

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
CAMPUS DE BAURU
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM EDUCAÇÃO PARA A CIÊNCIA

Deividi Marcio Marques

**AS INVESTIGAÇÕES DE ERNEST RUTHERFORD SOBRE A ESTRUTURA DA
MATÉRIA: CONTRIBUIÇÕES PARA O ENSINO DE QUÍMICA**

BAURU 2006

Deividi Marcio Marques

**AS INVESTIGAÇÕES DE ERNEST RUTHERFORD SOBRE A ESTRUTURA DA
MATÉRIA: CONTRIBUIÇÕES PARA O ENSINO DE QUÍMICA**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Educação para a Ciência, da Área de Concentração em Ensino de Ciências, da Faculdade de Ciências da UNESP/Campus de Bauru, como requisito à obtenção do título de Mestre, sob a orientação do Prof. Dr. João José Caluzi.

Apoio: CAPES

Bauru
2006

**DIVISÃO TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO
UNESP - BAURU**

Marques, Deividi Márcio.

As investigações de Ernest Rutherford sobre a estrutura da matéria: contribuições para o ensino de química / Deividi Márcio Marques, 2006.
182 f.

Orientador : João José Caluzi.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências, Bauru, 2006.

1. Ciência - História. 2. Educação em química. 3. Rutherford, Ernest, 1871-1937. 4. Modelo atômico nuclear. - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências. II - Título.

Ficha catalográfica elaborada por Maristela Brichi Cintra - CRB 5046

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

As investigações de Ernest Rutherford sobre a Estrutura da Matéria: Contribuições para o Ensino de Química

Deividi Marcio Marques

Banca examinadora – Qualificação

Dr. João José Caluzi (Orientador)

Dra. Roseli Pacheco Schnetzler

Dr. Aguinaldo Robinson de Souza

Banca examinadora – Defesa

Dr. João José Caluzi (Orientador)

Dra. Sirlei Roca

Dr. Aguinaldo Robinson de Souza

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM EDUCAÇÃO PARA A CIÊNCIA
BAURU 2006

Para os meus pais *Antonio e Tereza*.

Obrigado por tudo. Espero um dia conseguir retribuir todo o carinho e amor que vocês estão me dando. *Abençoe*.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao *Prof. Dr. João José Caluzi* pela orientação, apoio, confiança e amizade durante esses anos.

Aos professores *Dr. Aguinaldo Robinson de Souza*, *Dr. Roberto Nardi*, *Dra. Roseli Pacheco Schnetzler* e *Dra. Sirlei Roca* pelas valiosas sugestões e contribuições que possibilitaram novas reflexões e horizontes.

À *Profa. Dra. Ana Maria de Andrade Caldeira*, pelas oportunidades acadêmicas e conselhos.

À *Ana Lucia*, *Andressa*, *Célia* e *Toninha* pelos momentos de descontração, auxílio burocrático e “lanchinho”.

À *Mara Corazza*, pelas oportunidades de crescimento acadêmico e por ter me ensinado a gostar da carreira docente.

À minha irmã *Mabel Marques* e marido (*Eduardo Massola*), pela amizade, amor, carinho e compreensão. O que eu faria sem você. E também pelo *Miguel*. O tio de ama

Ao meu irmão *Djebel Marques* e esposa (*Andrezza Marques*). Apesar da distância, vocês estarão sempre presentes comigo. E pela *Sara*: o tio também te ama!

Aos meus amigos do coração *Gustavo Neves (Gu)*, *Helber Nardo*, *Daniela Ximenez e família*, *Carol Cecato e família*, *Luly Zonta*, *Érika e Aninha Dios*, *Luciano Giacóia*, *Mariana Bologna*, *Talles*, *Silmara*, *Reinaldo*, *Fernanda Brando*, *Breila*, *Fernanda Bozelli*,... Pelos momentos de alegrias. Meus eternos amigos e irmãos...

Ao *Prof. Dr. Jean Barrette*, da Universidade McGill, em Montreal pela simpatia, cordialidade e informações a respeito de Rutherford.

Enfim... A todos que de alguma maneira contribuíram para a realização dessa dissertação.

A **CAPES** pelo apoio financeiro.

Habitamos um universo onde os átomos são formados no centro das estrelas, onde a cada segundo nascem mil sóis, onde a vida é lançada pela luz solar e acesa nos ares e águas dos planetas jovens, onde a matéria-prima para a evolução biológica é algumas vezes obtida de uma explosão de uma estrela na outra metade da Via-Láctea, onde algo belo como uma galáxia é formada cem bilhões de vezes, um Cosmos de quasares e quarks, flocos de neve e pirilampos, onde pode haver buracos negros, outros universos e civilizações extraterrestres cujas radiomensagens estão até este momento atingindo a Terra. Muito pálidas, pela comparação, são as pretensões das superstições e pseudociências; como é importante para nós nos dedicarmos a entendermos a ciência, este esforço caracteristicamente humano.

Carl Sagan

RESUMO

Em virtude dos inúmeros erros encontrados nos livros didáticos em Química, sobretudo quando o assunto é a estrutura da matéria, em especial aos estudos de Ernest Rutherford, o trabalho propõe o resgate das pesquisas e descobertas de Rutherford sobre os desvios causados pelas partículas alfa ao atravessarem a matéria. Tal fato o conduziu na elaboração do modelo atômico nuclear, mesmo sabendo que tal modelo chocava com as idéias da Mecânica Clássica. Para isso estamos utilizando a História da Ciência, numa visão internalista, como fonte de dados, ou seja, a leitura dos originais de Rutherford e de outros cientistas que corroboraram com seus estudos. A pesquisa também propõe discutir alguns aspectos importantes sobre a inserção da História da Ciência no Ensino de Ciência assim como a importância do conhecimento químico em nossa sociedade.

Palavras-chave: História da Ciência; Ensino de Química; Modelo Atômico de Rutherford.

ABSTRACT

Because of the countless mistakes found in the text books in Chemistry, above all when the subject is the structure of the matter, especially to Ernest Rutherford's studies, the work proposes the rescue of the researches and discoveries of Rutherford on the deviations caused by the alpha particles by matter. Such fact lead him in the elaboration of the nuclear atomic model, exactly knowing that such model shocked with the ideas of the Classic Mechanics. For this we are using the History of Science, in an internally vision, as source of data, in other words, the reading of the originals of Rutherford and of other scientist's papers that corroborated with their studies. The research also considers discussing some important aspects about the insert of the History of Science in the Science Teaching as well as the importance of the chemical knowledge in our society.

Keywords: History of Science, Chemistry Teaching, Rutherford's model.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE TABELAS	11
LISTA DE GRÁFICOS	12
INTRODUÇÃO	13
1. O CONHECIMENTO QUIMICO	21
1.1 Ensino de Química: Compromisso com a Cidadania	24
2. HISTÓRIA DA CIÊNCIA E O ENSINO DE CIÊNCIAS	33
2.1 História da Ciência no Ensino de Ciência	33
2.2 Algumas Dificuldades na Inserção da História da Ciência no Ensino de Ciências	39
3. AS PESQUISAS SOBRE A ESTRUTURA DA MATÉRIA	42
3.1 Ernest Rutherford	42
3.2 Universidade McGill, Canadá	44
3.3 Rutherford em Manchester	70
3.4 A Confirmação: As Partículas alfa são de Fato Átomos de Hélio	103
3.5 A Explicação Dada Por Rutherford: O Artigo de 1911	108
4. AS ATIVIDADES	127
4.1 As Atividades Propostas	127
5. ALGUMAS CONCLUSÕES	167
6. REFERÊNCIAS	172
ANEXO	179

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Experiência de Rutherford	16
FIGURA 1.1 - Inter-relações entre os objetivos e focos de interesse em Química	29
FIGURA 3.1 - Ernest Rutherford	42
FIGURA 3.2 - O primeiro laboratório de Rutherford	43
FIGURA 3.3 - The Ernest Rutherford Physics Building	44
FIGURA 3.4-Esquema de um Eletrômetro de Dolezalek ou de quadrantes	45
FIGURA 3.5-Eletrômetro de Dolezalek ou de quadrantes	46
FIGURA 3.6-Esquema de um Eletroscópio de folha de ouro	47
FIGURA 3.7-Esquema do Eletroscópio utilizado para mensurar a radiação gama	56
FIGURA 3.8-Esquema do experimento elaborado por Rutherford	59
FIGURA 3.9-Esquema do equipamento montado por Rutherford	62
FIGURA 3.10-Esquema do instrumental usado por Rutherford	67
FIGURA 3.11-Esquema do instrumento utilizado por Rutherford e Geiger para o método elétrico	73
FIGURA 3.12- Os Espintariscópios	80
FIGURA 3.13-Esquema do equipamento utilizado por Rutherford e Geiger	85
FIGURA 3.14-Esquema do equipamento utilizado por Geiger	92
FIGURA 3.15-Esquema do equipamento utilizado por Geiger e Marsden	97
FIGURA 3.16-Esquema do instrumental utilizado por Geiger e Marsden	101
FIGURA 3.17-Rutherford Jubilee International Conference at Manchester	103
FIGURA 3.18-Esquema do instrumental de Rutherford e Royds	106
FIGURA 3.19-Esquema do trajeto de uma partícula alfa em direção ao centro de um átomo, segundo Rutherford	112
FIGURA 3.20-Equipamento elaborado para investigar os espalhamentos das partículas alfa	116
FIGURA 3.21-Instrumental original utilizado por Geiger e Marsden	119

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1-Nomenclatura da série do rádio	52
TABELA 3.2-Resultados obtidos por Rutherford	61
TABELA 3.3-Resultados obtidos do experimento de contagem	76
TABELA 3.4-Resultados obtidos por Rutherford e Geiger no experimento	78
TABELA 3.5-Resultados obtidos pelo método de cintilações	82
TABELA 3.6-Dados obtidos sobre o experimento de espalhamento	98

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 3.1-Resultados obtidos por Geiger em seu experimento sobre os espalhamentos das partículas alfa através das folhas de ouro	94
GRÁFICO 3.2-Número de cintilações pela quantidade de folhas de ouro	100

INTRODUÇÃO

Os estudos acerca da estrutura da matéria no início do século XX são considerados um dos grandes acontecimentos que marcaram o cenário do mundo científico da época. Tais estudos não só revolucionaram o mundo científico nas primeiras décadas daquele século como também deram espaço aos estudos acerca dos constituintes da matéria, bem como base para os estudos da Física Nuclear.

Esses fatos da Física logo influenciaram a Química, o que resultou numa visível ruptura com as noções da Química Clássica, ou seja, as idéias que os cientistas da época construíram sobre os átomos, tiveram que ceder espaço às novas concepções sobre os constituintes que compõem a estrutura da matéria. Em contribuição a essas descobertas encontramos o trabalho do físico Ernest Rutherford que o conduziram na elaboração de um modelo de átomo onde toda a sua carga estava concentrada num único ponto, o qual denominou de núcleo.

Ernest Rutherford (1871- 1937) nasceu em uma família agrária e iniciou seus estudos sobre a magnetização do ferro na Nova Zelândia, país onde nasceu. Foi contemplado, em 1895, com uma bolsa de estudos em Cambridge, Inglaterra, podendo assim continuar seus trabalhos. Cerca de quatro anos depois foi convidado para ser professor e dirigir um laboratório de Física na Universidade de McGill, em Montreal, Canadá.

Na Universidade McGill, Rutherford realizou pesquisas sobre os aspectos da radioatividade, incluindo a natureza e as propriedades das emanções¹ produzidas pelos elementos químicos rádio (Ra) e tório (Th) e o aquecimento e a propriedade de ionizações oriundas de processos radioativos. Ele descobriu que elementos radioativos emitem 2 tipos de radiação: a primeira pouco penetrante, que denominou alfa (α) e a segunda muito penetrante

¹ O termo emanção vem do inglês *emanation*. Esse nome foi dado por Rutherford para denominar um tipo de radioatividade temporária que estava presente em alguns elementos radioativos, uma espécie de vapor radioativo. Mais tarde descobriu-se que se tratava do elemento Radônio.

nomeada beta (β). Em seguida, determinou a carga e a natureza dos raios alfa, beta e gama (γ). Os raios gama, ao contrário do que está escrito em muitos livros didáticos, não foram descobertos por Rutherford, mas sim por Paul Villard na França, em 1900.

Por ter se dedicado a esse tipo de estudos e ter sido apoiado pelo químico Frederick Soddy (1877 – 1956), que juntos pesquisaram sobre a causa e a natureza da radioatividade, Rutherford pôde elucidar as três séries de radioatividade natural: urânio-rádio, actínio e tório. Durante seus nove anos na Universidade, publicou 69 trabalhos, alguns deles como segundo autor e proferiu palestras dentre as quais a famosa “*The Backerian Lecture*”, além disso, orientou alunos e trouxe para aquela Universidade grande prestígio.

Por seus trabalhos sobre a radioatividade, que contribuíram para o desenvolvimento desse ramo da Ciência, foi laureado em 1908 com o Prêmio Nobel de Química, além de outros prêmios, títulos e medalhas.

Após esse período foi sucessor da cadeira de Física de Arthur Schuster na Universidade Manchester, na Inglaterra até o ano de 1917. Foi nessa Universidade que ele fez grandes estudos sobre a estrutura da matéria. Na tentativa de explicar os desvios causados pelas partículas alfa ao atravessarem finíssimas folhas de diferentes metais, fato esse observado por Hans Geiger e Ernest Marsden, Rutherford propôs um novo modelo para o átomo que, temporariamente, substituiu o modelo então vigente de John Joseph Thomson.

Esse fato foi muito importante, pois, além de romper com o modelo atômico proposto por J. J. Thomson sobre o átomo (“pudim de ameixas”, do inglês *plum pudding*), o modelo do átomo nuclear proposto por Rutherford conseguia explicar os desvios sofridos pelas partículas. No entanto, o modelo de Rutherford apresentava alguns problemas, pois contradizia as leis do eletromagnetismo clássico além de ser um modelo que ia contra os princípios da Física Clássica. Apesar destas contradições, o modelo proposto juntamente com

a radiação do corpo negro e o efeito fotoelétrico, conduziu outros cientistas, sobretudo Niels Bohr, na formulação da Mecânica Quântica.

A importância de se estudar o tema está no fato dos livros didáticos de Ensino de Química, em sua grande maioria, apresentarem dificuldades ao elucidar os trabalhos de Ernest Rutherford acerca de suas investigações sobre a estrutura da matéria e conseqüentemente na elaboração do seu modelo atômico nuclear.

Na maioria das vezes esse capítulo aparece com erros, tanto relacionado aos seus experimentos quanto as suas conclusões, esquecendo-se que os resultados obtidos foram frutos de alguns anos de trabalho.

Outra falha nos livros didáticos é a de apresentarem o tema como algo pronto, sem, no entanto citarem os trabalhos de outros cientistas de grande nome que contribuíram.

Corroborando com essa idéia, Romanelli (1996) nos mostra alguns resultados de sua pesquisa. Através da análise da aula de um professor cujo tema era o modelo atômico de Rutherford, encontramos a seguinte fala desse professor:

“Rutherford (...), ele não sabia quantas camadas tinha a eletrosfera. (...) Aí, mais tarde veio Bohr e (...) pegou a estrutura atômica de Rutherford e aperfeiçoou e descobriu então quantas eram as camadas.” (ROMANELLI, 1996, p. 28).

Há certa confusão sobre a pesquisa de Rutherford. Conforme veremos no capítulo 3, Rutherford, em nenhum momento, estabeleceu a existência de camadas na eletrosfera. Pelo contrário, atribuiu que os elétrons cercavam esse núcleo em posições estáveis. Jamais ele mencionou a existência de camadas na eletrosfera, sendo essa idéia originária de Bohr.

A figura 1, extraída do livro Química – série Brasil, dos autores Antonio Sardella e Marly Falcone, nos mostram a conhecida figura da experiência de Rutherford. Acompanhando a ilustração há no livro didático em questão a seguinte informação:

“Vamos ver a descrição de uma experiência fundamental para o desvendamento da estrutura atômica e que só foi possível graças a utilização das formas de radiação.

Essa experiência foi realizada em 1911 e consistia em bombardear uma lâmina de ouro com partículas alfa provenientes do elemento polônio, protegido por um bloco de chumbo...” (SARDELLA & FALCONE, 2004, p. 65).

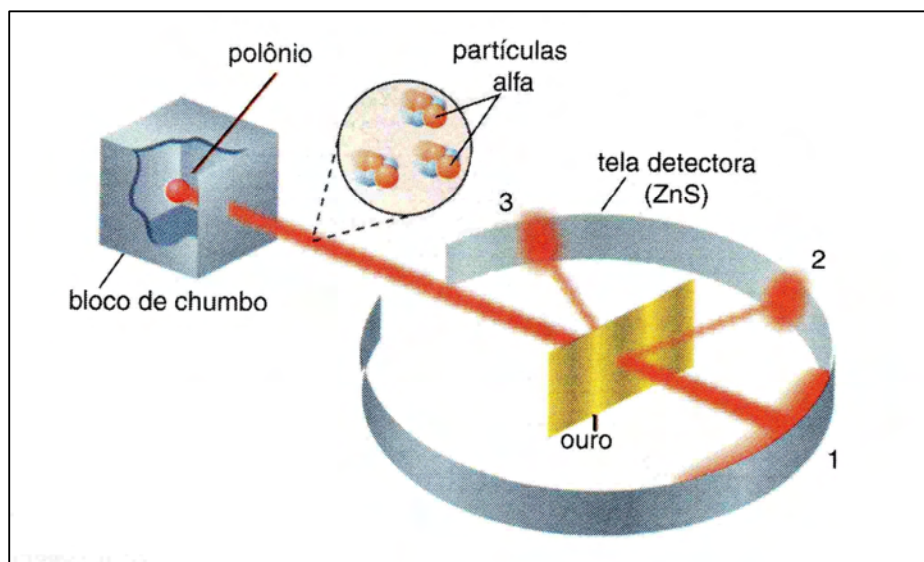


Figura 1 Experiência de Rutherford (SARDELLA & FALCONE, 2004, p. 65).

Através da análise dos artigos originais de Rutherford, no capítulo 3, veremos que a experiência, como dito anteriormente, foi realizada pelos seus dois assistentes (Geiger e Marsden em 1909); o material utilizado não foi o polônio, mas sim um dos produtos da série radioativa do rádio. A experiência foi realizada a pedido de Rutherford para verificar se seus cálculos matemáticos estavam corretos acerca do espalhamento das partículas alfa pela matéria e não estabelecer um novo modelo atômico.

Outro ponto que merece destaque são as questões presentes subliminarmente nessa figura, por exemplo: Por que foi usado o elemento polônio? O que é uma partícula alfa? Como a experiência foi realizada? Onde foi realizada? Como sabiam que o elemento polônio emite partículas alfa? Como explicar a expulsão de uma partícula beta de um núcleo positivo se a partícula tem carga negativa? Questões como essas podem aparecer durante uma aula sobre o assunto e cabe ao professor estar preparado para respondê-las.

Diante desses fatos nos perguntamos: Quais foram então os passos seguidos por Rutherford que o levaram na estruturação de seu modelo atômico? O que ocorreu, de fato, para que Rutherford o elaborasse? Conhecendo o paradigma clássico vigente na época porque mesmo assim propôs esse tipo de modelo sabendo que ia contra tais princípios? E por fim, como o professor pode utilizar desse material em sua prática docente?

Utilizamos para essa pesquisa os artigos originais de Rutherford e outros cientistas que de alguma maneira tiveram influência em seus trabalhos. Vários autores utilizam esse tipo de abordagem como fonte de informações. Achamos que com a utilização da História da Ciência, ou seja, o resgate dos fatos através da análise das fontes primárias com a finalidade de se obter “*uma descrição sistemática e coerente de suas bases e de seus fundamentos observacionais e experimentais*” (Martins, 1990, p. 5) poderemos ter uma visão ampla sobre os conhecimentos físicos, e conseqüentemente químicos, daquela época. Tais fatos se refletiram nos dias atuais o que possibilitou, por exemplo, o desenvolvimento de aceleradores de partículas, a descoberta de partículas sub-atômicas, a fissão e fusão nuclear, bem como, um amplo conhecimento do mundo quântico.

É importante ressaltarmos que além da leitura e do estudo das fontes originais (primárias) dos cientistas e do contexto histórico de sua época, serão também analisadas outras fontes de pesquisas denominadas como fontes secundárias, isto é, artigos e livros de historiadores da ciência que tratem do assunto em questão e que também contribuíram para o desenvolvimento dessa ciência.

Concordamos com Guerra *et al.* (1999, p. 207) ao dizer que o ensino de Ciências formal fornece “*apenas uma visão parcial do saber científico*” e o uso da História da Ciência permite ampliar a visão acerca da ciência, levando-os a perceber que esta decorre de uma construção humana, dentro do espaço e tempo.

Bastos (1998a, p. 46) complementa que os textos disponíveis sobre História da Ciência para consultas, raramente se adaptam às necessidades específicas do Ensino de Ciências. O motivo segundo o autor, pode ser porque tais textos não reúnam, concomitantemente, os diferentes aspectos que o professor pretende discutir em sala de aula, além de uma linguagem acessível. Esse tipo de material não mostra, às vezes, de maneira clara e concisa as relações que existem entre Ciência e sociedade.

Atualmente, como estabelece Freire Junior (2002, p. 27-28), a Educação em Ciências enfrenta um desafio contemporâneo: a de formar um aluno com capacidade de estabelecer uma relação crítica com a ciência e a tecnologia, ou seja, promover um ensino de forma a inserir esse aluno numa sociedade tecnologicamente modificada, desmistificando a ciência de forma a perceber que ela desempenha um importante papel na sociedade bem como compreender que é elemento da cultura. Em outras palavras o aluno poderá re-significar a realidade que o cerca.

Uma vez alcançado esse objetivo, esse aluno poderá formar sua própria opinião acerca de um acontecimento, perceber que os grandes avanços na medicina, na conquista espacial, na informática e na saúde foram frutos de um longo processo de pesquisa e investigação que envolveu grandes investimentos, horas de trabalho, tentativas e erros e que tais processos não cessaram. A ciência está em constante transformação. É muito simples repugnar as pesquisas envolvendo células troncos de embriões humanos sem ter qualquer tipo de idéia do que isso significa. Não estamos, com isso, querendo dizer que somos favoráveis a esse tipo de pesquisa, mas acreditamos que, se nós, professores de ciências, soubermos fornecer as ferramentas necessárias para nossos alunos, esses poderão formar sua própria opinião ou até mesmo mudar seu perfil epistemológico sobre tais fatos.

Em adição a esse fato, a Química deve ter o poder de articulação entre os conhecimentos científicos adquiridos e incorporados no decorrer de sua história ao cotidiano

do aluno, da escola... Enfim, do contexto sócio-cultural ali vigente. Por meio dessas articulações os alunos terão a chance de perceber que a química não é uma disciplina isolada das demais. Ela também pode ser entendida por meio do contexto social, educacional e ambiental. Por exemplo, o problema da poluição dos mananciais não é problema exclusivo da Ecologia. Ele pode ser estudado interdisciplinarmente, visto que grande parte dos poluentes são produtos químicos de diversas origens. Muitas vezes a poluição ocorre pelo uso incorreto de substâncias utilizadas sem orientações por parte das pessoas.

Por outro lado para que consigamos professores capacitados para promover esse tipo de aprendizado nos seus alunos, como sugere Schnetzler (2002a, p. 18), os docentes universitários que podem viabilizar das inúmeras *“contribuições epistemológicas e teórico-metodológico de pesquisas na área da Educação em Ciências, na qual se situam contribuições específicas da área da Educação em Química”*. É nesse sentido que vemos trabalhos como esse, ou seja, que permitem esclarecer aos professores, como decorreu a construção de um determinado conhecimento químico, no caso, as investigações sobre a estrutura da matéria, assim como contexto da época, seus obstáculos, seus problemas, entre outros.

Assim, no Capítulo 1, são apresentadas algumas discussões sobre o Conhecimento Químico assim como seu ensino. Consideramos importante esse tipo de discussão uma vez que, segundo Machado (2000), o Ensino de Química encontra-se *“dicotomizado da realidade de professores e alunos. Além disso, como agravante, apresenta essencialmente livresco”*, ou seja, um ensino muito concentrado no livro didático. Com isso pretendemos relatar o nascimento do Conhecimento Químico na cultura humana até os dias atuais, enfocando, ao final, seus objetivos em termos de ensino.

Procuramos apresentar, no Capítulo 2, alguns aspectos e discussões sobre a utilização da História da Ciência em relação ao Ensino de Ciências.

A trajetória de Ernest Rutherford nas pesquisas sobre a estrutura da matéria é apresentada no capítulo 3. Iniciamos esse estudo quando Rutherford se estabelece na Universidade McGill que, como já dito anteriormente, foi nessa Universidade que Rutherford começou a se interessar pelos processos radioativos, descobrindo as partículas emitidas nesses processos, permitindo um estudo muito rico, inovador e excitante das propriedades dessas emissões.

Em termos metodológicos optamos por uma abordagem contextual internalista da História da Ciência. O internalismo, segundo Acot (2001, p. 45), é quando *“o movimento das idéias científicas é produzido por uma dinâmica interna: as teorias desenvolvem-se e encadeiam-se, num universo de idéias e de representações – situando-se o seu contexto em posição secundária”*. Com esse tipo de abordagem procuramos reconstruir, até onde nos foi possível, os caminhos seguidos por Rutherford na estruturação de seu modelo atômico e posteriores embates do seu modelo.

No capítulo 4 são apresentadas algumas sugestões quanto as atividades que os professores podem realizar com seus alunos utilizando o conteúdo histórico pesquisado.

Por fim, no capítulo 5, são feitas as considerações finais sobre a dissertação.

1. O CONHECIMENTO QUÍMICO.

O Conhecimento Químico, ao longo dos séculos e da história do conhecimento humano e científico passou por constantes transformações. Como mostra Lobo (2002, p. 245), essas transformações foram resultados da utilização de novas concepções epistemológicas, ou seja, a noção do real e da relação sujeito-objeto foram determinantes para a construção desse conhecimento.

Então, qual a gênese do Conhecimento Químico? Acredita-se que a primeira atividade Química dominada pelo homem tenha sido a metalurgia, ou seja, a obtenção de ligas metálicas a partir da mistura de minérios para a obtenção de ferramentas e armas, como o bronze. Isso é datado por cerca de seis mil anos antes de Cristo. Nessa época o metal mais utilizado era o ouro (Vanin, 1994), ferro e o cobre.

Até o início da Era Cristã, o homem tinha profundo conhecimento das suas operações metalúrgicas, além de conhecer a arte dos pigmentos que eram extraídos de diferentes minerais como calcários e argila. É fácil perceber isso em inscrições, datadas de milhares de anos, em cavernas no Brasil e na Europa.

Os povos primitivos já utilizavam, por exemplo, técnicas para obter cobre e chumbo a partir de seus minérios, a fundição, o uso do ferro para a obtenção do aço, sobretudo pelos povos da Ásia Menor (os hititas). Esse tipo de conhecimento é denominado hoje como “artes químicas”, ou seja, um conhecimento puramente prático a qual não se buscavam explicações sobre sua ocorrência e/ou constituição.

Aliando o conhecimento prático da época com as novas idéias e pensamentos místicos, sobretudo egípcios e árabes, surge a alquimia (*al Khem*, a palavra *Khem* era o antigo nome do Egito). O que muitos acreditam é que o Conhecimento Químico moderno tenha tido origem na alquimia, denominada também de Química Medieval.

No entanto é um erro encarar a Química Moderna como um estágio superior da alquimia. O que podemos dizer é que ambas compartilham das mesmas técnicas (combustão, calcinação, destilação, etc.), materiais e substâncias (recipientes, água, mercúrio, enxofre, etc.), no entanto estabelecem visões epistemológicas diferentes para eles. Por exemplo, enquanto a combustão era vista para os alquímicos como a purificação do material, bem como a purificação da alma do manipulador, cujos males foram consumidos pelo ardor do fogo, na Química Moderna a combustão nada mais é do que a reação de uma substância (combustível) com o oxigênio com liberação de energia na forma de calor.

Os alquimistas eram homens que viviam, por vezes, isolados da sociedade, possuíam certas habilidades como a manipulação do fogo, extração de pigmentos, cerâmica, metalurgia, entre outros. A alquimia era aliada a filosofia grega. Os alquimistas acreditavam na essência e na constituição da natureza pelos quatro elementos (terra, ar, fogo e água) e no deus Hermes, o que denota seu caráter sagrado que jamais poderia ser questionado. Também tiveram influências dos conhecimentos práticos e místicos dos egípcios, da astrologia e o uso de imagens para representar os fenômenos (Vanin, 1994 e Read, 1995).

É conhecida a busca dos antigos alquimistas no elixir da vida e a transmutação dos metais em ouro. O ouro era considerado a mais perfeita de todas as matérias devido ao seu brilho, seu valor monetário e pelo fato dele não se oxidar, isso fica evidente nas máscaras e objetos dos antigos egípcios. A alquimia, portanto, possuía um conhecimento próprio. Não havia interesse na busca e na pesquisa pelas propriedades e constituição dos elementos, mas sim na sua essência, no que aquele elemento poderia trazer de benefício para a alma do manipulador, como aquele elemento ou aquela técnica poderia contribuir para uma purificação na essência do indivíduo que a praticava ou manipulava (Read, 1995).

A alquimia começou a entrar em desuso no século XVIII (mas não foi totalmente extinta), sobretudo com as pesquisas de caráter sistemático e quantitativo, até então nunca

vistos, de Antoine Laurent Lavoisier (1743 – 1794). Considerado por muitos o fundador da Química Moderna, ou da Nova Química, Lavoisier desenvolveu pesquisas sobre a combustão da matéria o que o levou na elaboração das leis ponderais e volumétricas, provocando a derrubada na teoria do flogisto, teoria essa elaborada por Georg Ernst Stahl, por volta de 1700 que explicava a grande maioria dos fenômenos químicos na época. Houve, portanto, a matematização do Conhecimento Químico. Isso sem contar as contribuições de Dalton com sua teoria atômica, que aplicou suas idéias sobre os átomos na química de Lavoisier.

Observa-se com isso uma mudança das atitudes puramente empíricas, ou seja, conhecimentos práticos baseado na experiência, para uma atitude mais reflexiva sobre o Conhecimento Químico. Isso fica evidente na fala de Mortimer (1992):

... todos os fatos, fenômenos e experiências da química podem ser relacionados sob o título de fatos empíricos. No entanto, a maioria deles não foi obtida sob o ponto de vista de uma doutrina empirista, pois a partir das proposições de Lavoisier para explicar a combustão, principalmente, a partir da formulação da hipótese atômica de Dalton, os caminhos puramente empiristas dentro da química foram se fechando cada vez mais. Desde então pode-se considerar a química como um empreendimento completamente racional, pois a maioria das experiências é pensada antes de ser realizada. Ou seja, a parte empírica é uma consequência de uma elaboração racional e deve ser construída de acordo com essa elaboração. (MORTIMER, 1992, p. 245).

A busca de uma racionalidade cada vez mais complexa, a sistematização do conhecimento e o desenvolvimento de técnicas trouxeram para o século XX o século das grandes realizações da Ciência, sobretudo na Química e na Física. Foi o que Bachelard (2000) chamou de “novo espírito científico”, que decorreu, principalmente com a ruptura das noções da Química Clássica, sobretudo *“no que se refere às concepções sobre o átomo e sobre as partículas subatômicas, em especial, o elétron”* (LOBO, 2002, p. 254).

A organização dos elementos até então descobertos e a realização da previsão da existência de vários outros por Mendeleev; o aparecimento das idéias de Planck sobre a radiação do corpo negro; o efeito fotoelétrico de Einstein assim como sua teoria da

relatividade (a noção de tempo/espço relativo); a descoberta das formas de radiação por Rutherford bem como a estrutura nuclear do átomo; a descoberta do elétron por Thomson; a natureza ondulatória da matéria de Louis de Broglie; as equações de onda de Schrödinger e outros contribuíram para essa busca de uma racionalidade cada vez mais perfeita, que pudesse se encaixar na dialética do real dado e real científico, ou seja, *a racionalidade cada vez mais complexa do conhecimento científico rompe com o conhecimento comum, buscando um movimento epistemológico que ligue a razão e experiência* (LOBO, 2002, p. 255).

Em decorrência a essas pesquisas o Conhecimento Químico na atualidade está presente em diversos setores da sociedade. Estamos numa época em que a busca e o desenvolvimento de materiais cada vez mais sofisticados para atividades específicas tem sido alvo de grandes investimentos nos mais variados setores da Química. Como esclarece Mortimer *et al* (2000, p. 274), a Química é a “*ciência central na concepção de novos materiais e pode oferecer respostas a essa diversidade de demandas através do conhecimento sobre a constituição, propriedades e transformações das substâncias*”.

No entanto essa eficiência que esta sendo cobrada da Química pode acarretar alguns problemas, sobretudo no ponto de vista ambiental. Enquanto a descoberta de um novo tipo de resina de revestimento para ser usada numa coluna de fracionamento em uma indústria petrolífera resultará num maior rendimento na obtenção de gasolina e derivados, por exemplo, essa mesma resina faz com que essa coluna libere uma quantidade a mais de poluentes na atmosfera, prejudicando a flora e a fauna na região dessa indústria.

1.2 ENSINO DE QUÍMICA: COMPROMISSO COM A CIDADANIA

Diante desse fato, nos cabe refletir, portanto, como deve ser ensinada a Química de forma a contribuir na formação cidadã do aluno. É muito comum estudantes do Ensino

Médio considerarem a Química como uma das disciplinas mais difíceis. As objeções são tanto em termos dos cálculos envolvendo simples reações quanto aos nomes de substâncias da Química Orgânica e/ou Inorgânica. Bem sabemos, a Química é uma Ciência que por muitas vezes se vale da abstração como uma das alternativas de ensino.

O uso inadequado dos modelos atômicos consagrados, por exemplo, para explicar fenômenos experimentais pode induzir os alunos a cometerem certos equívocos. Como resultado da assimilação incorreta dos modelos os alunos não desenvolvem a habilidade de relacionar um modelo com os dados experimentais, ou seja, o entendimento do microscópico para explicar o macroscópico fica prejudicado.

A atual situação do ensino de química, segundo pesquisas (cf. Campos e Cachapuz, 1997, Maldaner, 2000 e Schnetzler, 2002) vem enfrentando certos entraves. Os currículos tradicionais têm dado ênfase a conceitos e definições que vão muito além daquilo que de fato possa fazer sentido aos estudantes. O conceito de orbitais atômicos, bem como os subníveis de energia de um elétron, por exemplo. São ensinados para os alunos, em alguns casos os tipos de orbitais atômicos que existem, os subníveis, como determinar o subnível de um elétron bem como aquelas regras de distribuição eletrônica. O aluno consegue dar o “endereço completo” do elétron em um átomo, fornecendo todos os seus números quânticos (até o *spin* do elétron, se bem que em muitos casos, nem fazem idéia do que seria um *spin*). No entanto, ao perguntar ao aluno porque o sal de cozinha deixa a chama de um fogão amarela, qual a causa das cores dos fogos de artifício, ou mesmo questões de caráter histórico como e quando surgiram todas essas informações acerca da estrutura atômica, esse aluno não consegue relacionar o que “aprendeu” na escola com sua vivência sociocultural, ou seja, esse aprendizado não produziu, nesse aluno, significado.

Esse ensino tradicional de Química, como nos revela Mortimer *et al* (2000) leva a repetição de fórmulas, na resolução de exercícios para confirmar aquilo que foi dito pelo

professor e/ou o livro didático está correto. Isso transforma os estudantes em robôs; no lugar de entender o problema em questão, memoriza ou pergunta ao professor que fórmula se deve usar; ao invés de entender o motivo de uma classificação periódica ou como surgiu a tabela, decora os elementos da tabela periódica. Aí surgem os velhos e conhecidos versos cantarelados com os nomes dos elementos. Algo que levou décadas para ser estruturado, em segundos se transforma numa brincadeira.

Aliás, o livro didático é outro problema. Os professores em sua maioria utilizam o livro didático como um cânone, ou seja, considerando o seu conteúdo como algo acabado, verdadeiro, longe de qualquer tipo de crítica ou objeção. Inferindo destes livros, e passando aos seus alunos, o conceito de uma Química pronta e acabada. Em termos de atomismo, Mortimer (1988) nos mostra que os livros didáticos têm dificuldade em relacionar um modelo atômico com os fatos experimentais. Como dito anteriormente o professor faz do seu livro didático algo dogmático livre de erros e de contestações, sentindo-se, portanto obrigado a segui-lo fielmente.

Ao aluno, nessa perspectiva, cabe o papel de absorver o máximo possível de informações para poder concluir os objetivos das avaliações, sejam elas na forma de prova, teste ou chamadas orais. O papel do professor nesse caso é o de transmitir o conteúdo curricular, cumprir integralmente o cronograma, elaborar listas de exercícios que, muitas vezes, quando é exigida uma fórmula, é apenas sua aplicação direta. Para esses professores, os alunos aprendem na repetição, na memorização dos tipos de exercícios que podem cair na prova. Para Schnetzler e Aragão (1995, p. 27) esse ensino tradicional *“concebe que para ensinar basta saber um pouco do conteúdo específico e utilizar algumas técnicas pedagógicas”*.

Nesse tipo de perspectiva de ensino nos parece um tanto quanto complicado se pensarmos, segundo as tendências atuais de Ensino de Ciências, como por exemplo, na

formação de um cidadão apto a encarar um mundo com tantos avanços tecnológicos e principalmente serem críticos a tais avanços; constituir uma relação entre conhecimento científico, no caso Conhecimento Químico, e suas possibilidades de aplicação no cotidiano do aluno, de forma que ele compreenda as suas leis e os limites de validade de suas teorias.

Sem dúvida não é função da escola a formação de Químicos. Se essa fosse sua real função, não seriam mais necessários os cursos técnicos e universitários uma vez que a escola seria geradora de tais conhecimentos específicos desses cursos.

Baseado nas discussões sob o aspecto de novas diretrizes curriculares pautadas na Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional (Lei 9.394/96), observa-se uma nova função da escola: a de uma instituição de ensino promotora dos conhecimentos básicos científicos, morais, culturais e cívicos que deve formar indivíduos preparados para viver em sociedade, possibilitando a inclusão, o pensar crítico, desenvolvimento de atitudes, a cidadania, bem como na melhoria da sua visão do ambiente que os cerca.

Partindo desse novo papel da escola e relacionando com o Ensino de Química, portanto, deve articular os conhecimentos desenvolvidos no decorrer dos séculos com a sociedade tecnológica em que estamos vivendo. Segundo os PCNEM, a Química para o Ensino Médio deve ser:

...instrumento da formação humana que amplia os horizontes culturais e a autonomia no exercício da cidadania, se o conhecimento químico for promovido como um dos meios de interpretar o mundo e intervir na realidade, se for apresentado como ciência, com seus conceitos, métodos e linguagens próprios, e como construção histórica, relacionada ao desenvolvimento tecnológico e aos muitos aspectos da vida em sociedade. (BRASIL, 2002, p. 87).

Não estamos dizendo que devemos preparar um aluno para saber operar um espectrofotômetro², mas deixá-lo ciente de que existe um instrumento, uma técnica que utiliza o espectro da luz para realizar certos tipos de análises, bem como a história que esta por trás dessa técnica, ou seja, as pesquisas e as descobertas realizadas para se chegar nesse instrumento. Mesmo que esse aluno jamais tenha contato com esse tipo de instrumento, existe hoje nos meios de comunicação em massa tais como jornais, revistas, televisão uma infinidade de informações sobre os mais variados temas que possivelmente utilizarão esse tipo de instrumento para algum tipo de explicação.

Diante dessa busca do Ensino de Química na formação de um cidadão preparado para conviver na modernidade, Santos e Schnetzler (1996) baseados numa pesquisa realizada com Educadores em Química no Brasil estabelecem que os educadores revelam que a necessidade da Educação em Química esta no fato da influência da Química na sociedade.

Os educadores evidenciaram que há necessidade de o aluno adquirir conhecimento mínimo de química para poder participar com maior fundamentação na sociedade atual. Assim, o objetivo básico do ensino de química para formar o cidadão compreende a abordagem de informações químicas fundamentais que permitam ao aluno participar ativamente na sociedade, tomando decisões com consciência de suas conseqüências. Isso implica que o conhecimento químico aparece não como um fim em si mesmo, mas com objetivo maior de desenvolver as habilidades básicas que caracterizam o cidadão: participação e julgamento. (SANTOS e SCHNETZLER, p. 29, 1996).

Na busca dessa formação, cabe a química, portanto um papel de destaque. Mortimer *et al* (2000), baseado na seleção e organização de conteúdos para uma nova proposta curricular em química no estado de Minas Gerais, nos mostra essa idéia na figura 1.1, evidenciando os focos de interesse do ensino de química.

² A espectrofotometria é uma técnica que permite determinar a quantidade de um soluto em uma solução. A análise baseia na radiação absorvida ou transmitida dessa solução em comparação com outra solução cuja quantidade é conhecida.

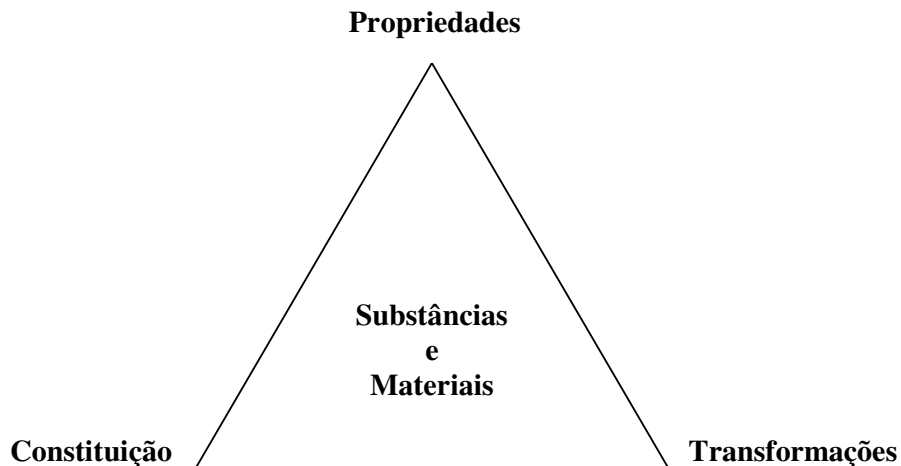


FIGURA 1.1 Inter-relações entre os objetivos e focos de interesse em Química (MORTIMER *et al*, 2000, p. 76).

Esse esquema traz os objetos de estudo da química, assim como suas relações. Conforme dito anteriormente, a Química é a ciência central na concepção de novos materiais e a investigação das substâncias, bem como suas propriedades, constituição e transformação. Diante disto, o conhecimento das substâncias e dos materiais nos remete a sua constituição, ou seja, o conhecimento da composição atômico-molecular dessas substâncias e/ou materiais, as ligações e interações que existem entre seus componentes, sejam íons, moléculas ou átomos. Isso nos fornece subsídios no entendimento e compreensão de suas propriedades como maleabilidade, dureza, ductibilidade, temperatura de fusão e ebulição, densidade, grau de pureza, solubilidade, estado físico, origem, entre outras propriedades, nos permite o planejamento, execução e entendimento dos processos de transformações que as substâncias e materiais possam sofrer.

De certa forma, os currículos e livros didáticos em química no nosso país seguem esse esquema, mas de uma forma linear, sem qualquer relação e inter-relação entre os temas dos vértices do triângulo (Mortimer, 2000).

Surge a questão, portanto, de como abordar tais focos de interesse. Bem sabemos que a Química é uma Ciência que lida com as questões do universo microscópico para explicar o macroscópico, ou vice-versa numa relação simultânea.

Os fatos macroscópicos, também tidos como *fenomenológicos*, são de interesse da Química, uma vez que são esses que estão em contato direto com o aluno, seja na escola, em casa, num supermercado ou num simples passeio. São os fatos que, numa primeira instância impressiona e aguça os sentidos do aluno. A reação entre um antiácido estomacal com a água, a mudança de estado físico da matéria, as bolhas de gás carbônico em uma garrafa de refrigerante aberta são fenômenos que impressionam o aluno e que não devem ser deixados de lado numa aula. É interessante para o professor, ao invés de colocar na lousa a equação química que representa a reação do antiácido estomacal com a água, disponibilizar aos alunos a observação dessa reação *in locu*, e a partir de então instigá-los a pensar e refletir sobre o que estão observando, podendo até analisar outras situações que isso possa acontecer. Em corroboração, Mortimer *et al* (2000) nos diz que:

A abordagem do ponto de vista fenomenológico também pode contribuir para promover habilidades específicas tais como controlar variáveis, medir, analisar resultados, elaborar gráficos etc. (MORTIMER *et al*, 2000, p. 76).

Para a explicação para esse tipo de fato, é necessário recorrer ao arsenal teórico da Química, ou seja, das informações atômico-moleculares. Nesse nível, os alunos já fazem alguma idéia da existência dos átomos ou de partículas que constituem a matéria. Ai entra também o papel das abstrações para a explicação do microscópico que também está ligado diretamente com o aspecto da linguagem da Química, como o uso de modelos, equações, cálculos matemáticos etc. Cabe ao professor poder proporcionar ao aluno esse conhecimento

científico, naquilo que chamam de *transposição didática*, ou seja, a maneira de como o docente associará o Conhecimento Químico com uma prática pedagógica.

Além desses aspectos surge também a questão dos aspectos históricos do Conhecimento Químico. É importante que os alunos também conheçam como foram concebidas essas idéias, linguagens e representações. As abordagens dos aspectos históricos em sala de aula têm sido muito utilizados, no entanto, segundo Kauffman (1991) os estudantes têm mostrado pouco interesse pelo passado. Deixaremos para o próximo capítulo as considerações sobre a importância e do uso da História da Ciência no Ensino de Ciências.

Os aspectos históricos podem ser importantes, sobretudo na formação dos professores. Um professor preparado academicamente e apto a abordar temas da História da Química em sua prática docente pode ser muito positivo. Sobre esse aspecto, Farias (2003) adiciona que:

Para o professor de Química, quer em nível do ensino médio, quer nas universidades, conhecer o mais profundamente possível a História da Química é também altamente desejável, visto que a apresentação breve da evolução histórica dos conhecimentos químicos não apenas tornará as aulas mais interessantes, e, conseqüentemente, motivantes para os alunos, mas também porque permitira ao aluno perceber que o conhecimento químico, assim como qualquer outro conhecimento humano, é fruto de muitos erros e alguns acertos, fruto da imaginação, mas também da perseverança de várias pessoas, sobretudo, que um novo conhecimento não nasce pronto...(FARIAS, 2003, P. 13).

Visto a importância do conhecimento químico num mundo tecnologicamente alterado das condições naturais na qual a humanidade está inserida, achamos de vital importância o aprendizado dessa ciência. Mas para isso precisamos do apoio da comunidade de pesquisadores que possa trazer, ao ambiente escolar, novas práticas pedagógicas a fim de beneficiar a relação aluno-professor bem como o ensino:

Para considerarmos alguém iniciado em química não basta que saiba decifrar a simbologia química, é necessário que conheça também, o tipo de pensamento usado nessa matéria e entenda as especificidades metodológicas da produção do

conhecimento químico. Essas três dimensões vão constituir-se dialeticamente na mente do aprendiz, desde que o programa de ensino as contemple simultaneamente. (MALDANER, 2000, p. 163).

2. HISTÓRIA DA CIÊNCIA E O ENSINO DE CIÊNCIAS

A necessidade de esclarecer alguns pontos favoráveis à utilização da História da Ciência no Ensino de Ciências em nossa pesquisa está no fato de desempenhar um papel importante e fundamental no desenvolvimento de atividades de ensino. Convém-nos, portanto, discutir seu papel.

Ultimamente tem-se dado atenção sobre a inserção da História da Ciência no Ensino de Ciências, sobretudo em Física e Química no Ensino Médio (cf. Castro 1993, Terrazzan, 1994, Teodoro, 2000, Perez, 2004). As razões pelas quais deve ocorrer tal inserção são inúmeras. No entanto, vale ressaltar outros aspectos de igual importância que muitos professores não sabem definir, por exemplo, como a História da Ciência pode ser importante no decorrer de sua prática docente.

Evidentemente não pretendemos propor a substituição do Ensino da Física e da Química pelo ensino da sua história. É importante para o professor conhecer a história do conteúdo que ensina, e mais, é importante que ele busque sempre explicitar para si mesmo e para os alunos a sua postura epistemológica frente à ciência.

2.1 História da Ciência no Ensino de Ciência.

Segundo Brotons (*apud* Castro, 1993 p. 6), foi no final do século XIX e início do século XX que houve uma maior atenção na relação História da Ciência e Ensino das Ciências. Talvez isso fosse consequência das mudanças ocorridas na atividade científica e no status social do cientista, assim como a emergência da ciência como força produtiva.

O próprio August Comte, fundador da filosofia positivista, já havia escrito, segundo Castro (1993, p.5), em relação à leitura da História da Ciência. Ele sugere uma leitura da Ciência sob dois aspectos: um histórico, no qual os conhecimentos são expostos na

ordem em que foram obtidos pelo espírito humano; e outro sendo um sistema de idéias apresentado tal como poderia ser concebido hoje, o que ele denominou dogmático. Também é possível uma leitura na qual haja uma combinação entre ambos os aspectos.

Devemos deixar claro que a História da Ciência que estamos nos reportando não é aquela presente em alguns livros didáticos, paradidáticos e até livros de Ensino Superior nos quais se valoriza um feito científico importante, uma descoberta com “data e hora marcada” que foi prontamente aceita pela comunidade de cientistas da época e que colocou seu descobridor num patamar insubstituível.

A maior parte dos livros didáticos do Ensino Médio, na opinião de Castro (1993, p. 8), não considera a história da evolução de conceitos e das idéias em Física. Para corroborar com essa informação, em termos de Ensino de Química, sobretudo no ensino de atomismo, Mortimer (1988, p. 237-8) acrescenta que, ainda que os livros didáticos apresentem aspectos históricos, em alguns casos, ocorre uma mistura de fatos que ocorreram em épocas diferentes, mas que são apresentados como se tivessem ocorridas ao mesmo tempo.

Esse tipo de História presente nesses manuais nada mais é do que uma seqüência cronológica de eventos que somente está naquele capítulo porque é o tema da aula. Na opinião de Martins:

Essa cronologia é pouco informativa e pouco útil. Serve, apenas, para que os estudantes fiquem conhecendo o nome de alguns cientistas famosos e tenham uma idéia sobre épocas (e sobre seqüências) de determinadas descobertas; mas não facilita o ensino da própria ciência (MARTINS, 1990, p.3).

Concordamos com a opinião de Martins. A idéia de muitos professores e alunos acerca da História da Ciência sempre está ligada a apenas datas, descobertas e seus respectivos cientistas. Nesses livros encontramos a valorização e a mitificação de alguns episódios, sempre associados a grandes gênios da Ciência. Muitas vezes os professores nem

ao menos conhecem um pouco da biografia de tais gênios, tampouco como eles conseguiram elaborar tal raciocínio.

Pimentel (1998, p. 317) analisou alguns livros didáticos de Física em relação a alguns erros conceituais, problemas referentes a experimentos e ilustrações. Ele concluiu que o livro deve ser encarado como um instrumento didático importante de apoio ao professor e aluno, no entanto, não deve ser usado como uma fonte de verdade absoluta. Caso o professor tenha dúvida com relação a algum conceito abordado no livro, este deve recorrer a outras fontes confiáveis de pesquisa.

É por essas razões que acreditamos que a História da Ciência tem a contribuir com o Ensino de Química. Ela pode servir de apoio aos conteúdos abordados uma vez que nada é considerado como pronto, acabado e definitivo na Ciência. Nada pode ser considerado a salvo de críticas, reflexões e refutações.

Uma das primeiras tentativas do uso da História da Ciência no Ensino foi o *Harvard Project Physics*, coordenado por G. Holton, F.J. Rutherford e F. Watson, que incorporava um grande número de material histórico em seu currículo, e o *Physical Science Study Committee* o qual havia um conteúdo matemático aplicado ao curso de Física. Ambos os projetos eram ligados a Física, mas podemos fazer uma relação com qualquer outra área do Ensino de Ciências.

Esses projetos obtiveram resultados positivos. Com relação ao primeiro aspecto de avaliação que era aumento do interesse pela ciência, o projeto *Harvard* se saiu melhor, mostrando que a inclusão de material histórico pode contribuir para um melhor ensino. O segundo aspecto de avaliação, que era dado pelo aumento do entendimento do método científico, ambos obtiveram os mesmos resultados, ou seja, a imagem equivocada da ciência e seus métodos deram lugar para uma imagem mais realista da ciência.

Nesses dois projetos percebemos que a História da Ciência pode proporcionar um melhor ensino. Com as palavras de Russel, conclui-se que:

Se desejamos usar a Histórica da Ciência para influenciar o entendimento dos estudantes em relação à ciência, devemos incluir quantidade significativa de material histórico e tratar este material de modo a elucidar as características peculiares da ciência. (RUSSEL, 1981, p. 56).

Outro aspecto positivo em relação à abordagem histórica no Ensino é a de que ela pode gerar certo paralelismo entre as idéias e/ou concepções dos alunos com o desenvolvimento histórico. Castro (1993, p. 11) salienta que isso é um tipo de leitura que se pode fazer da História da Ciência e sua relação com o ensino em termos de conceitos alternativos.

Sobre esse paralelismo, Marques e Caluzi (2003) relatam que alguns estudos (cf. Mortimer, 1995 e Chassot, 1996), mostram que, de fato, há certo paralelismo entre as idéias dos alunos e as idéias dos pensadores gregos quando o assunto é atomismo. Há certa similaridade entre as concepções atomísticas dos alunos com as idéias dos primeiros pensadores atomistas.

Podemos imaginar que um estudante pode formular a mesma conclusão que Demócrito (460 – 370 a.C.) teve há séculos ao dizer que a matéria é formada por inúmeras partículas indivisíveis como exemplifica Mortimer (1995. p. 26), ou ainda dizer que os átomos são como “pequenas bolinhas”, analogia encontrada nos livros didáticos para o átomo de Dalton em 1808 na tentativa de dar uma explicação teórica sobre as leis da conservação das massas e lei das proporções definidas, de Lavoisier e de Proust, respectivamente.

Isso não quer dizer que as idéias elaboradas pelos filósofos ou por cientistas sejam tão simples quanto as dos estudantes, mas sim que os estudantes também apresentam idéias tão bem fundamentadas quanto os filósofos que fizeram parte da construção da Ciência.

Segundo Gagliardi & Giordan (1986), o uso de uma abordagem histórica no ensino proporciona aos estudantes uma visão mais crítica da ciência:

A História da Ciência pode mostrar em detalhe alguns momentos de transformação profunda da ciência e indicar quais foram as relações sociais, econômicas e políticas que entraram em jogo, quais foram as resistências a transformação e que setores trataram de impedir a mudança. Essa análise pode fornecer as ferramentas conceituais para que os alunos compreendam a situação atual da ciência, sua ideologia dominante e os setores que a controlam e que se beneficiam dos resultados da atividade científica. (GAGLIARDI & GIORDAN, 1986, p.254)

A abordagem histórica nessa visão, portanto não significa apenas uma inclusão passiva no Ensino, mas sim uma inclusão ativa que proporcione aos estudantes a chance de entender e interpretar o mundo tecnológico de hoje; que possa relacionar e perceber que os conceitos dominantes hoje na ciência são frutos de um processo dinâmico desenvolvidos no decorrer de anos, que teve influência direta de uma sociedade e conseqüentemente os setores político, social, econômico e cultural.

A forma de como são ensinados conteúdos de Ciências no Ensino de Ciências pode levar aos estudantes concepções e idéias equivocadas com relação ao trabalho científico.

Gil Perez (*apud* Teodoro 2000, p. 55) relaciona esses equívocos:

Visão empirista e aleatória: Ressalta o papel da observação e da experimentação “neutras” (não contaminadas por idéias apriorísticas) esquecendo o papel essencial das hipóteses e da construção de um corpo coerente de conhecimentos (teoria).
[...]

Visão rígida (algorítmica, “exata”, infalível...): Apresenta o “método científico” como um conjunto de etapas a serem seguidas mecanicamente. Ressalta, por outro lado, o tratamento quantitativo, controle rigoroso etc, esquecendo, e inclusive rechaçando, tudo o que significa invenção, criatividade, dúvida.

Visão não problemática: Transmitem-se conhecimentos já elaborados, sem mostrar quais foram os problemas que geraram sua construção, qual foi sua evolução, as dificuldades e as limitações do conhecimento atual, as perspectivas possíveis.

Visão exclusivamente analítica: Ressalta a necessária parcialização dos estudos, seu caráter delimitado, simplificado, mas que resiste aos esforços posteriores de unificação e construção de corpos coerentes de conhecimentos cada vez mais amplos, o tratamento de problemas “fronteira” entre dois domínios distintos que podem chegar a unir-se.

Visão cumulativa, linear: Os conhecimentos aparecem como fruto de um crescimento linear, ignorando as crises, as remodelações profundas. Se ignora, em particular, a descontinuidade radical entre o tratamento científico dos problemas e o pensamento comum.

Visão de “senso comum”: Os conhecimentos apresentam-se como claros, óbvios, “de senso comum”, esquecendo que a construção científica parte, precisamente, do questionamento sistemático do óbvio. Contribui-se implicitamente para esta visão quando se pratica o *reducionismo conceitual*, ou seja, quando se apresenta o progresso das *concepções alternativas* dos alunos aos conceitos científicos como uma simples mudança de idéias, sem considerar as mudanças metodológicas que tal transformação exige, [...].

Visão “velada”, elitista: Esconde o significado dos conhecimentos atrás do aparato matemático. Não se esforça por fazer a ciência acessível, para mostrar seu caráter de construção humana, na qual não faltam nem confusões e nem erros... como os dos próprios alunos.

Da mesma forma o trabalho científico apresenta-se como um domínio reservado a minorias especialmente dotadas, transmitindo expectativas negativas a maioria dos alunos, com claras discriminações de natureza social e sexual (a ciência é apresentada como uma atividade predominantemente “masculina”).

Visão individualista: Os conhecimentos científicos aparecem como obra de gênios isolados, ignorando-se o papel do coletivo, dos intercâmbios entre grupos [...].

Visão descontextualizada, socialmente neutra: Esquece as complexas relações Ciência, Tecnologia e Sociedade e proporciona uma imagem dos cientistas como seres “acima do bem e do mal”, encerrados em torres de marfim alheios às necessárias tomadas de decisão. [...]

Em acordo com uma abordagem histórica no Ensino, Martins (1998) adiciona que a História da Ciência deve ser utilizada como um dispositivo didático útil para tornar o Ensino Médio mais interessante, facilitando sua aprendizagem. Além disso, a utilização da História da Ciência no Ensino Médio pode contribuir para:

Mostrar através de episódios históricos o processo gradativo e lento de construção do conhecimento, permitindo uma visão concreta da natureza real da ciência, seus métodos, suas limitações. Isso possibilitará a formação de um espírito crítico fazendo com que o conhecimento científico seja desmistificado sem que se destrua seu valor;

[...]

A História da Ciência mostra, através de episódios históricos, que ocorreu um processo lento de desenvolvimento de conceitos até se chegar às concepções aceitas atualmente, o que facilita o aprendizado do educando que poderá perceber que suas dúvidas são pertinentes ao conceito em questão;

[...]

O educando poderá ter a chance de perceber que a aceitação ou não de uma proposta não depende do seu valor intrínseco, mas sim de outros valores como sociais, filosóficos, políticos e religiosos. (MARTINS, 1998, p. 18).

Gagliardi (1988), corroborando com a importância da inserção da História da Ciência no Ensino de Ciência, adiciona que a História da Ciência pode proporcionar, ao mesmo tempo, um debate científico que salienta como determinado fato foi desenvolvido e estudado no decorrer dos séculos, como também gerar um debate do ponto de vista da Filosofia, mostrando como o homem concebe idéias, conhece e interage com seu meio, formula hipóteses, investiga, experimenta, sugere mecanismos, cria metodologias e as coloca em discussão.

A discussão sobre a História das Ciências pode ser ao mesmo tempo uma discussão sobre o que é conhecimento e como se conhece. Ao mostrar que cada conhecimento atual é resultado de um longo processo, que não bastam algumas experiências para mudar uma teoria, que os fatores sociais tem muito peso, podemos começar a desmistificar a imagem da ciência. (GAGLIARDI, 1988, p. 292).

2.2 ALGUMAS DIFICULDADES NA INSERÇÃO DA HISTÓRIA DA CIÊNCIA NO ENSINO DE CIÊNCIAS.

Visto a importância da História da Ciência no Ensino de Ciências, mesmo assim encontramos algumas dificuldades com relação a sua inserção. Uma dessas dificuldades é elucidada por Sanchés Ron (1988). Segundo o autor, os historiadores da história geral não têm dado tanta importância aos trabalhos produzidos por historiadores da Ciência, o que ocasiona

um reduzido número de opções aos docentes quando decidem abordar aspectos históricos de algum conceito.

Além do aspecto historiográfico, uma outra dificuldade é em relação aos professores. Muitas vezes, estes não têm o devido preparo acadêmico ou ainda não demonstram interesse pelos aspectos históricos. Freire Junior (2002, p. 24), aponta alguns aspectos que devem ser superados pelos professores de ensino de Ciências que se mostram interessados nas contribuições da História da Ciência na sua prática docente.

O primeiro aspecto se refere à eficácia da abordagem contextual. Segundo Freire Junior (2002, p. 24), num estudo realizado em cerca de 40 países cujo objetivo era investigar a eficácia do ensino centrado na História da Ciência, uma das conclusões foi que em *“aulas centradas apenas na história, filosofia e sociologia da ciência podem confundir os estudantes e se converterem em mais uma aula de estudos sociais com um disfarce de aula de ciências”* (FREIRE JUNIOR, 2002, p. 25). Ainda sobre esse estudo, os pesquisadores também concluem que a ampliação da alfabetização em ciências através de uma abordagem contextual a formação dos professores parece ser um importante aspecto para atingir os objetivos.

Um outro aspecto, ainda segundo o autor, está no fato de existir uma assimetria entre o discurso propositivo e a experiência concreta. Baseado em uma pesquisa realizada por Carvalho e Vannuchi (1996, *apud* Freire Junior, 2002), que analisaram dados dos últimos eventos nacionais ocorridos na área da Física, sobre as tendências no ensino de Física na década de 90, os autores perceberam que a categoria História e Filosofia da Ciência têm certo predomínio em termos de sugestão de abordagem nessa área. No entanto, existe uma carência de trabalhos ligados à área, ou seja, existe um grande consenso em incluir História e Filosofia da Ciência no currículo, mas essa inclusão convive com a dificuldade de se traduzir tais propostas à realidade escolar.

Concordamos com Freire Junior (2002) ao dizer que uma das saídas para esse tipo de problema, ou assimetria, está na investigação, na pesquisa de quais as razões dessa dificuldade de abordagem da ciência nessa concepção de ensino. Tal pesquisa poderia mostrar além dos fatores que interferem na inclusão, a realidade escolar brasileira bem como a formação dos professores.

Sabendo, portanto dos aspectos positivos quanto à inserção da História da Ciência no Ensino, nos parece favorável o seu uso no Ensino de Ciências. De fato encontramos muitos materiais que justificam seu uso. No entanto, percebe-se a carência de trabalhos práticos aplicados em sala de aula como roteiros de atividades, mini-cursos, entre outras sugestões que visem facilitar o trabalho docente, bem como sua formação.

3. AS PESQUISAS SOBRE A ESTRUTURA DA MATÉRIA.

3.1 ERNEST RUTHERFORD³

Ernest Rutherford (Figura 3.1) nasceu perto de Nelson, na Nova Zelândia em 30 de agosto de 1871. O pai de Rutherford era um homem engenhoso e enérgico, que mudou de profissão várias vezes. Rutherford tinha seis irmãos e cinco irmãs, três dos quais morreram ainda crianças.

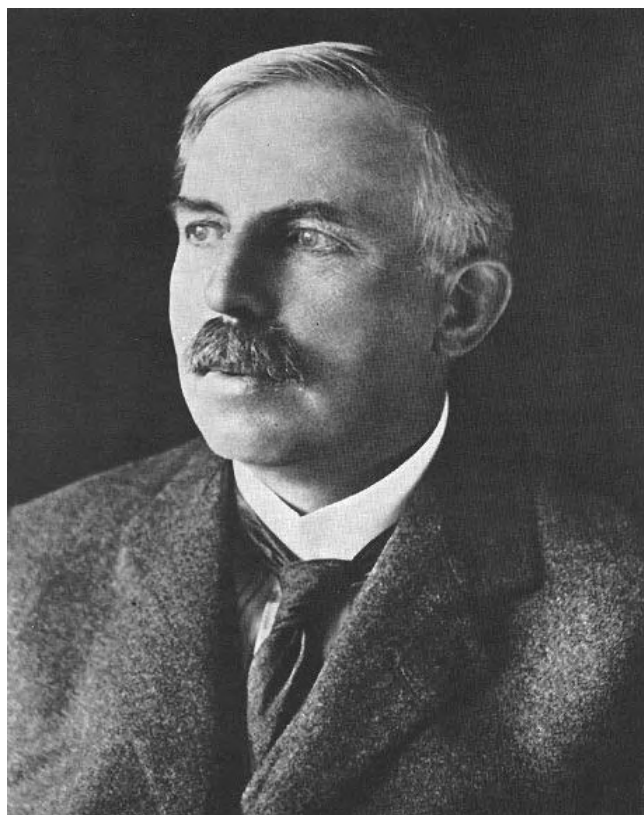


FIGURA 3.1 Ernest Rutherford (The Nobel Prize, 2005)

Rutherford estudou no *Nelson College* e no *Canterbury College* em Christchurch na Nova Zelândia. Para o bacharelado em ciências, escreveu uma tese sobre a magnetização do ferro por descarga de alta frequência. Ele buscava demonstrar que um fio de ferro através

³ As informações sobre a vida de Ernest Rutherford foram extraídas das obras de Andrade (1964), Segrè (1987), Nye (1994) e Campbell (2005).

do qual tivesse passado uma descarga de alta frequência magnetizava-o apenas superficialmente. Para isso, ele magnetizou o fio usando a descarga e mostrou que ele estava magnetizado, depois mergulhou o fio em ácido nítrico, dissolvendo apenas a superfície e a magnetização desapareceu (Figura 3.2).

Algum tempo depois, Rutherford seguiu para o Laboratório Cavendish na Universidade de Cambridge onde foi contemplado com uma bolsa de estudo, em 1895. Rutherford foi o primeiro aluno estrangeiro aceito para trabalhar em Cambridge, que na ocasião estava passando por importantes transformações em seu currículo.

O trabalho sobre magnetismo logo veio a ter aplicação prática, pois sua descoberta foi usada na detecção de sinais sem fio. Em Cambridge, sua primeira colaboração foi com Joseph John Thomson (1856 – 1940) na criação de tubos de descargas de gás no estudo de raios X.



FIGURA 3.2 O primeiro laboratório de Rutherford localizado no porão do Canterbury College onde realizou pesquisas sobre a magnetização do ferro. (SEGRÈ, 1987, p. 75).

3.2 UNIVERSIDADE MCGILL, CANADÁ.

No outono de 1898 Rutherford foi indicado para o cargo de professor de Física Experimental da Universidade McGill. A vaga surgiu com a aposentadoria do professor Hugh Callendar que decidiu voltar à Inglaterra. O presidente do Departamento de Física, Professor John Cox, foi para Cambridge para buscar um novo substituto e John Joseph Thomson recomendou Rutherford.

Naquela época, o Departamento de Física da Universidade McGill, mais precisamente o Laboratório de Física, incluía dois professores e alguns alunos pesquisadores. Havia um intenso trabalho por parte dos alunos de engenharia, medicina, química e física.

É conveniente comentar sobre seus trabalhos naquela universidade. Segundo dados do *THE RUTHERFORD MUSEUM*, localizado no *The Ernest Rutherford Physics Building* da Universidade McGill em Montreal (Figura 3.3), Rutherford pesquisou todos os aspectos da radioatividade.



FIGURA 3.3 The Ernest Rutherford Physics Building - Universidade McGill (Foto do autor, set/2004).

Antes de entrar em detalhes, é necessário mencionar dois equipamentos muito usados por Rutherford que o acompanhou durante todo o período em que fez parte daquela Universidade.

Rutherford dispunha, naquela ocasião, de dois métodos de mensuração da intensidade de radiação emitida por substâncias radioativas. Um deles era o eletrômetro de quadrantes, também conhecido como Eletrômetro de Dolezalek, que levava o nome do seu inventor Friedrich Dolezalek (1873-1920). Era um instrumento para medir diferenças de potenciais através de forças de atração e repulsão elétrica.

Um esquema desse instrumento é mostrado nas figuras 3.4 e 3.5: era uma caixa de metal cilíndrica plana dividida em quatro quadrantes separados. Uma agulha ficava suspensa dentro dos quadrantes por um fio metálico e o movimento da agulha pode ser observado sobre a escala através de um feixe de luz refletida por um pequeno espelho preso ao fio. Como mostra a figura 3.4, um par de quadrantes opostos fica conectado a um fio terra, o outro par no eletrodo B de uma câmara de ionização. Uma rotação leve dos eletrodos é registrada como um movimento da agulha, refletida pelo espelho. Alguns modelos possuíam uma chave que ligava e desligava o instrumento, representado na figura 3.4 pela letra K.

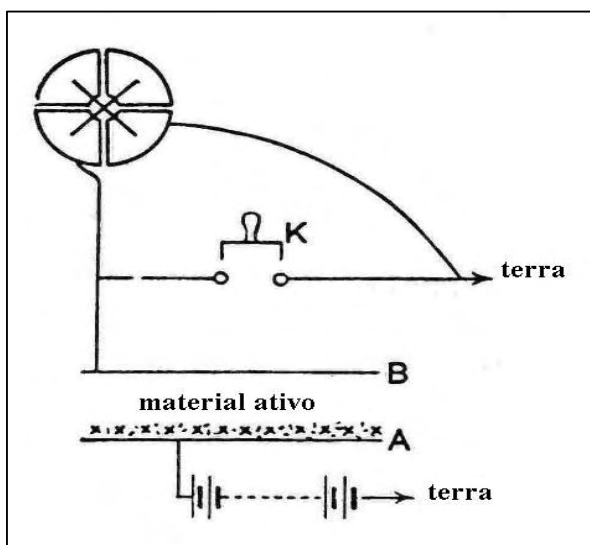


FIGURA 3.4 Esquema de um Eletrômetro de Dolezalek ou de quadrantes. (THE RUTHERFORD MUSEUM, 1996, p. 5).



FIGURA 3.5 Eletrômetro de Dolezalek ou de quadrantes. (RUDD, 2005).

Outro instrumento usado por Rutherford era um eletroscópio de folha de ouro (Figura 3.6). Esse equipamento consistia em uma caixa de metal que continha uma haste isolada do metal, L' , que foi unida na sua extremidade a uma folha de ouro, L . Quando a haste era carregada, conectada, por exemplo, a uma bateria de 200-300 volts, a folha de ouro se separava, podendo ser vista por uma espécie de janela com uma escala. A radiação de ionização descarregava a haste e a folha, de modo que a folha retornava gradualmente a sua posição vertical original no contato com a haste, e a taxa da queda da folha era uma medida da intensidade de radiação.

Segundo THE RUTHERFORD MUSEUM (1996) o eletroscópio de folha de ouro era um instrumento extremamente sensível e podia medir quantidades minúsculas de radiação.

O eletroscópio podia ser ativado diretamente pela radiação beta ou gama, que entrava através de uma janela de um recipiente de metal exterior. Para a medida da radiação alfa, Rutherford planejou uma câmara de ionização combinada ao eletroscópio onde uma camada do material ativo era depositada sobre a placa P; a placa paralela P' era conectada diretamente à haste L' do eletroscópio.

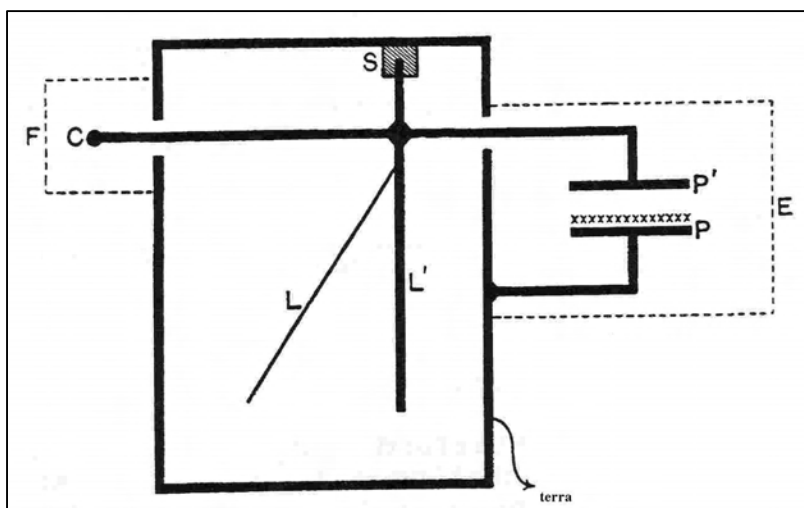


FIGURA 3.6 Esquema de um Eletroscópio de folha de ouro. (THE RUTHERFORD MUSEUM, 1996, p. 5).

Um dos primeiros trabalhos de Rutherford naquela Universidade apareceu em 1899 num artigo publicado na *Philosophical Magazine*, intitulado “*Radiação do Urânio e a Condução Elétrica Produzida*” (*Uranium radiation and the electrical conduction produced by it*), onde Rutherford estabeleceu a existência de dois tipos distintos de radiação provenientes do urânio: uma era rapidamente absorvida e a outra mais penetrante, respectivamente radiação alfa (α) e radiação beta (β). Mais tarde, após a descoberta de uma outra substância radiativa, por Mme. Curie que a chamou de rádio, Paul Villard, na França em 1900, estudando esse elemento percebeu que havia mais um tipo de radiação, semelhantes as

alfa e beta, porém mais penetrantes e capaz de atravessar lâminas metálicas. Foi assim chamada de radiação gama (γ).

Rutherford publicou, em 1900, o artigo “*Uma Substância Radioativa emitida dos Compostos de Tório*” (*A Radioactive Substance emitted from Thorium Compounds*) onde relatou a descoberta de um inesperado fenômeno. Ele percebeu que uma substância exposta durante algum tempo na presença de tório, torna-se radioativa. Rutherford averiguou logo que isto era devido à deposição, na superfície da substância exposta, de uma camada invisível de material radioativo. Essa radioatividade excitada decaía rapidamente e desaparecia em poucos dias. A essa nova substância, Rutherford chamou de *emanação*, que, segundo ele, possivelmente poderia ser um vapor do tório.

Naquele mesmo ano na *Philosophical Magazine*, Rutherford apresentou um artigo também sobre o tório. Nesse artigo, uma espécie de continuação do anterior, ele fez um estudo sobre os compostos de tório que, sobre certas condições, possuía a propriedade de produzir uma radioatividade temporária em todas as substâncias sólidas na sua proximidade.

Rutherford observou que a intensidade da radiação emitida por essas substâncias decaía, com o tempo, em uma progressão geométrica, diminuindo metade do seu valor em aproximadamente 11 horas. A queda da intensidade era independente da quantidade de matéria da substância, bem como sua natureza. Possivelmente tenha surgido assim o termo *vida média* da substância radioativa.

Quase que ao mesmo tempo, o casal Curie descobriu o mesmo fato com o rádio. Rutherford em seu artigo publicado na *Nature* (1901), *Emanações das Substâncias Radioativas* (*Emanations from Radio-active Substances*), cita que os Curie juntamente com Andre-Louis Debierne (1874-1949), descobrem um gás radioativo proveniente do rádio. Eles colocaram rádio dentro de um recipiente de vidro a vácuo, por meio de uma bomba de mercúrio. Foi encontrado que o vácuo aplicado diminuía gradualmente devido a emissão de

uma substância gasosa pelo rádio. Um pouco do gás coletado mostrou-se fortemente radioativo e quando havia substâncias na presença desse gás, essa se tornava temporariamente radioativa. A esse gás radioativo chamou-se de emanção de rádio. Hoje se sabe que essa emanção se trata do gás nobre radônio.

É interessante relatarmos brevemente sobre a descoberta do rádio. Segundo Andrade (1964, p. 54), o casal Curie investigava certa substância que era capaz de ionizar o ar ao redor. Como resultado destas pesquisas foi achado que as amostras de bismuto e de bário, separado de um mineral chamado pechblenda (óxido de urânio) eram altamente radioativos.

Nem o bismuto e nem o bário mostraram alguma atividade quando isolados e purificados, isto só poderia significar que elementos desconhecidos muito radioativos, se comportando quimicamente como bismuto e bário respectivamente, estavam presentes na pechblenda.

Após métodos químicos de separação fracionada de elementos, Mme. Curie conseguiu isolar os elementos radioativos e nomeou-os como polônio (elemento associado ao bismuto) e rádio (elemento associado ao bário). Quase que na mesma época, Debierne trabalhando com resíduos de urânio dos Curies, descobriu um novo elemento radioativo, o qual ele chamou actínio (Andrade, 1964, p. 56).

A descoberta dos dois tipos de radiação proporcionou, na época, um novo caminho a ser pesquisado. Como narrado por Rutherford numa conferência em 1908 (p. 137), de início havia pouco interesse nas partículas alfa em virtude do seu caráter pouco penetrante. As partículas beta foram de início mais estudadas. Algum tempo depois, em 1900, já havia sido demonstrado que as partículas beta, quando submetidas a um campo magnético, desviavam na mesma direção que um fluxo de raios catódicos e, conseqüentemente, pareciam ser um fluxo de partículas que carregavam carga negativa. Antoine Henri Becquerel (1852 – 1908) mostrou, no mesmo ano, que as partículas beta tinham pouca massa como os elétrons

(descobertos em 1898 por J. J. Thomson) dos raios catódicos e eram projetadas com velocidade comparada com a da luz.

Com relação às partículas alfa, Rutherford e McClung demonstraram em 1900 que elas ionizavam gases e também que 1 grama de rádio liberava uma grande quantia de energia na forma de radiação alfa. Algum tempo depois, mais precisamente em 1903, ele investigou outras propriedades dessas partículas e concluiu que elas são carregadas positivamente, pois, sob influência de um campo elétrico, são desviadas na direção do pólo negativo. Tais resultados foram publicados no artigo “*O Desvio Magnético e Elétrico dos Raios Facilmente Absorvidos do Rádio*”. (*The Magnetic and Electric Deviation of the Easily Absorbed Rays from Radium*)

É importante destacarmos sua parceria com Frederick Soddy (1877 – 1956), um jovem químico da Inglaterra que tinha o cargo de demonstrador químico da Universidade. Juntos escreveram o famoso artigo “*A Causa e a Natureza da Radioatividade*” (*The cause and Nature of Radioactivity*). Nesse trabalho, publicado em duas partes na *Philosophical Magazine*, em 1902, eles pesquisaram a radioatividade do tório. Através de uma simples operação química, eles descobriram que a maior parte da radioatividade do tório (em torno de 54%) é devida a um outro tipo de matéria, que a chamaram de tório X (ThX) e que possuía propriedades químicas distintas (Rutherford & Soddy, 1902, p. 492). Além de apresentar essa característica, apresentava também uma radioatividade temporária.

Andrade (1964, p. 63) lembra que naquele período Willian Crookes (1832 – 1919) também já tinha separado do urânio um tipo de substância ativa que ele chamou de urânio X.

No artigo sobre a radioatividade, Rutherford e Soddy, logo no início deixam claro que:

A radioatividade é acompanhada por mudanças elétricas na quais novos tipos de matéria são continuamente formados. (RUTHERFORD E SODDY, 1902, p. 472. Tradução nossa).

Para chegarem a essa conclusão, ambos pesquisaram exaustivamente o tório. A maior parte da radioatividade do tório foi removida por um processo de precipitação utilizando amônia. A substância removida, como já citado, foi chamada de tório X. Essa substância apresentava propriedades químicas distintas e sempre em pequenas quantidades. O tório, após separação do tório X, recuperava suas propriedades radioativas, pois emitia radiação, enquanto o tório X separado perdia sua radioatividade de modo exponencial.

Rutherford e Soddy mostraram que este comportamento poderia ser explicado se o tório recuperasse sua atividade perdida na medida em que ia formando tório X numa taxa constante, enquanto o tório X formado decaía de modo exponencial. Muitos desses dados foram baseados no trabalho de Rutherford de 1900 sobre o tório onde ele declarou que a radioatividade das substâncias decaía em progressão geométrica.

Para Andrade (1964, p.65) a essência da teoria era que o tório X era um tipo distinto de matéria ou, em outras palavras, um elemento distinto, com propriedades químicas definidas e diferentes das do tório. A radioatividade era uma propriedade atômica, uma vez que a taxa de decaimento, e as propriedades radioativas em geral, não foram afetadas de qualquer forma de combinação química, ou seja, os elementos radioativos poderiam estar combinados com qualquer elemento que não afetaria a sua radioatividade. A formação de tório X a uma taxa constante só poderia ser explicado pela mudança (ou transformação) do tório em tório X.

Dando seqüência, Rutherford e Soddy também descobriram que essas mudanças radioativas eram causadas pelas emissões radiativas, ou seja, emissões de partículas alfa e beta pelos átomos da matéria.

... o início das mudanças químicas que acontecem em corpos radioativos é devido à emissão de raios alfa, ou seja, a projeção violenta de uma massa carregada do átomo. A porção deixada para trás é instável, sofrendo mudanças químicas adicionais que são acompanhadas novamente por emissão dos raios alfa, e em alguns casos por raios beta (...) O que leva a emissão destas massas (partículas) pode ser devido à

ação de forças internas ou forças externas da qual nós não temos conhecimento ainda. (RUTHERFORD E SODDY, 1902a, p. 106. Tradução nossa).

Em 1903, Soddy voltou para a Inglaterra para trabalhar com Willian Ramsay. Segundo Rutherford (1903, p. 609) em uma nota para a revista *Nature*, Ramsay e Soddy mostraram que átomos do elemento hélio estavam presentes nas emissões de brometo de rádio e também na emanção de rádio, mas não determinaram se o hélio era um produto final do rádio ou surgia em alguma fase das emissões.

Em setembro de 1904, aparece outro artigo de Rutherford na *Philosophical Magazine*, chamado “*Transformação lenta dos Produtos do Rádio*” (*Slow Transformation Products of Radium*). Nesse artigo ele muda a nomenclatura recém utilizada para a série de desintegração do rádio. Como mostra a tabela abaixo o que anteriormente foi chamado de emanção X, passou a ser chamado de rádio A, e assim por diante. Na tabela, temos na segunda coluna, nomeado por T o tempo de meia vida (termo introduzido por Rutherford e Soddy); na terceira coluna o tipo de radiação emitida.

TABELA 3.1 Nomenclatura da série do rádio. (Adaptado, RUTHERFORD, 1904, p.658)

Série radioativado do rádio	T (Tempo de meia vida)	Tipo de radiação emitida
Rádio	—	Raios α
Emanção de Rádio	4 dias	Raios α
Rádio A	3 minutos	Raios α
Rádio B	21 minutos	—
Rádio C	28 minutos	Raios α β γ

No entanto, como mostrado acima, rádio A, B e C foram considerados como depósito ativo, mas de mudança rápida. Rutherford analisou esse depósito ativo. Inicialmente em uma solução diluída de ácido sulfúrico diluiu aproximadamente 30 miligramas de brometo

de rádio que havia sido estocada por um mês. A solução obtida mostrou-se fortemente ativa e emitia partículas alfa e beta. Para analisar essa solução, Rutherford colocou discos polidos de bismuto que eram deixados na solução por certo tempo. Após análises utilizando aquecimento, ele concluiu que havia dois produtos:

1. Um produto que emitia raios beta, solúvel em ácido sulfúrico, mas não se volatiliza a 1000°C, e não se depositava no bismuto;
2. Um produto que emitia apenas raios alfa, solúvel em ácido sulfúrico, volatilizava a 1000°C, e se depositava, em solução, no bismuto. (RUTHERFORD, 1904, p. 662. Tradução nossa).

Seguindo a nomenclatura dada por ele, esses novos produtos foram nomeados como rádio D e rádio E, respectivamente, e foram chamados também de depósito ativo de mudança lenta, pois o tempo de meia vida era muito grande.

Outro fato importante com relação ao rádio foi dado por Mme Curie e Albert Laborde. Segundo Rutherford (1904, p.620) eles observaram que o rádio e seus compostos mantêm a temperatura do ar, ao redor, alguns graus acima da temperatura ambiente. Pela teoria da desintegração dada por Rutherford e Soddy, esse aquecimento, ou calor emitido de rádio, surge em parte dos raios emitidos, ou seja, pela emissão, na maioria, de partículas alfa, e em parte do sistema do quais os raios são expelidos, em outras palavras, pelo “*auto-bombardamento*” por parte das partículas alfa, uma vez que eram facilmente absorvidas pela matéria.

Uma vez emitida uma partícula alfa, o átomo de rádio tende a se rearranjar de forma a recuperar sua forma estável ou temporariamente estável. Rutherford (1904, p.620) diz que pode ser daí uma parte da liberação de calor. Algum tempo depois ele explica que esse aquecimento, cerca de 41%, deve-se à desintegração da emissão X (rádio A) juntamente com as subseqüentes mudanças.

Além disso, ele adverte que os resultados experimentais não estão completos o bastante para mostrar se o efeito de aquecimento de cada um dos produtos é proporcional a sua atividade, medido pelas partículas alfa, mas os resultados indicam essa possibilidade. Contudo o efeito de aquecimento é diretamente ligado com a radioatividade do rádio, e a variação de tempo do efeito de aquecimento de cada um dos produtos radioativos é igual à variação de tempo da atividade. Isto resulta que a emissão de calor do rádio é acompanhada das mudanças sucessivas que acontecem no rádio.

Naquele mesmo ano de 1904, Rutherford publica seu livro chamado “*Radioactivity*”. Nesse livro, segundo Andrade (1964, p. 75), Rutherford dá conta, de forma admirável, de todo o conhecimento contemporâneo do assunto, com reconhecimento completo e generoso das pesquisas de outros cientistas nessa área. O livro foi publicado pela *Cambridge University Press*.

Com relação à emissão de rádio, Rutherford (1904, p. 648) cita um trabalho de Sir William Ramsay e Soddy onde eles isolaram a emissão do rádio e determinaram seu volume. Eles calcularam que 1 grama de rádio contém em torno de 1 milímetro cúbico de emissão, quando mensurado em pressão e temperatura ambiente. Também perceberam que a emissão tem todas as propriedades de um gás, no entanto seu volume diminuía com o tempo, mas isso não era permanente, a emissão mudava continuamente em uma substância sólida que ficava depositada nas paredes do recipiente que estava armazenado. Como já citado, tratava-se do gás nobre radônio.

Em maio daquele mesmo ano, 1904, Rutherford foi convidado pela *Royal Society* para pronunciar a *Bakerian Lecture*, na Inglaterra. Essa conferência foi fundada em 1775 por Henry Baker. O título da conferência dada por Rutherford foi “*As Sucessivas Mudanças nos Corpos Radioativos*” (*The Succession of Changes in Radioactive Bodies*) que foi publicada na *Philosophical Transactions of the Royal Society*.

Nessa conferência, Rutherford expôs os quatro elementos (rádio, tório, urânio e actínio) como sendo cada um a fonte de uma série de mudanças radioativas. O anexo 1 mostra a série radioativa desses elementos.

Também nessa conferência aparece um importante instrumento que foi muito usado por ele. Era um outro tipo de eletroscópio (esquematisado na figura 3.7) usado para mensurar a atividade da radiação beta e gama. Para mensurar a radiação beta, uma lâmina de alumínio no fundo do eletroscópio absorve as partículas alfa, mas permite que as partículas beta e radiação gama passem livremente.

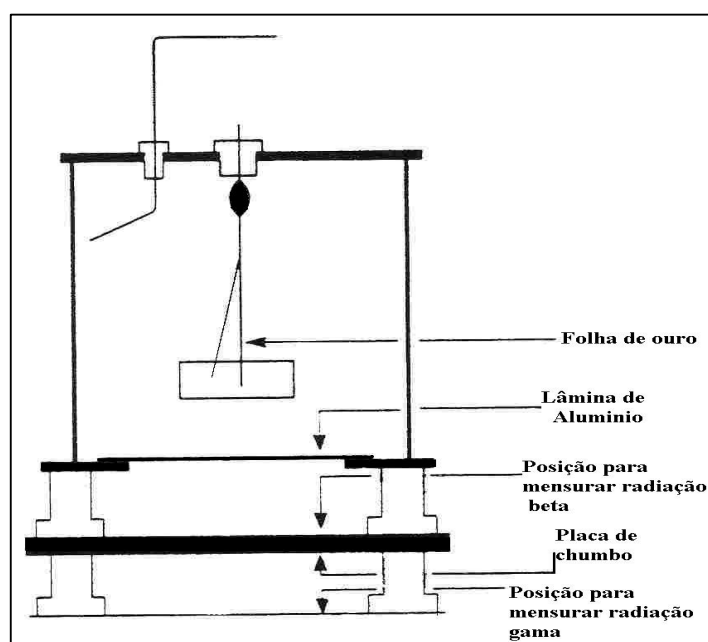


FIGURA 3.7 Esquema do Eletroscópio utilizado para mensurar a radiação gama (THE RUTHERFORD MUSEUM, 1996, p. 12).

Para medir a radiação gama, a fonte de radiação era colocada abaixo da placa de chumbo de 6 mm de espessura, que era suficiente para interromper partículas alfa e beta, mas suficientemente fina para permitir a passagem da radiação gama. Isso fazia um movimento no sistema de folha de ouro separado dentro do recipiente de metal. O movimento das folhas era

determinado por meio de janelas de mica, onde um microscópio servia para medir a intensidade da radiação, sobre uma escala.

Outro ponto importante dessa conferência foi ter mostrado que o urânio pode ser a origem do rádio. No entanto, não havia nenhuma evidência experimental definitiva comprovando que o rádio pode ser produzido pelo urânio, tório ou actínio. Rutherford e Boltwood em 1906 publicaram o trabalho “*A Proporção Relativa de Rádio e Urânio em Minerais Radioativos*” (*The Relative Proportion of Radium and Uranium in Radio-active Minerals*), num artigo para o *American Journal of Science* mostra, através de experimentos, a proporção entre a quantidade de urânio e rádio em minerais radioativos, apoiados na idéia que rádio é um produto de decomposição do urânio. De acordo com a teoria da desintegração, a quantidade de rádio por grama presente num mineral de urânio deveria ser uma constante cujo valor pode ser deduzido, aproximadamente, se a atividade relativa do rádio puro e do urânio puro fosse conhecida.

Para determinar a quantidade de rádio associada com 1 grama de urânio é necessário apenas comparar a atividade da emanção produzida por uma quantidade padrão de brometo de rádio puro com o produzido por uma quantidade de mineral que contém um peso conhecido de urânio

A quantidade de rádio presente no urânio é aproximadamente a quantidade esperada se o urânio fosse à origem do rádio. Um método foi criado para determinar, em um mineral radioativo, a proporção da atividade total devido à presença do urânio, do rádio e dos outros corpos radioativos. Os resultados obtidos conduzem à conclusão que o actínio não é um produto direto do urânio no mesmo sentido que é o rádio.

Outra questão levantada por Rutherford era que havia uma forte evidência que o chumbo era o produto final da série radioativa do rádio. Na emissão de uma partícula alfa, o rádio F mudava para uma espécie de chumbo, pois era inativo e representava o fim das séries.

De modo semelhante, Rutherford analisou o depósito ativo do tório em direção aos seus sucessivos produtos (tório A, B e C), e actínio e seus produtos (actínio A, B e C). Foi mostrado que estes produtos finais também eram chumbo, tório C e actínio C como sendo os produtos finais (Andrade, 1964, p. 78).

Andrade (1964, p.77), mostra que, incidentalmente, Rutherford descobriu que o rádio F também tinha propriedades químicas e radioativas muito similares ao elemento polônio, descoberto por Mme Curie. Logo constatou que se tratava do mesmo elemento. Outro fato interessante, é que esse mesmo elemento era muito semelhante ao telúrio proveniente dos resíduos de pechblenda.

Importante também levarmos em consideração um dado encontrado no trabalho de W. H. Bragg e R. Kleeman, de 1904 citados por Rutherford (1908). Naquela época já era conhecido que a absorção das partículas alfa pela matéria era um pouco diferente das partículas beta. Nesse trabalho, Bragg e Kleeman perceberam que as partículas alfa, devido a sua grande quantidade de movimento, percorriam trajetórias em linhas retas, ionizavam moléculas presentes na sua trajetória e eram todas projetadas na mesma velocidade, desde que fosse usado o mesmo tipo de material radioativo. No entanto, perdiam seu poder de ionização depois de percorrer determinada distância no ar.

Nesse trabalho Bragg e Kleeman mostraram também que as partículas alfa do rádio consistiam em quatro grupos distintos, cada qual percorrendo distâncias diferentes, mas cada grupo com sua distinta distância antes de perder o poder de ionização. Cada grupo de partículas alfa pertencia aos produtos da série do rádio (rádio, emanção, rádio A e rádio C). Rutherford explica esse fato assumindo que cada partícula alfa, de cada produto, tem a mesma massa e a mesma carga, o que difere entre os grupos é a velocidade inicial das partículas (Rutherford, 1906, p.844).

É interessante, para ficar claro, analisarmos a segunda parte do artigo de Rutherford, publicado em março de 1904, intitulado “*A Radiação e Emissão do Rádio – Parte II*” (*The Radiation and Emanation of Radium – Part II*). Nesse artigo ele mostra as mudanças ocorridas pelo rádio baseado na recém descoberta por ele e Soddy do processo de desintegração. Vamos imaginar que um pequeno número de átomos de rádio (dentro de centenas de milhares de átomos), tornam-se instáveis a cada segundo e expõem, com uma velocidade extremamente grande, partículas alfa. A expulsão dessas partículas, cuja massa tem valor em torno de duas vezes o átomo de hidrogênio, deixa o átomo de rádio mais leve, mudando suas propriedades químicas e físicas. Os átomos de rádio que expeliram uma partícula alfa, constituem agora átomos de emissão de rádio. Esses átomos de emissão também são instáveis e, conforme investigado por ambos, metade do número de átomos totais produzidos se desintegram em quatro dias, expelindo outra partícula alfa. Os átomos de emissão menos uma partícula alfa expelida tornam-se, agora, átomos de rádio A, e comportam-se como sólidos, uma vez que a emissão de rádio é um gás. Essas desintegrações ocorrem em até cinco estágios.

Outro ponto a ser destacado dessa comunicação é que Rutherford relembra o fato, descoberto por Ramsay e Soddy, de que o hélio sempre aparecia num tubo que continha emissão de rádio. Os resultados indicavam que o hélio era um produto da emissão conforme esta vai sendo gradualmente transformada. Houve uma tendência para assumir que o hélio é um produto final da desintegração do átomo da emissão, mas esta evidência estava difícil de ser obtida. No entanto, ele declara que:

A produção de hélio pela emissão de rádio é de extrema importância, como sendo o primeiro e bem autenticado caso de transmutação de um elemento em outro. Esse processo de transmutação é de caráter muito especial, por ser espontâneo, e a uma razão que é independente do nosso controle. Para explicar a produção de hélio pelo rádio em linhas estritamente químicas, foi sugerido que o hélio não é um elemento verdadeiro, mas é um estado de combinação instável de hélio com algum elemento conhecido ou desconhecido, e que esta combinação está continuamente se

separando, com a liberação de hélio. (RUTHERFORD, 1904b, p. 655. Tradução nossa).

Na edição de julho da *Philosophical Magazine* de 1905, Rutherford no artigo intitulado “*Algumas Propriedades dos Raios α do Rádío*” (*Some Properties of the α Rays from Radium*) mostra os resultados preliminares sobre a investigação feita para a determinação da velocidade e a razão carga/massa das partículas alfa expelidas do rádío. Para essa determinação Rutherford dispôs de um equipamento mostrado na figura 3.8. Um fio condutor foi coloca numa fenda V a uma distância de 2 cm abaixo de uma estreita abertura S. Uma placa fotográfica P foi colocada a uma distância definida acima da abertura. Todo o equipamento foi montado dentro de um tubo de metal T, em vácuo e também colocado entre as placas de um eletroímã.

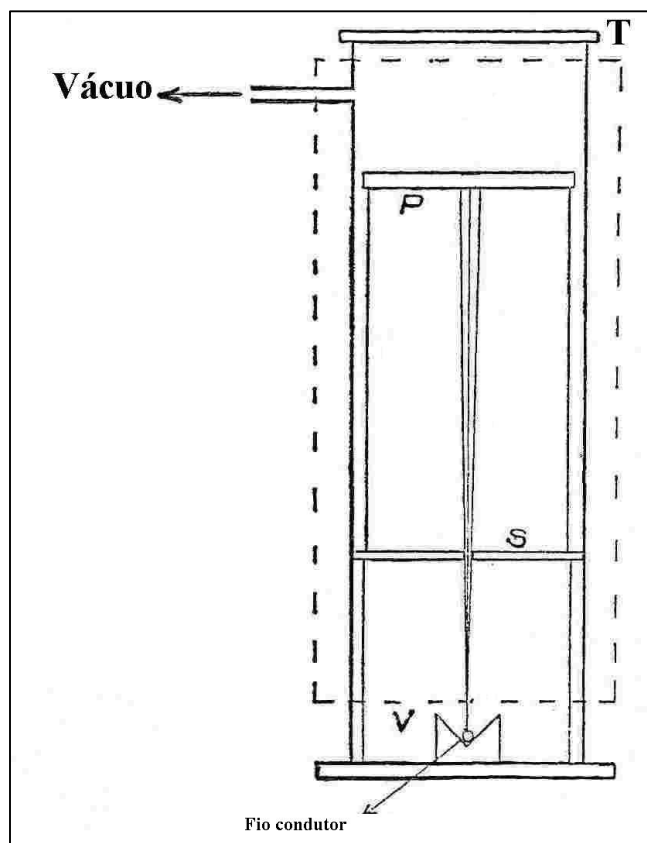


FIGURA 3.8 Esquema do experimento elaborado por Rutherford. (RUTHERFORD, 1905, p.805)

As partículas alfa proveniente de V passariam pela abertura S e atingiriam a placa fotográfica. O campo magnético era então aplicado paralelamente ao plano do fio e da abertura. O campo era invertido a cada dez minutos, por um período de uma hora. Ao final foram observadas duas faixas estreitas, e a distância entre os centros dessas faixas representou duas vezes a distância de deflexão de um feixe normal de partículas pelo campo magnético.

Rutherford (1905, p.807) salienta que o experimento de deflexão das partículas alfa sobre ação de um campo elétrico não havia sido completado. Esse método era um pouco complicado porque era difícil conseguir um vácuo suficientemente bom para permitir uma grande diferença de potencial entre as placas sem haver faíscação.

Utilizando os dados obtidos desse experimento, Rutherford encontrou os seguintes valores:

$$\text{Velocidade das partículas} = 2,5 \times 10^9 \text{ cm/s}$$

$$\text{Razão carga/massa} = 6,5 \times 10^3 \text{ unidades eletromagnéticas.}$$

No entanto, vale ressaltar que esses valores não eram definitivos. Conforme Rutherford (1905, p.807) adiciona, é importante obter os dados de um experimento com campo elétrico e assim determinar se a partícula alfa é um átomo de hélio projetado.

Nesse mesmo artigo, Rutherford traz também dados de alguns experimentos realizados para determinar a velocidade relativa das partículas alfa do rádio C depois de passar através de folhas de alumínio de conhecidas espessuras. Foi utilizado o mesmo equipamento mostrado na figura 3.8. As folhas de alumínio utilizadas tinham em torno de 0,00031cm de espessura e cobriam o pedaço do fio ativo. Foram utilizadas até 12 folhas de alumínio sobre material ativo. A tabela 3.2 mostra esses resultados. A segunda coluna mostra a distância ($2d$) entre as faixas, ou seja, a distância entre os centros das imagens obtidas na chapa fotográfica. Na terceira coluna temos a velocidade das partículas que foi calculada

assumindo o valor da razão carga/massa como sendo constante. Isto é expresso em termos de V_0 , ou seja, a velocidade das partículas quando não há nenhuma barreira.

TABELA 3.2 Resultados obtidos por Rutherford. (Adaptado, RUTHERFORD, 1905, p.809)

Número de folhas de alumínio	Distância 2d entre as faixas	Velocidade das partículas
0	1,46 mm	1,00 V_0
5	1,71 mm	0,85 V_0
8	1,91 mm	0,76 V_0
10	2,01 mm	0,73 V_0
12	2,29 mm	0,64 V_0

Com relação à diminuição de velocidade, Rutherford não estabelece nenhuma explicação sobre esse fato, apenas estabelece que a partícula alfa perde sua energia cinética quando atravessa as folhas de alumínio.

Em agosto de 1905 Rutherford publicou, na *Philosophical Magazine*, o artigo “Carga Carregada pelos Raios α e β do Rádio” (*Charge Carried by α and β Rays of Radium*). Nesse artigo, ele objetivava estimar o número de partículas alfa expelidas por 1 grama de rádio por segundo, bem como a sua carga. Como mostra a figura 3.9 uma pequena quantidade conhecida de brometo de rádio puro, em torno de 0,484 miligramas foi dissolvida em água e a solução foi uniformemente espalhada sobre a placa de metal A, que foi evaporada até a secagem e conectada a um dos pólos de uma bateria. O outro pólo foi aterrado.

Numa segunda placa B, separada paralelamente da placa A alguns milímetros, foi colocada num recipiente de metal C, conectado a um eletrômetro de quadrantes que indicava a corrente que passava entre as placas.

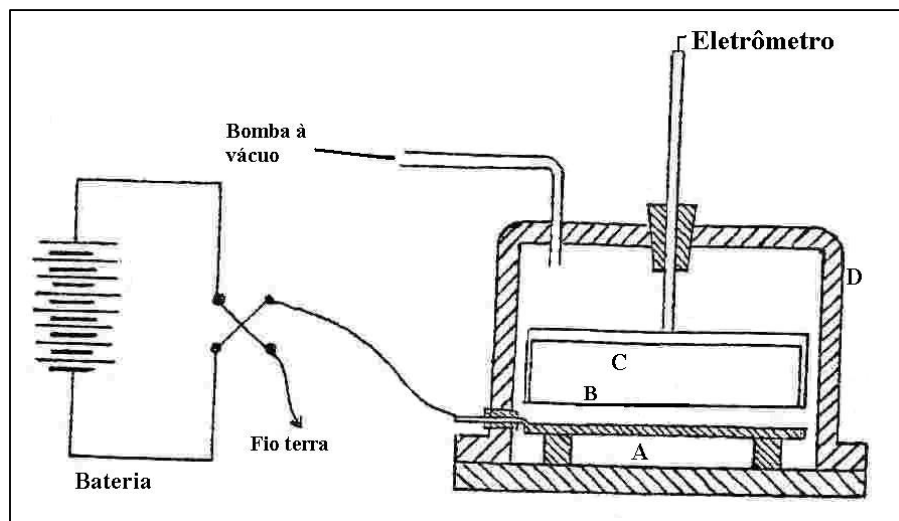


FIGURA 3.9 Esquema do equipamento montado por Rutherford. (RUTHERFORD, 1905a, p. 817).

Todo o instrumental foi colocado dentro de uma caixa de metal D. Rutherford esperava que, se as partículas alfa (provenientes da placa A) levassem com elas uma carga positiva, isto será comunicado a placa superior (B) onde elas são absorvidas. A pressão do ar interna produzia certa quantidade de ionização, mas era dissipada rapidamente. Na maioria das vezes era necessário trabalhar a uma pressão muito baixa. Importante lembrar que a quantidade existente de brometo de rádio na amostra era determinada pelo efeito dos seus raios gama num eletroscópio.

O esperado era que a placa A adquirisse carga positiva, no entanto diminuindo a pressão do gás, a corrente entre as placas diminuía diretamente como a pressão, mas finalmente alcançava um valor limitante, correspondendo a aproximadamente um milésimo do valor da pressão atmosférica. Esta corrente era praticamente a mesma se a placa inferior fosse carregada negativamente.

Por esse dado, nenhuma evidência correta poderia ser obtida, ou seja, a carga que as partículas alfa possuíam. Como Rutherford (1905a, p. 817) sugere, o fracasso na determinação da carga poderia ser devido à presença de vários elétrons lentos, liberados das

placas pela ação das partículas. No entanto, para diminuir esse efeito, o experimento foi refeito, mas a fonte de emissão de partículas alfa foi coberta por uma fina folha de alumínio. Foi então utilizado em torno de 0,19 miligramas de brometo de rádio. Ele sabia que as partículas alfa eram interrompidas por uma folha de alumínio de 0,0004 cm de espessura. Então, foi usada uma folha foi de 0,00034 cm de espessura. Assim, algumas partículas poderiam passar através da folha. E no intuito de reduzir, ao máximo possível, o número de elétrons emitido pelo impacto das partículas alfa na placa, a fonte de emissão foi colocada em um recipiente de cobre retangular.

Essa experiência foi repetida, mas com algumas alterações em 1908 por Rutherford e Geiger. Deixaremos para mais tarde as explicações de como Rutherford chegou nesses valores. Assumindo que as partículas alfa carregam a mesma carga iônica, carga essa mensurada por J. J. Thomson, sendo $3,4 \times 10^{-10}$ unidades eletrostática, ou $1,13 \times 10^{-19}$ Coulombs, o número de partículas alfa projetadas, por segundo, em direção à placa superior B foi $8,7 \times 10^6$. Isto é um número estimado para a quantidade de 0,484 miligramas de brometo de rádio. Rutherford lembra que metade das partículas alfa projetadas do rádio são absorvidas pela placa inferior, e pode ser facilmente deduzido que o número total de partículas alfa expelida por segundo de 1 grama de brometo de rádio é $3,6 \times 10^{10}$.

O número de partículas alfa obtido na quantidade de 0,19 miligramas de brometo de rádio foi $3,36 \times 10^{10}$; 0,484 miligramas liberam $3,96 \times 10^{10}$. A média dos três valores encontrados é $3,64 \times 10^{10}$, sendo esse o valor provável.

Rutherford, após analisar esses resultados concluiu:

...assumindo a composição do composto empregado, RaBr_2 , deduzo que o número total de partículas alfa emitidas por segundo de um grama de rádio, com sua atividade mínima, é $6,2 \times 10^{10}$. Já a atividade dos raios alfa do rádio em equilíbrio radioativo é quatro vezes este valor mínimo, e inclui três produtos, a emanção, rádio A e rádio C que emitem raios alfa. Nós podemos concluir assim que o número total de partículas alfa expelida por segundo de 1 grama de rádio em equilíbrio radioativo é quatro vezes o número a sua atividade mínima, e é igual a $2,5 \times 10^{11}$. (RUTHERFORD, 1905a, p. 819. Tradução nossa).

Rutherford também concluiu que esse experimento é uma das evidências que a partícula alfa expelida do rádio realmente transporta uma carga positiva. Fica claro no artigo que a intenção dele não era determinar o valor exato dessa carga, mas sim ter uma certeza que essa carga era de fato positiva.

No mesmo ano, 1905, apareceu a segunda edição do seu livro “*Radio-activity*”. Nessa segunda edição Rutherford escreveu sobre os aspectos mais difíceis e controversos da teoria da desintegração radioativa. Levando em consideração que as partículas alfa eram átomos de hélio projetados, ele então considerava que os átomos dos rádio-elementos como combinações de alguma substância conhecida, ou desconhecida e hélio. Percebe-se algo interessante aqui. Sabia-se que radio-elementos expeliam partículas alfa e que esses radio-elementos também produziam átomos de hélio, que era projetado com grande velocidade além de liberar muita energia. Ainda não havia nenhuma confirmação de que as partículas alfa eram átomos de hélio:

Nesta visão, urânio, tório e rádio na verdade são compostos por hélio. Porém, o hélio é retido em fortes combinações tais que não pode ser separado através de força física ou química, e, conseqüentemente, estes corpos se comportam como elementos químicos num senso químico usualmente aceito. (RUTHERFORD *apud* ANDRADE, 1964, p.91. Tradução nossa).

Foi também em 1905 que Rutherford foi convidado para proferir uma palestra na Universidade de Yale a convite do professor Hadley. No ano anterior ele recebeu como prêmio da *Royal Society* por seus trabalhos acerca da radioatividade a Medalha Rumford. Esse prêmio foi muito comemorado em Montreal na época, pois trouxe certo reconhecimento para aquela Universidade.

Em janeiro de 1906 aparece a segunda parte do artigo publicado no ano anterior na *Philosophical Magazine* “*Algumas Propriedades dos Raios α do Rádio – Segunda Parte*” (*Some Properties of the Rays from Radium – Second Paper*). Nesse artigo Rutherford retoma

os já citados resultados obtidos por Bragg e Kleeman. O ponto mais importante desse artigo está no fato da controvérsia existente entre ele e Becquerel com relação à passagem das partículas alfa pela matéria.

Segundo Rutherford (1906, p. 844), Becquerel publicou na *Comptes Rendus* n°. 11 de 11 de setembro de 1905, que o retardamento da velocidade das partículas alfa na passagem delas pelo alumínio, observado por Rutherford, não existia nas partículas alfa expelidas de rádio, ou de qualquer outro produto do rádio. Por isto ele concluiu que a teoria proposta por Bragg e Kleeman para explicar os resultados, da absorção dos raios alfa de rádio, era insustentável. Segundo Becquerel, as partículas alfa eram expelidas na mesma velocidade e essa velocidade não é alterada pela passagem na matéria. Para explicar a curvatura decrescente do caminho das partículas na passagem delas por ar, primeiro mostrado por Rutherford, Becquerel supôs que a massa da partícula alfa de algum modo aumenta em sua passagem pelo ar. Ou seja, Rutherford mostrou resultados bem diferentes dos encontrados.

Rutherford (1906, p.851) ao final do seu artigo conclui:

1. Os raios do rádio em equilíbrio radioativo são complexos e consistem em partículas alfa projetadas com diferentes velocidades;
2. As partículas alfa diminuem sua velocidade na sua passagem pelo ar e pelo alumínio;
3. A ausência do aumento da deflexão dos raios de uma espessa camada de rádio depois de atravessar alumínio, observada por M. Becquerel, é uma consequência necessária da *complexidade* dos raios;
4. A curvatura decrescente do caminho dos raios em ar, observada por M. Becquerel, também é uma consequência necessária da complexidade dos raios;
5. Há evidência de um distinto espalhamento dos raios do rádio C na sua passagem pelo ar.

Com relação ao item 3, essa *complexidade* das partículas alfa poderia ser pelo fato de não terem muitos dados sobre a partícula alfa, visto que não havia sido realmente estabelecido à relação carga/massa. Os dados eram apenas experimentais pelo método utilizando um campo magnético. Outro fato era que ainda não se tinha uma idéia conclusiva

que demonstrasse o porquê das partículas terem sua velocidade diminuída ao passarem pela matéria.

Em agosto daquele mesmo ano, 1906, Rutherford publicou um artigo na *Philosophical Magazine* intitulado “*Retardação das Partículas α do Rádio na Passagem através da Matéria*” (*Retardation of the Particle from Radium in passing through Matter*), onde ele analisou o espalhamento sofrido pelas partículas alfa ao atravessarem diferentes números de folhas de alumínio. O procedimento foi praticamente o mesmo usado e descrito na edição de julho da *Philosophical Magazine* de 1905, mostrado na figura 3.8.

A diferença é que, como mostra a figura 3.10, um tipo de fio metálico ativo (com os produtos do rádio) foi colocado dentro de um cilindro de metal D que foi soldado numa base. Uma barra vertical foi anexada em um dos lados desse cilindro. Havia um sulco perfurado nessa barra onde havia duas hastes móveis B e C. A haste B tinha uma pequena fenda por onde as partículas alfa passariam. Na haste C havia uma chapa fotográfica de sulfeto de zinco, onde as partículas alfa colidiam. As distâncias entre as hastes poderiam ser alteradas convenientemente. As imagens produzidas na chapa fotográfica foram observadas utilizando um microscópio e as folhas de alumínio eram colocadas sobre a placa B. Sobre o instrumento foi colocado um tubo de metal P, celado nas extremidades. Na extremidade inferior havia uma espécie de celante FF que conservava o vácuo dentro do instrumento.

Todo o instrumental estava fixado em uma armação de madeira e colocado entre os pólos de um eletroímã grande de forma que a fonte de emissão e a fenda estivessem em paralelo à direção do campo magnético. A extensão do campo magnético esta representado na figura 3.10 pelas linhas pontilhadas LL. O eletroímã tinha uma corrente constante de 12 ampères e a duração de exposição do campo magnético normalmente era de duas horas e a direção do campo era invertida cada dez minutos.

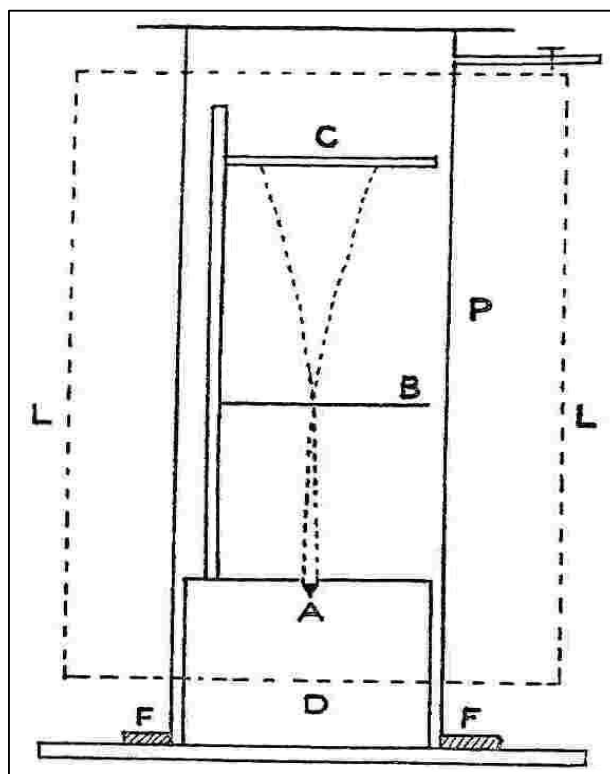


FIGURA 3.10 Esquema do instrumental usado por Rutherford. (RUTHERFORD, 1906, p. 860).

Após mensurações, Rutherford concluiu que as partículas alfa de fato diminuem sua velocidade após passarem pela matéria, no caso, pelas folhas de alumínio. Ele percebeu uma rápida diminuição daquilo que ele chamou de efeito fotográfico, ou seja, o fato do feixe de partículas alfa em impressionar a chapa fotográfica.

Esta diminuição rápida do efeito fotográfico não é atribuída a uma diminuição do número de partículas alfa que caem na placa, mas pela diminuição da impressão provocada pelas partículas. Segundo Rutherford (1906, p.868) os resultados gerais levaram-no a concluir que o efeito fotográfico devido a uma partícula alfa é aproximadamente proporcional a sua extensão em ar, ou seja, a sua distância percorrida. Por exemplo, as partículas alfa provenientes de um fio metálico coberto com rádio C, conseguem percorrer, em vácuo, aproximadamente 7 cm, produz sete vezes o efeito fotográfico que um feixe de raios depois

de atravessar uma camada de folhas de alumínio, cujo poder de interrupção da partícula é equivalente 6 cm de ar.

Rutherford também observou que a luminosidade das cintilações produzida pelas partículas alfa na tela de sulfeto de zinco diminuiu rapidamente do mesmo modo que a quantidade de partículas alfa decrescia pelo uso das folhas de alumínio, ou seja, era proporcional ao número de folhas de alumínio.

Na realidade Rutherford percebeu que as partículas poderiam ser muito úteis. Elas poderiam ser “projéteis” atômicos que, ao serem lançados sobre os átomos que compõem a matéria, tornaria possível o estudo de modo a entender sua estrutura.

Um dos últimos trabalhos de Rutherford enquanto professor da Universidade McGill, intitulado “*Deflexão Magnética e Elétrica dos Raios α do Rádio*” (*Magnetic and Electric Deflection of the α Rays from Radium*), foi publicado na *Physical Review* de 1906b. Rutherford nessa nota relata a deflexão elétrica utilizando o método fotográfico. Os raios passavam entre duas placas paralelas de 3,75 cm de comprimento e separadas por 0,21 mm. Essas placas serviram para determinar a largura do feixe de raios, como também para aplicar o campo elétrico. Desde que as placas estivessem próximas, um campo que corresponde a 20.000 volts por cm poderia ser obtido com 400 volts entre as placas sem risco de descarga elétrica, uma vez que o vácuo não era muito bom. A placa fotográfica foi colocada 4 cm acima das placas. O material ativo (tipo de um fio metálico) foi colocado do lado de fora do instrumento e as partículas entravam no campo elétrico através de uma fina folha de mica que cobria o material.

Rutherford percebeu que em campos elétricos fracos o traço do feixe de partículas sobre a chapa foi primeiro estendido. Em campos fortes, uma única banda se dividiu em duas, cada feixe maior que o feixe sem campo elétrico. As extremidades externas das faixas

estavam claramente definidas, e a distância entre as extremidades exteriores poderia ser medida.

Após analisar os resultados, Rutherford encontrou como valor da razão carga/massa, $5,0 \times 10^3$ e $5,2 \times 10^3$. Eram valores um pouco abaixo dos encontrados por outros cientistas da época, mas Rutherford atribuiu essas discrepâncias pelo fato dos experimentadores utilizarem como fonte de emissão de partículas alfa o rádio em equilíbrio com seus produtos, e conseqüentemente obtendo feixes de partículas não homogêneos, o que impediu de encontrar um valor decisivo.

Rutherford faz uma ressalva. Ele menciona o valor da relação carga/massa do hidrogênio obtido pela eletrólise da água, em torno de 10^4 . Comparando esse valor com o seu e dentro dos limites de erros, a massa da partícula alfa proveniente do rádio C é duas vezes a do átomo de hidrogênio. Ele conclui sua nota dizendo:

A questão se a partícula alfa é uma molécula de hidrogênio, um átomo de hélio, ou uma molécula de hélio que carrega duas vezes a carga iônica, foi discutido. Não é possível no momento definitivamente decidir entre estas possibilidades. Experiências adicionais estão em desenvolvimento para determinar o valor da relação e/m para as partículas alfa dos outros produtos de rádio, do tório e actínio. (RUTHERFORD, 1906, p. 853. Tradução nossa).

Também no ano de 1906 aparece outro livro escrito por Rutherford chamado “*Radio-active Transformations*”. Era uma publicação oficial da *Silliman Memorial Lectures* proferida por ele em 1905. Continha um pouco mais de informações que a segunda edição do seu livro *Radio-active*, onde dissertou sobre raios-X, raios catódicos, efeito Zeeman e os três tipos de radiações. Também foi traduzido para o alemão e teve uma boa recepção (Bassalo, 1999, p. 308).

Rutherford deixa a Universidade McGill e volta para a Inglaterra. Seus trabalhos desenvolvidos em Montreal serviram de base para o conhecimento da radioatividade até hoje. J.J. Thomson (*apud* Andrade, 1964, p. 95) acrescenta:

“A atividade científica de Rutherford nunca foi maior que quando ele estava em Montreal”

3.3 RUTHERFORD EM MANCHESTER.

Rutherford retornou a Inglaterra para chefiar o Laboratório da Universidade de Manchester, em 1907. A cátedra de Física da Universidade de Manchester pertencia ao alemão Sir Arthur Schuster (1851-1934), o grande espectroscopista. Schuster era um homem rico, herdeiro de uma fortuna, gastando boa parte em equipamentos para o seu laboratório.

Andrade (1964, p. 97) faz um belo relato de como era Manchester naqueles tempos. Segundo o autor, a cidade era um grande centro industrial e financeiro com aproximadamente 600 mil habitantes “*enegrecidos pela fumaça de centenas de chaminés industriais*”. Contudo, a cidade contava com notáveis centros de cultura como, por exemplo, a Biblioteca John Rylands e o *The Hallé Orchestra and Choir*, muito conhecido na Europa.

A Universidade de Manchester possuía um novo prédio para laboratórios. Este edifício continha salas de aulas, laboratórios, anfiteatro, equipamentos para engenharia elétrica e eletroquímica. Para Andrade (1964, p.99), o espaço disponível para Física era grande e os equipamentos eram muito bons para a época, sendo inferiores apenas para os do Laboratório de Física da *German University*, na Alemanha. Mesmo possuindo muitos equipamentos, Rutherford e também por seus colaboradores, costumava utilizar seus próprios equipamentos, ou seja, construído por eles mesmos.

Uma vez estabelecido em Manchester, Rutherford encontrou como assistente o jovem alemão Hans Geiger (1882-1945), famoso por ter criado o Contador Geiger, instrumento utilizado para detectar radioatividade. Ambos publicaram vários trabalhos associados aos estudos das partículas alfa.

Andrade (1964, p. 100) também acrescenta que em Manchester também havia um jovem auxiliar técnico chamado William Kay que auxiliou Rutherford durante todo o período em que esteve em Manchester.

Naquela época, a universidade não dispunha de muito elemento rádio para as pesquisas. Segrè (1987, p. 105), relata que havia menos de 20 miligramas. O rádio provinha das minas de Joachimstal (Áustria). A Academia de Viena emprestou aproximadamente 350 miligramas de brometo de rádio para Rutherford e para William Ramsay. Ramsay era da *University College* de Londres, na época em que receberam o empréstimo ele relutou em dar uma parte para Rutherford. Em compensação, em janeiro de 1908, a Academia de Viena emprestou mais 300 miligramas para Rutherford que posteriormente foi comprado pelo laboratório.

Rutherford nessa época também recebeu de Paris suprimento de resíduos de pechblenda contendo actínio e outros elementos radioativos.

Tendo a quantidade de rádio que precisavam, Rutherford e Geiger iniciaram as pesquisas. Importantes trabalhos foram publicados por eles no ano de 1908, que na verdade eram continuações dos experimentos que Rutherford havia feito no Canadá. Esses trabalhos, três no total, foram publicados em sequência na *Proceedings of the Royal Society of London* e objetivavam a criação de dois métodos para a contagem de partículas alfa de substâncias radioativas, a carga e a natureza das partículas alfa e o efeito de espalhamento sofrido pelas partículas alfa ao atravessarem a matéria.

Rutherford e Geiger publicaram em 1908 dois importantes artigos na *Proceedings of the Royal Society of London*. O primeiro deles, intitulado “Um Método Elétrico de Contagem de Partículas α de Substâncias Radioativas” (*An Electrical Method of Counting the Number of α - Particles from Radio-active Substances*), Rutherford e Geiger relatam dois

métodos criados por eles de contagem de partículas alfa emitidas por substâncias radioativas: o método elétrico e o método de cintilações.

Geiger estudou um método elétrico de contagem de uma única partícula alfa. A grande dúvida em relação a isso era o fato dos diferentes valores encontrados da carga unitária. Isso fica evidente com a justificativa dada pelos autores no artigo:

Houve a necessidade de um método de contar as partículas de alfa diretamente sem qualquer suposição da carga carregada por cada uma [...]. Se o número de partículas alfa expelida de uma quantidade definida de material radioativo pudesse ser determinado por um método direto, a carga carregada por cada partícula poderia ser conhecida imediatamente medindo a carga positiva total carregada pelas partículas alfa. E deste modo, deveria ser possível lançar alguma luz na pergunta se a partícula alfa carrega uma carga e ou $2e$, e assim resolver o problema mais urgente em radioatividade, [...] se a partícula alfa é um átomo de hélio. (RUTHERFORD e GEIGER, 1908, p. 141. Tradução nossa).

Geiger utilizou um método conhecido como ionização por colisão. Era um método desenvolvido por J. A. Thownsend que consistia na formação de íons a partir de um potencial elétrico muito grande.

A ionização produzida em um gás por uma única partícula alfa é sumamente pequena e seria difícil descobrir eletricamente esse efeito. Na tentativa de aprimorar esse fenômeno, foi proposto por eles um método elétrico: os íons produzidos pela passagem da partícula alfa por um gás geram um número grande de novos íons através de colisões. Deste modo seria possível aumentar o efeito elétrico devido a uma partícula alfa centenas de milhares de vezes. A entrada de uma única partícula num recipiente de teste seria indicada por um súbito desvio da agulha de um eletrômetro.

A experiência, portanto, para detectar uma única partícula alfa, consistiu que as partículas alfa pudessem ser expelidas através de um gás a baixa pressão exposta em um campo elétrico um pouco abaixo do valor de faíscação. Deste modo, a pequena ionização produzida por uma partícula alfa passando ao longo do gás poderia ser aumentada centenas de vezes. A súbita corrente através gás devido à entrada de uma partícula alfa no recipiente de

prova seria suficientemente aumentada para dar uma fácil movimentação mensurável da agulha do eletrômetro. Para esse método, eles dispuseram de um instrumento mostrado na figura 3.11.

O recipiente detector consistia em um cilindro de metal A, de 15 a 25 cm de comprimento, 17 cm de diâmetro, separado por um fio de cobre ao centro B, que atravessa uma tampa de ebonite na extremidade. O fio B usado na maioria das experiências tinha 45 mm de diâmetro. O cilindro foi esvaziado a uma pressão de 20 a 50 mm de mercúrio. O fio central estava conectado com um eletrômetro de Dolezalek (eletrômetro de quadrantes) e na parte externa do tubo em um terminal negativo de uma grande bateria. A tampa de ebonite C estava fixada em um pequeno tubo de vidro D de 5 mm de diâmetro que tinha uma abertura circular em torno de 15 mm de diâmetro na extremidade. Esta abertura pelas quais as partículas alfa entraram no recipiente detector estava firmemente coberta com uma fina folha de mica. Na maioria das experiências a espessura da folha de mica era equivalente, como poder de parada das partículas de alfa, a aproximadamente 5 mm de ar na pressão atmosférica. Na outra extremidade do tubo D estava fixado um tubo de borracha longo que estava fixado um longo tubo de vidro E de 450 cm de comprimento e 25 cm diâmetro.

Uma grande válvula reguladora F com uma abertura de 1 cm de diâmetro foi presa ao final do tubo de vidro próximo ao recipiente detector. O outro lado do tubo de vidro E foi selado por uma rolha G.

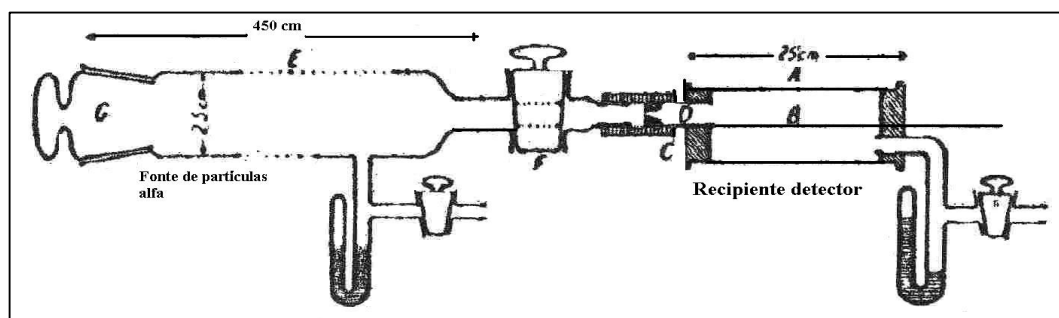


FIGURA 3.11 Esquema do instrumento utilizado por Rutherford e Geiger para o método elétrico. (RUTHERFORD e GEIGER, 1908, p. 143).

A fonte de partículas alfa foi depositada ao término do longo tubo E, conectado ao recipiente detector de tal modo que as partículas tiveram que atravessar um pequeno orifício para entrar no detector e percorrer em paralelo ao fio central B. Um fato interessante é de como eles dispuseram a fonte de emissão: a matéria ativa, na forma de um fino filme de aproximadamente 1 cm^2 de área estava depositada no final de um cilindro de ferro leve e oco que poderia ser movido ao longo do tubo de vidro do exterior por meio de um eletroímã. A razão pela qual a fonte de emissão estar depositada numa distância muito grande e o orifício de entrada de partículas alfa tão pequeno, esta no fato de que Rutherford e Geiger queriam que apenas uma única partícula do total milhões expelida pela fonte radioativa pudesse entrar no detector.

Quando a válvula reguladora F estava fechada, nenhuma partícula alfa poderia entrar no recipiente detector, e a estabilidade da agulha de eletrômetro poderia ser testada em intervalos durante as experiências.

Quando a válvula então era aberta, uma pequena fração do total de partículas alfa expelida por segundo passava através da abertura e penetrava no cilindro A, ou seja, a uma distância tão grande entre a fonte de emissão e o detector era devido ao fato de ser conveniente que apenas 3 a 5 partículas alfa pudessem penetrar no detector. Uma vez no detector, elas chocavam-se com as moléculas dos gases ali presente arrancando-lhes elétrons. Daí a formação de novos íons. Esses íons eram detectados pelo eletrômetro que marcava um determinado valor de ionização devido à diferença de potencial entre o cilindro A e o fio central B. Quando uma partícula alfa penetrasse no detector causando uma ionização, o eletrômetro marcaria um outro valor devido à nova diferença de potencial.

Como ressalta Andrade (1964, p. 104), era um método um pouco demorado para se trabalhar devido à demora de reposta do eletrômetro. Mais tarde, com um tipo aperfeiçoado de instrumento, o denominado eletrômetro de fio (*string electrometer*), eles puderam

aumentar a taxa de contar as partículas consideravelmente. O instrumento era composto de um fio extremamente fino localizado entre placas paralelas que responderam rapidamente a mudanças de carga. Era a primeira vez que se provou ser possível contar, de imediato, partículas atômicas, um avanço definitivo no estudo da física atômica.

As observações foram feitas dessa maneira. A fonte de partículas alfa foi uma placa de metal de $0,5\text{cm}^2$ exposta por algumas horas numa grande quantidade de emanção de rádio. Depois que a placa foi removida da emanção, cerca de 15 minutos depois, as partículas alfa provenientes desse material seria devido ao rádio C. Foi utilizado o rádio C porque eles sabiam que as partículas seriam emitidas na mesma velocidade também devido à meia vida do rádio C. Nessa mensuração em particular foi utilizado no recipiente de detector, ou de teste, dióxido de carbono numa pressão de 420 mm de Hg e a força eletromotriz aplicada foi de 1320 volts. A placa de metal ativa foi colocada a uma distância de 350 cm da abertura, que tinha 1,23mm de abertura.

As observações no número e a magnitude do deslocamento da agulha do eletrômetro devido às partículas alfa foram observadas num intervalo de 10 minutos. Os resultados encontrados estão na tabela 3.3.

Cada divisão da escala era igual a 2,5mm. A intensidade da radiação alfa decrescia em torno de 15% durante o período observado. Como forma de análise desses resultados, Rutherford e Geiger disseram que quando a válvula F estava fechada de forma que nenhuma partícula alfa poderia entrar no recipiente detector, o deslocamento máximo da agulha da posição zero, no decorrer de 10 minutos, não foi maior que três divisões na escala. Só duas ou três excursões de tal amplitude aconteceram naquele intervalo.

TABELA 3.3 Resultados obtidos do experimento de contagem. (RUTHERFORD e GEIGER, 1908, p. 145).

Tempo	Número de deslocamentos	Magnitude dos sucessivos deslocamentos numa escala.
1° minuto	4	11, 12, 10, 11
2° minuto	3	10, 11, 8
3° minuto	5	10, 9, 13, 8, 12
4° minuto	4	18* , 8, 12
5° minuto	3	10, 6, 10
6° minuto	4	9, 10, 12, 11
7° minuto	2	10, 11
8° minuto	3	11, 13, 8
9° minuto	3	8, 20*
10° minuto	4	8, 12, 14, 6
Média	3,5	10 divisões

Pela tabela acima, vemos que a média de deslocamento da agulha com a válvula aberta foi 10 divisões. Foram omitidos os pequenos deslocamentos menores que três divisões da escala. Com exceção dos dois números marcados com asterisco, cada deslocamento marcado na tabela foi devido a uma única partícula alfa. Os dois grandes deslocamentos marcados com asterisco são, cada um, devido à superposição dos efeitos devido à entrada de duas sucessivas partículas alfa no detector com diferença de poucos segundos de uma a outra. Isto foi visto prontamente da peculiaridade do movimento luminoso na escala. Como a agulha estava se movendo lentamente próximo do fim da escala causado pelo efeito de uma partícula alfa, foi comunicado um segundo impulso devido à entrada de outra partícula e isto a fez mover novamente mais rapidamente.

Tendo desenvolvido essa técnica, Rutherford e Geiger então começaram com a análise quantitativa. Séries de experimentos foram feitos para determinar o número de partículas alfa expelidas por segundo, de um grama de rádio, o mais preciso possível. O

número de partículas que entravam no recipiente detector ou de teste por minuto foi determinado pela contagem do deslocamento da agulha do eletrômetro.

O procedimento geral de uma das experiências foi o seguinte. Depois da atividade de raios gama terem sido exatamente medidos, foram feitas observações do número de deslocamentos, continuamente, para um intervalo de dez minutos. A atividade de raios gama era então novamente determinada, e outros dez minutos contados. Quando o número de partículas alfa que entravam na abertura tinha caído entre uma ou duas por minuto, o material ativo foi trazido mais próximo à abertura e observações continuaram como antes, num período de cerca de duas horas.

Nos experimentos eles usaram como fonte de emissão rádio C pelo fato de saberem a quantidade de rádio em equilíbrio com seus produtos pela intensidade de radiação gama.

Para os cálculos eles usaram a seguinte fórmula matemática:

$$n = \frac{QA}{4\pi^2} \quad \text{Eq. 1}$$

Onde n é a média de partículas que entram no recipiente de teste; Q é a média de partículas expelidas por segundo da fonte de emissão; A , área em cm^2 da abertura do recipiente detector, e r à distância em centímetros da fonte de emissão até a abertura. Já havia sido verificado e já citado também que as partículas alfa são projetadas igualmente em todas as direções, conseqüentemente a fração do total de partículas expelida pela fonte e que entram no detector é igual à área da abertura (QA) dividida pela área da superfície de uma esfera de raio igual para a distância da fonte da abertura. (Rutherford e Geiger, 1908, p. 152). Os resultados apresentados na tabela 3.4 foram extraídos do artigo. No recipiente detector foi

usada uma pressão de 37,5mm de Hg e uma força eletromotriz em torno de 1200 volts. O diâmetro da abertura foi 1,23mm.

A segunda coluna é referente aos valores da média de atividade de radiação gama da fonte em termos de miligramas de rádio puro em equilíbrio. A última é o número total de partículas alfa expelidas do rádio C expelidas por segundo em 1 grama do rádio em equilíbrio.

TABELA 3.4 Resultados obtidos por Rutherford e Geiger no experimento. (RUTHERFORD e GEIGER, 1908, p. 154).

Distância da fonte à abertura (cm)	Média de radiação gama da fonte (por mg de Ra)	Número de deslocamentos em 10 minutos	Número de partículas expelidas por grama
350	0,309	45	$3,06 \times 10^{10}$
350	0,154	25	$3,33 \times 10^{10}$
350	0,11	16	$2,96 \times 10^{10}$
150	0,055	49	$3,43 \times 10^{10}$
150	0,031	25	$3,11 \times 10^{10}$
		TOTAL = 160	MÉDIA = $3,18 \times 10^{10}$

A quarta coluna, na realidade, foi calculada baseada na equação 1, mas como foi usada a quantidade de raios gama emitida pelo rádio C, então, apenas isolando Q a fim de facilitar os cálculos, temos:

$$Q = \frac{4\pi^2}{A} \cdot n \quad \text{Eq. 2}$$

O número total Q_0 expelido para uma atividade de raio de gama que corresponde a 1 grama de rádio é determinado por:

$$Q_0 = \frac{Q}{\rho} = \frac{4\pi^2}{A} \cdot \frac{n}{\rho} \quad \text{Eq. 3}$$

Onde ρ é a atividade de raio gama da fonte em termos de 1 grama de rádio. Visto que n e ρ foram determinados experimentalmente, e r e A eram conhecidos, o valor Q_0 pôde então ser calculado. Os valores calculados para Q_0 , para cada experimento são dados, portanto, da última coluna da tabela 3.4 e serve como comparação aos valores para as diferentes observações.

Rutherford e Geiger (1908, p. 158) resumem os resultados obtidos da seguinte forma:

- a) Para uma determinada intensidade de radiação a uma determinada distância, a média de deslocamentos observado no eletrômetro em um determinado intervalo é independente da pressão ou natureza do gás, e também da ampliação de ionização provocada;
- b) O número de partículas alfa que entram no detector é proporcional à atividade da fonte (medida pelos raios gama) e inversamente proporcional ao quadrado da distância da fonte a abertura;
- c) Para uma determinada intensidade de radiação a uma determinada distância, o número de partículas alfa que entram no recipiente detector é proporcional à área da abertura;
- d) Usando rádio C como uma fonte de radiação as partículas alfa são projetadas, em média, igualmente em todas as direções.

Rutherford e Geiger, ao final, concluem que levando em conta as dimensões da abertura e do fio de cobre, o espalhamento do feixe de partículas em sua passagem pelo tubo e também pela folha de mica utilizada no recipiente detector, foi calculado que esta correção não pode ser mais que 3%. Fazendo a correção, o valor de Q_0 se torna aproximadamente $3,4 \times 10^{10}$. Ou seja, em média $3,4 \times 10^{10}$ partículas alfa são expelidas por segundo do rádio C presente em 1 grama de rádio em equilíbrio. Levando como uma suposição mais simples e

mais provável que um átomo de rádio emite uma partícula alfa, infere-se que em 1 grama de rádio $3,4 \times 10^{10}$ átomos são desintegrados por segundo.

Outro método aparece nesse artigo: o método de cintilações. Ao atingir uma tela de sulfeto de zinco a partícula alfa produzia uma cintilação, ou seja, impressionava a chapa fotográfica. Segundo os autores, era importante comparar o número de cintilações produzida na tela de sulfeto de zinco com o número de partículas alfa contadas pelo método elétrico para constatar se cada cintilação corresponde a uma única partícula alfa.

William Crookes, Elster e Geitel já tinham mostrado que as partículas alfa que se chocam em uma tela de sulfeto de zinco produziam várias cintilações (Rutherford, 1908). Em 1903, Crookes inventou um pequeno instrumento chamado “*espintariscópio*” que permitia visualizar pequenas cintilações: o choque de cada partícula com uma tela fluorescente produzia pequenos pontos luminosos. Sacks (2002, p. 288) lembrando suas memórias de infância diz que os espintariscópios “*foram brinquedos científicos da moda nas salas de estar...*”. Os espintariscópios eram muito populares e era facilmente adquirido no comércio como mostra esse anúncio (Figura 3.12).



FIGURA 3.12 Os Espintariscópios eram vendidos em lojas especializadas da década de 1940 e ainda hoje o são. Esse pequeno instrumento contém uma tela fluorescente e uma lente ocular. No seu interior, uma quantidade extremamente pequena de brometo de rádio. (SACKS, 2002, p.255).

Para isso, eles dispuseram de uma fina camada de sulfeto de zinco sobre uma placa de vidro que, através de um microscópio, era possível observar as cintilações. Para haver o máximo de precisão possível, foi usado o mesmo tubo de descarga E e abertura, coberta com a mica (Figura 3.11). O recipiente de teste também foi removido e no local foi adaptada a tela de sulfeto de zinco. Como no método elétrico, foi usado rádio C como fonte de emissão.

O microscópio usado tinha o poder de aumento de 50 vezes. As experiências foram feitas à noite em um quarto escuro. Não era tarefa fácil. Eles tinham que entrar no quarto, esperar um bom tempo até que os olhos se acostumassem com a falta de luz. Também era difícil de continuar contando por mais de dois minutos, pois os olhos tornavam-se cansados.

Por sugestão, eles acharam melhor iluminar ligeiramente a tela através de luz artificial para poderem manter os olhos focado na tela. À distância e a intensidade da fonte foram ajustadas de forma que entre 20 e 60 cintilações pudessem ser observadas por minuto. Era comum encontrarem algumas cintilações com a válvula F ainda fechada, devido à radioatividade natural e outros distúrbios. Neste caso, as cintilações foram contadas antes e depois de cada experiência, e foi subtraído do número contado com a válvula aberta. Era comum, segundo os autores, contar 100 cintilações e anotar o tempo com um cronômetro.

Os resultados de uma série de observações para intensidades variadas das radiações são mostrados na tabela 3.5. Tendo como diâmetro da abertura da válvula F em 123 mm coberta com mica e 200 cm a distância entre a fonte de emissão e a abertura, na coluna 1 temos o número calculado de partículas alfa por minuto; na coluna 2 o número observado de cintilações por minuto; e na coluna 3 a razão entre cintilações e o número de partículas (coluna 2/coluna 1).

TABELA 3.5 Resultados obtidos pelo método de cintilações (RUTHERFORD e GEIGER, 1908, p. 158).

I Número calculado de partículas alfa por minuto	II Número observado de cintilações por minuto	III Razão entre cintilações e o número de partículas
39	31	0,80
38	49	1,29
34	29	0,85
32	31	0,97
31	32	1,03
28	27	0,96
27	28	1,04
25	21	0,81
23	25	1,09
21	21	1,00
	TOTAL = 294	MÉDIA = 0,99

Rutherford e Geiger concluem que os resultados mostram claramente que, dentro do limite do erro experimental:

... cada partícula alfa produz uma cintilação em uma tela preparada corretamente de sulfeto de zinco. A concordância dos dois métodos de contar as partículas alfa tem em si mesmo uma forte evidência da precisão obtida contando as partículas alfa expelidas por grama de rádio pelo método elétrico. Está claro agora que nós temos dois métodos distintos, um elétrico e o outro óptico, para detectar uma única partícula, e que pode ser esperado que o emprego de qualquer método dê resultados corretos na contagem do número de partículas alfa. (RUTHERFORD e GEIGER, 1908, p. 158, tradução nossa).

Outra conclusão extraída desses experimentos, segundo os autores, é que há muitas razões para acreditar que uma partícula alfa é, na verdade, um átomo de hélio, há, portanto, dois métodos distintos de detectar a expulsão de um único átomo de hélio, um que depende de seu efeito elétrico, o outro da luminosidade produzida em cristais de sulfeto de zinco.

Como conclusão, Rutherford e Geiger (p. 160 – 161) resumem os resultados obtidos, entre os quais se destacam:

- 1) Empregando o princípio de amplificação de ionização através da colisão, o efeito elétrico devido a uma única partícula alfa pode ser amplificado para ser observado por um eletrômetro;
- 2) A magnitude do efeito elétrico devido a uma partícula alfa depende da voltagem empregada e pode ser variada dentro de amplos limites;
- 3) Este método elétrico pode ser empregado para a contagem de partículas alfa expelida de todos os tipos de matéria ativa que emite raios alfa (Rutherford e Geiger também utilizaram esse método com urânio, tório e actínio);
- 4) Utilizando rádio C como uma fonte de raios alfa, o número total de partículas alfa expelido por segundo de 1 grama de rádio foi contado com precisão. Para rádio em equilíbrio, este número é $3,4 \times 10^{10}$ e para cada um de seus três produtos de raio alfa;
- 5) O número de cintilações observadas em uma tela preparada corretamente com sulfeto de zinco é, dentro do limite de erro experimental, igual ao número de partículas alfa que incide como contado pelo método elétrico. Resulta disto que cada uma das partículas alfa produz uma cintilação.

Rutherford e Geiger encerram dizendo que esse método de amplificar o efeito de ionização também poderia ser empregado para determinar a quantidade de partículas beta expelidas.

Nós mostramos previamente que o princípio de amplificação de ionização através da colisão pode ser usado para estender amplamente nosso método de detecção de material radioativo. Cálculos mostram que sobre boas condições deveria ser possível por este método detectar uma única partícula beta, e, por conseguinte contar diretamente o número de partículas beta expelida de substâncias radioativas. (RUTHERFORD e GEIGER, 1908, p. 161. Tradução nossa).

Uma vez estabelecido o número de partículas alfa expelida de uma quantidade conhecida de matéria ativa, Rutherford e Geiger publicam na sequência o artigo onde determinaram o valor da carga positiva carregada pelas partículas.

O artigo na sequência foi o “*A Carga e a Natureza das Partículas α* ” (*The Charge and Nature of the α -Particles*). No artigo anterior, o objetivo era determinar o número de partículas alfa emitidas pela fonte radioativa, rádio C. Nesse artigo, o objetivo era

determinar o valor da carga carregada por cada partícula. Determinar esse valor parecia ser fácil. Ora, a carga carregada por cada partícula podia ser determinada medindo a carga total levada pelas partículas alfa expelidas por segundo de uma quantidade conhecida de rádio.

O problema, nesse caso, seria a fonte de radiação utilizada. O rádio C além de emitir partículas alfa, também emite partículas beta. Então o equipamento elaborado deveria conter um tipo de barreira para bloquear o efeito das partículas beta, não interferindo no resultado.

Rutherford já havia investigado no já citado artigo de agosto de 1905, as condições experimentais necessárias para a determinação da carga total carregada pelas partículas alfa.

Para isso, eles fizeram uma adaptação do experimento usado por Rutherford em 1905 como mostra a figura 3.13. Um cilindro de vidro H H de 4 cm de diâmetro tampados por outros dois tubos D e E. A fonte de radiação R anexada na tampa E. Na tampa D havia uma abertura que estava selada por uma tampa de ebonite F.

A câmara de teste era formada de 2 placas paralelas A e B separadas entre si por aproximadamente 2 mm. A abertura circular 1,92cm de diâmetro corta a superfície da placa B, que por sua vez foi coberta por uma folha de alumínio. A face superior da câmara AC consiste de uma superfície de latão de 2,5cm de abertura que na superfície inferior está coberta também com uma fina folha de alumínio. A placa B está conectada em um dos pólos de uma bateria. O outro pólo foi aterrado. A câmara AC que está isolada da placa B esta conectada em um dos quadrantes do eletrômetro de Dolezalek.

O equipamento, além de ser sido exaustado por uma bomba de vácuo, está localizado entre os pólos N e S de um campo magnético, assim as partículas alfa provenientes de R passaria por um forte campo magnético.

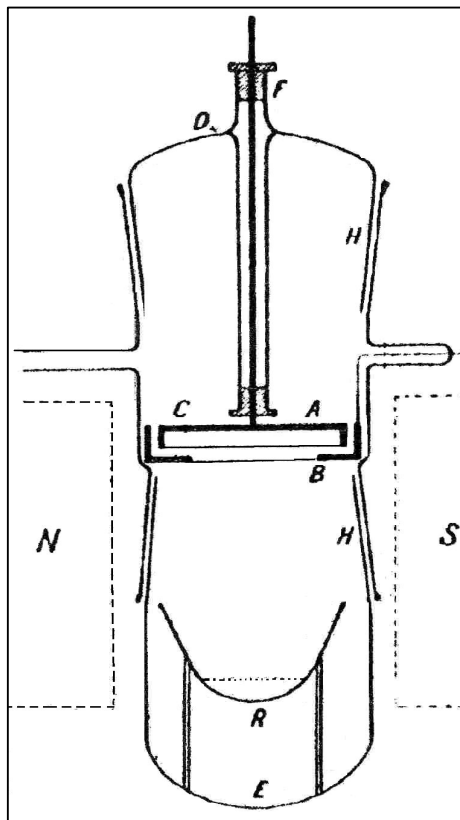


FIGURA 3.13 Esquema do equipamento utilizado por Rutherford e Geiger (RUTHERFORD e GEIGER, 1908a, p.163).

A presença do campo magnético tinha 2 propósitos. Antes de atingir a câmara de teste, as partículas alfa atravessam primeiro a fina folha de alumínio da placa B e isso faz com que elétrons seja liberados. Esse fato foi descoberto por J. J. Thomson e citado por Rutherford em 1905. Thomson determinou que um grande número de elétrons de baixa velocidade são liberados quando as partículas alfa passam através da matéria. A presença de cargas negativas afeta a câmara de teste e conseqüentemente mascara o efeito das cargas positivas das partículas alfa. Mas na presença de um campo magnético, esses elétrons descreveriam órbitas muito pequenas e retornariam para a superfície de onde eles foram emitidos.

A outra razão que justifica o uso de um campo magnético está no fato de o rádio C utilizado como fonte também emite partículas beta e, conseqüentemente, cargas negativas.

A fonte foi depositada a 3,5 cm abaixo da câmara de teste e a força do campo magnético foi ajustada para que as partículas beta fossem desviadas completamente da câmara de teste.

Um pequeno recipiente de vidro no formato de um tampão, representado na figura 3.13 por R, foi anexado à tampa de vidro E por um tubo de vidro de aproximadamente 8 cm de comprimento. Este estava preenchido com mercúrio e emanção, proveniente de aproximadamente 40 miligramas de rádio introduzido, com a ajuda do mercúrio, ao topo do tampão. O nível do mercúrio é representado pela linha pontilhada na figura 3.13.

A emanção foi deixada no tampão por mais de três horas. A superfície interna do tampão agiu então como uma fonte da radiação alfa muito intensa. O mercúrio foi deixado por mais de 3 horas até que o rádio C fosse depositado. Após esse período o mercúrio foi removido.

A quantidade de rádio C depositada foi calculada pela medição da sua atividade de raios gama, cujo eletroscópio foi colocado a alguns metros de distância do equipamento.

Para os cálculos foi proposto o seguinte raciocínio: Na câmara de teste, a placa superior (AC) recebia as cargas positivas mesmo que a placa inferior (B) estivesse carregada positivamente ou negativamente.

No primeiro caso, utilizando a mesma simbologia usada pelos autores, i_1 , o potencial na placa inferior era $+V$. No segundo caso, i_2 , o potencial era $-V$, sendo que nesse caso o potencial era sempre menor que i_1 porque dependia do grau de exaustão, logo:

$$i_1 = i_0 + nE \quad \text{Eq. 4}$$

onde n é o número de partículas alfa por segundo passando em direção a placa superior e E é a carga de cada uma; $E i_0$ a corrente que passa através do gás devido à ionização do gás residual pela passagem das partículas alfa.

Se trocar a voltagem, a corrente de ionização é igual em magnitude, porém de direção inversa, então:

$$i_2 = nE - i_0 \quad \text{Eq. 5}$$

Somando as duas equações, temos:

$$nE = \frac{1}{2}(i_1 + i_2) \quad \text{Eq. 6}$$

Desde que Q seja a quantidade de rádio C medido em qualquer instante em termos de raio gama devido à 1g de rádio e N o número de partículas alfa expelida por segundo por grama de rádio, logo QN é o número total de partículas alfa expelida por segundo da fonte R.

A fração total do número de partículas alfa expelida por R que atinge a placa superior é dada por K. Logo, $n = KQN$, onde K e Q são medidos e N é conhecido da contagem experimental. Substituindo na formula, temos:

$$E = \frac{i_1 + i_2}{2KQN} \quad \text{Eq. 7}$$

A fração K do total de partículas alfa que atinge a placa AC foi determinada assumindo que as partículas alfa são emitidas igualmente em todas as direções. Segundo os autores, a precisão dessa hipótese foi verificada em outro experimento, no entanto eles não mostram de que forma isso foi realmente verificado. Sabendo que a fonte era proveniente de

uma área sensível, a superfície foi dividida em anéis concêntricos e determinado o valor de K para cada área. O valor K no experimento de contagem foi de $3,4 \times 10^{10}$.

O resultado no experimento 1, que assumia +V, eles encontraram que $E = 9,2 \times 10^{-10}$. No experimento 2, -V, $E = 9,4 \times 10^{-10}$. A média foi, portanto, $E = 9,3 \times 10^{-10}$, ou seja, esse é o valor da carga carregada pela partícula alfa originária do rádio C.

Um dado importante aparece nesse artigo com relação à natureza das partículas alfa:

Por outros dados é conhecido que as partículas alfa de todos os produtos radioativos foram examinadas como idênticas. Conseqüentemente nós podemos concluir que cada partícula alfa, independente de sua fonte, sob certas condições, carrega a mesma carga.... (RUTHERFORD e GEIGER, 1908a, p. 168. Tradução nossa.).

Rutherford e Geiger também compararam esse valor com o valor da carga do átomo de hidrogênio. Townsend (*apud* Rutherford e Geiger, 1908) observou, a partir da ionização do gás liberado pela eletrólise do oxigênio, que cada partícula carrega a carga de 3×10^{-10} unidades eletrostáticas.

Medidas da carga carregada por um íon em gases foram realizadas por outros cientistas como Thomson, em 1903, H. A. Wilson, 1903 e Millikan e Bergman, em 1908. Os valores obtidos de e encontrados foram (em unidades eletrostáticas):

- Thomson = $3,4 \times 10^{-10}$
- Wilson = $3,1 \times 10^{-10}$
- Millikan = $4,06 \times 10^{-10}$

A partir desses números, o valor da carga carregada por uma partícula alfa ($9,3 \times 10^{-10}$ unidades) é entre $2e$ e $3e$. Numa visão mais ampla, a carga e carregada pelo átomo de hidrogênio é a unidade fundamental da eletricidade, em razão disso, os autores concluem

que a carga carregada por uma partícula alfa é um múltiplo integral de e , e que pode ser $2e$ ou $3e$. Percebe-se certa incerteza nos valores por parte dos autores.

Adiante eles buscam provar baseados em outros dados obtidos de estudos de substâncias radioativas que a partícula alfa carrega a carga $2e$.

Um desses estudos foi baseado no período de transformação do rádio. Os autores citam o trabalho de Boltwood, de 1908, onde mostrou que o rádio tem metade de sua massa transformada (half transformed) em 2000 anos. Sendo P o número de átomos de hidrogênio em 1 grama de hidrogênio, então o número de átomos de rádio presente em 1 grama de rádio é $P/226$. O valor 226 se refere ao peso atômico do rádio.

Se λ é a constante de transformação do rádio, então o número de átomos de rádio transformados por segundo por grama de rádio é $\lambda P/226$. Sobre a provável idéia de que cada átomo “transformado” expela uma partícula alfa, este número então é N partículas alfa expelida por segundo por grama.

O valor N vem do número obtido da contagem das partículas alfa, que é $3,4 \times 10^{10}$, logo:

$$\frac{\lambda P}{226} = 3,4 \times 10^{10} \quad \text{Eq. 8}$$

Pelos dados da eletrólise da água, é conhecido que:

$$\begin{aligned} P &= 9,6 \times 10^4 \text{ unidades eletromagnéticas.} \\ &= 2,88 \times 10^{14} \text{ ES unidades.} \end{aligned}$$

Onde e é a carga carregada pelo átomo de hidrogênio. Dividindo uma equação pela outra, e substituindo o valor de $\lambda = 1,09 \times 10^{-11}$ deduzido pela medição de Boltwood, têm-se $e = 4,1 \times 10^{-10}$ unidades eletrostáticas.

Segundo Rutherford e Geiger (1908a), poderia haver certos erros experimentais na determinação da carga e por parte dos outros cientistas. A partir do momento que, experimentalmente, Rutherford e Geiger encontraram que a partícula alfa carrega uma carga igual a $9,3 \times 10^{-10}$ unidades, e se cada partícula carrega um valor de $2e$, a carga do átomo de hidrogênio, portanto é algo em torno de $4,65 \times 10^{-10}$ unidades. Esse valor é um pouco maior do que foi encontrado e já citados por Thomson, Wilson e Millikan.

Numa forma de justificar essa diferença de valores com os resultados dos outros cientistas, Rutherford e Geiger lançam algumas considerações sobre os prováveis erros cometidos pelos cientistas. Esses erros são de ordem experimental que, no entanto, são difíceis de serem excluídos ou controlados.

Não é nossa intenção de qualquer forma criticar a precisão das medidas feitas por tais experimentadores, mas nós desejamos chamar atenção que há fontes de erros que estão sempre presentes nas experiências deles e que é sumamente difícil eliminá-las. (RUTHERFORD e GEIGER, 1908a, p. 170. Tradução nossa).

Mesmo admitindo esses erros experimentais, eles analisam os dados como um todo e concluem com alguma certeza que as partículas alfa carregam uma carga $2e$, e esses valores de e não são muito diferentes dos $4,65 \times 10^{-10}$ unidades eletrostáticas encontrados.

Com relação à natureza das partículas alfa, Rutherford em 1906 mostrou a relação da carga na partícula alfa sobre sua massa observando o desvio da partícula alfa dentro de um campo elétrico e magnético. Essa razão foi igual a $5,07 \times 10^3$ num sistema eletromagnético. O valor correspondente de e/m para o átomo de hidrogênio na eletrólise é $9,63 \times 10^3$.

Como forma de resumir esses dois trabalhos, podemos entender que sabendo o número de partículas alfa expelidas por segundo em um grama de rádio da experiência de contagem (elétrico e cintilação que foi $3,4 \times 10^{10}$), a carga levada por cada partícula foi então determinada medindo a carga positiva total levada por todas as partículas alfa expelidas. Foi encontrado que cada partícula alfa carregava uma carga positiva de $9,3 \times 10^{-10}$ unidades eletrostáticas. De uma consideração da evidência experimental da carga levada pelos íons em gases, foi concluído que a partícula alfa carrega duas unidade de carga ($2e$), e que o valor da carga unitária do átomo de hidrogênio era igual a $4,65 \times 10^{-10}$ unidades (mensurada por Thomson). Fazendo uma comparação do valor conhecido da razão e/m para a partícula alfa com a do átomo de hidrogênio, resulta a idéia que uma partícula alfa é um átomo projetado de hélio que leva duas cargas.

Geiger publicou um artigo na *Proceedings of the Royal Society of London*, em julho de 1908. Entitulado “*Sobre os Espalhamentos das Partículas α pela Materia*” (*On the Scattering of the α -Particles by Matter*). Nesse estudo Geiger relata que no decorrer das pesquisas realizados por ele e Rutherford sobre a contagem de partículas alfa a partir de 1 grama de rádio, havia um interesse no espalhamento sofrido pelas partículas alfa ao atravessarem a matéria.

Na realidade esse tipo de observação já havia sido feito por Rutherford, num artigo de 1906, sobre esse tipo de espalhamento. Geiger também faz referências a outros cientistas que também discutem esses espalhamentos como Kucera e Masek em 1906, W. H. Bragg em 1907, L. Meitner em 1907 e E. Meyer em 1907. No entanto, Geiger não faz nenhuma citação sobre os resultados obtidos por estes pesquisadores no decorrer do artigo.

Esse efeito de espalhamento também ocorria com as partículas beta. Um estreito feixe de partículas beta após atravessarem uma folha de metal emerge em um feixe não definido. Rutherford no seu estudo de 1906 percebeu que quando as partículas alfa

atravessavam uma estreita fenda coberta com uma fina folha de mica produzia uma imagem estendida numa chapa fotográfica. No entanto, quando não havia nenhuma cobertura na fenda, a imagem produzida era bem definida.

Geiger realiza algumas observações utilizando o instrumental mostrado abaixo na figura 3.14.

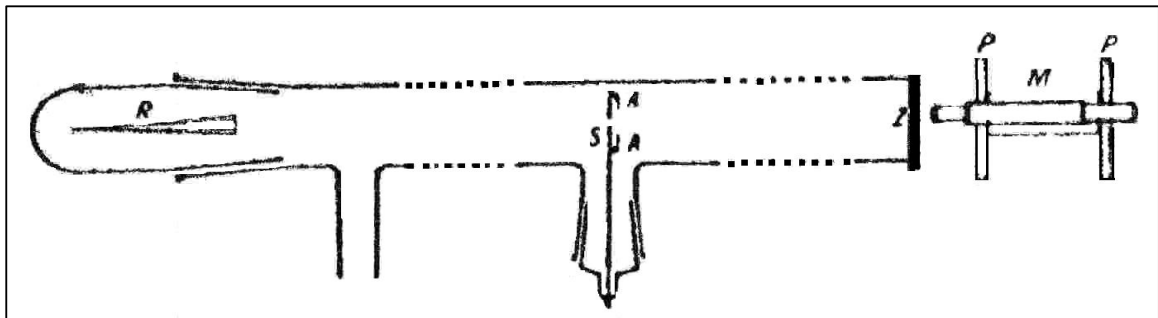


FIGURA 3.14 Esquema do equipamento utilizado por Geiger. (GEIGER, 1908, p. 174)

O instrumental consistia em um tubo de vidro de aproximadamente 2 metros de comprimento e 4 cm de diâmetro. A fonte de emissão de partículas alfa, provenientes do brometo de rádio (RaBr_2), estava depositada em um tubo R. A extremidade do tubo, que era menor que 2mm diâmetro, estava fechado hermeticamente por uma fina folha de mica pela quais as partículas alfa poderiam escapar livremente. Em seguida, as partículas alfa passariam por uma estreita fenda S de aproximadamente 0,9mm. Na fenda S havia um pequeno suporte (AA) utilizado para alojar metais como o ouro e o alumínio.

Após passarem por essa fenda, as partículas formariam imagens em uma tela fosforescente Z. A contagem das partículas alfa que atingiram a tela foi determinada pelo método de cintilações com o auxílio de um microscópio móvel M cujo poder de ampliação era de 50 vezes. A área da tela que poderia ser vista pelo microscópio era de aproximadamente 1 mm².

O microscópio estava montado em uma superfície de deslizamento PP de forma que as cintilações produzidas a distâncias variadas do centro da fenda poderiam ser observadas. A posição real do microscópio era lida em milímetros por uma escala fixada na superfície de deslizamento.

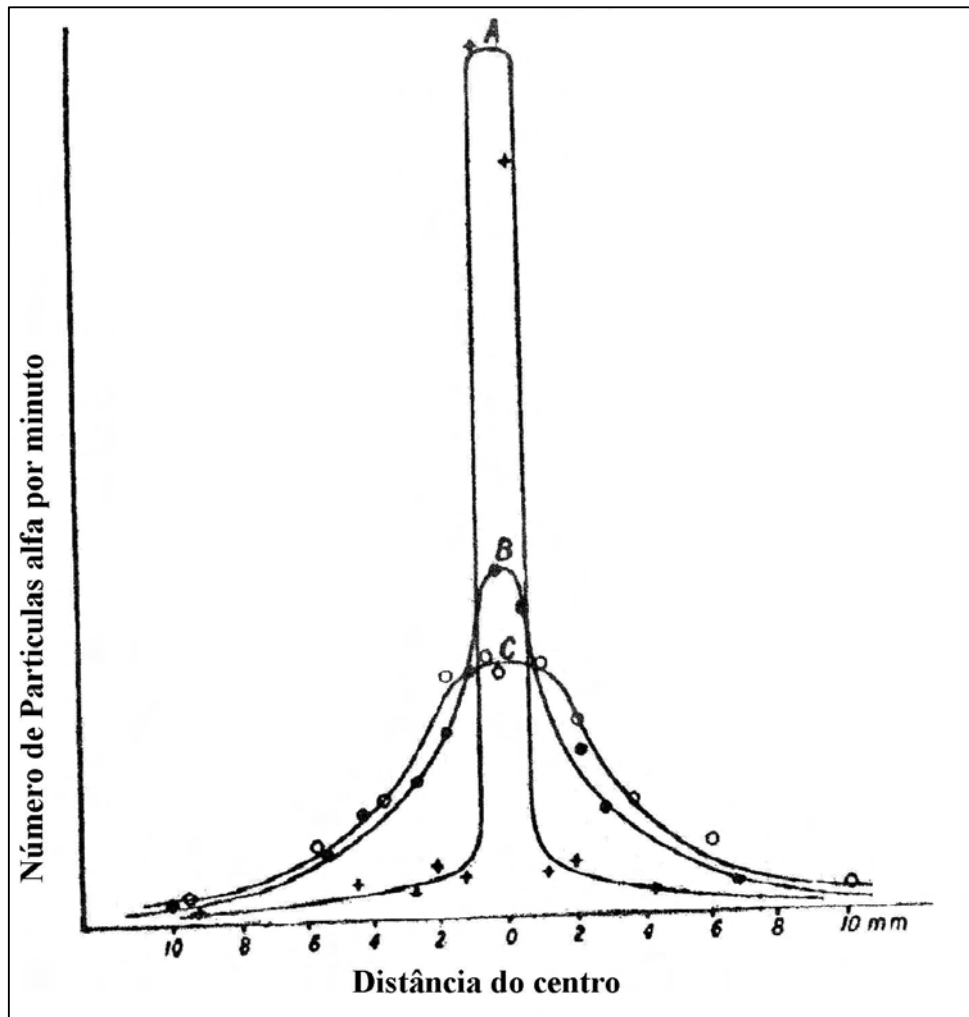
Geiger relata que no primeiro experimento ele utilizou rádio C que foi depositado em um pequeno pedaço de metal, mas devido à alta taxa de decaimento radioativo tornou o experimento impossível de obter resultados definitivos. A saída encontrada foi utilizar o brometo de rádio que foi depositado no tubo R sob baixa pressão.

Os resultados obtidos por Geiger nesse artigo estão apresentados no gráfico 3.1. A curva A mostra a distribuição das cintilações em vácuo onde não havia nenhum material na fenda S. É notável no gráfico que a maioria das cintilações observadas estão centradas no meio da tela. A explicação dada por Geiger para as cintilações observadas fora do centro da tela é devido à existência de um pouco de ar dentro do tubo. Era difícil conseguir um vácuo perfeito.

A curva B mostra o espalhamento das cintilações decorrente do uso de uma folha de ouro na fenda. Geiger não menciona a espessura dessa folha, mas diz que o poder de interrupção de uma folha corresponde a aproximadamente 1 mm de ar. Na curva C, ele utilizou 2 folhas de ouro.

Geiger também utilizou uma chapa de alumínio, mas “*a chapa de alumínio mostrou claramente o efeito de espalhando, mas em uma extensão muito menor que folha de ouro, se equivalentes espessuras fossem usados*” (GEIGER, 1908, p. 176, tradução nossa).

GRÁFICO 3.1 Resultados obtidos por Geiger em seu experimento sobre os espalhamentos das partículas alfa através das folhas de ouro (GEIGER, 1908, p. 176).



Geiger concluiu que as observações dão uma evidência direta que há um espalhamento muito acentuado das partículas alfa ao atravessarem a matéria. Adiante ele encerra o artigo dizendo que:

As experiências estão sendo realizadas com todas as substâncias para as quais é possível adquirir uma estreita prova na tentativa do estabelecimento de alguma conexão entre o poder de espalhamento e o poder de interrupção destes materiais. Uma investigação mais profunda nos permitirá também tratar do assunto de um ponto de vista teórico. (GEIGER, 1908, p. 177, tradução nossa).

A explicação para tal efeito pode ser entendida admitindo que, na época, tinham em mente o modelo atômico de Thomson. Quando uma partícula alfa atravessa o metal sofre um grande número de pequenos desvios em direções aleatórias, ou seja, ao encontrar um átomo da folha do metal, no caso ouro, cada encontro provoca um pequeno desvio. Quanto mais fina é a folha de ouro, menor a probabilidade da partícula alfa encontrar um átomo no decorrer do seu percurso e, conseqüentemente, apresentar pequenos desvios. Essa probabilidade de encontros aumenta quanto maior o número de folhas forem utilizadas, conforme mostra o gráfico 3.1.

O ano de 1908 foi muito promissor para Rutherford. Na primavera daquele ele recebeu o prêmio Bressa da Academia de Ciências de Turim, na Itália. Esse prêmio era dado todos os anos aos melhores livros sobre ciências experimentais. O valor do prêmio foi de 384 libras, valor muito bom para a época (Andrade, 1964, p.107).

Outro prêmio importante foi o Nobel em Química. O anúncio ocorreu em novembro de 1908. No mês seguinte ele foi para Estocolmo para se apresentar. A cerimônia foi organizada pela *Swedish Royal Academy of Science*.

No ano seguinte além de Geiger continuar seus estudos sobre as partículas alfa ele teve como assistente Ernest Marsden (1889 – 1970). Naquela época, Marsden tinha apenas 20 anos de idade. Andrade (1964, p. 111) relata um fato interessante sobre essa época. Segundo o autor, Rutherford em uma de suas últimas palestras narrou o seguinte fato:

Um dia Geiger veio até mim e disse ‘Você não acha que o jovem Marsden, que eu estou treinando em análises radioativas, deveria começar uma pequena pesquisa?’ [...] Eu respondi ‘Por que não o deixe ver se alguma partícula alfa pode se espalhar por um grande ângulo?’ Eu posso dizer com confiança, eu não acreditei que haveria. Até onde sabíamos, a partícula alfa era uma partícula maciça, muito rápida e com muita energia, e você poderia mostrar que se o espalhamento ocorresse era devido ao efeito acumulado de vários pequenos desvios e a chance de uma partícula alfa se dispersar para trás era muito pequena. Então eu me lembro que dois ou três dias mais tarde, Geiger veio com grande excitação ao meu encontro dizendo, ‘Nós conseguimos algumas partículas alfa se dispersando para trás....’ Definitivamente era o evento mais incrível que já havia acontecido em minha vida. Era quase tão

incrível quanto se você arremessasse um projétil de 15 polegadas em um pedaço de pano de seda e ela voltasse e atingisse você. (ANDRADE, 1964, p.111).

O fato a que Rutherford estava se referindo resultou o artigo publicado na *Philosophical Magazine*, intitulado “*Sobre a Reflexão Difusa das Partículas α* ” (*On a Diffuse Reflection of the α -Particles*). Como Rutherford disse, era possível que ocorressem tais espalhamentos, ou dispersões, para trás, mas o número encontrado por Geiger e Marsden foi muito grande. No artigo eles fazem prévias considerações sobre o já conhecido espalhamento ocorrido pelas partículas beta. Com relação às partículas alfa eles observaram:

Uma pequena fração de partículas alfa incidindo sobre uma placa metálica tem sua direção mudada em tal grau que elas emergem no ponto de incidência. (GEIGER E MARSDEN, 1909, p. 495, tradução nossa).

A sequência de experimentos para desvendar o modo de como ocorria tais fatos tiveram como objetivos:

- a) A quantidade relativa de reflexões em diferentes metais;
- b) A quantidade relativa de reflexões variando a espessura do metal;
- c) A fração de partículas alfa incidentes que são refletidas.

A quantidade relativa de reflexões em diferentes metais foi investigada pelo já conhecido método de cintilações. Foi utilizado o mesmo tubo descrito no artigo de Geiger de 1908 onde foi empregada uma intensa fonte de partículas alfa, como mostra a figura 3.15. A fonte de radiação era um tubo de vidro cônico AB. Na extremidade desse tubo, R, foi celada hermeticamente por uma folha de mica. A espessura dessa folha era equivalente a 1 cm de ar de forma que as partículas alfa poderiam passar facilmente através dela.

Havia, dentro do tubo gás a baixa pressão e a fonte de emissão era aproximadamente a 20 miligramas de RaBr_2 . Uma tela de sulfeto de zinco S foi fixada atrás de uma placa de chumbo P de tal modo que nenhuma partícula alfa poderia atingi-la

diretamente. Quando um refletor era colocado na posição RR numa distância em torno de 1 cm a frente da extremidade do tubo, as cintilações poderiam ser observadas. É claro que partículas beta também foram refletidas.

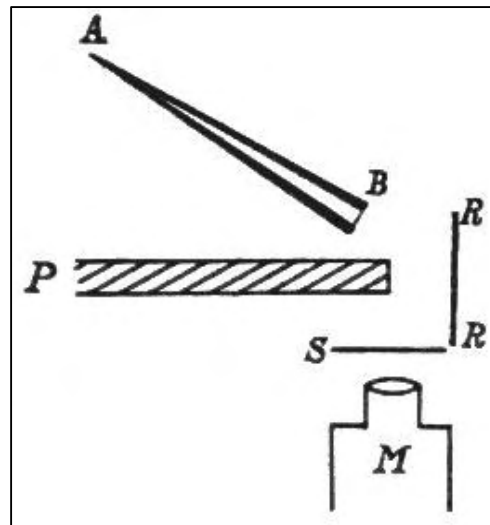


FIGURA 3.15 Esquema do equipamento utilizado por Geiger e Marsden. (GEIGER E MARSDEN, 1909, p.496).

Utilizando um microscópio (M) de baixo poder de resolução, o número de cintilações por minuto sobre uma área, em milímetros quadrados definidos, da tela de sulfeto de zinco foi contado com refletores de diferentes materiais. Cuidados foram tomados para que os diferentes tipos de refletores fossem colocados exatamente na mesma posição.

Geiger e Marsden relatam que esperavam que o número de partículas alfa refletidas da placa poderia ser diferente em diferentes direções, e dependeria também do ângulo de incidência. No entanto, nesse equipamento montado por eles, nenhuma diferença apreciável foi achada para diferentes ângulos.

Isto se deve ao fato que, devido à necessidade de se ter um mesmo tubo perto do refletor, o ângulo de incidência variou muito. Uma investigação da variação do efeito com os

ângulos de incidência e emergência necessitaria de uma fonte intensa e homogênea de raios alfa, condição difícil de obter.

A tabela 3.6 mostra os resultados obtidos. Na coluna 1 o metal usado como refletor; na coluna 2, o peso atômico; na coluna 3 o número de cintilações observadas por minuto e, na coluna 4, a razão entre o peso atômico e o número de cintilações.

TABELA 3.6 Dados obtidos sobre o experimento de espalhamento. (GEIGER E MARSDEN, 1909, p. 497).

1 Metal	2 Peso atômico, A	3 Número de cintilações por minuto, Z	4 A/Z
Chumbo	207	62	30
Ouro	197	67	34
Platina	195	63	33
Estanho	119	34	28
Prata	108	27	25
Cobre	64	14,5	23
Ferro	56	10,2	18,5
Alumínio	27	3,4	12,5

Pela tabela 3.6 observamos que a razão peso atômico sobre o número de cintilações diminui na medida em que o peso atômico decresce. No caso do chumbo, no entanto, isso não ocorre. Geiger e Marsden acreditam que isso ocorreu devido a leves impurezas presentes no chumbo.

Geiger e Marsden advertiram que os valores dessa tabela foram corrigidos porque eles observaram que mesmo na ausência de qualquer refletor, em torno de uma cintilação por minuto foi observada. Isso acontecia devido à reflexão das partículas alfa em sua passagem pelo ar.

Na quarta coluna cujos valores são da razão peso atômico (A) pelo número de cintilações (Z), os valores não correspondem quando se faz a devida operação matemática. Pode ter sido um equívoco cometido por Geiger e Marsden, mesmo porque no artigo não há nenhuma outra informação a respeito desses valores encontrados, no entanto, independente dos valores colocados naquela coluna, a conclusão que quanto maior o peso atômico do metal, maior o número de cintilações é válida.

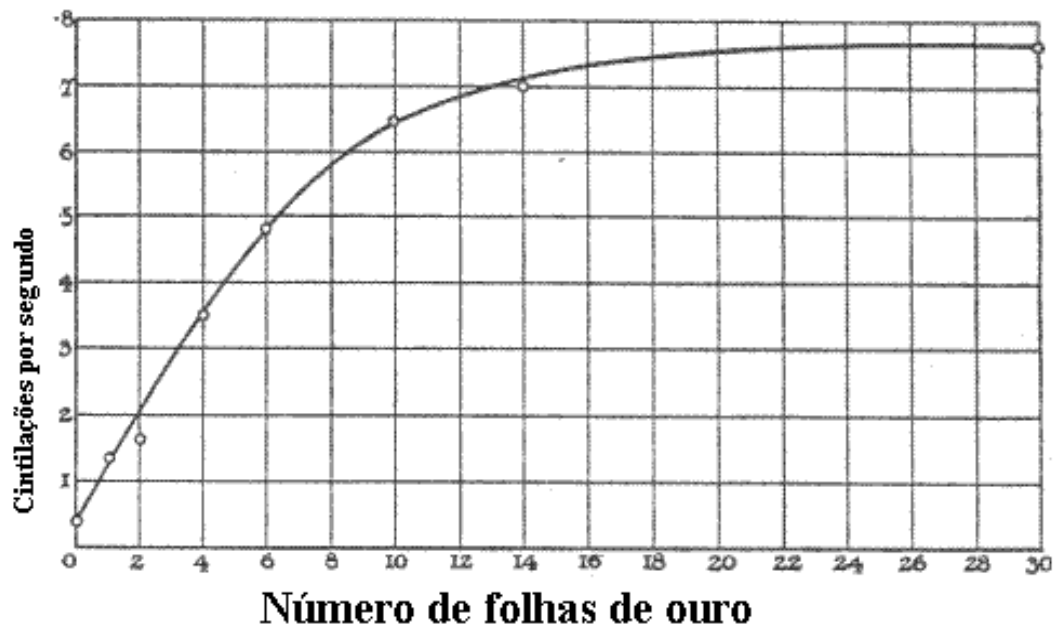
É interessante notar, na visão deles, que para partículas beta o número de partículas refletidas também diminui com o peso atômico do refletor. Isso foi observado em 1906 por McClelland. No entanto para partículas beta o número refletido pelo ouro é algo duas vezes maior que o alumínio, para partículas alfa a mesma relação atinge aproximadamente vinte vezes. Ou seja, as partículas alfa se refletem mais, e por isso produzem imagens difusas na tela de sulfeto de zinco.

Com relação ao segundo ponto de investigação, sobre a quantidade relativa de reflexões variando a espessura do metal, Geiger e Marsden constatarem que o número de partículas refletidas varia com a espessura do metal utilizado como refletor. Para isso eles dispuseram de finíssimas folhas de ouro. O ouro foi utilizado porque ele pode ser obtido em folhas uniformes e muito finas. Muitas folhas foram utilizadas e cada uma, em relação ao poder de interrupção pelo ar, era equivalente a 0,4mm de ar.

O gráfico 3.2 foi extraído do artigo e mostra o número de cintilações. Cada valor foi ajustado com o número de reflexões pelo ar, ou seja, a cada leitura foi subtraído ao número de cintilações devido à passagem das partículas através do ar. O primeiro ponto na curva representa o número de cintilações observadas devido apenas à placa de vidro deixado sozinha enquanto o refletor, o último ponto (marcando 30 folhas de ouro) dá o número das cintilações quando uma espessa placa de ouro foi usada.

Geiger e Marsden comentam que uma curva semelhante a essa foi obtida sobre os efeitos de espalhamento das partículas beta. Isso mostra que a reflexão não é efeito de superfície, mas um efeito de volume, ou seja, depende do número de camadas do metal utilizado como refletor.

GRÁFICO 3.2 Número de cintilações pela quantidade de folhas de ouro. (GEIGER E MARSDEN, 1909, p. 498).



Surge então um fato interessante. Quando comparado com uma espessura de uma folha de ouro onde uma partícula alfa pode penetrar, o efeito é confirmado mesmo utilizando uma camada relativamente fina. Geiger e Marsden comentam que:

Em nossas experiências, em torno da metade das partículas refletidas foram de uma camada equivalente a aproximadamente 2 milímetros do ar. Se considerado a elevada velocidade e a massa das partículas alfa parece surpreendente que algumas das partículas alfa, como mostra a experiência, podem ser giradas dentro da folha de ouro de 6×10^{-5} cm em um ângulo de 90° , ou mais. Para produzir um efeito similar por um campo magnético, é necessário um intenso campo de 10^9 unidades absolutas. (GEIGER E MARSDEN, 1909, p. 498. Tradução nossa).

Por fim, para a determinação da fração de partículas alfa incidentes que são refletidas, Geiger e Marsden utilizaram o instrumental mostrado na figura 3.16.

Nesse experimento não foi utilizado o mesmo tubo de vidro contendo o material radioativo utilizado nas experiências anteriores, pois era inadequado. O motivo de não usar estava no fato que, em primeiro lugar, por causa da dificuldade de averiguar corretamente o número de partículas alfa que emergem do tubo; segundo, por causa dos diferentes valores de partículas alfa emitidas dos três produtos: emanção, rádio A e rádio C. Conseqüentemente, como fonte de radiação foi utilizada o rádio C, o material foi depositado em uma placa, A, de pequenas dimensões. As partículas alfa provenientes da placa A eram lançadas em direção ao refletor de platina R que possuía dimensões em torno de 1cm^2 , em um ângulo de 90° em relação à fonte de emissão. As partículas refletidas eram então contadas, com o auxílio de um microscópio, em diferentes pontos da tela S.

A quantidade de rádio C utilizada foi determinada pelo valor da atividade de raios gama. Admitindo que $3,4 \times 10^{10}$ partículas são expelidas por segundo por grama de rádio C, o número de partículas alfa expelidas por segundo da placa A foi então determinada. O número de partículas atingindo o refletor de platina, portanto, foi facilmente calculado desde que era conhecida a distância e a área.

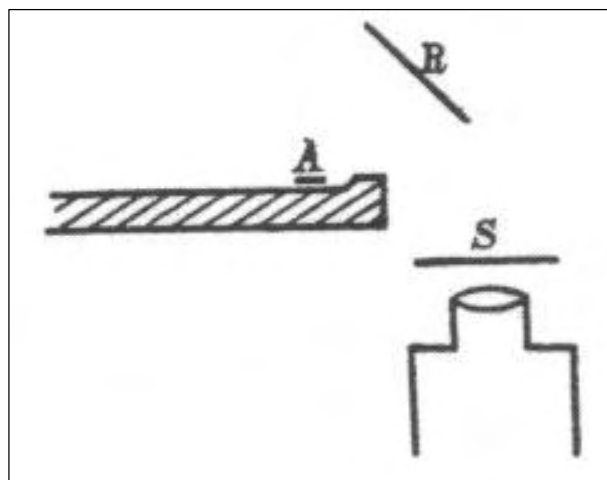


FIGURA 3.16 Esquema do instrumental utilizado por Geiger e Marsden. (GEIGER E MARSDEN, 1909, p. 499).

Para encontrar o valor total de partículas refletidas, supôs que estiveram distribuídas uniformemente em volta de uma meia esfera, tendo o meio do refletor como centro da esfera.

Das determinações, num total de três, encontraram que aproximadamente uma em cada 8.000 das partículas incidentes foram refletidas, isto é, 7999 poderiam atravessar a estrutura da folha sem sofrer qualquer desvio, no entanto, 1 apresentava um desvio muito grande.

Outro dado levantado por eles é que parecia provável que o número de partículas refletidas dependia também da velocidade com que as partículas alfa atingiam o refletor. No caso do experimento, cujas partículas eram provenientes do rádio C, tiveram que percorrer poucos centímetros pelo ar antes de atingir o refletor. As partículas refletidas, ainda sim, tiveram uma velocidade apreciável mesmo colocando uma folha de alumínio de espessura equivalente a 0,5cm de ar em termos de poder de interrupção pelo ar como anteparo, o número das cintilações contadas não foi alterado.

Com esse artigo, como tinham em mente o modelo atômico de Thomson, grandes ângulos de desvios não eram compatíveis com o modelo. Rutherford analisou, segundo Boorse *et al* (1989, p. 181), os dados obtidos por Geiger e Marsden. Eles encontraram que as partículas alfa ao passarem através de uma folha de ouro, de aproximadamente 6×10^{-5} cm de espessura, espalharam as partículas alfa num ângulo de 90° ou mais. Para que isso ocorra, deve-se assumir que existem pequenos desvios a cada encontro. Então, para que fossem possíveis tais ângulos, as partículas teriam que encontrar pelo caminho algo em torno de 10.000 colisões para produzir tal efeito. Esse era o ponto que Rutherford não concordava. Grandes ângulos de desvios não eram possíveis levando em consideração a espessura da folha de ouro utilizada.

Se a estrutura atômica fosse realmente tal qual Thomson idealizou, as partículas poderiam atravessar os átomos sem sofrer qualquer tipo de deflexão, dada a grande energia e a carga de cada uma delas.

Marsden relembra em suas observações no *Rutherford Jubilee International Conference at Manchester*, em 1961 que Rutherford “*pensou durante muitas semanas naqueles notáveis resultados*” (BOORSE *et al*, 1989, p. 177, Tradução nossa). Essa Conferência aconteceu em Manchester para celebrar as pesquisas realizadas por Rutherford e, em especial, celebrar o 50º Aniversário do Átomo Nuclear. Como mostra a figura 3.17, todas as correspondências e documentos possuíam um timbre, que era uma representação da época de investigação de Rutherford do trajeto da partícula alfa indo em direção ao núcleo de um átomo.

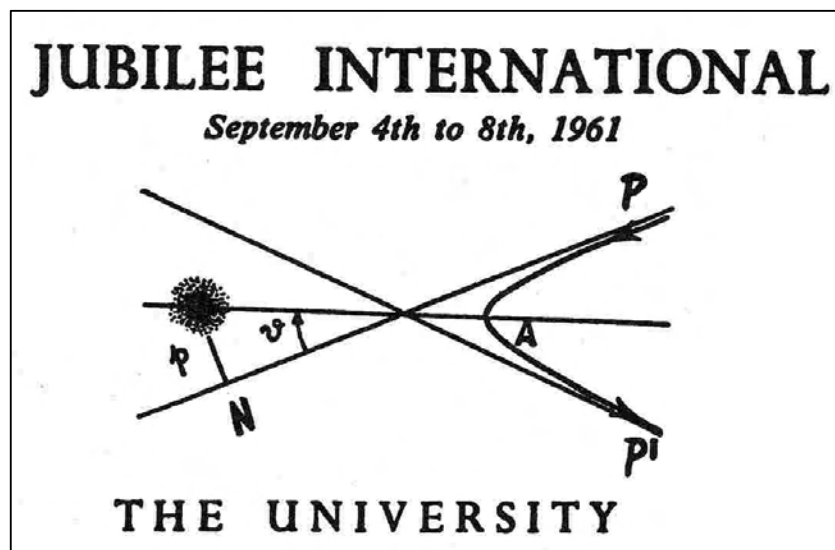


FIGURA 3.17 *Rutherford Jubilee International Conference at Manchester*. (ANDRADE, 1964, p. 139).

3.4 A CONFIRMAÇÃO: AS PARTÍCULAS ALFA SÃO DE FATO ÁTOMOS DE HÉLIO.

Naquele mesmo ano de 1909, Rutherford e Thomas Royds (1881 – 1955) publicaram um artigo com dados experimentais decisivos de um experimento feito por eles

em 1908. Foi um trabalho conclusivo sobre aquela velha questão: A partícula alfa é mesmo um átomo de hélio ou o hélio é liberado quando um átomo libera uma partícula alfa? Havia fortes evidências, baseadas em dados experimentais coletadas durante a primeira década do século XX que a partícula alfa era de fato um átomo de hélio. Os valores de várias quantidades radioativas, segundo Rutherford e Royds, calculados na suposição que a partícula é um átomo de hélio que leva duas unidades de carga, foi mostrado estar em bom acordo com os resultados experimentais. Eles também citam um dado de James Dewar, extraído de uma publicação de 1908, onde analisou que a taxa calculada de produção de hélio pelo rádio, experimentalmente, forneceu a evidência da identidade da partícula com o átomo de hélio.

No artigo intitulado “*A Natureza das Partículas α de Substância Radioativa*” (*The Nature of the α Particle from Radioactive Substance*), publicado na *Philosophical Magazine* em novembro de 1909, Rutherford e Royds fazem uma crítica aos métodos até então empregados para esse tipo de investigação. Eles afirmam que os métodos foram indiretos, pois levava em consideração apenas a carga carregada pelo átomo de hélio e o valor da razão carga/massa da partícula. Segundo eles, só seria possível provar a identidade da partícula alfa, se elas fossem armazenadas independentemente da matéria que as expeliu.

Com isso poderia ser possível discutir se o aparecimento de hélio na emissão de rádio era um resultado da expulsão da partícula. Se um átomo de hélio aparecesse para cada partícula expelida, cálculos experimentais poderiam contribuir para isso, e ainda discutir se a partícula poderia ser um átomo de hidrogênio ou de alguma outra substância.

Para conseguirem determinar o que de fato era a partícula alfa, ou em outras palavras, se eram de fato átomos de hélio, Rutherford e Royds dispuseram de um instrumental onde as partículas alfa expelidas de um material radioativo depositado dentro de um recipiente suficientemente fino pudesse permitir apenas a passagem delas e não de outras substâncias como hélio ou outros produtos radioativos.

A figura 3.18 mostra esse instrumental. Aproximadamente 140 miligramas de rádio em equilíbrio com sua emanção foi comprimida por meio de uma coluna de mercúrio dentro de um fino tubo de vidro A de aproximadamente 1.5cm de comprimento. Este tubo foi selado em um tubo capilar maior B, que era suficientemente fino para permitir que as partículas alfa da emanção e seus produtos escaparem, mas suficientemente forte para resistir pressão atmosférica. A espessura da parede do tubo empregada na maioria das experiências era menos de 0,01mm., e era equivalente, em termos de poder de interrupção das partículas, de aproximadamente 2 cm de ar. Como a média das partículas da emanção e os produtos do rádio A e C eram 4.3, 4.8, e 7 cm., respectivamente, era possível a passagem da maioria das partículas alfa pelas paredes do tubo.

A distância que as partículas percorriam depois de atravessarem as paredes dos tubos foi determinada com o auxílio de uma tela de sulfeto de zinco. Ambos notaram que quando a tela estava muito próxima ao tubo, essa se tornava brilhante, mas praticamente desaparecia numa distância em torno de 5 cm. No entanto notaram que depois de certo tempo a tela brilhava a distância de 7 cm. Isso era devido ao decaimento radioativo do rádio. Inicialmente o brilho observado era devido às partículas alfa provenientes da emanção e os produtos do rádio A. Isso num período de 3 minutos. No decorrer do tempo, a quantidade de rádio C, que inicialmente era zero, gradualmente aumentou.

O tubo de vidro A era envolvido por um tubo de vidro T, de 7,5 cm de comprimento e 1,5 cm de diâmetro que estava anexado a um outro tubo de vidro C. Um pequeno tubo de vácuo V foi também anexado da parte superior do tubo T. O interior do tubo T foi exaustado através de uma válvula D, e a completa exaustão foi feita com o auxílio de um tubo de carvão esfriado com ar líquido. Foi utilizada uma coluna de mercúrio H anexada em um reservatório, o mercúrio foi compelido no tubo T até atingir o fundo do tubo A.

Rutherford e Royds montaram esse instrumental com o objetivo de que, parte das partículas alfa que escaparam através das paredes do tubo fino (A) fosse armazenada dentro do tubo de vidro B. Se a partícula for um átomo de hélio, ele deveria difundir gradualmente do tubo B para o mercúrio e daí para o tubo T, e sua presença poderia ser detectada espectroscopicamente, elevando o nível de mercúrio e comprimindo os gases dentro do tubo de vácuo.

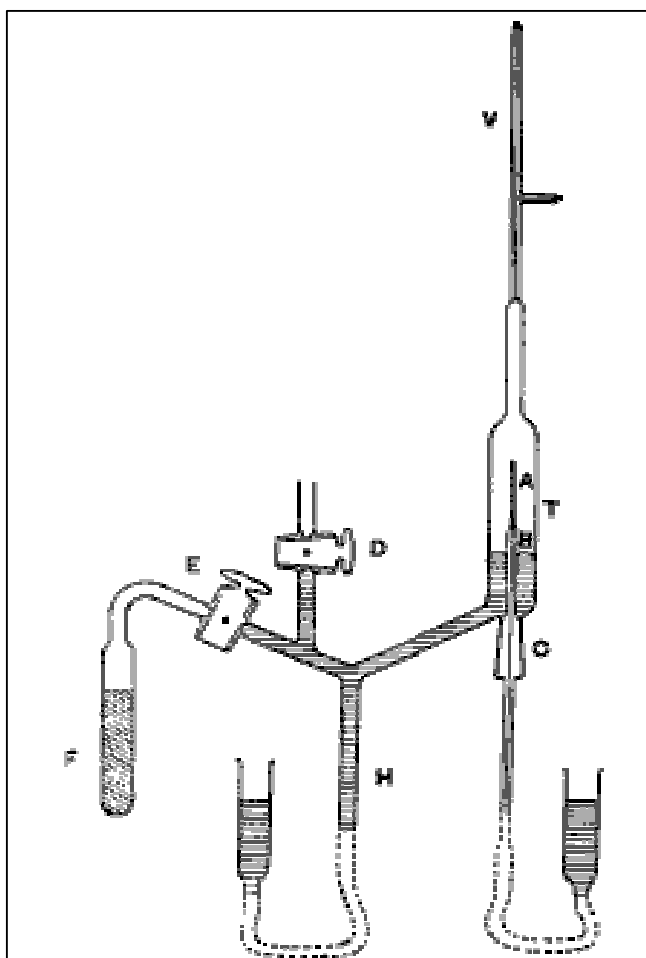


FIGURA 3.18 Esquema do instrumental de Rutherford e Royds. (RUTHERFORD E ROYDS, 1909, p. 283).

Uma maneira de prevenir quaisquer tipos de erros no experimento e evitar a contaminação do instrumento com hélio, Rutherford e Royds utilizou mercúrio prontamente destilado e toda a vidraria utilizada era nova.

Antes de introduzir o material radioativo, não havia sido detectado qualquer tipo de traço de hélio. Em intervalos de tempo depois da introdução do material radioativo, eles perceberam que o nível de mercúrio elevou-se um pouco e os gases no interior do tubo foi examinado espectroscopicamente.

Depois de 24 horas nenhuma linha amarela, que indicava a presença de hélio foi vista. Dois dias depois, surge um traço amarelo um pouco visível. Depois de 4 dias, traços amarelo e verde aparecem luminosas. E, depois de 6 dias, foram observadas todas as fortes linhas do espectro de hélio. Eles ressaltaram ainda que, pela ausência do espectro de néon, é fácil deduzir que a presença de hélio não é devida a um vazamento de ar no equipamento.

Baseado nos dados coletados das experiências, Rutherford e Royds concluíram que o hélio não poderia ter difundido pelas paredes de vidro, mas sim serem derivados das partículas alfa que passaram pelas paredes:

Em outras palavras, os experimentos dão uma prova decisiva que a partícula depois de perder sua carga é um átomo de hélio. (RUTHERFORD E ROYDS, 1909, p. 284, tradução nossa.).

Segundo o artigo, eles repetiram várias vezes às experiências para dar uma prova realmente definitiva de que o hélio não era proveniente do ar atmosférico nem de possíveis contaminações, uma vez que os experimentos eram cautelosamente montados e analisados.

Mas se de fato eram átomos de hélio que carregavam duas cargas positivas, como as partículas perderiam os elétrons? Rutherford (1908) na conferência de entrega do Prêmio Nobel relata que:

Considerando as evidências, nós concluímos que a partícula alfa é um átomo projetado de hélio que tem, ou de algum modo durante sua trajetória, adquirido duas unidades de carga de eletricidade positiva. É um pouco inesperado que o átomo de um gás monoatômico como hélio deveria levar uma dupla carga. Não deve ser esquecido, porém, que a partícula alfa é liberada a uma velocidade alta como resultado de uma intensa explosão atômica, e lançada através das moléculas da

matéria em seu caminho. Tais condições são excepcionalmente favoráveis à perda de elétrons anexados do sistema atômico. Se a partícula alfa pode perder dois elétrons deste modo, a dupla carga é explicada. (RUTHERFORD, Nobel Lecture, 1908. Tradução nossa).

Rutherford ainda considera que os átomos dos elementos radioativos possam ser constituídos por átomos de hélio. Poderia ser um novo modelo atômico para elementos radioativos?

... há muitas razões para acreditar que as partículas alfa, assim que são liberadas pela grande maioria das substâncias radioativas, são idênticas em massa e constituição e deve consistir em átomos de hélio. Consequentemente nós somos guiados à conclusão que os átomos dos elementos radioativos primários como urânio e tório devem ser constituídos em parte pelo menos de átomos de hélio. Estes átomos são libertados em fases definidas das transformações a uma taxa que independe do controle laboratorial. (RUTHERFORD, *Nobel Lecture*, 1908. Tradução nossa).

Rutherford ainda comenta que, devido à característica do hélio em ser um elemento quimicamente inerte a outras substâncias, é muito notável que deveria fazer um papel proeminente na constituição dos sistemas atômicos de urânio e tório e rádio. Pode ser que esta propriedade do hélio de formar átomos complexos está de algum modo conectado com sua inabilidade para entrar em combinações com outros elementos químicos.

3.5 A EXPLICAÇÃO DADA POR RUTHERFORD: O ARTIGO DE 1911.

No intuito de explicar os fatos experimentais observados por Geiger e Marsden, Rutherford publica na *Philosophical Magazine* seu famoso artigo intitulado “*O Espalhamento das Partículas alfa e beta pela Matéria e a Estrutura do Átomo*” (*The Scattering of α and β Particles by Matter and the Structure of the Atom*). Esse artigo, publicado em maio de 1911, é citado em inúmeros livros didáticos como sendo o responsável pela divulgação de Rutherford sobre a nova estrutura atômica.

De início Rutherford deixa claro que esses espalhamentos são mais evidentes nas partículas alfa devido a sua grande velocidade e energia. Rutherford acreditava que esses desvios eram devidos a vários e pequenos encontros que as partículas sofriam ao chocarem com os átomos que compunham a matéria. No entanto, como mostrado por Geiger e Marsden, algumas partículas sofriam deflexão com ângulos de 90° ao atravessarem uma finíssima lamina de ouro. Mais tarde, em 1910, Geiger aponta que a probabilidade de uma partícula ser defletida em ângulos de 90° era extremamente pequena.

Rutherford faz uma breve referência ao trabalho de Thomson publicado em 1910 na qual elabora uma teoria que explicava o espalhamento sofrido por partículas elétricas na matéria. Esse trabalho foi um dos marcos iniciais de Rutherford para a elaboração de sua teoria atômica.

Segundo Rutherford (1911), a teoria de Thomson supunha que o átomo consiste em um número N de corpúsculos negativamente carregados (elétrons), acompanhado uniformemente por uma quantidade igual de eletricidade positiva distribuída ao longo de uma esfera. A deflexão de uma partícula eletrificada negativamente atravessando o átomo é devido a duas causas: (1) pela repulsão dos corpúsculos distribuídos no átomo, e (2) a atração da eletricidade positiva no átomo. Mas isso com relação a um único encontro de uma partícula com um átomo da matéria. Segundo Thomson (*apud* Rutherford, 1911), a estrutura particular assumida para o átomo não admitia um ângulo de deflexão muito grande devido ao diâmetro da esfera de eletricidade positiva ser minúscula quando comparado com o diâmetro da esfera de influência do átomo.

Thomson em 1910 (*apud* Rutherford, 1911) propôs que espalhamentos com ângulos dessa magnitude (mais de 90°) ocorriam porque as partículas elétricas chocavam com vários átomos, ou seja, Thomson assumiu que o ângulo de divergência sofrido por uma partícula carregada era causado por um número grande de colisões com muitos átomos que

compõem a matéria. Qualquer colisão (única) causava apenas um ângulo mínimo de divergência.

Além disso, como salienta Boorse *et al* (1989, p. 181), o ângulo de divergência total não é a soma das divergências produzida em uma única colisão multiplicada pelo número total de colisões: o valor do ângulo de divergência, ou de desvio, é a raiz quadrada desta soma de colisões, por exemplo, se cada colisão resultasse em média em uma divergência de 1° , 100 colisões dariam origem a uma divergência de apenas 10° .

Esse era o ponto que Rutherford não concordava. Utilizando novamente os dados fornecidos por Geiger e Marsden de 1909. Se uma folha de ouro com espessura de aproximadamente 6×10^{-5} cm poderia espalhar partículas em ângulos maiores que 90° , e se pequenos desvios ocorressem a cada encontro, então seria necessário que cada partícula sofresse algo em torno de 10.000 colisões para espalharem com tais ângulos. Segundo Rutherford (1911) isso era improvável em virtude da espessura do material utilizado. Cada partícula que sofreu um desvio dessa magnitude colidiu com apenas um único átomo. Para que isso seja possível, ou seja, para explicar essa teoria de que a partícula encontra apenas um único átomo, o modelo atômico deveria então sofrer algumas mudanças.

Crowther (1910 *apud* Rutherford, 1911) publicou um artigo sobre seus estudos com relação aos espalhamentos. Ele mostrou que o número de elétrons existente no átomo pode ser deduzido através dos espalhamentos. Nesse trabalho ele assumiu que a eletricidade positiva no átomo é contínua e que o número de elétrons era em torno de três vezes o seu peso atômico.

Aqui se percebe, portanto a questão de pesquisa de Rutherford. Havia o espalhamento de partículas carregadas eletricamente que, ao atravessarem a matéria, sofriam desvios de até 90° , no entanto a estrutura atômica que tinham em mente, a estrutura de Thomson, não permitia que desvios desse porte ocorressem. Então, deveria haver um estudo

aprofundado nesse fato, ou seja, um estudo sobre a natureza de tais espalhamentos (tanto para as partículas alfa quanto para as partículas beta) para formar uma idéia sobre a constituição dos átomos que esteja coerente com os fatos observados.

Num primeiro momento Rutherford examinou quando uma partícula tem apenas um único encontro com o átomo que compõe a matéria, mas que esse único encontro seja capaz de produzir um grande ângulo de reflexão.

Rutherford considera um átomo que contenha uma carga $\pm Ne$ (*e* nesse artigo de 1911, tem o valor de $4,65 \times 10^{-10}$ unidades eletrostáticas) no seu centro cercado por uma esfera de eletrificação que contém uma carga $\pm Ne$ distribuída uniformemente ao longo de uma esfera de raio R . Esse centro teria um raio de aproximadamente 3×10^{-12} cm. Entre o centro e a esfera de eletrificação teria um raio menor que 10^{-8} cm. Essa estrutura também era válida para as partículas alfa, uma vez que as partículas beta eram considerados elétrons de alta velocidade.

Um fato interessante aparece nesse artigo. A carga central poderia ser positiva ou negativa:

Será mostrado que as principais deduções da teoria são independentes se a carga central é positiva ou negativa. Será assumido que o sinal é positivo por conveniência. A questão sobre a estabilidade do átomo proposto não necessita ser considerada nesta fase, para isto obviamente dependerá da minúscula estrutura do átomo, e no movimento dos componentes que constituem as partes com carga. (RUTHERFORD, 1911, p. 671. Tradução nossa).

Achamos convenientes não entrarmos em detalhes nos cálculos matemáticos que envolveram o trabalho de Rutherford visto que são cálculos complexos que requereria certo tempo para descrevê-los, no entanto vamos nos concentrar nos resultados obtidos através desses cálculos.

Primeiramente ele considera a passagem de uma partícula positiva próximo ao centro de um átomo.

Supondo que a velocidade da partícula não é apreciavelmente alterada pela sua passagem pelo átomo, o caminho da partícula sob a influência de uma força repulsiva descreve uma hipérbole, como mostra a figura 3.19, sendo o centro do átomo S o foco externo. Espera-se que a partícula, para entrar no átomo, percorra o sentido PO e o sentido de saída, num movimento de “escapar” do átomo, é OP', e os ângulos formados por OP e OP' sejam iguais com a linha o AS, onde A é a ápice da hipérbole e p (SN) a distância perpendicular do centro em direção ao movimento inicial da partícula. Na realidade, a partícula não choca com o centro do átomo, pois à medida que vai se aproximando desse centro, ela sofre ação repulsiva.

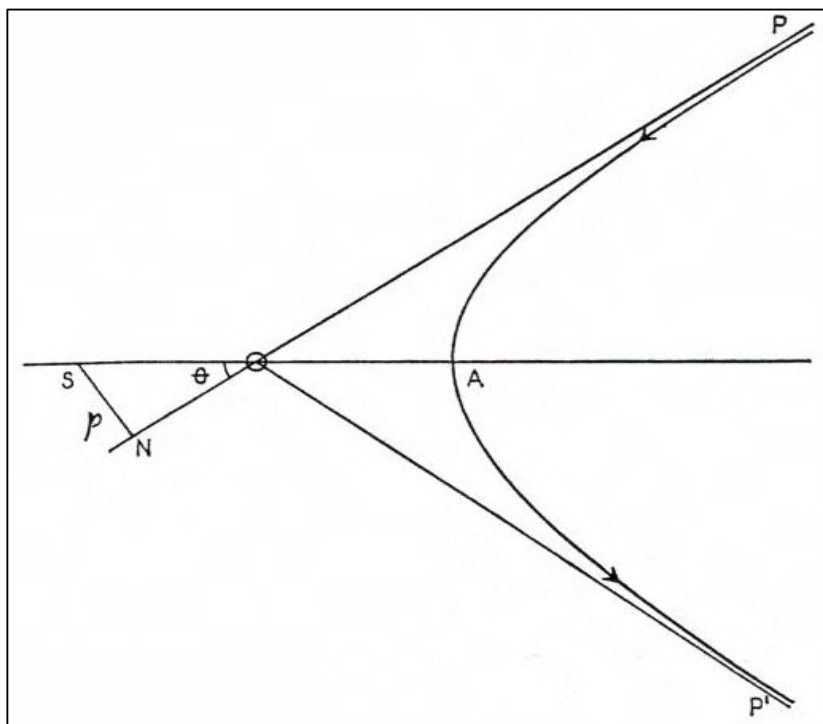


FIGURA 3.19 Esquema do trajeto de uma partícula alfa em direção ao centro de um átomo, segundo Rutherford (RUTHERFORD, 1911, p. 672).

Rutherford também admitiu através de seus cálculos, que as partículas alfa e beta tem suas velocidades alteradas ao sofrerem um único encontro atômico. Havia uma crença de que elas não alteravam sua velocidade, mas seus cálculos mostraram o contrário. Por

exemplo, uma partícula alfa após atravessar uma finíssima folha de alumínio, ainda percorria uma distância de 7 cm antes de ser neutralizada, no entanto, quando uma partícula alfa atravessa essa mesma folha e é defletida num ângulo 90° , tem uma redução de 4.5cm.

É bom deixar claro que essa análise foi realizada apenas matematicamente, e experiências nesse sentido ainda seriam realizadas.

Em relação ao tamanho da carga central, Rutherford afirmou que era proporcional ao peso atômico, e disto deduziu, por exemplo, que a ocorrência de espalhamento numa folha de ouro deveria ser (de acordo com experiência) aproximadamente cinquenta vezes maior que no alumínio. Em particular, a comparação com o valor experimental, o valor da carga central para ouro como sendo $100e$. Hoje o peso atômico de ouro é 197. Mesmo atribuindo um valor errôneo ao ouro, a teoria de Rutherford ainda era importante, pois explicava os espalhamentos.

Essa foi a teoria defendida por Rutherford sobre os espalhamentos das partículas carregadas eletricamente ao atravessarem a matéria. Em linhas gerais, a partícula alfa sofria grandes desvios de 90° em virtude de sofrer um único encontro com um átomo que compõe a matéria. Em razão disso Rutherford idealizou seu modelo atômico para que seus cálculos pudessem dar conta dos resultados experimentais.

As conclusões de Rutherford, ao final do seu artigo de 1911 foram brevemente relatadas. Ele disse que comparando a sua teoria com os resultados experimentais, era previsível, portanto que o átomo consiste de uma carga central supostamente concentrada em um ponto e que os grandes ângulos de desvios sofridos pelas partículas alfa e beta são principalmente devido à passagem delas por um forte campo central.

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. Ao mesmo tempo, evidências experimentais não são precisas o bastante para negar a possibilidade que uma pequena fração da carga positiva possa

ser carregada por “*satellites*” estendendo a alguma distância do centro. Evidência neste aspecto poderia ser obtida examinando se a mesma carga central é exigida para explicar uma única grande deflexão de partículas alfa e beta; para partícula alfa deve haver uma aproximação muito maior ao centro do átomo que a partícula de beta de velocidade proporcional para sofrer a mesma grande deflexão. (RUTHERFORD, 1911, p. 687. Tradução nossa).

Interessante notar que em nenhum momento em seu artigo ele menciona a palavra “núcleo” para nomear a carga central do átomo. Embora, ao longo de seu artigo, Rutherford não, especificamente, menciona a teoria planetária do átomo, mas faz uma referência ao trabalho do físico japonês Hantaro Nagaoka (1865-1950), que propôs um modelo planetário do átomo, ou seja, o “sistema saturniano”.

Segundo Rutherford (1911, p. 688), Nagaoka considerou matematicamente as propriedades do átomo saturniano, suposto consistir em uma massa central cercada por anéis de elétrons giratórios. Ele mostrou que esse sistema era estável se a força de atração fosse grande. Do ponto de vista de Nagaoka, a chance de uma grande deflexão estaria praticamente inalterada, se o átomo é considerado como um disco ou uma esfera.

Interessante ressaltar que o modelo de Nagaoka era bem conhecido uma vez que ele estava trabalhando no Laboratório Cavendish..

Outro ponto que deve ser destacado é a natureza da carga elétrica central, ou seja, se é positiva ou negativa. Rutherford não deixa isso claro, ele apenas lance uma hipótese.

As deduções da teoria são independentes do sinal da carga central, e está próximo de se obter uma evidência definida para determinar se é positiva ou negativa. Pode ser possível resolver a pergunta de sinal por consideração da diferença das leis de absorção das partículas beta. Pelo efeito da redução da velocidade da partícula beta deveria ser marcado muito mais por um centro positivo que por um centro negativo. Se a carga central é positiva, é fácil perceber que uma massa positivamente carregada [partícula alfa] se libertou do centro de um átomo pesado e adquiriria uma grande velocidade atravessando o campo elétrico. Pode ser possível dessa maneira definir a alta velocidade de expulsão de partículas sem supor que elas estão, inicialmente, em rápido movimento dentro do átomo. (RUTHERFORD, 1911, p. 688. Tradução nossa).

Em suma, a teoria atômica de Rutherford estabelecia que: um átomo consiste em uma carga central positiva ou negativa concentrada dentro de uma esfera de raio de aproximadamente 3×10^{-12} cm, e cercado por eletricidade do sinal oposto distribuída ao longo do resto do átomo de raio 10^{-8} cm. E que uma partícula alfa sofre um grande ângulo de desvio devido apenas a um único encontro com essa carga central. A esse encontro, fará a partícula alfa descrever uma hipérbole com o centro do átomo sendo um dos focos. Podemos dizer, conforme Rutherford propôs que o átomo é composto, sobretudo, de espaços vazios. A maior parte da massa de um átomo, portanto, estaria concentrada no seu centro, que corresponde apenas a 100 milésimos do seu diâmetro.

Rutherford encerra seu artigo dizendo que experiências para testar sua teoria estão sendo testadas por Geiger e Marsden e que futuras conclusões serão reservadas para os próximos artigos. A grande contribuição de Rutherford é que o modelo atômico de Thomson não tinha possibilidade de explicar as grandes deflexões, enquanto que seu modelo poderia.

Porém, segundo Boorse *et al* (1989, p. 182), os resultados de Rutherford ao mesmo tempo convincente, eram um pouco vagos. Ele considerou que nem toda a carga positiva estava concentrada na região central do átomo. Retomando a citação da página 109 “*que evidências experimentais não são precisas o bastante para negar a possibilidade que uma pequena fração da carga positiva possa ser carregada por “satellites” estendendo a alguma distância do centro..*” (RUTHERFORD, 1911, p. 684), ou seja, “satélites” poderiam transportar uma porção de carga positiva para fora do centro.

Embora os valores que ele obteve para a carga central de metais diferentes são muito maiores que os de hoje, por exemplo, 100 para ouro, ele concluiu corretamente que a carga central deveria ser “*aproximadamente proporcional ao peso atômico*” (RUTHERFORD, 1911, p. 687) do átomo. Mas Rutherford não estava certo se isto poderia ser aplicado para os elementos leves. Contudo, a conclusão de que havia uma região central

que concentrava uma grande carga elétrica foi ao mesmo tempo revolucionária, pois explicava tanto os espalhamentos, quanto audaciosa, pelo fato de negligenciar a estabilidade elétrica do sistema. Isso nos mostra que a verdadeira preocupação de Rutherford era apenas explicar porque as partículas alfa se defletem a grandes ângulos.

Nesse artigo em especial, Rutherford não usa a palavra “núcleo” para definir essa região central atômica. Nos outros artigos subsequentes a esse ele já começa a usar essa nomenclatura.

É interessante sabermos que, na época quando Rutherford elaborou sua teoria sobre o espalhamento das partículas elétricas pela matéria, seus cálculos matemáticos foram baseados no livro de Isaac Newton, *Principia* e ele usou a matemática newtoniana para obter seus resultados finais conforme mostra Andrade (1964), Feather (1973) e Boorse (1989). Pode ser por isso que ele idealizou um átomo do ponto de vista clássico.

Geiger e Marsden lançaram-se na pesquisa para testar essa teoria. Os resultados dessa pesquisa foram publicados num artigo em abril de 1913 na *Philosophical Magazine*. O artigo intitulado “*As Leis de Deflexão das Partículas α Através de Grandes Ângulos*” (*The Laws of Deflexion of α -Particles through Large Angles*).

Por sugestão de Rutherford, Geiger e Marsden pesquisaram os seguintes pontos dessa teoria:

1. Variação do espalhamento com ângulo;
2. Variação do espalhamento com a densidade da matéria;
3. Variação do espalhamento com o peso atômico do material;
4. Variação do espalhamento com a velocidade das partículas incidentes;
5. A fração de partículas espalhadas por um ângulo definido.

O primeiro aspecto da pesquisa, a nosso ver, parece ser mais interessante. Analisando o trabalho experimental desenvolvido pelos pesquisadores podemos fazer uma analogia com aquele esquema da experiência de Rutherford retratado nos livros didáticos. As evidências indicam que pode ser esse o experimento elaborado que faz parte dos livros didáticos e que, erroneamente, é tido como elaborado por Rutherford.

Para estudar a variação dos espalhamentos com o ângulo, Geiger e Marsden dispuseram do equipamento mostrado da figura 3.20.

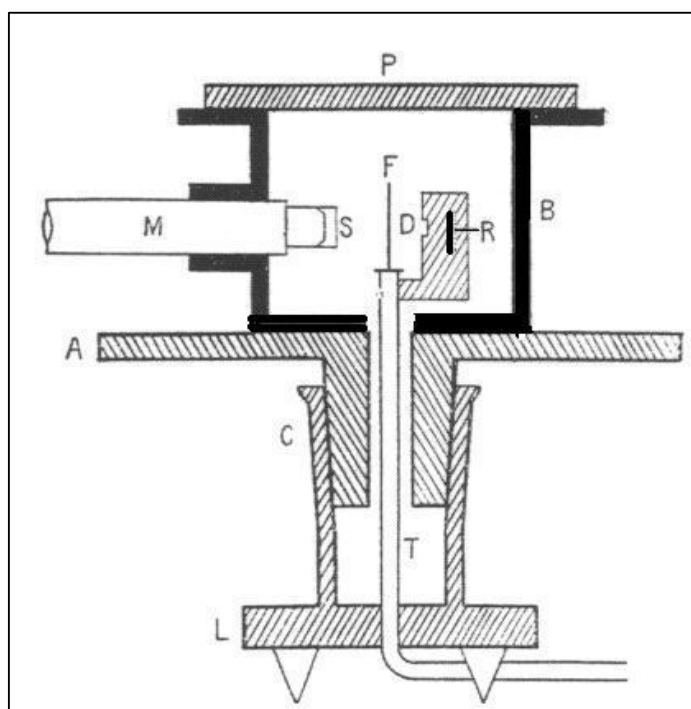


FIGURA 3.20 Equipamento elaborado para investigar os espalhamentos das partículas alfa (GEIGER E MARSDEN, 1913, p. 607).

O instrumental usado consistia numa espessa caixa cilíndrica de metal B, o qual continha a fonte R de partículas alfa. Essa fonte de radiação era semelhante a que Rutherford e Royds utilizaram em 1909 em seus experimentos sobre a natureza das partículas alfa. Consistia em um tubo pequeno tubo de vidro de aproximadamente 1 mm. em diâmetro, contendo uma quantidade grande de emanção de rádio. As partículas alfa emitidas pela

emanação e seus depósitos ativos (rádio A e rádio C) poderiam atravessar as paredes do tubo sem muita dificuldade. Foram utilizados aproximadamente 100 miligramas de emanação de rádio.

O metal a ser utilizado como “espalhador” de partículas era afixado em F, e um microscópio M o qual uma tela de sulfeto de zinco S estava rigidamente presa. Eles utilizaram nesse experimento como metal espalhador ouro e prata. A caixa foi firmada em uma plataforma circular graduada em graus A que poderia ser girada por meio de uma junta cônica hermética C. Girando a plataforma, a caixa B e o microscópio moviam se também, no entanto o suporte F e a fonte R permaneciam em posição, sendo presos ao tubo T que foi fixado em uma plataforma L. A caixa B estava fechada por um vidro opaco P, e poderia ser esvaziado pelo tubo T.

Por meio de um diafragma colocado em D, um feixe de partículas alfa se dirigia a folha de metal colocado em F, girando o microscópio as partículas alfa, que se espalharam em diferentes direções, poderiam ser observadas na tela S. Embora aproximadamente 100 miligramas de emanação de rádio estavam disponíveis para as experiências, a pequenez do efeito para os ângulos maiores de deflexão necessitou curtas distâncias entre a tela, a fonte e a folha de metal. Em algumas experiências a distância entre a fonte e a folha de metal era de 2,5cm e a tela de sulfeto de zinco rotacionava numa circunferencia de 1,6cm de raio. Em outras experiências foram aumentadas estas distâncias.

O número de partículas que foram defletidas diminuía rapidamente com o aumento dos ângulos, e, como não era possível contar com certeza mais de 90 cintilações por minuto (apenas aproximadamente 5 por minuto), só poderiam ser feitas ao mesmo tempo medidas em cima de um intervalo relativamente pequeno de ângulos. O número de partículas defletindo por ângulos grandes foi primeiro a ser medido. Interessante dizer que a experiência não foi executada de imediato, o material radioativo permaneceu em R durante 51 horas.

Ambos se revezavam nas observações. Abaixo, a figura 3.21 que mostra o equipamento original montado por Geiger e Marsden.

Utilizando de um instrumental matemático, Geiger e Marsden concluem quem os espalhamentos obedecem a leis matemáticas. O número de partículas que emergem de uma folha de metal se espalhando a um ângulo θ varia de acordo com a seguinte expressão:

$$\begin{array}{l} \text{Número de partículas} \\ \text{alfa defletida em um} \\ \text{dado ângulo} \end{array} = \frac{1}{\sin^4 \frac{\theta}{2}} \quad \text{Eq. 9}$$

Essa expressão era valida quando as partículas são contadas em uma área definida, a uma distância constante da folha de metal. Esta relação foi testada também para ângulos que variam de 5° a 150° . Observações entre 150° e 180° não puderam ser aferidas em virtude da posição da caixa de chumbo. O número de partículas variou de 1 a 250.000, em bom acordo com a teoria e essa expressão foi estabelecida por Rutherford, no seu artigo de 1911.

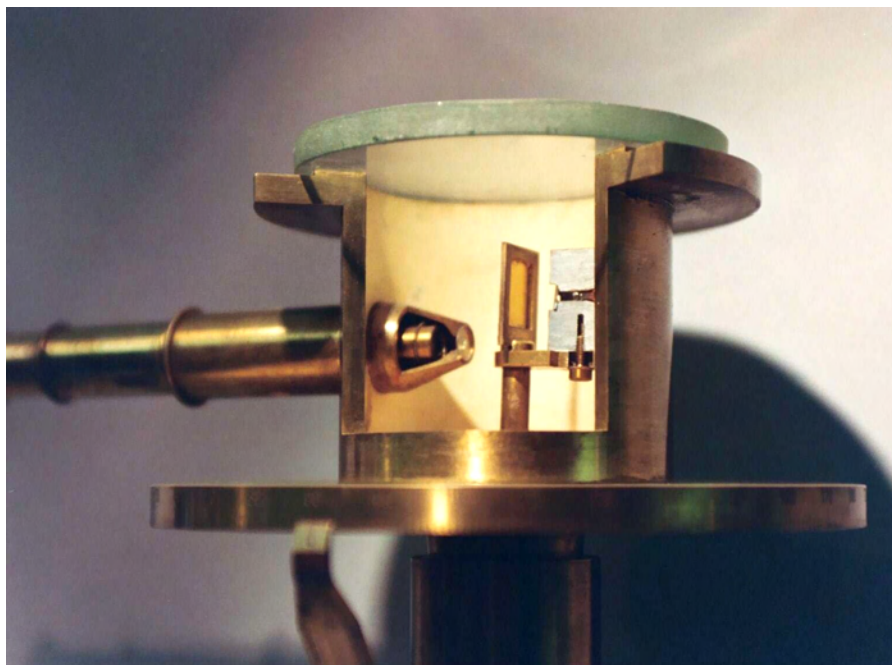


FIGURA 3.21 Instrumental original utilizado por Geiger e Marsden (TURNER, 2005).

Com relação aos outros aspectos da pesquisa, não entraremos em detalhes específicos como os cálculos e equipamentos, mesmo porque foi utilizado o mesmo equipamento, salvo algumas alterações e modificações como, por exemplo, a espessura e o número da folha de metal utilizada, a fonte de emissão assim como o tempo e emissão.

Alguns dos resultados obtidos foram:

1. O número de partículas defletidas em uma direção definida é diretamente proporcional à espessura da folha de metal utilizada. Quanto menor a espessura, mais definida é a direção das partículas.
2. O espalhamento por átomo das folhas que compõem os diferentes materiais utilizados varia aproximadamente com o quadrado do peso atômico. Esta relação foi testada para folhas de peso atômico, do carbono ao ouro.
3. Experiências quantitativas mostraram que a fração de partículas provenientes do rádio C que se defletem por um ângulo de 45° através de uma folha de ouro com poder de interrupção de partícula equivalente a 1 mm. de ar (2.1×10^{-5} cm), é 3.7×10^{-7} vezes quando as partículas defletidas são contadas em uma tela de sulfeto de zinco de 1 mm^2 de área colocada a uma distância de 1 cm da folha de metal. Destes dados e os resultados precedentes, pode ser calculado que o número das cargas elementares que compõem o centro do átomo é igual à metade do peso atômico.

As pesquisas sobre a teoria de Rutherford prosseguiram com os estudos de outros cientistas. Havia alguns pontos na teoria de Rutherford de 1911 que não estavam bem claras, como, por exemplo, sobre a constituição do núcleo bem como sua carga, o que o levou a escrever o artigo “*A Estrutura do Átomo*” (*The Structure of the Atom*), publicado em 1914.

O espalhamento das partículas alfa na matéria foi intensamente estudado, mas havia a necessidade de se estudar o espalhamento das partículas beta. No seu artigo de 1911, Rutherford dá pouca atenção a esse fato, pois acreditava que a sua teoria também poderia explicar o espalhamento das partículas beta. No entanto, admitindo um núcleo positivo, as forças que atuam entre o núcleo e partícula beta são de atração, e a partícula aumentaria rapidamente sua velocidade em direção ao núcleo. Pela eletrodinâmica usual, isto requer uma perda de energia através de radiação, e também um aumento da massa aparente do elétron (admitiam que a partícula beta eram elétrons). Darwin (1913 *apud* Rutherford, 1914) trabalhou matematicamente o resultado destes efeitos na órbita do elétron e mostrou que, sob certas condições, a partícula não “escapa” do átomo, mas descreve uma órbita espiral em direção ao núcleo.

É de interesse fazer uma referência a um estudo elaborado por Rutherford e M. J. Nuttall (1913). Eles estudaram a passagem de partículas alfa através de gases como o hidrogênio e hélio. Eles encontraram que o espalhamento de partículas alfa em hidrogênio e hélio está de acordo com a idéia que o núcleo do elemento hidrogênio tem uma carga positiva, enquanto a partícula alfa, ou hélio, tem duas cargas positivas. Com relação ao carbono, eles analisaram os resultados do espalhamento das partículas alfa realizados por Geiger e Marsden através desse elemento. Rutherford e Nuttall concluem que o núcleo do elemento carbono carrega uma carga de seis unidades:

Das experiências de Geiger e Marsden sobre os grandes ângulos de espalhamento de partículas alfa através do carbono, ficou claro que o átomo de carbono se comporta como se o núcleo carregasse uma carga de cerca de seis unidades. Assumindo este valor n para o carbono, os resultados indicam que o núcleo de hidrogênio tem uma carga de uma unidade fundamental e o núcleo de hélio duas unidades. Este valor para hélio já foi observado pelo fato das partículas alfa em sua trajetória levarem duas unidades de carga positiva. (RUTHERFORD E NUTTALL, 1913, p. 370. Tradução nossa).

É valido lembrar que nessa época, 1913, Niels Bohr (1885-1962) já havia publicado seu famoso artigo (*Sobre a Constituição de Átomos e Moléculas*) na *Philosophical Magazine* onde ele mostra as dificuldades eletrostáticas desse modelo proposto por Rutherford; ele já havia tomado conhecimento do trabalho de Bohr sobre esse fato, mas mesmo assim insistia na idéia desse tipo de átomo de acordo com as leis clássicas da Mecânica de Newton.

Com relação a dimensão do núcleo, Rutherford em 1911 já havia dado um valor para ele (3×10^{-12} cm). Rutherford (1914) cita que Darwin estabeleceu que a distância máxima que um núcleo de hidrogênio pode se aproximar de um núcleo de hélio era de aproximadamente $1,7 \times 10^{-13}$ cm. Supondo os núcleos tenham dimensões e sejam esféricos na forma, a soma dos raios dos núcleos de hidrogênio e de hélio não é maior que esse valor; um valor extremamente pequeno, menor até que o valor aceito, naquela época, do diâmetro do elétron (2×10^{-13} cm). Por esses dados, Rutherford conclui que:

Isto nos leva a questão se o núcleo de hidrogênio é tão pequeno que sua massa pode ser considerada da mesma maneira para como a massa do elétron negativo (RUTHERFORD, 1914, p. 494. Tradução nossa).

Segundo Rutherford (1914), este resultado obtido por Darwin era de grande interesse porque explicava o desaparecimento de partículas beta na sua passagem pela matéria. É óbvio que uma partícula beta passando próximo de um elétron sofreria ocasionalmente uma grande deflexão. O problema, ainda segundo o autor, era matematicamente semelhante ao encontro de uma partícula alfa com um núcleo de um átomo.

Outro ponto estudado por Rutherford foi o valor da massa do núcleo de hélio. Ele encontrou que o núcleo de hélio tem uma massa quase quatro vezes maior que a do núcleo de hidrogênio. Ele supôs que o núcleo de hidrogênio era formado por apenas um elétron positivo, isto é, o átomo de hidrogênio, e denominou que ele era uma unidade da quais todos os átomos

estão compostos. Conseqüentemente, segundo Rutherford (1914), era previsto, portanto que o átomo de hélio contivesse quatro elétrons positivos e dois negativos. Parece estranho falar em elétron positivo para designar a carga positiva do átomo, mas, naquela época, o termo próton ainda não tinha sido empregado. O núcleo de hidrogênio foi designado próton por volta de 1918 pelo próprio Rutherford. Segundo Andrade (1964, p.164-165), os núcleos de átomos de hidrogênio deveriam ter uma designação especial. Rutherford, portanto, sugeriu chamá-los de próton, ou seja, um próton é um átomo de hidrogênio que perdeu seu elétron.

Essas informações obtidas sobre os núcleos de hidrogênio e hélio levaram Rutherford a pesquisar uma outra questão: Alguns elementos radioativos além de expelirem átomos de hélio (partículas alfa), também poderiam expelir átomos de hidrogênio, ou qualquer outro tipo de elemento com carga? Essa questão foi estudada por Rutherford e Robinson, por volta de 1913. Eles estudaram os átomos que são expulsos de uma substância radioativa, bem como os átomos que expeliram estas partículas. Eles encontraram que tais partículas são expelidas, mas que certamente são aproximadamente menos que 1 entre 10.000 do número de átomos de hélio. Com esse dado, Rutherford conclui que:

Dessa maneira o núcleo de hélio é uma configuração muito estável que resiste às intensas perturbações que resultam em sua expulsão com alta velocidade de um átomo radioativo, e é uma das unidades a qual, possivelmente a grande maioria dos átomos são compostos. A evidência radioativa indica que o peso atômico dos sucessivos produtos diminui quatro unidades em virtude da expulsão de uma partícula alfa, e foi freqüentemente apontado ao fato que os pesos atômicos de muitos dos átomos permanentes diferem aproximadamente quatro unidades. (RUTHERFORD, 1914, p. 494-495. Tradução nossa).

Ainda com relação à composição do núcleo, Rutherford (1914) estabelece que as principais características físicas e químicas dos átomos são determinadas pelo seu núcleo, entretanto a massa do átomo dependia do número e do arranjo dos elétrons positivos e negativos que constituem o átomo. Considerando que a evidência experimental indicava que o

núcleo tem dimensões muito pequenas, os constituintes (elétrons positivos e elétrons) deveriam estar muito próximos um dos outros.

Poderia ser uma possível explicação da liberação de partículas beta do núcleo. Bohr (1913 *apud* Rutherford, 1914) concluiu que de fato as partículas beta de alta velocidade são originárias do núcleo. Naquela época sabia-se que as transformações radioativas eram acompanhadas pela expulsão de partículas beta de alta velocidade, liberavam uma grande quantidade de energia, sobretudo na forma de radiação gama. Segundo Rutherford (1914), seria difícil imaginar que as partículas beta teriam origem na distribuição eletrônica externa.

Parece ser mais provável que um elétron de alta velocidade é liberado do núcleo, e em sua trajetória de fuga do átomo inicia uma violenta vibração na distribuição eletrônica desse átomo, originando uma intensa produção de raios gama e também partículas beta secundárias. (RUTHERFORD, 1914, p. 496. Tradução nossa).

Sobre a carga nuclear, Rutherford aponta um aspecto levantado por Barkla, em 1911, que mostra os resultados sobre o valor da carga nuclear através do estudo por raios X. Ainda se observa a idéia de Rutherford sobre a presença de cargas negativas compondo o núcleo.

[...] sobre o espalhamento das partículas através da matéria, foi determinado que a carga positiva do núcleo seja aproximadamente igual a $\frac{1}{2} Ae$, onde “A” é o peso atômico; “e” a carga unitária. Isto é o mesmo que declarar que o número de elétrons na distribuição externa é aproximadamente metade do peso atômico em termos de hidrogênio. É de interesse notar que este é o valor deduzido por Barkla (1911) pela evidência completamente diferente do espalhamento de raios X na passagem deles na matéria. Isto é fundado na teoria de espalhamento dada por J. J. Thomson que supõe que cada elétron em um átomo se espalha como uma unidade independente. Parece improvável supor que os elétrons dentro do núcleo poderiam contribuir com esse espalhamento, porque eles estão juntos no núcleo positivo e devem ser mantidos em equilíbrio por forças de diferentes magnitudes daquela força que mantém os elétrons externos. (RUTHERFORD, 1914, p. 496. Tradução nossa).

A maioria dos resultados obtidos pela teoria de Rutherford sobre os átomos havia sido estudada e verificada experimentalmente. Mas ainda havia a questão da estabilidade de

tal sistema atômico. A teoria eletromagnética mostra que um objeto eletricamente carregado, quando gira, à maneira do elétron em torno do núcleo, emite radiação eletromagnética, perdendo energia nesse processo. Segundo a teoria, à medida que perde energia o elétron iria espiralar para o interior até finalmente cair dentro do núcleo. Devido às dificuldades apresentadas pelo Modelo Atômico de Rutherford, sobretudo do ponto de vista da Mecânica Clássica, Bohr (1969, p. 96) afirma, em relação ao átomo de Rutherford sobre a dificuldade de “*natureza muito séria derivadas da aparente instabilidade do sistema de elétrons*”.

Rutherford estava ciente desse detalhe. Isso fica evidente na sua fala:

[...] Bohr chamou atenção às dificuldades de construir átomos na teoria do "núcleo", e mostrou que não podem ser deduzidas as posições estáveis dos elétrons externos pela mecânica clássica. Pela introdução de uma concepção conectada com o quantum de Planck [Teoria dos Quanta], ele mostrou sob certas condições que é possível construir átomos e moléculas simples. [...] Por enquanto pode haver muita diferença de opinião sobre a validade e do significado físico subjacente das suposições feitas por Bohr, [...] não há dúvida que as teorias de Bohr são de grande interesse e importância a todos os físicos como a primeira e definitiva tentativa de construir átomos simples e moléculas e explicar os seus espectros. (RUTHERFORD, 1914, p. 498. Tradução nossa).

Rutherford deixou de lado essa questão da estabilidade, mas contribuiu para que Bohr pudesse desenvolver seu raciocínio sobre a estrutura da matéria baseada nas novas teorias sobre o quantum. Campbell (2001) acrescenta que Rutherford em 1914 esteve na Austrália e Nova Zelândia para uma reunião científica e visitar a família. A Primeira Guerra Mundial foi declarada antes que ele chegasse à Austrália. Depois de três meses de visita a Nova Zelândia, Rutherford retornou à Inglaterra onde trabalhou em métodos acústicos de detectores de submarinos para a *British Admiralty's Board of Invention and Research*.

Logo após o final da guerra Rutherford aprofundou seus trabalhos sobre o núcleo atômico concentrando-se nas colisões de partículas alfa com átomos leves. Conseguiu em

meados de 1919 a conversão artificial, ou transmutação, do nitrogênio em oxigênio, um velho sonho dos alquimistas.

Em 19 de outubro de 1937 ele faleceu em decorrência de uma hérnia. Como cientista que foi e de sua grande herança deixada para o meio científico, suas cinzas foram enterradas na Abadia de Westminster, junto ao túmulo de Newton.

Como nos mostra Campbell (2001), os trabalhos de Rutherford asseguram sua imortalidade. Como indica o jornal *The New York Times*, em um tributo que acompanha o anúncio de sua morte inesperada em 1937:

É dado para poucos homens conquistar a imortalidade, menos ainda conquistar um Record Olímpico, durante sua vida. Lord Rutherford conseguiu ambos. Uma geração que testemunhou uma das grandes revoluções na história da ciência; ele era universalmente reconhecido como o principal explorador do vasto e infinitamente complexo universo dentro do átomo, um universo que ele foi o primeiro a penetrar.

O maior feito de Rutherford em Manchester foi à descoberta da estrutura nuclear do átomo. Não é de nosso interesse entrar nos detalhes sobre os detalhes da teoria de Bohr sobre a constituição dos átomos. O que nos interessou, portanto com esse relato foi resgatar a trajetória de Rutherford sobre suas pesquisas acerca da estrutura da matéria. Ficou claro que o interesse de Rutherford de fato não era elaborar um novo modelo atômico do átomo para substituir o de Thomson, mas sim decifrar um enigma (os espalhamentos das partículas elétricas na matéria) o qual foi objeto de pesquisa de muitos cientistas em Manchester e em outras universidades.

4. AS ATIVIDADES.

Após termos feito, no capítulo anterior, o levantamento histórico das pesquisas de Rutherford sobre a estrutura da matéria até sua elaboração da teoria atômica nuclear, convém-nos, nesse momento, sugerir algumas atividades que o professor poderá realizar com seus alunos no ambiente escolar. Gostaríamos de deixar claro que cada atividade deve ser cuidadosamente pensada antes de ser aplicada aos alunos, ou seja, deve haver todo um contexto para que a atividade realmente possa ser produtiva, ou seja, de que forma serão aplicadas as atividades, em que momento da disciplina, se os alunos estarão em grupos ou não, entre outras possibilidades de trabalho.

As questões propostas, na realidade, podem ou não serem respondidas pelos alunos na forma escrita. O professor pode simplesmente utilizá-las como referência para iniciar uma discussão.

4.1 AS ATIVIDADES PROPOSTAS.

Essas atividades têm como objetivo abordar alguns aspectos fundamentais da radioatividade, processos radioativos, instrumental, e a experiência de Geiger, Marsden e Rutherford. Para isso vamos sugerir a leitura de textos que foram elaborados a partir dos trechos do material pesquisado. Na sequência de cada texto serão propostas algumas questões para discussão. Será dada ênfase, em alguns casos, a relação entre o conteúdo histórico com alguns avanços tecnológicos que por vezes foram possíveis graças aos conhecimentos desenvolvidos no passado.

Texto 1 – A Radioatividade.

A radioatividade foi sem dúvida um grande marco na História da Ciência que contribuiu para desvendar os constituintes da matéria. O fenômeno é de ordem atômica, os quais certos elementos químicos estão sujeitos a emitirem energia (radiação). Foi descoberta, ao que tudo indica, por Antonie Henri Becquerel (1852 – 1908) no ano de 1886 ao perceber que certa quantidade de sais de urânio conseguia impressionar chapas fotográficas.

Após essa descoberta, alguns cientistas da época lançaram-se na pesquisa para entender melhor esse processo como, por exemplo, o casal Pierre Curie (1859 – 1906) e Marie Sklodowska Curie (1867 – 1934), na França. Juntos descobriram que a chapa fotográfica ficava impressionava devido aos “raios” que os sais de urânio liberavam.

O casal iniciou suas pesquisas decidindo investigar vários minerais. Iniciaram por um minério de urânio chamado pechblenda, também conhecido como uraninita, ou simplesmente óxido de urânio, que contém urânio, além de bismuto, bário e chumbo. Após a separação dos elementos, o urânio apresentou a atividade esperada e as frações de bismuto e bário também apresentaram atividade.

Como sabiam que quando puros o bismuto e o bário não apresentavam qualquer atividade do tipo, o casal Curie supôs que haveria um elemento semelhante ao bismuto e outro semelhante ao bário, ou seja, em cada fração dos elementos havia um novo elemento semelhante, que seriam nomeados de rádio e polônio.

Devido a essa suspeita o casal Curie dispôs-se a isolar esses novos elementos por rigorosos processos químicos, pesquisando a substância ativa baseados nas diferenças de suas propriedades físicas, por mecanismos elétricos através de um grande número de fracionamento e precipitações.

O rádio, segundo Wehr (1965) foi separado do bário por cristalização fracionada. De uma tonelada de pechblenda, os Curie separaram apenas um quinto de grama de um sal de

rádio. Mesmo assim puderam avaliar a atividade do rádio nas amostras a partir do momento que se tornavam mais concentradas. Em relação ao urânio e com a mesma quantidade de massa, o polônio é cerca de 10 bilhões de vezes mais ativa e o rádio 20 milhões de vezes.

Com relação ao rádio, Marie Curie ficou tão impressionada com sua luminosidade que o descreve:

Uma de nossas alegrias era ir à nossa sala de trabalho à noite, quando distinguíamos as tênues silhuetas luminosas dos frascos e cápsulas que continham nossos produtos. [...] Era uma visão magnífica, e sempre nova para nós. Os tubos brilhantes pareciam luzes fantásticas esmaecidas. (*apud* Sacks (2002, p. 262).

Questões

1. Explique, no seu ponto de vista, o que você entende por radioatividade?
2. Você já ouviu falar em radioatividade?
3. Conforme nos diz o texto, a radioatividade é um fenômeno de ordem atômica. Após a leitura, como você esquematizaria esse processo?

Texto 2 – Tipos de radiação emitida pelas substâncias radioativas.

Continuando as pesquisas sobre as substâncias radioativas, encontramos os trabalhos de Ernest Rutherford (1871-1937). Físico nascido na Nova Zelândia, Rutherford foi contemplado, em 1895, aos 24 anos com uma bolsa de estudos no Laboratório Cavendish na Universidade de Cambridge. Ele foi o primeiro aluno estrangeiro aceito para trabalhar em Cambridge que na ocasião estava passando por importantes transformações em seu currículo.

No outono de 1898 Rutherford foi indicado para o cargo de Professor de Física Experimental da Universidade McGill, em Montreal, Canadá. A vaga surgiu em virtude da aposentadoria do Professor Hugh Callendar que decidiu voltar à Inglaterra. O presidente do Departamento de Física, Professor John Cox, foi para Cambridge para buscar um novo substituto e John Joseph Thomson recomendou Rutherford.

Um dos primeiros trabalhos de Rutherford naquela Universidade apareceu em 1899, num artigo publicado na *Philosophical Magazine*, intitulado “*Radiação do Urânio e a Condução Elétrica Produzida*”. A *Philosophical Magazine* é uma revista de grande nome no meio acadêmico e científico. Sua primeira publicação data o ano de 1798. Grandes nomes já tiveram suas pesquisas publicadas nessa revista como Crookes, Becquerel, Thomson entre outros.

Nessa publicação, Rutherford estabeleceu a existência de dois tipos distintos de radiação provenientes do urânio: uma era rapidamente absorvida pela matéria e o interessante poder de ionizar o ar; a outra mais penetrante, respectivamente radiação ou partícula alfa (α) e radiação ou partícula beta (β). Mais tarde, após a descoberta do rádio por Mme. Curie, Paul Villard, na França em 1900, estudando esse elemento percebeu que havia mais um tipo de radiação, semelhante a alfa e beta, porém mais penetrantes capazes de atravessar lâminas metálicas. Foi assim chamada de radiação gama (γ).

Após estudos minuciosos, Rutherford descobriu que as partículas na realidade apresentavam cargas: a partícula alfa possuía carga positiva, pois, ao atravessarem um campo elétrico, eram atraídas pelo pólo negativo; a partícula beta era negativa, pois eram atraídas pelo pólo positivo. A radiação gama, no entanto, não era atraída por nenhum dos pólos.

Com relação as partículas beta, hoje já se sabe que elas não são exclusivamente negativa.

Em núcleos com excesso de nêutrons, um nêutron é convertido em próton e uma partícula beta (negativa) é emitida. É criado também um neutrino, de massa desprezível, mas de grande energia. Mas, existem certos núcleos que ocorre um excesso de prótons. Nesse caso um próton é convertido em nêutron, e uma partícula beta positiva (também conhecida como pósitron) é emitida.

No ano de 1900, Rutherford publicou dois artigos sobre o elemento tório, onde relatou a descoberta de um inesperado fenômeno. Ele percebeu que uma substância que esteve exposta durante algum tempo na presença de tório, torna-se radioativa. Rutherford averiguou logo que isto era devido à deposição, na superfície da substância exposta, de uma camada invisível de material radioativo, o qual chamou de emanção, que, segundo ele, possivelmente poderia ser um vapor do tório.

Rutherford observou também que a intensidade da radiação emitida por essas substâncias decaía com o tempo em uma progressão geométrica, diminuindo metade do seu valor em aproximadamente onze horas, sendo esse valor constante. O decaimento da intensidade era independente da quantidade de matéria da substância, bem como sua natureza. Possivelmente tenha vindo daí à origem do termo vida média da substância radioativa, ou seja, o tempo que uma substância leva para perder metade da sua radioatividade. Por exemplo, uma quantidade definida de tório (urânio, rádio ou qualquer outro elemento radioativo), durante um período de tempo, tem metade de sua intensidade radioativa diminuída, ou seja, partindo de uma quantidade “X” de um elemento radiativo, após o primeiro período de meia-

vida, somente a metade ($X/2$) dos átomos radioativos originais permanecem radioativos. No segundo período, somente $X/4$, e assim por diante. Alguns elementos possuem meia-vida de bilhões de anos. Outros, frações de segundos. Esse tempo é característico de cada elemento radioativo.

Questões

1. Quais os tipos de radiações que Rutherford descobriu pesquisando o elemento tório? O que você imagina ser uma partícula alfa? E a beta?
2. Porque uma substância não radioativa se torna radioativa na presença de uma outra substância radioativa?
3. Quando um núcleo emite uma radiação do tipo beta, em ambos os casos, o que ocorre com o número atômico?
4. Em 1987, em Goiânia, no estado de Goiás, um catador de papel encontrou um equipamento abandonado em uma clínica de tratamento de câncer desativada. O equipamento foi vendido a um ferro velho, onde algumas pessoas desmontaram e encontraram, dentro de uma cápsula de chumbo, um pó azul brilhante que, além de ser muito bonito e atrativo, era fosforescente, ou seja, brilhava no escuro. Esse pó brilhante se tratava do composto cloreto de cézio, contendo o elemento cézio 137, que é radioativo e que foi distribuído para várias pessoas da comunidade, inclusive crianças. Dias depois algumas pessoas começaram a sentir náusea, vômitos, diarreia e tontura. O resultado: quatro pessoas morreram e centenas contaminadas.

Você consegue relacionar esse fato com o que Rutherford observou e que foi publicado em 1900? Porque o composto ficava armazenado dentro de uma cápsula de chumbo?

5. A idade de certos fósseis encontrados em vários locais do planeta pode ser datada pela técnica do carbono 14. Na natureza encontramos o elemento carbono, cujo número de massa é 12 o qual forma diversas substâncias essenciais para a manutenção da vida como carboidratos, proteínas, ácidos nucleicos entre outros. Devido à ação de raios cósmicos oriundos do espaço. O carbono 14 é um radioisótopo artificial que se forma na atmosfera da Terra através da colisão de raios cósmicos com átomos de nitrogênio 14.

Uma vez formado carbono 14, esses se ligam com oxigênio, formando gás carbônico que é assimilado pelos seres vivos. Nós convivemos com ambas os elementos químicos (ditos isótopos) em perfeita harmonia e a quantidade de carbono 14 nos organismos vivos está em equilíbrio com a da atmosfera. Quando um organismo morre, o isótopo carbono 14 é instável e emite uma partícula beta, transmutando-se no isótopo estável de nitrogênio, o nitrogênio 14. A meia-vida do carbono 14 é de 5600 anos.

Baseado nesse fato acerca do carbono 14, você saberia dizer de que modo então é possível estimar a idade de um fóssil?

6. Após a leitura desse texto e ter debatido esses fatos acerca das radiações produzidas por elementos radioativos, você considera que os processos radioativos naturais são benéficos ou maléficos ao ser humano?
7. Você considera correto dizer que os processos radiativos são processos, ou fenômenos, químicos? Justifique.

Texto 3 – Transformações radioativas.

Rutherford sempre esteve acompanhado por outros cientistas durante suas investigações. É importante destacarmos sua parceria com Frederick Soddy (1877 – 1956), um jovem químico da Inglaterra que tinha o cargo de demonstrador químico da Universidade McGill de Montreal. Juntos escreveram o famoso artigo “*A Causa e a Natureza da Radioatividade*”. Nesse trabalho, publicado em duas partes na *Philosophical Magazine*, em 1902, eles pesquisaram a radioatividade do tório. Através de uma simples operação química, eles descobriram que a maior parte da radioatividade do tório (em torno de 54%) é devida a um outro tipo de matéria, o qual chamaram de tório X (ThX) que possuía propriedades químicas distintas das do tório. Além de apresentar essa característica, apresentava também uma radioatividade temporária.

É bom lembrar que naquele mesmo período Willian Crookes (1832 – 1919) também já tinha separado do urânio um tipo de substância ativa na qual ele a chamou de urânio X.

Rutherford e Soddy perceberam que para um elemento radioativo se transformar em outro, ou em outra linguagem, quando um elemento radioativo sofria um *decaimento radioativo* e se transformava em outro elemento, também radioativo, era necessário que o primeiro elemento emitisse (um tipo de) radiação. Essas mudanças radioativas eram causadas pelas emissões radiativas, ou seja, emissões de partículas alfa e beta pelos átomos daquele elemento. Esse fato foi chamado de *teoria da desintegração*. Vale ressaltar que a radiação gama sempre estava presente nesses processos.

Apesar de terem descoberto que a causa desse processo ser à emissão de radiação alfa, ou beta, eles não sabiam por que certos elementos a emitiam. Nas palavras de Rutherford e Soddy sobre esse fato, temos:

... o início das mudanças químicas que acontecem em corpos radioativos é devido à emissão de raios alfa, ou seja, a projeção violenta de uma massa carregada do átomo. A porção deixada para trás é instável, sofrendo mudanças químicas adicionais que são acompanhadas novamente por emissão dos raios alfa, e em alguns casos por raios beta (...) O que leva a emissão destas massas (partículas) pode ser devido à ação de forças internas ou forças externas da qual nós não temos conhecimento ainda. (RUTHERFORD E SODDY, 1902, p. 106. Tradução nossa).

Essa descoberta também foi aplicada para os outros elementos conhecidos da época como o urânio e o rádio. A cada mudança que ocorria nesses elementos, eles tinham uma nomenclatura própria, por exemplo, o rádio, sofria um decaimento, produzindo emissão de rádio, esse por sua vez produzia rádio A, que produzia rádio B e que produzia rádio C. Na grande maioria das experiências, utilizava rádio C, pois produzia uma intensa quantidade de radiação alfa e o tempo de meia vida era de aproximadamente 28 minutos.

Com relação ao rádio, Mme Curie e Albert Laborde na França, observaram que esse elemento, e seus compostos, mantém a temperatura do ar ao redor de alguns graus acima da temperatura ambiente. Pela teoria da desintegração dada por Rutherford e Soddy, esse aquecimento ou calor emitido do rádio surge em parte dos raios emitidos, ou seja, pela emissão na maioria de partículas alfa, e em parte do sistema do quais os raios são expelidos, em outras palavras, pelo “*auto-bombardeamento*” por parte das partículas alfa, uma vez que eram facilmente absorvidas pela matéria. Uma vez emitida uma partícula alfa, o átomo de rádio tende a se rearranjar de forma a recuperar sua forma estável ou temporariamente estável.

Questões

1. Explique, com suas palavras, a teoria da desintegração dada por Rutherford e Soddy.
2. Além de ionizar o ar ao redor, qual a outra característica dos elementos radioativos?
3. Esquematize e explique como seria o “*auto-bombardeamento*”. O que isso tem haver com o aquecimento do ar ao redor da substância radioativa?

Texto 4 – Técnicas de mensuração da carga e atividade.

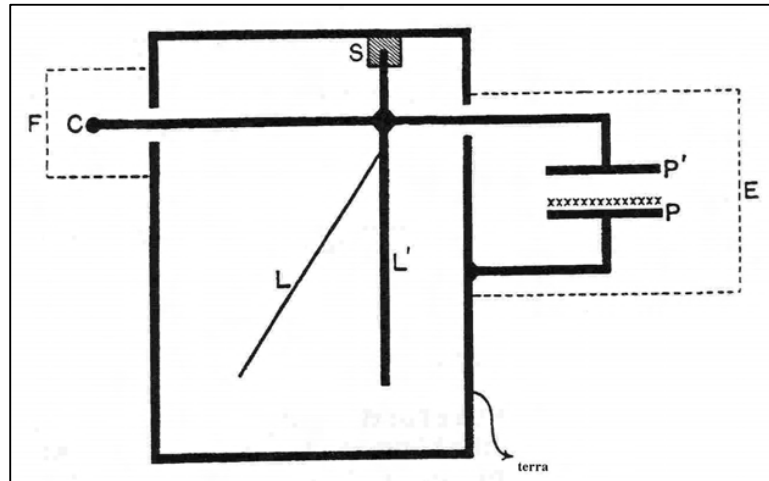
Rutherford em 1903 realizou uma experiência que consistia em passar um feixe de radiação proveniente de algum elemento radioativo entre duas placas elétricas carregadas eletricamente (uma positiva e a outra negativa). Ele percebeu que as partículas alfa eram atraídas pela placa negativa; as partículas beta eram atraídas pela placa positiva. No entanto a radiação gama não sofreu qualquer desvio.

1. Esquematize essa experiência. Qual a conclusão que Rutherford possivelmente chegou com relação à carga de cada uma das radiações?
2. Como você imagina que eram realizadas essas experiências e principalmente a análise desses resultados numa época que não existiam, por exemplo, computadores?

Não era tarefa fácil determinar as propriedades dessas radiações. Um instrumento muito usado por Rutherford para detectar a presença de eletricidade era o eletroscópio de folha de ouro. Esse instrumento consistia em uma caixa de metal que continha uma haste isolada do metal, L', a que foi unida na sua extremidade a uma folha de ouro, L. Quando a haste era carregada, conectada, por exemplo, a uma bateria de 200-300 volts, a folha de ouro se separava, podendo ser vista por uma espécie de janela com uma escala. A radiação de ionização descarregava a haste e a folha, de modo que a folha retornava gradualmente a sua posição vertical original no contato com a haste, e a taxa da queda da folha era uma medida da intensidade de radiação.

O eletroscópio de folha de ouro era um instrumento extremamente sensível e podia medir quantidades minúsculas de radiação. O eletroscópio podia ser ativado diretamente pela radiação beta ou gama, onde entravam através de uma janela de um recipiente de metal exterior. Para a medida da radiação alfa, Rutherford planejou uma câmara

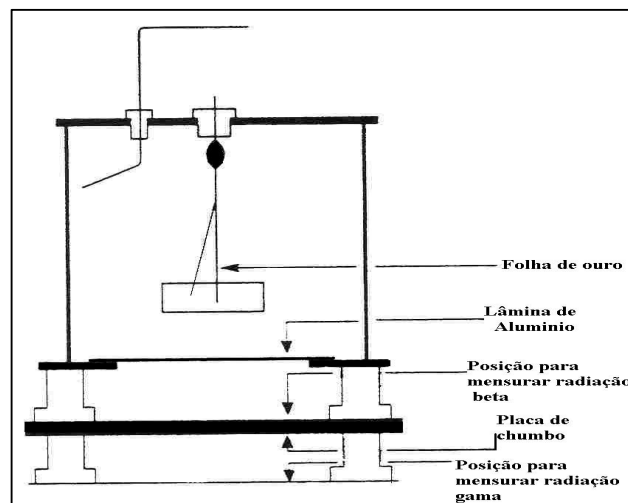
de ionização combinada ao eletroscópio em que uma camada do material ativo foi espalhada a placa em P e a placa paralela P' foi conectada diretamente à haste L' do eletroscópio.



Esquema de um eletroscópio.

3. Porque as folhas de ouro se separavam quando uma das placas era conectada a um dos pólos de uma bateria? Qual a razão de se ter uma escala nesse instrumento? Como você imagina que esse instrumento foi construído?

Alguns anos depois, Rutherford começou a usar um outro tipo de eletroscópio para mensurar radiação beta e gama. Era um instrumento esquematizado abaixo.



Esquema de um outro tipo de eletroscópio

4. Baseado no esquema, você saberia explicar porque havia diferentes posições para mensurar as radiações? Coloque em ordem crescente as radiações do ponto de vista de absorção pela matéria (entenda matéria por qualquer corpo físico que ocupa espaço).

Texto 5 – Constituição das partículas alfa, beta e gama.

As partículas beta de início foram as mais pesquisadas e estudadas do que as alfa, mas como na ocasião já se conhecia o elétron, isso por volta de 1900, os cientistas julgaram que as partículas beta eram muito semelhantes aos elétrons, em virtude da velocidade de deslocamento e pelo valor da sua carga negativa. A radiação gama foi constatada como sendo ondas eletromagnéticas, e conseqüentemente sem carga e massa. Os raios gamas sempre são acompanhados quando um elemento radioativo emite uma partícula alfa ou beta.

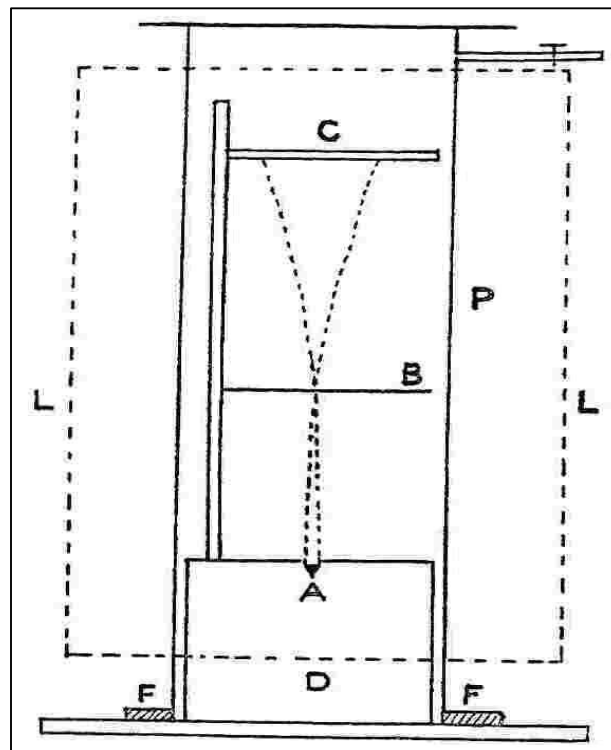
Um fato interessante foi observado por Frederick Soddy e William Ransay na Inglaterra, por volta de 1905. Estudando compostos radioativos de rádio (brometo de rádio, RaBr_2), eles perceberam que quando esses compostos emitiam uma partícula alfa, e se transformavam naquilo que eles chamavam de emanção de rádio, havia sempre no recipiente onde ela estava depositada, certa quantidade de gás hélio. O hélio é um elemento gasoso e inerte, por causa disso ele é conhecido também como gás nobre e apresenta duas unidades de carga positiva ou próton. Os resultados indicavam que o hélio era um produto da radiação do rádio conforme este ia sendo gradualmente transformado.

Em virtude disso, havia naquela época, uma tendência em achar que as partículas alfas eram, na realidade, átomos de hélio projetado dos átomos radioativos. Já haviam mensurado o valor da carga elétrica do hidrogênio naquela época. Em relação as partículas alfa, perceberam que era correspondente a duas vezes esse valor, assim como o valor do hélio. Rutherford, sobre esse fato, nos diz:

A questão se a partícula alfa é uma molécula de hidrogênio, um átomo de hélio, ou uma molécula de hélio que carrega duas vezes a carga iônica, foi discutido. Não é possível no momento definitivamente decidir entre estas possibilidades. Experiências adicionais estão em desenvolvimento para determinar o valor da relação e/m [carga/massa] para as partículas alfa dos outros produtos de rádio, do tório e actínio. (RUTHERFORD, 1906, p. 853. Tradução nossa).

Um estudo realizado por Rutherford, em 1906, lhe rendeu bons resultados o que possibilitou um estudo bastante aprofundado nessa questão: o espalhamento das partículas alfa ao atravessarem finíssimas folhas de diferentes metais.

Em agosto daquele ano Rutherford publicou um artigo na *Philosophical Magazine* intitulado “*Retardamento das Partículas alfa do Rádio na Passagem através da Matéria*”, onde ele analisou o espalhamento sofrido pelas partículas alfa ao atravessarem diferentes números de folhas de alumínio. Para isso, ele dispôs do equipamento mostrado abaixo:



Equipamento utilizado por Rutherford

Foi colocado dentro de um cilindro de metal D um pequeno pedaço de arame ativo (esse arame foi exposto a radioatividade do rádio). Uma barra vertical foi anexada em um dos lados desse cilindro. Havia um sulco perfurado nessa barra onde havia duas hastes moveis B e C. A haste B tinha uma pequena fenda por onde as partículas alfa passariam. Na haste C havia uma chapa fotográfica de sulfeto de zinco, onde as partículas alfa colidiam. As

distâncias entre as hastes poderiam ser alteradas convenientemente. As imagens produzidas na chapa fotográfica foram observadas utilizando um microscópio e as folhas de alumínio eram colocadas sobre a placa B. Sobre o equipamento foi colocado um tubo de metal P, celado nas extremidades. Na extremidade inferior havia uma espécie de celante FF que conservava o vácuo dentro do instrumental.

Todo o equipamento estava fixado em uma armação de madeira e colocado entre os pólos de um eletroímã grande de forma que a fonte de emissão e a fenda estivessem em paralelo à direção do campo magnético. A extensão do campo magnético está representado na figura pelas linhas pontilhadas LL. O eletroímã tinha uma corrente constante de 12 ampères e a duração de exposição do campo magnético normalmente eram duas horas e a direção do campo que era invertida cada dez minutos.

Após mensurações, Rutherford concluiu que as partículas alfa de fato diminuem sua velocidade após passarem pela matéria, no caso, pelas folhas de alumínio. Outro fato observado por ele foi em relação a luminosidade das cintilações (dos pontos luminosos) produzida pelas partículas alfa na tela de sulfeto de zinco diminuiu rapidamente do mesmo modo que a quantidade de partículas alfa decrescia pelo uso das folhas de alumínio, ou seja, era proporcional ao número de folhas de alumínio. Esse foi um dos últimos trabalhos de Rutherford enquanto professor da Universidade McGill, em Montreal.

Com relação às cintilações, William Crookes, Elster e Geitel já tinham mostrado que as partículas alfa que se chocam em uma tela de sulfeto de zinco produziam várias cintilações (Rutherford, 1908). Em 1903, Crookes inventou um pequeno instrumento chamado “*espintariscópio*” que permitia visualizar pequenas cintilações: o choque de cada partícula com uma tela fluorescente produzia pequenos pontos luminosos. Sacks (2002, p. 288) lembrando suas memórias de infância diz que os espintariscópios “*foram brinquedos*

científicos da moda nas salas de estar...". Os espintariscópios eram muito populares e era facilmente adquirido no comércio como mostra esse anúncio (Figura 1).



FIGURA 1 Os Espintariscópios eram vendidos em lojas especializadas da década de 1940 e ainda hoje o são. Esse pequeno instrumento contém uma tela fluorescente e uma lente ocular. No seu interior, uma quantidade extremamente pequena de brometo de rádio. (SACKS, 2002, p.255).

Questões

1. Esquematize baseado no texto lido, um átomo de algum elemento radioativo emitindo as três formas de radiação, evidenciando sua trajetória num campo elétrico.
2. Como você explicaria o fato da presença do hélio nos processos radioativos?
3. Em sua experiência Rutherford percebeu que quanto maior o número de folhas de alumínio no trajeto das partículas alfa, menos luminosidade produzia na tela de sulfeto de zinco. Comente esse fato.

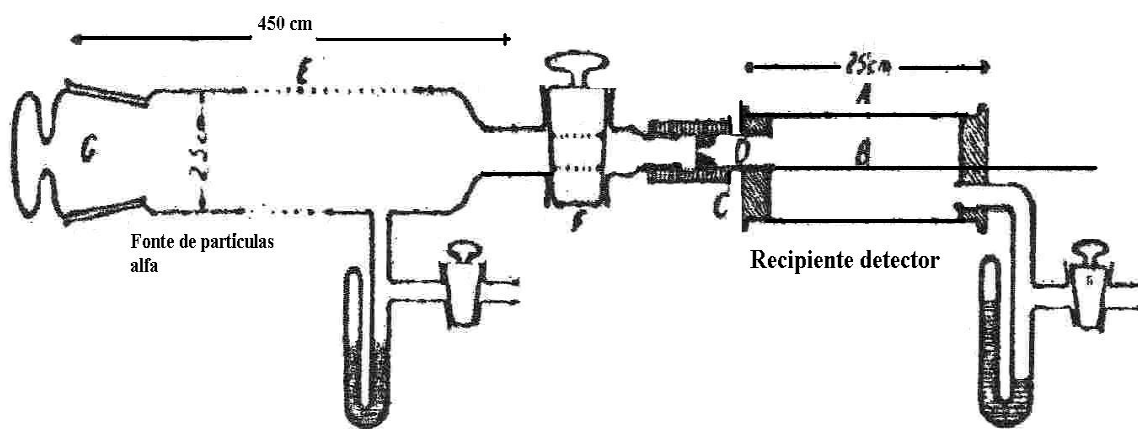
Texto 6 – Determinação da quantidade e da carga da partícula alfa.

Rutherford retornou a Inglaterra para chefiar o Laboratório da Universidade de Manchester, em 1907. A cátedra de Física da Universidade de Manchester pertencia ao alemão Sir Arthur Schuster (1851-1934), o grande espectroscopista. Schuster era um homem rico. Ele havia herdado uma fortuna com a qual gastou boa parte dela em equipamentos para o seu laboratório. Uma vez estabelecido em Manchester, Rutherford encontrou como assistente o jovem alemão Hans Geiger (1882-1945), famoso por ter criado o Contador Geiger, instrumento utilizado para detectar radioatividade. Ambos publicaram vários trabalhos associados aos estudos das partículas alfa.

Rutherford continuou seu estudo sobre as partículas alfa naquela universidade. Mas para isso, ele precisou de mais rádio. No entanto naquela época Manchester não dispunha de muito elemento rádio para as pesquisas. Segrè (1987, p. 105), relata que havia menos de 20 miligramas. O rádio provinha das minas de Joachimstal (Áustria). A Academia de Viena emprestou aproximadamente 350 miligramas de brometo de rádio para Rutherford e para William Ramsay. Ramsay era da *University College* de Londres, na época em que receberam o empréstimo ele relutou em dar uma parte para Rutherford. Em compensação, em janeiro de 1908, a Academia de Viena emprestou mais 300 miligramas para Rutherford que posteriormente foi comprado pelo laboratório.

Rutherford e Geiger publicaram dois importantes trabalhos que tinham como objetivo investigar a quantidade de partículas alfa emitida pelo hélio bem como sua carga. No primeiro caso, a quantidade de partículas alfa expelida pelo rádio, ambos desenvolveram dois métodos para isso: um elétrico e outro por cintilação. No método elétrico, Geiger utilizou um método conhecido como ionização por colisão. Era um método desenvolvido por J. A. Thownsend que consistia na formação de íons a partir de um potencial elétrico muito grande.

A ionização produzida em um gás por uma única partícula alfa é sumamente pequena e seria difícil descobrir eletricamente esse efeito. Na tentativa de aprimorar esse fenômeno, foi proposto por eles um método elétrico: os íons produzidos pela passagem da partícula alfa por um gás geram um número grande de novos íons através de colisões. Deste modo seria possível aumentar o efeito elétrico devido a uma partícula alfa centenas de milhares de vezes. A entrada de uma única partícula num recipiente de teste seria indicada por um súbito desvio da agulha de um eletrômetro (equipamento utilizado para medir diferenças de potencial elétrico). O instrumental usado é apresentado na figura abaixo:



Equipamento utilizado por Rutherford e Geiger.

A fonte de partículas alfa foi depositada ao término do longo tubo E (de 450 cm!), conectado ao recipiente detector de tal modo que as partículas tiveram que atravessar um pequeno orifício D para entrar no recipiente detector onde iria ionizar o gás a baixa pressão e produzir novos íons. Um fato interessante é de como eles dispuseram a fonte de emissão: a matéria ativa, na forma de um fino filme de aproximadamente 1 cm^2 de área estava depositada no final de um cilindro de ferro leve e oco que poderia ser movido ao longo do tubo de vidro do exterior por meio de um eletroímã. A razão pela qual a fonte de emissão estar depositada

numa distância muito grande e o orifício de entrada de partículas alfa tão pequeno, está no fato de que Rutherford e Geiger queriam que apenas uma única partícula, do total milhões expelida pela fonte radioativa, pudesse entrar no detector. A válvula F regulava a quantidade de partículas alfa. Como resultado, eles encontraram que as partículas alfa expelidas por segundo em 1 grama de rádio da experiência de contagem foram aproximadamente $3,4 \times 10^{10}$ partículas.

O método de cintilação consistia no seguinte: ao atingir uma tela de sulfeto de zinco a partícula alfa produzia uma cintilação, ou seja, impressionava a chapa fotográfica. Segundo Rutherford e Geiger, era importante comparar o número de cintilações produzida na tela de sulfeto de zinco com o número de partículas alfa contadas pelo método elétrico para constatar se cada cintilação corresponde a uma única partícula alfa. William Crookes, Elster e Geitel já tinham mostrado que as partículas alfa que se chocam em uma tela de sulfeto de zinco produzem várias cintilações (Rutherford, 1908).

Para isso, eles dispuseram de uma fina camada de sulfeto de zinco sobre uma placa de vidro na qual, através de um microscópio era possível observar as cintilações. Para haver o máximo de precisão possível, foi usado o mesmo tubo de descarga E da figura acima, e a abertura foi coberta com mica. O recipiente de teste também foi removido e no local foi adaptada a tela de sulfeto de zinco. Como no método elétrico, foi usado rádio como fonte de emissão.

O microscópio usado tinha o poder de aumento de 50 vezes. As experiências foram feitas à noite em um quarto escuro. Não era tarefa fácil. Eles tinham que entrar no quarto, esperar um bom tempo até que os olhos se acostumassem com a falta de luz. Também era difícil de continuar contando por mais de dois minutos, pois os olhos tornavam-se cansados. Como resultado, eles encontraram que de fato cada cintilação corresponde a uma

partícula alfa que se chocou com a tela de sulfeto de zinco. E também encontraram o mesmo número de partículas expelidas por segundo de 1 grama de rádio, ou seja, $3,4 \times 10^{10}$ partículas.

Conhecendo esse número, Rutherford e Geiger puderam determinar através de uma outra experiência o valor da carga da partícula alfa, foi encontrado o valor de 9.3×10^{-10} unidades eletrostáticas. De uma consideração da evidência experimental da carga carregada pelos íons em gases, foi concluído que a partícula alfa carrega duas unidade de carga ($2e$), e que o valor da carga unitária do átomo de hidrogênio era igual a 4.65×10^{-10} unidades (mensurada por Thomson). Fazendo uma comparação do valor conhecido da razão e/m para a partícula alfa com a do átomo de hidrogênio, resulta a idéia que uma partícula alfa é um átomo projetado de hélio que leva duas cargas.

Questões

1. O contador Geiger é um dos instrumentos mais úteis para a detecção da radioatividade, pois monitora a radiação através da detecção da ionização de um gás a baixa pressão. Com base na experiência de Rutherford e Geiger de contagem de partícula alfa, pelo método elétrico, explique o funcionamento desse aparelho.
2. As partículas alfa, segundo os dados obtidos por Rutherford e Geiger, é um átomo projetado de hélio. Como eles conseguiram esse resultado, levando em conta os valores encontrados?

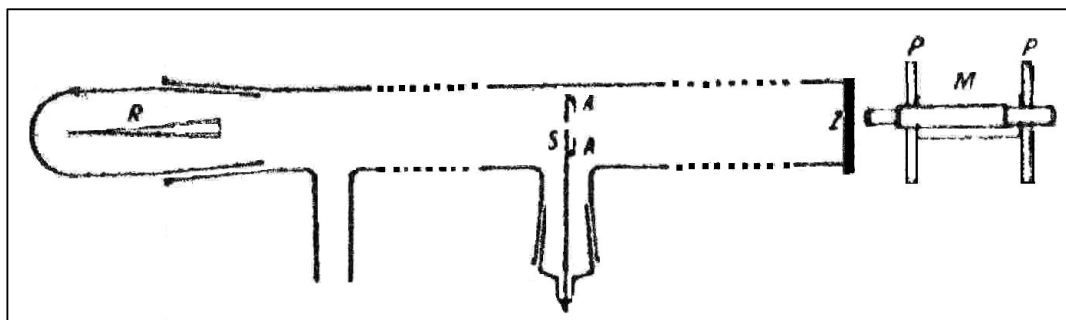
Texto 7 – Os resultados de Geiger e Marsden.

Geiger realizou um estudo que foi publicado na *Proceedings of the Royal Society of London*, em julho de 1908. Intitulado “*Sobre o Espalhamento das Partículas alfa pela Matéria*”. Nesse estudo Geiger relata que no decorrer das pesquisas realizadas por ele e Rutherford sobre a contagem de partículas alfa a partir de 1 grama de rádio, havia um interesse no espalhamento sofrido pelas partículas alfa ao atravessarem a matéria.

Na realidade esse tipo de observação já havia sido feito por Rutherford, num artigo de 1906, sobre esse tipo de espalhamento. Foi algo pesquisado por grandes físicos da época como Kucera e Masek em 1906, W. H. Bragg em 1907, L. Meitner em 1907 e E. Meyer em 1907.

Esse efeito de espalhamento também ocorria com as partículas beta. Um estreito feixe de partículas beta após atravessar uma folha de metal emerge em um feixe não definido. Rutherford no seu estudo de 1906 percebeu que quando as partículas alfa atravessavam uma estreita fenda coberta com uma fina folha de mica produzia uma imagem estendida numa chapa fotográfica. No entanto, quando não havia nenhuma cobertura na fenda, a imagem produzida era bem definida.

Geiger realiza algumas observações utilizando o equipamento abaixo:



Equipamento utilizado por Geiger.

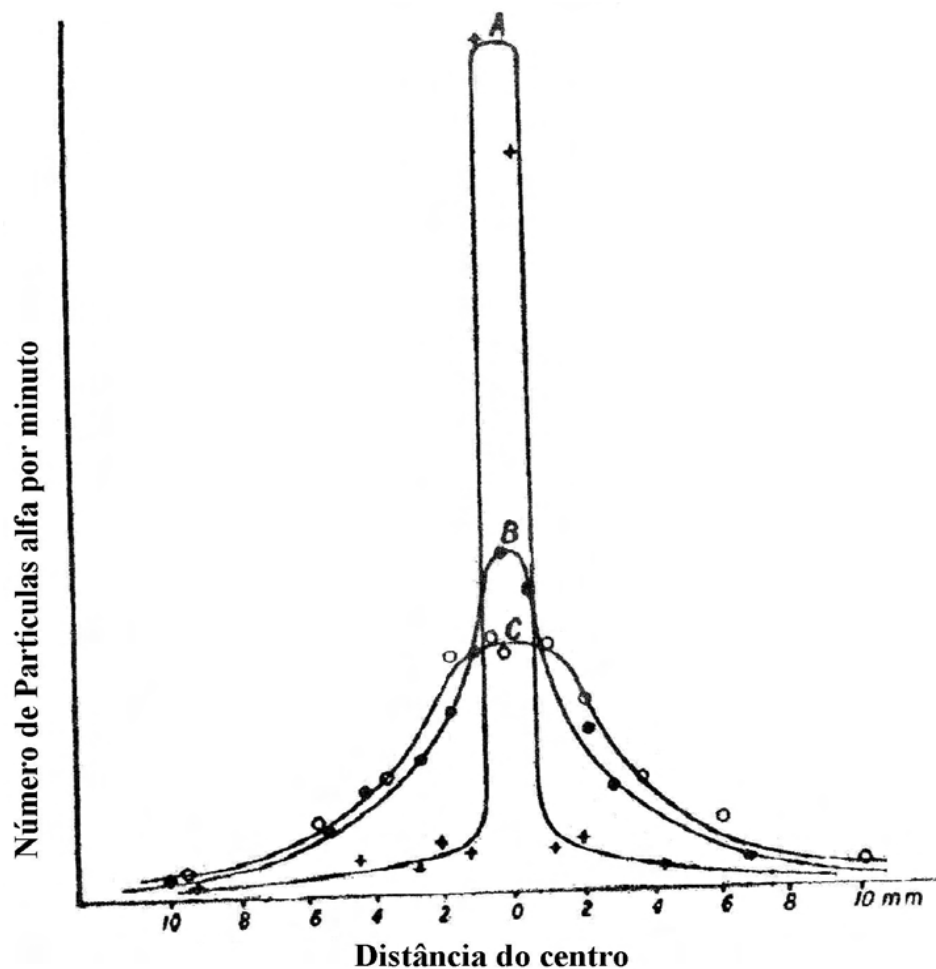
O experimento consistia em um tubo de vidro de aproximadamente 2 metros de comprimento e 4 cm de diâmetro. A fonte de emissão de partículas alfa, provenientes do

brometo de rádio (RaBr_2), estava depositada em um tubo R. A extremidade do tubo, que era menor que 2 mm diâmetro, estava fechado hermeticamente por uma fina folha de mica pela qual as partículas alfa poderiam escapar livremente. Em seguida, as partículas alfa passariam por uma estreita fenda S de aproximadamente 0,9 mm.

Na fenda S havia um pequeno suporte (AA) utilizado para alojar finíssimas folhas de metais, no caso, de ouro. Após passarem por essa fenda, as partículas formariam imagens em uma tela fosforescente Z. A contagem das partículas alfa que atingiram a tela eram contadas pelo método de cintilações com o auxílio de um microscópio móvel M cujo poder de ampliação era de 50 vezes e a área da tela que poderia ser vista pelo microscópio era de aproximadamente 1 mm^2 .

Os resultados obtidos por Geiger nesse artigo estão apresentados no gráfico abaixo. A curva A mostra a distribuição das cintilações em vácuo na qual não havia nenhum material na fenda S. É notável no gráfico que a maioria das cintilações observadas estão centradas no meio da tela. A explicação dada por Geiger para as cintilações observadas fora do centro da tela é devido à existência de um pouco de ar dentro do tubo. Era difícil conseguir um vácuo perfeito.

A curva B mostra o espalhamento das cintilações decorrente do uso de uma folha de ouro na fenda. Geiger não menciona a espessura dessa folha, mas diz que o poder de interrupção de uma folha corresponde a aproximadamente 1 mm de ar. Na curva C, ele utilizou 2 folhas de ouro.



Resultado do experimento

1. Baseado nesse gráfico que traz o resultado de Geiger, você saberia explicar porque Geiger obteve as curvas A, B e C? Porque diferentes números de folhas do metal, de ouro, trazem diferentes resultados?
2. Ao final desse artigo, Geiger diz a seguinte frase. Comente-a.

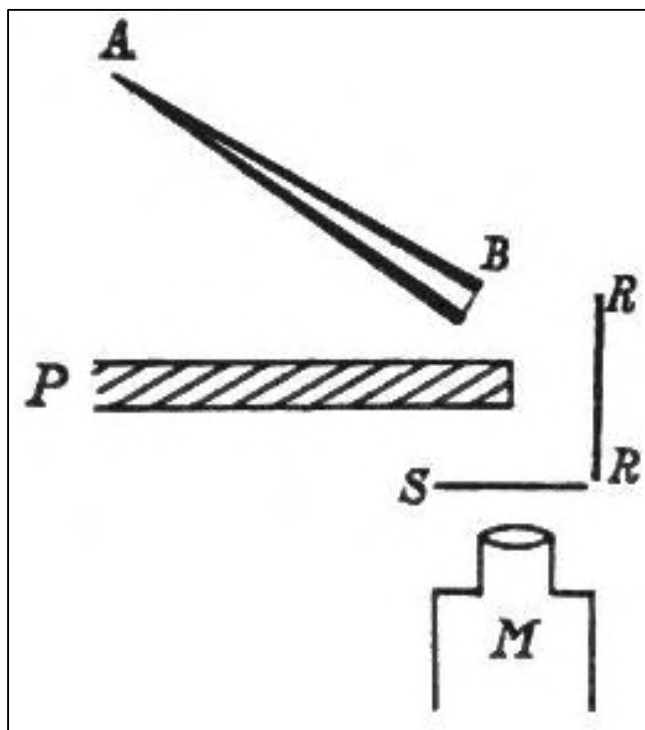
As experiências estão sendo realizadas com todas as substâncias para as quais é possível adquirir uma estreita prova na tentativa do estabelecimento de alguma conexão entre o poder de espalhamento e o poder de interrupção destes materiais. Uma investigação mais profunda nos permitirá também tratar do assunto de um ponto de vista teórico. (GEIGER, 1908, p. 177, tradução nossa).

Naquela época, em meados de 1910, o modelo atômico que os cientistas tinham em mente era o modelo de Thomson. O modelo atômico de Thomson consistia de uma esfera de carga elétrica positiva na qual os elétrons, de carga negativa, estariam distribuídos uniformemente, modelo esse denominado “pudim de passas”. Portanto, tais resultados encontrados por Geiger estavam em bom acordo com o modelo vigente.

Geiger continuou seus estudos sobre as partículas alfa tendo agora como assistente Ernest Marsden (1889 – 1970). Naquela época, Marsden tinha apenas 20 anos de idade. Andrade (1964, p. 111) relata um fato interessante sobre essa época. Segundo o autor, Rutherford em uma de suas últimas palestras narrou o seguinte fato:

Um dia Geiger veio até mim e disse ‘Você não acha que o jovem Marsden, que eu estou treinando em métodos radioativos, deveria começar uma pequena pesquisa?’ [...] Eu respondi ‘Por que não o deixe ver se alguma partícula alfa pode se espalhar por um grande ângulo?’ Eu posso lhe falar com confiança, eu não acreditei que haveria. Desde que nós soubemos, a partícula alfa era uma partícula maciça muito rápida, com muita energia, e você poderia mostrar que se o espalhamento ocorresse era devido ao efeito acumulado de vários pequenos espalhamentos e a chance de uma partícula alfa se dispersar para trás era muito pequena. Então eu me lembro que dois ou três dias mais tarde, Geiger veio com grande excitação ao meu encontro dizendo, ‘Nós conseguimos algumas partículas alfa se dispersando para trás....’ Definitivamente era o evento mais incrível que já havia acontecido em minha vida. Era quase tão incrível quanto se você arremessasse um projétil de 15 polegadas em um pedaço de pano de seda e ela voltasse e atingisse você. (ANDRADE, 1964, p.111, tradução nossa).

Como Rutherford disse, era possível que ocorressem tais espalhamentos, ou dispersões, para trás, mas o número encontrado por Geiger e Marsden foi muito grande. Um dos experimentos realizados por eles está esquematizado abaixo:



Esquema do instrumental utilizado por Geiger e Marsden. (GEIGER E MARSDEN, 1909, p.496).

A fonte de radiação era um tubo de vidro cônico AB. A extremidade desse tubo foi celada hermeticamente por uma folha de mica. A espessura dessa folha era equivalente a 1 cm de ar de forma que as partículas alfa poderiam passar facilmente através dela.

Havia, dentro do tubo gás a baixa pressão e a fonte de emissão era aproximadamente a 20 miligramas de RaBr_2 . Uma tela de sulfeto de zinco S foi fixada atrás de uma placa de chumbo P de tal modo que nenhuma partícula alfa poderia atingi-la diretamente. Quando um refletor era colocado na posição RR numa distância em torno de 1 cm a frente da extremidade do tubo, as cintilações poderiam ser observadas.

Utilizando um microscópio de baixo poder de resolução, o número de cintilações por minuto sobre uma área, em milímetros quadrados definidos, da tela de sulfeto de zinco foi contado com refletores de diferentes materiais. Cuidados foram tomados para que os

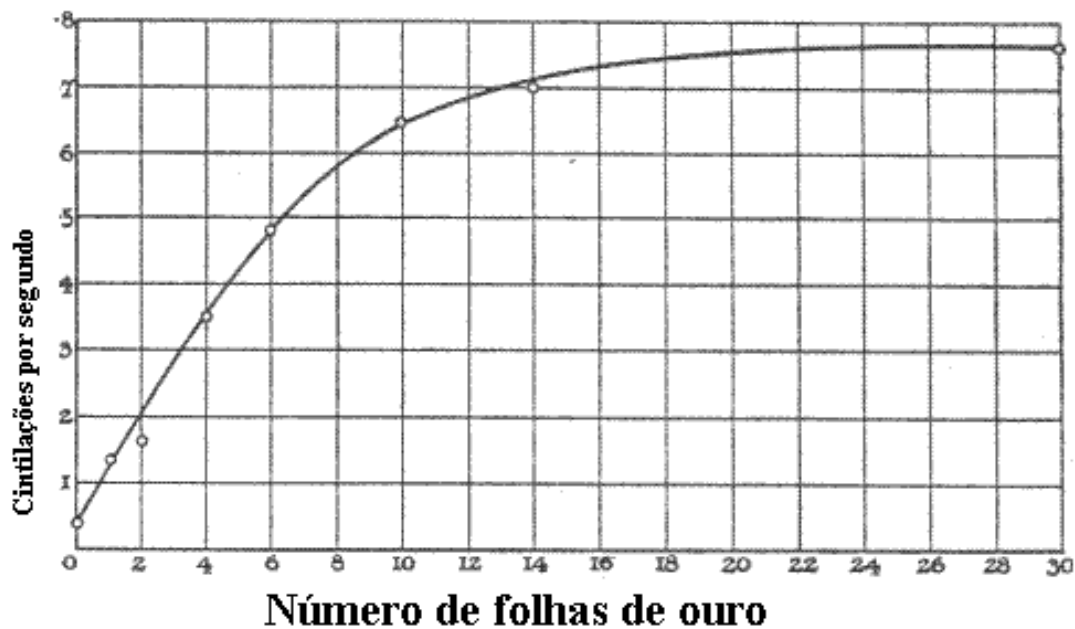
diferentes tipos de refletores fossem colocados exatamente na mesma posição. A tabela abaixo traz os resultados:

1 Metal	2 Peso atômico, A	3 Número de cintilações por minuto, Z	4 A/Z
Chumbo	207	62	30
Ouro	197	67	34
Platina	195	63	33
Estanho	119	34	28
Prata	108	27	25
Cobre	64	14,5	23
Ferro	56	10,2	18,5
Alumínio	27	3,4	12,5

Dados obtidos sobre o experimento de espalhamento. (GEIGER E MARSDEN, 1909, P. 497).

3. Baseado nos resultados da experiência de Geiger e Marsden, esboçados na tabela acima, o que você pode concluir?
4. A coluna 4 mostra a razão peso atômico/número de cintilações por minuto. Refaça os cálculos e compare com o resultado encontrado por Geiger e Marsden. Os resultados são os mesmos? O que você pode concluir?

Outro ponto pesquisado por eles foi a quantidade de partículas refletidas em virtude da espessura das folhas de ouro utilizada. O ouro foi utilizado porque ele pode ser obtido em folhas uniformes e muito finas. Muitas folhas foram utilizadas e cada uma, em relação ao poder de interrupção pelo ar, era equivalente a 0,4 mm de ar. O gráfico abaixo traz os resultados:



Número de cintilações pela quantidade de folhas de ouro. (GEIGER E MARSDEN, 1909, p. 498).

4. Baseado no quadro acima, o que você pode concluir?
5. Comente a frase de Geiger e Marsden sobre o quadro acima:

Em nossas experiências, em torno da metade das partículas refletidas foram refletidas de uma camada equivalente a aproximadamente 2 milímetros do ar. Se considerado a elevada velocidade e a massa das partículas alfa parece surpreendente que algumas das partículas alfa, como mostra a experiência, pode ser giradas dentro da folha de ouro de 6×10^{-5} cm em um ângulo de 90° , ou mais. Para produzir um efeito similar por um campo magnético, é necessário um intenso campo de 10^9 unidades absolutas. (GEIGER E MARSDEN, 1909, p. 498. Tradução nossa).

Texto 8 – A explicação dos resultados de Geiger e Marsden.

Os resultados de Geiger e Marsden deixaram Rutherford muito perturbado. Como tinham em mente o modelo atômico de Thomson, grandes ângulos de desvios não eram compatíveis com o modelo. Rutherford, segundo Boorse *et al* (1989, p. 181), analisou os dados obtidos por Geiger e Marsden. Eles encontraram que as partículas alfa ao passarem através de uma folha de ouro, de aproximadamente 6×10^{-5} cm de espessura (ou 0,00006 cm), espalharam as partículas num ângulo de 90° ou mais. Para que isso ocorra, deve-se assumir que existem pequenos desvios a cada encontro. Então, para que fossem possíveis tais ângulos, as partículas teriam que encontrar pelo caminho algo em torno de 10.000 colisões para produzir tal efeito. Esse era o ponto que Rutherford não concordava. Grandes ângulos de desvios não eram possíveis levando em consideração a espessura da folha de ouro utilizada.

Marsden relembra em suas observações no *Rutherford Jubilee Internacional Conference at Manchester*, em 1961 que Rutherford “*pensou durante muitas semanas naqueles notáveis resultados*” (BOORSE *et al*, 1989, p. 177, Tradução nossa).

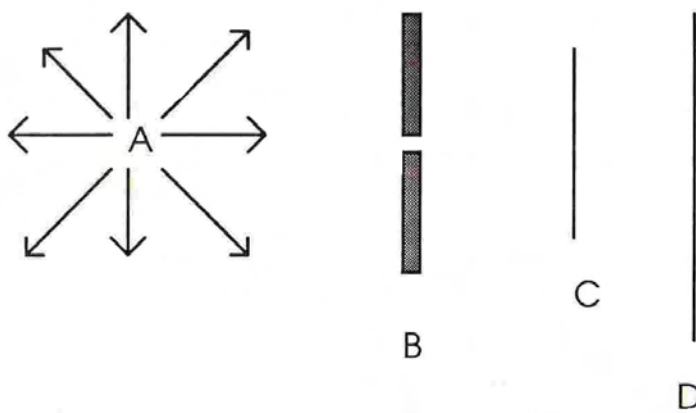
1. Represente esses desvios das partículas alfa ao atravessarem uma folha de ouro, do ponto de vista microscópico.

Nesse meio tempo, Rutherford e Thomas Royds (1881 – 1955) pesquisaram sobre se de fato as partículas alfa eram átomos de hélio ou não. O experimento consistiu em encerrar aproximadamente 140 miligramas de rádio purificado em um fino tubo de vidro, onde as partículas produzidas pela emissão radioativa eram concentradas em um outro compartimento isolado, impossibilitando o contato externo. A constatação que as partículas alfa eram átomos de hélio foi verificada através de análises espectroscópicas. Ao final do artigo, eles concluem:

Nós podemos concluir com certeza com essas experiências que a partícula alfa após ter perdido sua carga é um átomo do hélio. Outra evidência indica que a carga é duas vezes o valor unitário da carga do átomo do hidrogênio liberado na eletrólise da água.”(Rutherford e Royds, 1909, Tradução nossa).

No intuito de explicar os fatos experimentais observados por Geiger e Marsden, Rutherford publica na *Philosophical Magazine* seu famoso artigo intitulado “*O espalhamento das partículas alfa e beta pela matéria e a estrutura do átomo*”. De início Rutherford deixa claro que esses espalhamentos são mais evidentes nas partículas alfa devido a sua grande velocidade e energia. Rutherford acreditava que esses desvios eram devidos a vários e pequenos encontros que as partículas sofriam ao chocarem com os átomos que compunham a matéria. No entanto, como mostrado por Geiger e Marsden, algumas partículas sofriam deflexão com ângulos de 90° ao atravessarem uma finíssima lamina de ouro. Mais tarde, em 1910, Geiger aponta que a probabilidade de uma partícula ser defletida em ângulos 90° era extremamente pequena.

2. Utilizando o esquema abaixo (extraída do livro *Aprendendo Química*, Romanelli e Justi, 1999, p. 141), responda:



A = fonte de emissão de partículas alfa

B = placa de chumbo com orifício

C = lâmina de ouro

D = detector móvel de sulfeto de zinco

- O que você pode inferir sobre a trajetória das partículas alfa?

2.2 - O que você pode supor sobre a lâmina de ouro? Como você esquematizaria o arranjo atômico da folha de ouro?

2.3 - O que você pode dizer sobre a estrutura do átomo?

Rutherford não concordava com os resultados baseados no modelo atômico de Thomson. Utilizando novamente os dados fornecidos por Geiger e Marsden de 1909, se uma folha de ouro com espessura de aproximadamente 6×10^{-5} cm poderia espalhar partículas em ângulos maiores que 90° , e se pequenos desvios ocorressem a cada encontro, então seria necessário que cada partícula sofresse algo em torno de 10.000 colisões para espalharem com tais ângulos. Segundo Rutherford (1911) isso era improvável em virtude da espessura do material utilizado. Cada partícula que sofreu um desvio dessa magnitude colidiu com apenas um único átomo. Para que isso seja possível, ou seja, para explicar essa teoria de que a partícula encontra apenas um único átomo, o modelo atômico deveria então sofrer algumas mudanças.

Como forma de explicar tais resultados, Rutherford considera um átomo que contenha uma carga $\pm Ne$ (e nesse artigo, tem o valor de $4,65 \times 10^{-10}$ unidades eletrostáticas) no seu centro cercado por uma esfera de eletrificação que contém uma carga $\pm Ne$ distribuída

uniformemente ao longo de uma esfera de raio R . Esse centro teria aproximadamente um raio de aproximadamente 3×10^{-12} cm. Entre o centro e a esfera de eletrificação teria um raio menor que 10^{-8} cm. Essa estrutura também era válida para as partículas alfa, uma vez que as partículas beta eram consideradas elétrons de alta velocidade.

3. Esquematize como Rutherford inferiu sobre a estrutura do átomo para explicar tais desvios? Onde estariam as cargas positivas e negativas do átomo? Por quê?

Rutherford primeiramente considera a passagem de uma partícula positiva próximo ao centro de um átomo. Supondo que a velocidade da partícula não é apreciavelmente alterada pela sua passagem pelo átomo, o caminho da partícula sob a influência de uma força repulsiva descreve uma hipérbole, sendo o centro do átomo como foco externo. Na realidade a partícula não choca com o centro do átomo, mas a medida que vai se aproximando desse centro, sofre ação repulsiva.

Ele também admitiu através de seus cálculos que as partículas alfa e beta tem sua velocidade alterada ao sofrerem um único encontro atômico. Havia uma crença de que elas não alteravam sua velocidade, mas seus cálculos mostraram o contrário. Por exemplo, uma partícula alfa após atravessar uma finíssima folha de alumínio, ainda percorria uma distância de 7 cm antes de ser neutralizada, no entanto, quando uma partícula alfa atravessa essa mesma folha e é defletida num ângulo 90° , tem uma redução de 4,5 cm. É bom deixar claro que essa análise foi realizada apenas matematicamente, que experiências nesse sentido ainda seriam realizadas e estudadas.

4. Baseado no relato acima, esquematize o percurso de uma partícula alfa, tendo a figura abaixo como o centro de um átomo.



Centro de átomo que compõe a folha de ouro

Essa foi a teoria defendida por Rutherford sobre os espalhamentos das partículas carregadas eletricamente ao atravessarem a matéria. Em linhas gerais, a partícula alfa sofria grandes desvios de 90° em virtude de sofrer um único encontro com um átomo que compõe a matéria. Em razão disso Rutherford idealizou seu modelo atômico para que seus cálculos pudessem dar conta dos resultados experimentais.

As conclusões de Rutherford, ao final do seu artigo de 1911 foram brevemente relatadas. Ele inicia dizendo que comparando a sua teoria com os resultados experimentais, foi suposto, portanto que o átomo consiste de uma carga central supostamente concentrada em um ponto e que os grandes ângulos de desvios sofridos pelas partículas alfa e beta são principalmente devido à passagem delas por um forte campo central.

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. Ao mesmo tempo, evidências experimentais não são precisas o bastante para negar a possibilidade que uma pequena fração da carga positiva possa ser carregada por “*satellites*” estendendo a alguma distância do centro. Evidência neste aspecto poderia ser obtida examinando se a mesma carga central é exigida para explicar uma única grande deflexão de partículas alfa e beta; para partícula alfa deve haver uma aproximação muito maior ao centro do átomo que a partícula de beta de

velocidade proporcional para sofrer a mesma grande deflexão. (RUTHERFORD, 1911, p. 687. Tradução nossa).

Interessante notar que em nenhum momento em seu artigo ele menciona a palavra “núcleo” para nomear a carga central do átomo. Embora, ao longo de seu artigo, Rutherford não menciona, especificamente, a teoria planetária do átomo, mas faz uma referência ao trabalho do físico japonês Hantaro Nagaoka (1865-1950), que propôs um modelo planetário do átomo, ou “sistema saturniano”.

Segundo Rutherford (1911, p. 688), Nagaoka considerou matematicamente as propriedades do átomo saturniano, suposto consistir em uma massa central cercada por anéis de elétrons giratórios. Ele mostrou que esse sistema era estável se a força de atração fosse grande. Do ponto de vista de Nagaoka, a chance de uma grande deflexão estaria praticamente inalterada, se o átomo é considerado como um disco ou uma esfera.

Outro ponto que deve ser destacado é a natureza da carga elétrica central, ou seja, se é positiva ou negativa. Rutherford não deixa isso claro, ele apenas sugere:

As deduções da teoria são independentes do sinal da carga central, e está próximo de se obter uma evidência definida para determinar se é positiva ou negativa. Pode ser possível resolver a pergunta de sinal por consideração da diferença das leis de absorção das partículas beta. Pelo efeito da redução da velocidade da partícula beta deveria ser marcado muito mais por um centro positivo que por um centro negativo. Se a carga central é positiva, é fácil perceber que uma massa positivamente carregada [partícula alfa] se libertou do centro de um átomo pesado e adquiriria uma grande velocidade atravessando o campo elétrico. Pode ser possível dessa maneira definir a alta velocidade de expulsão de partículas sem supor que elas estão, inicialmente, em rápido movimento dentro do átomo. (RUTHERFORD, 1911, p. 688. Tradução nossa).

Em suma, a teoria atômica de Rutherford estabelecia que: um átomo consiste em uma carga central positiva, ou negativa, concentrada dentro de uma esfera de raio de aproximadamente 3×10^{-12} cm, e cercado por eletricidade do sinal oposto distribuída ao longo

do átomo de raio 10^{-8} cm. Uma partícula alfa que sofre um grande ângulo de desvio é devido apenas a um único encontro com essa carga central. A esse encontro, é suposto que fará a partícula alfa descrever uma hipérbole com o centro do átomo sendo um dos focos.

5. Baseado no que você acabou de ler, você acha que Rutherford estava realmente interessado em estabelecer um novo conceito de átomo? Quais as razões que o levaram a defender sua teoria?
6. Após a leitura, você acha que Rutherford teve influência de alguma outra pesquisa ao idealizar seu modelo atômico?
7. Sobre a carga central do átomo, qual o seu sinal? Porque você considera que a carga central pode assumir tais valores?
8. Alguns elementos radioativos, além de emitirem partícula alfa também emitem partículas beta. Baseado na teoria de Rutherford sobre a estrutura do átomo, como você explicaria a emissão de partículas beta por tais elementos?
9. Você acha correto dizer que Rutherford descobriu o núcleo atômico? Por quê?

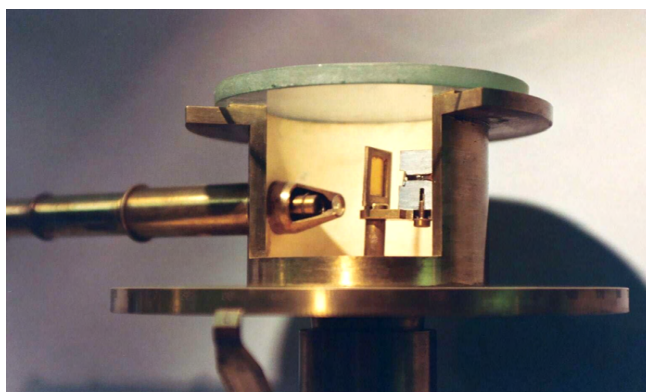
Texto 9 - Os experimentos de Geiger e Marsden para testar a teoria de Rutherford e as conclusões sobre a constituição do núcleo do átomo.

Geiger e Marsden lançaram-se na pesquisa para testar a teoria de Rutherford. Os resultados dessa pesquisa foram publicados num artigo em abril de 1913 na *Philosophical Magazine*. O artigo intitulado “*As Leis de Deflexão das Partículas alfa através de Grandes Ângulos*”.

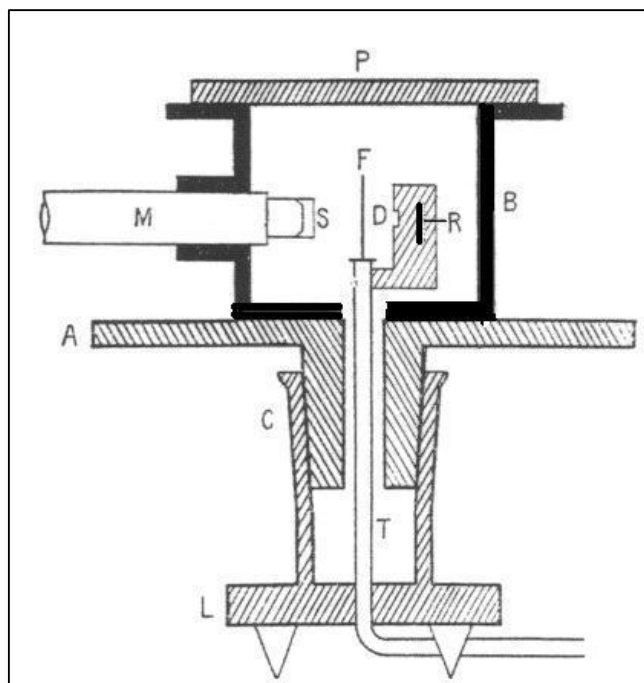
Por sugestão de Rutherford, Geiger e Marsden pesquisaram os seguintes pontos dessa teoria:

6. Variação do espalhamento com ângulo;
7. Variação do espalhamento com a densidade da matéria;
8. Variação do espalhamento com o peso atômico do material;
9. Variação do espalhamento com a velocidade das partículas incidentes;
10. A fração de partículas espalhadas por um ângulo definido.

O primeiro aspecto da pesquisa, a nosso ver, parece ser mais interessante. Para estudar a variação dos espalhamentos com o ângulo, Geiger e Marsden dispuseram do instrumental mostrado nas figuras abaixo. Na primeira figura o instrumental original, na segunda um esquema desse instrumental.



Instrumento usado por Geiger e Marsden (TURNER, 2005).



Equipamento elaborado para investigar os espalhamentos das partículas alfas (GEIGER E MARSDEN, 1913, p. 607).

O instrumental usado consistia numa forte caixa cilíndrica de metal B, o qual continha a fonte de partículas alfa R. Essa fonte de radiação era semelhante a que Rutherford e Royds utilizaram em 1909 em seus experimentos sobre a natureza das partículas alfa. Consistia em um tubo pequeno e fino tubo de vidro de aproximadamente 1 mm. em diâmetro, contendo uma quantidade grande de emanção de rádio bem purificado. As partículas alfa emitidas pela emanção e seus depósitos ativos (rádio A e rádio C) poderiam atravessar as paredes do tubo sem muita dificuldade. Foram utilizados aproximadamente 100 miligramas de emanção de rádio.

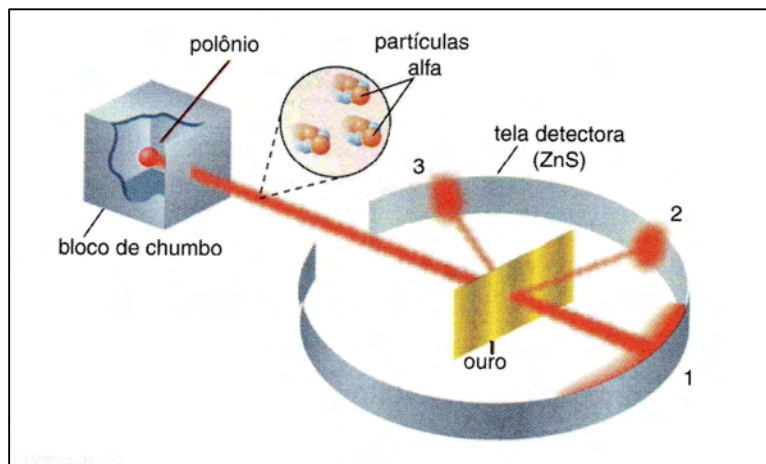
O metal a ser utilizado como “espalhador” de partículas era afixado em F, e um microscópio M o qual uma tela de sulfeto de zinco S estava rigidamente presa. Eles utilizaram nesse experimento como metal espalhador ouro e prata. A caixa foi fixada em uma plataforma circular graduada em graus A que poderia ser girada por meio de uma junta cônica hermética C. Girando a plataforma a caixa B e o microscópio moviam também, no entanto o suporte F e

a fonte R permaneciam em posição, sendo presos ao tubo T que foi fixado em uma plataforma L. A caixa B estava fechada por um vidro opaco P, e poderia ser esvaziado pelo tubo o T.

Por meio de um diafragma colocado em D, um feixe de partículas alfa se dirigia a folha de metal colocado em F, girando o microscópio as partículas alfa que se espalharam em diferentes direções poderiam ser observadas na tela S. Embora aproximadamente 100 miligramas de emanção de rádio estavam disponíveis para as experiências, a pequenez do efeito para os ângulos maiores de deflexão necessitou curtas distâncias entre a tela, a fonte e a folha de metal. Em algumas experiências a distância entre a fonte e a folha de metal era de 2,5 cm e a tela de sulfeto de zinco rotacionava numa circunferência de 1,6 cm de raio. Em outras experiências foram aumentadas estas distâncias.

Geiger e Marsden concluíram que o número de partículas defletidas em uma direção definida é diretamente proporcional a espessura da folha de metal utilizada. Quanto menor a espessura mais definida é a direção das partículas.

1. Você conseguiria fazer uma analogia com as figuras do equipamento de Geiger e Marsden com essa extraída do livro Química – série Brasil, dos autores Antonio Sardella e Marly Falcone?



Outro ponto estudado por Rutherford, apontado por ele em 1914, foi o valor da massa do núcleo de hélio. Ele encontrou que o núcleo de hélio tem uma massa quase quatro vezes maior que a do núcleo de hidrogênio. Ele supôs que o núcleo de hidrogênio era formado por apenas um elétron positivo, isto é, o átomo de hidrogênio, e denominou que era uma unidade da quais todos os átomos estão compostos. Conseqüentemente, segundo Rutherford (1914), era previsto, portanto que o átomo de hélio contém quatro elétrons positivos e dois negativos.

Parece estranho falar em elétron positivo para designar a carga positiva do átomo, mas naquela época o termo próton ainda não tinha sido empregado. O núcleo de hidrogênio foi designado próton por volta de 1918 pelo próprio Rutherford. Segundo Andrade (1964, p.164-165) o núcleo de átomos de hidrogênio deveria ter uma designação especial. Ele sugeriu chamá-los de próton, ou seja, um próton é um átomo de hidrogênio que perdeu seu elétron.

Essas informações obtidas sobre os núcleos de hidrogênio e hélio levaram Rutherford a pesquisar uma outra questão: Alguns elementos radioativos além de expelirem átomos de hélio (partículas alfas), também poderiam expelir átomos de hidrogênio, ou qualquer outro tipo de elemento com carga? Essa questão foi estudada por Rutherford e Robinson, por volta de 1913. Eles estudaram os átomos que são expulsos de uma substância radioativa bem como os átomos que expeliram as partículas. Eles encontraram que tais partículas são expelidas, mas que certamente são aproximadamente menos que 1 entre 10,000 do número de átomos de hélio. Com esse dado, Rutherford conclui que:

Dessa maneira o núcleo de hélio é uma configuração muito estável que resiste às intensas perturbações que resultam em sua expulsão com alta velocidade de um átomo radioativo, e é uma das unidades a qual, possivelmente a grande maioria dos átomos são compostos. A evidência radioativa indica que o peso atômico dos sucessivos produtos diminui quatro unidades em virtude da expulsão de uma partícula alfa, e foi freqüentemente apontado ao fato que os pesos atômicos de muitos dos átomos permanentes diferem aproximadamente quatro unidades. (RUTHERFORD, 1914, p. 494-495. Tradução nossa).

Ainda com relação composição do núcleo, Rutherford (1914) estabelece que as principais características físicas e químicas dos átomos são determinadas pelo seu núcleo, entretanto a massa do átomo dependia do número e do arranjo dos elétrons positivos e negativos que constituem o átomo. Considerando que a evidência experimental indicava que o núcleo tem dimensões muito pequenas, os constituintes (elétrons positivos e elétrons) deveriam estar muito próximos um dos outros.

2. Como você esquematizaria o modelo proposto por Rutherford para o átomo?

A maioria dos resultados obtidos pela teoria de Rutherford sobre os átomos havia sido estudada e verificada experimentalmente. Mas ainda havia a questão da estabilidade de tal sistema atômico. A teoria eletromagnética mostra que um objeto eletricamente carregado, quando gira a maneira do elétron em torno do núcleo, emite radiação eletromagnética, perdendo energia nesse processo. Segundo a teoria, à medida que perde energia o elétron iria espiralar para o interior até finalmente cair dentro do núcleo. Devido às dificuldades apresentadas pelo Modelo Atômico de Rutherford, sobretudo do ponto de vista da Mecânica Clássica. Bohr (1969, p. 96) afirma, em relação ao átomo de Rutherford sobre a dificuldade de *“natureza muito séria derivadas da aparente instabilidade do sistema de elétrons”*.

Rutherford estava ciente desse detalhe. Isso fica evidente na sua fala:

[...] Bohr chamou atenção às dificuldades de construir átomos na teoria do "núcleo", e mostrou que não podem ser deduzidas as posições estáveis dos elétrons externos pela mecânica clássica. Pela introdução de uma concepção conectada com o quantum de Planck [Teoria dos Quanta], ele mostrou sob certas condições que é possível construir átomos e moléculas simples. [...] Por enquanto pode haver muita diferença de opinião sobre a validade e do significado físico subjacente das suposições feitas por Bohr, [...] não há dúvida que as teorias de Bohr são de grande interesse e importância a todos os físicos como a primeira e definitiva tentativa de construir átomos simples e moléculas e explicar os seus espectros. (RUTHERFORD, 1914, p. 498. Tradução nossa).

3. Porque havia a contradição ao modelo proposto por Rutherford? De fato, ele estava preocupado com essa contradição? Por que, então, Rutherford propôs tal modelo?

5. ALGUMAS CONCLUSÕES.

Nessa pesquisa procuramos descrever e justificar os passos seguidos por Rutherford na elaboração do seu modelo atômico nuclear. Baseado em seus artigos originais, percebemos como esse conceito foi sendo estruturado de acordo com os novos fatos e problemas que foram surgindo.

Pelo material histórico pesquisado, descrito no capítulo 3, pudemos entender a trajetória de vida de Rutherford. A mudança da Inglaterra para o Canadá foi um dos pontos-chaves no andamento das pesquisas de Rutherford, pois foi naquela universidade que ele começou a se dedicar aos processos radioativos. Além desse aspecto, esse episódio também mostra que não só ele realizava pesquisas nessa área, mas sim cientistas franceses, como Mme. Curie. Havia uma constante troca de informação entre esses grupos.

A busca pela real identidade das partículas alfa foi outro destaque. Percebe-se a busca por métodos, a criação de técnicas, as hipóteses e conclusões para definirem se a partícula alfa de fato era um átomo de hélio que perdeu sua carga ou não. Usando esse fato como objeto de investigação, Rutherford e Royds conseguiram provar que de fato são átomos de hélio e permitiu que Geiger desenvolvesse dois métodos de contagem de partículas alfa (elétrico e cintilações), o que permitiu Rutherford desenvolver seu raciocínio sobre a estrutura da matéria, e a criação de um instrumento para detectar radiação, o contador Geiger.

O capítulo 3 nos revela também como Rutherford conseguiu elaborar tal estrutura para a matéria. Aquela visão de que o modelo atômico nuclear surgiu, aparentemente, para substituir o modelo atômico de Thomson foi, ao nosso entender, derrubada. Na realidade, o modelo proposto por Rutherford era baseado em cálculos matemáticos que tinham como meta

explicar os resultados encontrados por Geiger e Marsden sobre o espalhamento das partículas eletricamente carregadas expelidas de compostos radioativos na matéria, no caso, finíssimas folhas de metais.

Ao elaborar tal modelo para a matéria, Rutherford comete alguns equívocos, por exemplo, quanto a estabilidade do sistema atômico, os valores do peso atômico para alguns elementos e a constituição da carga central, o núcleo. Tais equívocos tinham uma justificativa.

Quanto a estabilidade do sistema atômico, que posteriormente foi reformulada por Bohr com a introdução da teoria dos quanta de Planck, originando a velha Mecânica Quântica, Rutherford deixou claro que não se importava com tal fato. O seu verdadeiro objetivo não era estabelecer uma nova estrutura para o átomo, mas sim dar conta dos resultados encontrados por Geiger e Marsden. Como seu modelo conseguia explicar porque algumas partículas alfa desviavam com ângulos de 90° ao se colidirem com a matéria, Rutherford resolveu ignorar a questão da estabilidade. Futuramente, em 1914, admitiu que havia essa dificuldade, mas não mostrou interesse em estudar esse fato, sendo isso objeto de estudo de Bohr.

Outro ponto que nos chama atenção é o valor da carga do centro do átomo, o núcleo. É costume ouvirmos dizer que o átomo apresenta uma carga central positiva e que essa descoberta se deve a Rutherford. Em primeiro lugar, nos parece estranho dizer que Rutherford descobriu o núcleo. A definição de descoberta é algo que estava encoberto e que, conseqüentemente, foi encontrado. Pela nossa pesquisa Rutherford não descobriu o núcleo do átomo, pelo contrário, ele apenas sugeriu que o átomo pudesse ter uma região central onde toda sua carga estivesse concentrada porque seus cálculos matemáticos o conduziram a isso.

De acordo com a pesquisa, num primeiro momento, Rutherford admite que o núcleo tenha tanto cargas positivas quanto negativas e ainda que, um pouco dessa carga positiva poderia ser carregada até certa distância do núcleo por *satélites*. Com relação à carga positiva, ele admitiu que tratava-se do núcleo de hidrogênio. A carga negativa era formada de elétrons, uma vez que naquela época, Thomson já tinha proposto a existência desses corpúsculos negativos. Mesmo tendo as pesquisas avançadas sobre a constituição do núcleo e tendo muitas provas de que o núcleo de fato poderia ser positivo, Rutherford, no seu artigo de 1914, ainda assim admite que o núcleo continha carga negativa em virtude de alguns elementos radioativos emitirem partículas beta, que são negativas.

Interessante ressaltarmos que a idéia de átomo planetário não é de Rutherford, mas sim do físico japonês Hantaro Nagaoka, que admitiu os átomos como “átomos saturnianos”. Nagaoka propôs, em 1904, esse tipo de arranjo atômico pelos resultados de suas pesquisas sobre os espectros luminosos emitido pelos corpos. Segundo esse modelo, as oscilações perpendiculares ao plano de movimento dos anéis resultavam no espectro tipo banda (contínuo), enquanto as oscilações paralelas aquele plano resultavam num espectro tipo raia (discreto) (BASSALO, 1999).

Isso nos faz pensar se Rutherford idealizou ou conduziu seus cálculos por influência da idéia de Nagaoka ou foi apenas uma coincidência.

Sobre a questão de que Rutherford admitiu que os elétrons estivessem em camadas definidas na eletrosfera como mostra certos livros didáticos é outro equívoco. Em nenhum momento ele admitiu que os elétrons estivessem em camadas, mas sim distribuídos ao redor desse núcleo numa esfera de eletrificação. Essa idéia de camadas foi proposta por Bohr em um de seus postulados.

Aquela famosa experiência que traz Rutherford como autor e que é mostrada nos livros didáticos de Química como a responsável pela descoberta do núcleo, na realidade não foi bem dessa maneira. De acordo com o material pesquisado, a experiência foi realizada por seus dois alunos, Geiger e Marsden, a pedido do próprio Rutherford para conferir se de fato o seu arsenal matemático para a explicação dos desvios das partículas alfa estavam corretos, ou seja, uma experiência para provar os seus cálculos matemáticos. Havia um fato encontrado por Geiger e Marsden, em 1909, das experiências sobre os desvios das partículas alfa ao chocarem com a matéria. Pelo modelo atômico de Thomson não era possível tal desvio; Rutherford entra com os cálculos para explicar tais resultados estabelecendo uma teoria; Geiger e Marsden testam a teoria utilizando aquela experiência.

Não estamos, contudo, com essas críticas a respeito das conclusões de Rutherford depreciar e/ou arruinar os seus méritos, pelo contrário, estamos sim buscando argumentos que mostrem como as pesquisas e resultados de Rutherford foram interpretados de maneira errônea e que acabaram sendo perpetuados até os dias atuais em nossos manuais de ensino. Com esse propósito, sugerimos, no capítulo 4, algumas atividades em forma de texto para que os professores pudessem trabalhar com seus alunos em sala de aula.

Os textos contendo o material histórico podem proporcionar aos alunos, por exemplo, uma visão de como a ciência foi sendo construída, as tentativas e erros dos cientistas perante algum fato que hoje consideramos como certos, assim como, relacionar alguns fatos de hoje sobre a radioatividade no intuito de entenderem como esse conceito foi sendo construído e interpretado.

Não estamos certos em dizer se essas atividades poderão ou não atingir nossos objetivos como proposto no capítulo 4, mas poderemos posteriormente disponibilizar essas atividades para futuras investigações sobre o sucesso das metas de tais atividades.

Ressaltamos que a nossa pesquisa trouxe uma contribuição para o entendimento do Conhecimento Químico, ou seja, de que forma ele foi e é construído e como esse conhecimento está presente nas nossas vidas. É importante para os professores e também para os alunos entenderem a importância de se conhecer e entender o universo Químico e também como esse conhecimento está inserido num outro universo chamado Ciência.

Cabe ressaltar que com o uso da História da Ciência em nossa pesquisa nos foi possível cumprir nossos objetivos, constituindo, portanto, uma importante ferramenta de pesquisa.

6. REFERÊNCIAS.

- ACOT, P., *História das Ciências*, Edições 70, coleção Universo da Ciência, Lisboa, 2001.
- ALFONSO-GOLDFARB, A. M.. Alguns apontamentos sobre a Historiografia em história da Ciência. In: Angela Maria Martins. (Org.). *O tempo e o Cotidiano na história*. São Paulo, 1993, p. 79-87.
- ANDRADE, E.N. da C., *Rutherford and the Nature of the Atom*. Anchor Books, Doubleday & Company Inc. Garden City, New York, 1964.
- BACHELARD, G. *O novo espírito científico*. Tempo Brasileiro, Rio de Janeiro, 2000.
- BASSALO, J.M.F. Nascimento da Física. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 21, no. 2, Junho, 1999
- BASTOS, F. *História da Ciência e Ensino de Biologia*. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo, 1998. (32-56).
- BASTOS, F. História da Ciência e Pesquisa em Ensino de Ciências: Breves Considerações. IN: *Questões Atuais no Ensino de Ciências*. NARDI, R. São Paulo: Escrituras Editora, 1998a. p. 43-52.
- BOHR, N. Sobre a constituição de átomos e moléculas, *Philosophical Magazine*, série 6, vol. 26, n° 151, julho de 1913. IN: *Textos Fundamentais da Física Moderna*, vol. II. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1969.
- BOORSE, H. A. et al. *The atomic Scientists – A Biographical History*. Wiley Science Editions. John Wiley & Sons Inc. New York, 1989.
- BRASIL, MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO. PCN+, *Ensino Médio, Orientações Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais. História*. Brasília, Secretaria de Educação Média e Tecnológica, 2002.
Disponível em http://santoinacio-rio.com.br/PCN_mais_Ciencias_da_Natureza.pdf Acessado em 04/07/2005.
- BRASIL, MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO. *Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional*. Secretaria da Educação. Brasília, 1996.
Disponível em <http://portal.mec.gov.br/arquivos/pdf/ldb.pdf> Acessado dia 04/05/2005.
- CAMPBELL, J. *Ernest Rutherford – Scientist Supreme*. Obtido via internet no site <http://www.rutherford.org.nz/>. Acessado dia 18/04/2005.
- CAMPOS, C., CACHAPUS, A. Imagens de Ciência em Manuais de Química Portugueses. *Química Nova na Escola*, n° 6, p. 24-29. Novembro 1997.
- CASTRO, R. S. História e Epistemologia da Ciência: Investigando suas contribuições num curso de Física de segundo grau. Dissertação de mestrado. Instituto de Física/Faculdade de Educação da Universidade de São Paulo, 1993.

CHASSOT, A.I., Sobre Prováveis Modelos Atômicos, *Química Nova na Escola*, nº 3, maio 1996 p.3.

DEBUS, A. G. A Ciência e as Humanidades: Função Renovadora da Integração Histórica. *Revista da Sociedade Brasileira de História da Ciência*. **5**: 3 - 13, 1991.

FARIAS, R. F. de, *Para Gostar de Ler a História da Química* – vol. 2. Editora Átomo, Campinas, 2003.

FEATHER, N. *Lord Rutherford*. Priory Press Limited, London, 1973.

FIGUEIRAS, C. A. L., A História da Ciência e o Objeto de seu Estudo: Confrontos entre a Ciência Periférica, a Ciência Central e a Ciência Marginal. *Química Nova*, Vol. 24, No. 5, 709-712, 2001.

FREIRE JUNIOR, O. Relevância da Filosofia e da História das Ciências para a Formação dos Professores de Ciências. IN: SILVA FILHO, W. J. da *et al. Epistemologia e Ensino de Ciências*. Waldomiro José da Silva Filho (org). Salvador: Arcádia, 2002.

GAGLIARDI, R. Cómo Utilizar la Historia de las Ciencias en la Enseñanza de las Ciencias. *Enseñanza de las Ciencias*, v.6, n.3, p.291-296. 1988.

GAGLIARDI, R., GIORDAN, A. La Historia de las Ciencias: Una Herramienta para la Enseñanza. *Enseñanza de las Ciencias*, v.4, p. 253-258, 1986.

GEIGER, H. On the Scattering of the α -Particles by Matter, *Proceedings of the Royal Society of London*, **Jul/ 1908**, p. 174-177.

GEIGER, H. The Scattering of the α -Particles by Matter: *Proceedings of the Royal Society*, vol A83, p. 492 – 504, **1910**.

GEIGER, H, MARSDEN, E., On a Diffuse Reflection of the α - Particles: *Philosophical Magazine*, **Jun/1909**.

GEIGER, H, MARSDEN, E., The Laws of Deflexion of α Particles through Large Angles: *Philosophical Magazine*, **Abril/1913**.

GIL PEREZ, D. Contribución de la Historia y de la Filosofía de las Ciencias al Desarrollo de un Modelo de Enseñanza/Aprendizaje como Investigación. *Enseñanza de Las Ciencias*, v.11, n.2, p.197-212.

GUERRA, A. et al. A História da Ciência ajuda no aprendizado de Ciências? *VII Seminário Nacional de História da Ciência e da Tecnologia*, 1999. (207-209).

KAUFFMAN, G. B. History in the Chemistry Curriculum. In: *History, Philosophy, and Science Teaching: Selected Readings*. Michael R. Matthews, Toronto, 1991. p. 185 – 200.

LOBO, S. F., Epistemologia Bachelardiana e o Progresso Filosófico das Ciências Físicas: Implicações na Química e no Ensino de Química. IN: SILVA FILHO, W. J. da *et al.*

Epistemologia e Ensino de Ciências. Waldomiro José da Silva Filho (org). Salvador: Arcádia, 2002.

MACHADO, J.R.C, Considerações sobre o ensino de Química. *Educação Química*. Centro de Educação/ UFPA, 2000. Obtido via internet <http://www.ufpa.br/eduquim/consideracoes.htm>. Acessado dia 18/02/2005.

MALDANER, O.A.A *Formação Inicial e Continuada de Professores de Química: Professores/Pesquisadores*. Coleção Educação Química. Ed. UNIJUÍ: Ijuí, 2000.

MARQUES, D. M.; CALUZI, J.J. Ensino de Química e História da Ciência: O Modelo Atômico de Rutherford. In. 4ª ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS – ABRAPEC, Bauru, 2003.

MARTINS, R. A. Sobre o Papel da História da Ciência no Ensino. *Boletim da Sociedade Brasileira da História da Ciência*, 9, 3-5, 1990.

MARTINS, L. A. P. A História da Ciência e o Ensino de Biologia. *Jornal Semestral do Grupo de Estudo e Pesquisa em Ensino e Ciência da Faculdade de Educação da Unicamp*, 5, 18-21, 1998.

MORTIMER, E. F. *O ensino de teoria atômica e de ligação química no segundo grau: drama, tragédia ou comédia?* Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, 1988.

MORTIMER, E. F. Pressupostos Epistemológicos para uma Metodologia de Ensino de Química: Mudança Conceitual e Perfil Epistemológico, *Química Nova*, 15 (3), 1992.

MORTIMER, E. F., Concepções Atomistas dos Estudantes, *Química Nova na Escola*, nº 1, maio 1995.

MORTIMER, E. F. *et al.* A Proposta Curricular de Química do Estado de Minas Gerais: Fundamentos e Pressupostos. *Química Nova*, 23 (2), 2000.

MOSELEY, H.G.J., The High Frequency Spectra Of The Elements. *Philosophical Magazine*, 1913. Obtido via internet <http://dbhs.wvusd.k12.ca.us/webdocs/Chem-History/Moseley-article.html>. Acessado em 12/06/1005.

NAGAOKA, H. Kinetics of a System of Particles illustrating the Line and the Band Spectrum and the Phenomena of Radioactivity. *Philosophical Magazine* s.6, v.7 May 1904, p. 445-455. Obtido via internet <http://dbhs.wvusd.k12.ca.us/webdocs/Chem-History/Nagaoka-1904.html> Acessado em 18/02/2005.

NYE, M. J. *The Question of the Atom*. Los Angeles: Tomash Publishers, 1984

PEREZ, J.R.B, *A Divulgação Científica e o Ensino de Ciências: Uma Abordagem sobre o conceito massa-energia relativístico*. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista, 2004.

PIMENTEL, J.R., Livros Didáticos de Ciências: A Física e alguns Problemas. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, v.15, n.º3: p. 308-318, dezembro 1998.

READ, J. *From Alchemy to Chemistry*. Dover Publications, Inc. New York, 1995.

ROMANELLI, L. I, O papel mediador do professor no processo de ensino-aprendizagem do conceito átomo, *Química Nova na Escola*, n.º. 3, p. 27-31, maio 1996.

ROMANELLI, L.I., JUSTI, R.D., *Aprendendo Química*. Editora Unijui, Ijuí, 1999.

RUDD, Historical Scientific Instrument Gallery. Dolezalek Quadrant Electrometer. University of Nebraska-Lincoln. Department of Physics and Astronomy. Obtido via Internet. <http://physics.unl.edu/outreach/histinstr/intro.html>. Acessado dia 13/06/2005.

RUSSEL, T. L. What History of Science, How Much, and Why? *Science Education*, **65**(1): 51- 64, 1981.

RUTHERFORD, E. Uranium Radiation and the Electrical Conduction Produced by It, **jan/1899**. IN. *The Collected Papers of Lord Rutherford of Nelson*. Volume I, New Zealand, Cambridge, Montreal. Interscience Publishers Inc. New York, 1962.

RUTHERFORD, E. A Radioactive Substance emitted from Thorium Compounds, **jan/1900**. IN. *The Collected Papers of Lord Rutherford of Nelson*. Volume I, New Zealand, Cambridge, Montreal. Interscience Publishers Inc. New York, 1962.

RUTHERFORD, E. Emanations from Radio-active Substances, **Nature**, **1901**. IN. *The Collected Papers of Lord Rutherford of Nelson*. Volume I, New Zealand, Cambridge, Montreal. Interscience Publishers Inc. New York, 1962.

RUTHERFORD, E. The Chemical Nature of the Alpha Particles from Radioactive Substances: **Ernest Rutherford – Nobel Lecture, 1908**. Obtido via Internet <http://nobelprize.org/chemistry/laureates/1908/rutherford-lecture.html>. Acessado em 12/03/2005.

RUTHERFORD, E., McCLUNG, R.K. Energy of Röntgen and Becquerel Rays, and the Energy required to produce an Ion in Gasses, **jun/1900**. IN. *The Collected Papers of Lord Rutherford of Nelson*. Volume I, New Zealand, Cambridge, Montreal. Interscience Publishers Inc. New York, 1962.

RUTHERFORD, E., SODDY, F, The Cause and Nature of Radioactivity part I, **set/1902**. IN. *The Collected Papers of Lord Rutherford of Nelson*. Volume I, New Zealand, Cambridge, Montreal. Interscience Publishers Inc. New York, 1962.

RUTHERFORD, E., SODDY, F, The Cause and Nature of Radioactivity part II, **nov/1902a**. IN. *The Collected Papers of Lord Rutherford of Nelson*. Volume I, New Zealand, Cambridge, Montreal. Interscience Publishers Inc. New York, 1962.

RUTHERFORD, E. The Amount of Emanation and Helium from Radium, **Nature**, **1903**. IN. *The Collected Papers of Lord Rutherford of Nelson*. Volume I, New Zealand, Cambridge, Montreal. Interscience Publishers Inc. New York, 1962.

RUTHERFORD, E. The Magnetic and Electric Deviation of the Easily Absorbed Rays from Radium, **feb/1903**. IN. *The Collected Papers of Lord Rutherford of Nelson*. Volume I, New Zealand, Cambridge, Montreal. Interscience Publishers Inc. New York, 1962.

RUTHERFORD, E. Slow Transformation Products of Radium, **set/1904**. IN. *The Collected Papers of Lord Rutherford of Nelson*. Volume I, New Zealand, Cambridge, Montreal. Interscience Publishers Inc. New York, 1962.

RUTHERFORD, E. The Succession of Changes in Radioactive Bodies. *The Bakerian Lecture*, **mai/1904a**. IN. *The Collected Papers of Lord Rutherford of Nelson*. Volume I, New Zealand, Cambridge, Montreal. Interscience Publishers Inc. New York, 1962.

RUTHERFORD, E., BOLTWOOD, B.B. The Relative Proportion of Radium and Uranium in Radio-active Minerals, *American Journal of Science*, **1906**. IN. *The Collected Papers of Lord Rutherford of Nelson*. Volume I, New Zealand, Cambridge, Montreal. Interscience Publishers Inc. New York, 1962.

RUTHERFORD, E. The Radiation and Emanation of Radium – Part II, **ago/1904b**. IN. *The Collected Papers of Lord Rutherford of Nelson*. Volume I, New Zealand, Cambridge, Montreal. Interscience Publishers Inc. New York, 1962.

RUTHERFORD, E. Some Properties of the α Rays from Radium – First Paper, **jul/1905**. IN. *The Collected Papers of Lord Rutherford of Nelson*. Volume I, New Zealand, Cambridge, Montreal. Interscience Publishers Inc. New York, 1962.

RUTHERFORD, E. Charge Carried by α and β Rays of Radium, **ago/1905a**. IN. *The Collected Papers of Lord Rutherford of Nelson*. Volume I, New Zealand, Cambridge, Montreal. Interscience Publishers Inc. New York, 1962.

RUTHERFORD, E. Retardation of the Alpha Particle from Radium in passing through Matter, **ago, 1906** IN. *The Collected Papers of Lord Rutherford of Nelson*. Volume I, New Zealand, Cambridge, Montreal. Interscience Publishers Inc. New York, 1962.

RUTHERFORD, E. Some Properties of the α Rays from Radium – Second Paper, **jan/1906a**. IN. *The Collected Papers of Lord Rutherford of Nelson*. Volume I, New Zealand, Cambridge, Montreal. Interscience Publishers Inc. New York, 1962.

RUTHERFORD, E. Magnetic and Electric Deflection of the α Rays from Radium, *The Physical Review*, **1906b**. IN. *The Collected Papers of Lord Rutherford of Nelson*. Volume I, New Zealand, Cambridge, Montreal. Interscience Publishers Inc. New York, 1962.

RUTHERFORD, E., GEIGER, H., An Electrical Method of Counting the Number of α – Particles from Radio-active Substances: *Proceedings of the Royal Society of London*, **Jul/ 1908**, p.141 – 161.

RUTHERFORD, E., GEIGER, H., The Charge and Nature of the α -Particle: *Proceedings of the Royal Society of London*, **Jul/ 1908a**, p.162-173.

RUTHERFORD, E., ROYDS, T. The Nature of the α Particle from Radioactive Substances. *Philosophical Magazine*, **Nov/1909**, p. 261 – 268.

RUTHERFORD, E., The Scattering of α and β Particles by Matter and the Structure of the Atom: *Philosophical Magazine*, series 6, volume 21, **Abril/1911**.

RUTHERFORD, E., The Structure of the Atom: *Philosophical Magazine*, series 6, volume 27, **Março/1914**.

RUTHERFORD, E., NUTTALL, J. M. Scattering of α Particles by Gases. *Philosophical Magazine*, **1913**. IN. *The Collected Papers of Lord Rutherford of Nelson*. Volume I, New Zealand, Cambridge, Montreal. Interscience Publishers Inc. New York, 1962.

SACKS, O. *Tio Tungstênio – Memórias de uma infância química*. São Paulo. Companhia das Letras, 2002.

SANCHÉS RON, J.M., Usos y Abusos de la Historia de la Física en la Enseñanza. *Enseñanza de las Ciencias*, v.6, n.2, p.179-188, 1988.

SANTOS, W. L.P, SCHNETZLER, R. P., Função Social: O que significa ensino de química para formar o cidadão? *Química Nova na Escola*, p. 28-34, Novembro, 1996.

SARDELLA, A. & FALCONE, M. Química – série Brasil, Ensino Médio – vol. único. 1ª Edição. Editora Ática. São Paulo, 2004.

SEGRÈ, E. *Dos Raios X aos Quarks – Físicos Modernos e suas descobertas*. Brasília: Editora da UnB, 1987.

SCHNETZLER, R. P., ARAGÃO, R. M.R., Importância, Sentido e Contribuições de Pesquisas para o Ensino de Química. *Química Nova na Escola*, p.27-31, Maio 1995.

SCHNETZLER, R. P. Concepções e Alertas sobre a Formação Continuada de Professores de Química. *Química Nova na Escola*, p. 15-20, Novembro 2002.

SCHNETZLER, R. P. A Pesquisa em Ensino de Química no Brasil: Conquistas e Perspectivas. *Química Nova*, vol. 25, Supl. 1, p. 14-24, 2002a.

TEODORO, S. R., *A História da Ciência e as Concepções Alternativas de Estudantes como Subsídios para o Planejamento de um Curso sobre Atração Gravitacional*. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista. Bauru, 2000.

TERRAZZAN, E. A. *Perspectivas para a Inserção da Física Moderna na escola Média*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 1994.

THE NOBEL PRIZE, The Nobel Prize in Chemistry 1908 – *Lord Ernest Rutherford of Nelson*. Disponível em <http://www.nobelpris.org/english/chemie/rutherford.html>. Acessado dia 12/03/2005.

THE RUTHERFORD MUSEUM, McGill University, 46 pags, Montreal, 1996.

TURNER, D. *Nuclear Physics*. Furman University, Greenville, South Caroline. Disponível em <http://physunserver.furman.edu/people/jturner/physics39/phy39.htm>. Acessado em 12/09/2005.

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

VILLARD, P. Sur la Réflexion et la Réfraction des Rayons Cathodiques et des Rayons Déviés du Radium. *Comptes Rendus. Des Séances de L'Académie des Sciences*. Janvier – Juin 1900. Disponível em <http://gallica.bnf.fr>, acessado dia 5/07/2005.

WEHR, M. R., *Física do átomo*. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico S/A, 1965.

ANEXO

ANEXO 1.

Em maio de 1904, Rutherford foi convidado pela *Royal Society* para pronunciar a *Bakerian Lecture*, na Inglaterra, intitulada “*As Sucessivas Mudanças nos Corpos Radioativos*” (*The Succession of Changes in Radioactive Bodies*) que foi publicada na *Philosophical Transactions of the Royal Society*.

Nessa conferência, Rutherford expôs os quatro elementos (rádio, tório, urânio e actínio) como sendo cada um a fonte de uma série de mudanças radioativas. É interessante conhecermos quais os elementos e características sobre esses compostos radioativos.

PRODUTO	Tempo de Meia Vida (T)	Algumas Propriedades Físicas e Químicas
Urânio	109 anos	Solúvel em excesso de carbonato de amônio.
Urânio X	22 dias	Insolúvel em excesso de carbonato de amônio.
Produto final	-----	-----

Série do Urânio (adaptado, RUTHERFORD, 1904, p. 710).

PRODUTO	Tempo de Meia Vida (T)	Algumas Propriedades Físicas e Químicas
Tório	3x10 ⁹ anos	Insolúvel em amônia
Tório X	4 dias	Solúvel em amônia
Emanação de tório	1 minuto	Gás quimicamente inerte; condensa em torno de -120°.
Tório A	11 horas	Comportam-se como sólido; insolúvel em amônia; solúvel em ácidos fortes; tório A pode ser separado do tório B por eletrolise; volátil em aquecimento brando.
Tório B	55 minutos	
Tório C (produto final)	-----	-----

Série do Tório (adaptado, RUTHERFORD, 1904, p. 710).

PRODUTO	Tempo de Meia Vida (T)	Algumas Propriedades Físicas e Químicas
Actínio	-----	-----
Actínio X	-----	-----
Emanação de actínio	3-7 segundos	Comporta-se como um gás
Actínio A	41 minutos	Comportam-se como um sólido; solúvel em ácidos fortes; actínio A pode ser parcialmente separado de B por eletrolise.
Actínio B	1-5 minutos	
Actínio C (produto final)	-----	-----

Série do Actínio (adaptado, RUTHERFORD, 1904, p.750).

PRODUTO	Tempo de Meia Vida (T)	Algumas Propriedades Físicas e Químicas
Rádio	800 anos	-----
Emanação de rádio	4 dias	Gás quimicamente inerte; condensa em torno de -150°; espectro definido; volume diminui com o tempo.
Rádio A	3 minutos	Comportam-se como sólido; solúveis em ácidos fortes; B é mais volátil que A ou C e pode ser temporariamente separado deles; volátil em aquecimento brando.
Rádio B	21 minutos	
Rádio C	28 minutos	
Rádio D	Em torno de 40 anos	Emite apenas raios β . Solúvel em ácidos fortes
Rádio E	Em torno de 1 ano	Provavelmente um constituinte ativo de série radio-telúrio; solúvel em ácidos fortes; volatiliza com forte aquecimento; deposita sobre o bismuto em solução.

Série do Rádio (adaptado, RUTHERFORD, 1904, p. 710).