

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE QUÍMICA

LORENA DE SOUZA CECELOTTI

**História da Ciência no Ensino de Química: Análise Historiográfica da
Radioatividade e Estrutura da Matéria**

UBERLÂNDIA/MG

2026

LORENA DE SOUZA CECELOTTI

**HISTÓRIA DA CIÊNCIA NO ENSINO DE QUÍMICA: ANÁLISE
HISTORIOGRÁFICA DA RADIOATIVIDADE E ESTRUTURA DA MATÉRIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Licenciatura em Química da Universidade Federal de Uberlândia como requisito para a obtenção do título de Licenciado em Química.

Orientador: Prof. Dr. Deividi Marcio Marques

UBERLÂNDIA/MG

2026

AGRADECIMENTOS

Dedico este trabalho, primeiramente, à minha irmã mais velha, Maria Eduarda, por todo o apoio, incentivo e presença ao longo de toda a minha graduação. Seu suporte foi essencial para que eu seguisse firme, mesmo nos momentos mais difíceis.

Aos meus amigos Raphael e João, deixo meu sincero agradecimento pelo apoio emocional constante, pela ajuda nos trabalhos da faculdade e pelas inúmeras noites de estudo sem dormir. A parceria e a amizade de vocês tornaram essa trajetória mais leve e possível.

Às professoras Amanda e Viviani, que sempre foram uma grande inspiração para mim. Agradeço pela paciência, pelo cuidado e por tudo o que me ensinaram, não apenas sobre a vida acadêmica, mas também sobre a vida fora dela.

Por fim, dedico este trabalho ao meu orientador, Deividi, por confiar em mim desde o início, pelo apoio contínuo ao longo de toda a graduação, pelas oportunidades na pesquisa, nas iniciações científicas, nos trabalhos, congressos e na construção deste Trabalho de Conclusão de Curso. Sua orientação foi fundamental para a minha formação acadêmica e pessoal.

“Ensinar é um exercício de imortalidade. De alguma forma, continuamos a viver naqueles cujas vidas tocamos.”

(Hannah Arendt)

RESUMO

A radioatividade constitui um dos temas centrais da Química e da Física moderna, estando presente em diferentes áreas do conhecimento e em diversas aplicações tecnológicas. No entanto, no ensino na Educação Básica, especialmente no Ensino Médio, ocorre muitas vezes de forma descontextualizada, com pouco enfoque em seu desenvolvimento histórico e nos processos que levaram à construção desses conceitos. Diante disso, este trabalho tem como objetivo analisar o desenvolvimento histórico da radioatividade e das investigações sobre a estrutura da matéria, com ênfase nos estudos de Ernest Rutherford, Hans Geiger e Ernest Marsden, à luz da historiografia da ciência contemporânea. A pesquisa caracteriza-se como qualitativa, de natureza bibliográfica e documental, baseada na análise de documentos relacionadas às descobertas dos raios X, à radioatividade e à consolidação do modelo atômico nuclear. Foram examinadas as contribuições de cientistas como Henri Becquerel, Marie Curie, Ernest Rutherford e Frederick Soddy, considerando seus experimentos, interpretações e debates científicos no contexto histórico em que foram produzidos. A análise buscou evitar interpretações anacrônicas, valorizando a ciência como um processo histórico, coletivo e em constante construção.

PALAVRAS-CHAVE: História da Ciência, Radioatividade, Ensino de Química

ABSTRACT

Radioactivity is one of the central themes of modern Chemistry and Physics, being present in different areas of knowledge and in various technological applications. However, in Basic Education, especially at the secondary school level, it is often taught in a decontextualized manner, with little emphasis on its historical development and on the processes that led to the construction of these concepts. In this context, this study aims to analyze the historical development of radioactivity and investigations into the structure of matter, with emphasis on the studies of Ernest Rutherford, Hans Geiger, and Ernest Marsden, in light of contemporary historiography of science. The research is characterized as qualitative, bibliographic, and documentary in nature, based on the analysis of documents related to the discoveries of X-rays, radioactivity, and the consolidation of the nuclear atomic model. The contributions of scientists such as Henri Becquerel, Marie Curie, Ernest Rutherford, and Frederick Soddy were examined, considering their experiments, interpretations, and scientific debates within the historical context in which they were produced. The analysis sought to avoid anachronistic interpretations, valuing science as a historical, collective, and continuously evolving process.

KEYWORDS: History of Science; Radioactivity; Chemistry Teaching

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Henri Becquerel.....	9
Figura 2: Willian Crookes.....	13
Figura 3: Tubo de Crookes.....	14
Figura 4: Tubo de Crookes ligado a uma fonte de corrente elétrica.....	14
Figura 5: Wilhelm Conrad Röntgen.....	15
Figura 6: Primeira Radiografia.....	16
Figura 7: Reconstituição da primeira radiografia da mão.....	18
Figura 8: Primeiras aplicações clínicas da radiografia nos EUA (fratura do antebraço) na clínica do Dr. Edwin Frost (1896)	18
Figura 9: Joseph John Thomson.....	19
Figura 10: Maria Salomea Sklodowska.....	20
Figura 11: Casal Curie.....	23
Figura 12: Ernest Rutherford.....	24
Figura 13: Frederick Soddy.....	26
Figura 14: Johannes Wilhelm Geiger e Johannes Ernest Marsden.....	27
Figura 15: Esquema ilustrativo do aparato experimental.....	31
Figura 16: Dados quantitativos do experimento de espalhamento.....	33
Figura 17: Curva experimental obtida a partir das medições de cintilações.....	34
Figura 18: Configuração experimental para análise da distribuição angular.....	35
Figura 19: Lise Meitner.....	39
Figura 20: Otto Hahn.....	40
Figura 21: Albert Einstein.....	41

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	9
2. RADIOATIVIDADE NO ENSINO.....	41
2.1 História da radioatividade no ensino.....	41
2.2 O ensino da radioatividade no Ensino Médio.....	42
3. OBJETIVO.....	11
4. METODOLOGIA.....	11
5. HISTÓRICO DA RADIOATIVIDADE.....	11
5.1 Raios-X.....	13
5.2 Radioatividade.....	17
5.3 Contribuições de Marie Curie.....	19
5.4 Ernest Rutherford.....	23
5.5 Era da radioatividade.....	30
6. CONCLUSÕES.....	42
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	43

1. INTRODUÇÃO

Os fenômenos radioativos estão cada vez mais presentes nos meios de comunicação e é função do professor de Química utilizar novas estratégias de ensino ao abordar esse tema em sala de aula. No entanto, para se compreender os conceitos e os conteúdos de radioatividade faz-se necessário o entendimento sobre a estrutura da matéria, em especial, ao modelo proposto por Rutherford.

Nesse sentido, este trabalho delimita como objeto de análise alguns episódios históricos fundamentais para a compreensão da relação entre radioatividade e o desenvolvimento do modelo atômico nuclear. Em particular, são examinados os estudos experimentais realizados por Hans Geiger, Ernest Marsden e Ernest Rutherford no início do século XX, com destaque para os experimentos de espalhamento de partículas alfa que conduziram à proposição do modelo atômico nuclear. A partir de uma abordagem historiográfica da ciência, busca-se analisar como esses experimentos foram concebidos, interpretados e debatidos na comunidade científica da época. Além disso, pretende-se discutir de que maneira a contextualização histórica desses episódios pode contribuir para o ensino de Química no Ensino Médio, favorecendo a compreensão da radioatividade e da estrutura da matéria como conhecimentos inter-relacionados e historicamente construídos.

Nos currículos de Química da Educação Básica, de modo geral, observa-se um distanciamento entre os conteúdos de radioatividade e o modelo atômico nuclear, o que pode induzir estudantes e professores a compreenderem essas ideias como desconectadas e desenvolvidas em momentos históricos distintos. Essa abordagem fragmentada e descontextualizada dificulta a compreensão da ciência como um processo histórico, coletivo e em constante construção, limitando a articulação entre conceitos fundamentais da Física e da Química (PORTO, 2010). Nesse sentido, este estudo tem como objetivo a pesquisa documental dos trabalhos publicados por Hans Geiger, Ernest Marsden e Ernest Rutherford sobre a estrutura da matéria, à luz da historiografia da ciência contemporânea, contemplando os experimentos, explicações e debates científicos envolvidos nesse processo.

A radioatividade pode ser definida como o fenômeno pelo qual núcleos atômicos instáveis emitem espontaneamente partículas ou radiações eletromagnéticas em decorrência de transformações internas em sua constituição, podendo resultar na formação de novos elementos químicos (OKUNO; YOSHIMURA, 2010). Tais processos apresentam ampla aplicação em áreas como medicina, agricultura, indústria e geração de energia, embora também tenham sido historicamente empregados para fins bélicos.

O estudo da radioatividade se iniciou a partir da descoberta dos raios X, verificados inicialmente, por Röntgen. Segundo Martins

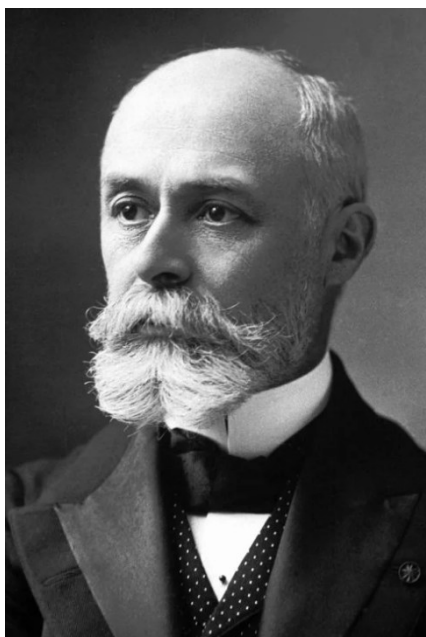
(...) aquilo que Röntgen observou parecia algo muito diferente dos raios catódicos (...) essa coisa não era visível, não tornava o ar luminoso, mas excitava a luminosidade de um material fluorescente e, como Röntgen observou depois, era capaz de sensibilizar chapas fotográficas, como se fosse luz. Ainda mais: esses novos tipos de raios eram capazes de atravessar madeira, um livro de mil páginas e placas metálicas. Essa radiação, batizada por Röntgen de “raios X”, era algo totalmente novo. (MARTINS, p. 28. 1990).

Essa constatação causou grande repercussão nos cientistas da época que aprofundaram as pesquisas nessa área e, entre eles, Henri Poincaré; matemático e físico, se interessou pelo trabalho de Röntgen e conjecturou que havia uma relação entre esses fenômenos, a emissão desses raios e a fluorescência do tubo de Crookes (ou tubos de raios catódicos).

Em sua experiência, ao atravessar o tubo por uma descarga elétrica, este emite os raios X. Notou-se que na parede do tubo de vidro, de frente ao cátodo, se formava um brilho amarelo-esverdeado, que indicava a origem dos raios. Essa hipótese se tornou fonte para Becquerel.

Henri Becquerel (fig. 1) pertencia a uma ilustre família de cientistas e foi natural que se interessasse pelos raios X. O cientista então iniciou seus experimentos a respeito da emissão dos raios por corpos luminescentes. “Uma semana depois, no dia 2 de março, a Academia escuta o resultado de novas investigações que imortalizaram o nome Becquerel, já que nelas se descreve a existência de um novo fenômeno: a radioatividade...” (BECQUEREL, El descubrimiento de la radioactividad, p. 32).

Figura 1 - Henri Becquerel



Fonte: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1903/becquerel/biographical/>

O cientista acreditava que a radiação que estudava era semelhante à luz, ou luminosidade, já que se refratam e refletem.

Depois de ter observado que todos os compostos de urânio emitiam essas mesmas radiações invisíveis, Becquerel resolve testar o urânio metálico. Obtém uma amostra preparada por Moissan e verifica que ele também emite a radiação. Mas Becquerel conclui que esse é o primeiro caso de um metal que apresenta uma fosforescência invisível (MARTINS, p. 36. 1990).

Contudo, Becquerel abandonou a pesquisa após esse feito. No intuito de dar continuidade aos estudos, dois pesquisadores iniciaram sua busca em outros materiais, diferente do urânio, no intuito de identificar outros que emitem radiações do mesmo tipo. Segundo Martins (p.39. 1990), a busca foi realizada, na Alemanha, por G. C. Schmidt e, na França, por Marie Curie. Em abril de 1898, ambos publicaram a descoberta de que compostos de tório emitem radiações, como o urânio.

Maria Sklodovska (Curie) física e matemática, junto com o seu marido, estudou diversos minerais a fim de observar suas radiações e observou que:

Todos os minerais que se mostraram ativos contêm os elementos ativos. Dois minerais de urânio – a pechblenda (óxido de urânio) e a calcolita (fosfato de cobre e uranila) são muito mais ativos do que o próprio urânio. Esse fato é muito notável e leva a crer que esses minerais podem conter um elemento muito mais ativo do que o próprio urânio. Reproduzi a calcolita pelo processo de Debray com produtos puros; essa calcolita artificial não é mais ativa do que outros sais de urânio. (CURIE apud MARTINS, 1990, p. 39)

Em decorrência dessa observação, as pesquisas acerca dos raios de Becquerel retomam, e nota-se que esse fenômeno não era isolado, e sim generalizado. Graças a isto, Curie o renomeia como radioatividade.

Os raios urânicos foram frequentemente chamados raios de Becquerel. Pode-se generalizar esse nome, aplicando-o não apenas aos raios urânicos, mas também aos raios tóricos e a todas as radiações semelhantes. (CURIE apud MARTINS, 1990, p. 40)

Posteriormente, Marie desenvolveu um trabalho que repercutiria em toda comunidade acadêmica. Em seus estudos anteriores havia apontado a existência de outro material desconhecido ainda mais radioativo presente na pechblenda e para a sua comprovação, dedicou seu trabalho no intuito de o isolar, descobrindo mais tarde ser o elemento Rádio.

Neste pequeno prólogo, apresentamos alguns fatos que antecederam as descobertas e a nomeação das diferentes formas de radiações ionizantes, também chamadas de partículas subatômicas, que permitiram a diversos cientistas o estudo da composição da matéria e sua natureza. Nos próximos tópicos, iremos abordar como decorreu essas investigações e como esses processos direcionaram o desenvolvimento de instrumentos e ferramentas que não só trouxe desenvolvimento social, mas também, avanços científicos.

2. RADIOATIVIDADE NO ENSINO

2.1 História da radioatividade no ensino

A História da Ciência é considerada uma área de estudo relativamente nova, quando comparada com outras, já que inicia seu processo de institucionalização a partir do século XX. Sua pesquisa em um primeiro olhar parece óbvia: relatar a história dos acontecimentos científicos. Contudo, significa muito mais do que apenas isso. Esta, busca criticar, estudar, analisar e recuperar conhecimentos sobre a natureza que são tidos como errados pelos critérios científicos.

Para se estudar a História da Ciência e compreender seus conhecimentos científicos, faz-se necessário que haja uma compreensão e contextualização a respeito do passado tal como era vista no passado. Ou seja, é importante entender as influências políticas, econômicas, sociológicas, religiosas, todas que envolvem aquele meio e o influencia, se esvaindo de perspectivas normativas.

Além do mais, ao se estudar a História da Ciência, esta se mostra mais humanizada para os alunos, evidencia que as “descobertas” foram realizadas por pessoas normais, comuns, e deixa a ciência mais palpável e desmistificada, permite também ao estudante observar as hipóteses, as observações e o desenvolvimento dos pensamentos que levaram ao conhecimento que temos acesso hodiernamente. Por conta disso, é recomendado se iniciar o estudo de radioatividade a partir de sua historiografia.

Para a história da radioatividade, a contextualização e transdisciplinaridade são um aspecto muito importante. Acontecimentos históricos como Hiroshima e Nagasaki, Césio 137 Goiânia, Garotas do rádio e os relógios luminosos, o acidente nuclear de *Three Mile Island*, a trajetória de Marie Curie, o desastre radioativo de Fukushima Daiichi, criação da primeira bomba, entre outros. A utilização desses recursos visuais históricos facilita a aplicação da radioatividade na sala de aula, sua história e seus efeitos.

2.2 O ensino de radioatividade no Ensino Médio

De acordo com Martins (1998), a apresentação dos conhecimentos científicos como verdades prontas e acabadas contribui para uma visão simplificada da ciência, ocultando os processos históricos, os debates e as incertezas que marcaram a construção desses conhecimentos. No ensino de radioatividade, essa abordagem dificulta a articulação entre os fenômenos nucleares e os modelos atômicos, especialmente o modelo nuclear proposto por Rutherford.

Nesse sentido, Cordeiro (2011) aponta que os conteúdos relacionados à radioatividade, no contexto educacional, costumam ser trabalhados de forma dissociada do seu desenvolvimento histórico e epistemológico, favorecendo aprendizagens mecânicas e a manutenção de concepções equivocadas. A autora destaca ainda que a ausência de uma abordagem histórica dificulta a compreensão da natureza dinâmica do conhecimento científico.

Além disso, estudos como o de Resquetti (2013) evidenciam que o ensino de radioatividade no nível médio apresenta desafios relacionados à fragmentação curricular e à pouca integração entre conceitos de Física e Química. Essa separação contribui para dificuldades na compreensão.

Outro aspecto recorrente destacado na literatura refere-se à associação quase exclusiva da radioatividade a eventos catastróficos e riscos à saúde. Embora esses temas sejam relevantes, Resquetti (2013) e Cordeiro (2011) ressaltam que, quando abordados sem uma contextualização histórica e conceitual adequada, podem reforçar concepções distorcidas e uma visão negativa da ciência.

Diante dessas dificuldades apontadas pelas pesquisas, a utilização da História da Ciência no ensino de radioatividade mostra-se uma estratégia pedagógica relevante, por possibilitar uma compreensão mais contextualizada, crítica e humana da ciência.

3. OBJETIVO

Analisar, à luz da historiografia contemporânea da ciência, o desenvolvimento histórico da radioatividade e das investigações sobre a estrutura da matéria — com ênfase nas contribuições e nos documentos de Rutherford, Geiger, Marsden, Becquerel, Curie e Soddy, constituindo material com potencial uso em sala de aula.

4. METODOLOGIA

A pesquisa desenvolvida possui caráter qualitativo, de natureza bibliográfica e documental. Segundo Gil (2008), a pesquisa bibliográfica é elaborada a partir de material já publicado, enquanto a pesquisa documental utiliza fontes que ainda não receberam tratamento analítico aprofundado, como documentos históricos e registros originais. Nesse sentido, o estudo fundamenta-se na análise de fontes primárias e secundárias relacionadas à história da radioatividade e à evolução dos modelos atômicos, à luz da historiografia da ciência contemporânea, ou seja, que considera contextos sociais, culturais, políticos e institucionais, ampliando os atores envolvidos e dialogando com diferentes áreas do conhecimento, conforme Alfonso-Goldfarb, Waisse e Ferraz (2004).

Como documentos, foram considerados artigos científicos, conferências, relatórios experimentais e textos originais produzidos por pesquisadores como Becquerel, Curie, Rutherford, Soddy, Geiger e Marsden. Entre as fontes primárias analisadas destacam-se artigos e comunicações científicas publicados entre o final do século XIX e o início do século XX por pesquisadores envolvidos nas investigações sobre radioatividade e estrutura da matéria. Dentre esses documentos encontram-se textos nos quais Henri Becquerel descreve suas observações sobre os chamados “raios urânicos”, bem como trabalhos de Marie Curie relacionados ao estudo das substâncias radioativas. Foram também considerados artigos e relatórios experimentais de Ernest Rutherford, Hans Geiger e Ernest Marsden referentes às investigações sobre o comportamento das partículas alfa e seus experimentos de espalhamento em lâminas metálicas. A análise desses materiais buscou identificar a descrição dos procedimentos experimentais, os instrumentos utilizados, as interpretações propostas pelos cientistas e os debates científicos associados a essas investigações.

A seleção dos episódios históricos e dos cientistas abordados neste estudo baseou-se na relevância de suas contribuições para a compreensão dos fenômenos radioativos e para o desenvolvimento de interpretações acerca da estrutura da matéria no início do século XX. Assim, foram priorizados trabalhos frequentemente mencionados na literatura historiográfica da ciência como marcos importantes no avanço das pesquisas sobre radioatividade e no surgimento do modelo atômico nuclear. Nesse sentido, os estudos de Becquerel, Curie, Rutherford, Geiger e Marsden foram escolhidos por evidenciarem momentos significativos na investigação das radiações emitidas por elementos radioativos e nas interpretações experimentais que contribuíram para a compreensão da constituição da matéria. Além disso, foram consultados livros, artigos acadêmicos, dissertações e teses que discutem a história e a filosofia da ciência, bem como trabalhos voltados ao ensino de Química e incorporação da História da Ciência como recurso pedagógico.

A análise do material foi conduzida de forma interpretativa, buscando compreender os experimentos e conceitos científicos dentro de seus contextos históricos, sociais e epistemológicos, evitando interpretações anacrônicas. A partir dessa análise, foram selecionados episódios históricos relevantes que possibilitam articular o desenvolvimento da radioatividade com a construção dos conceitos científicos presentes nos currículos de Química. Com base nos resultados obtidos, foi elaborada uma proposta de um material voltada ao ensino de radioatividade no Ensino Médio, integrando aspectos históricos, conceituais e didáticos, com o intuito de contribuir para uma compreensão mais crítica e contextualizada da ciência.

Cabe ressaltar que este estudo apresenta algumas limitações decorrentes do recorte adotado. A pesquisa concentra-se em determinados episódios históricos e em alguns cientistas cujos trabalhos tiveram grande repercussão nas investigações sobre radioatividade e estrutura da matéria, não contemplando a totalidade das contribuições existentes no período. Além disso, a análise baseia-se em fontes documentais disponíveis em publicações científicas e em estudos historiográficos já publicados, o que implica o acesso mediado a parte dos documentos originais. Dessa forma, o objetivo do trabalho não é esgotar todas as interpretações possíveis sobre o tema, mas analisar episódios relevantes que permitam discutir o desenvolvimento histórico desses conhecimentos e suas possíveis articulações com o ensino de Química.

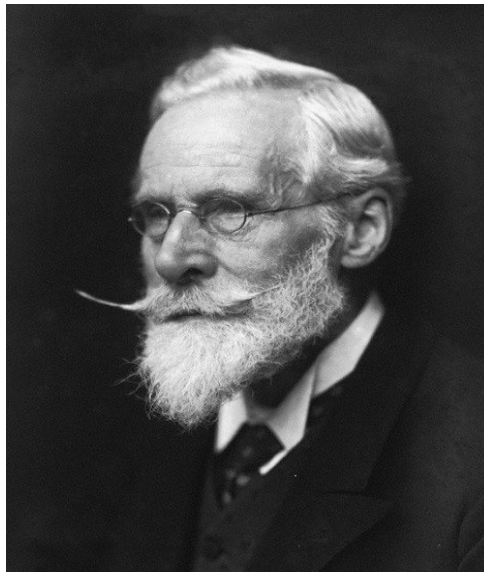
5. HISTÓRICO DA RADIOATIVIDADE

5.1 Raios-X

A descoberta do raio X foi fundamental para o início dos estudos sobre a natureza dos raios catódicos e, posteriormente, respondeu perguntas como e porque compostos químicos emitem um certo tipo de radiação e qual sua natureza.

Tem-se, então, o principal instrumento utilizado, tanto por Becquerel como Röntgen e Piltchikof, nessas investigações: o tubo de Crookes ou tubo de raios catódicos. Sir. Willian Crookes, a quem se deve a nomeação e uma possível criação do tubo, foi um químico e físico britânico e a sua trajetória até seus estudos com este tipo de instrumento, partiu da curiosidade a respeito dos estudos com descargas elétricas em tubos vidro com gases rarefeitos, ou quase um vácuo perfeito.

Figura 2 - Willian Crookes



Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/William_Crookes

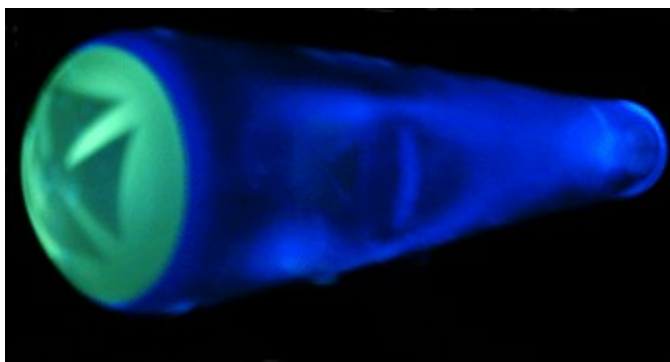
Os tubos de Crookes eram relativamente simples: um tubo de vidro contendo em suas extremidades terminais elétricos ligados em uma fonte de corrente elétrica. A corrente era notada quando uma diferença de potencial era aplicada na ampola, contudo, mesmo com um gás rarefeito, a corrente elétrica podia ser detectada. (RESQUETTI, p. 44. 2013).

Figura 3 - Tubo de Crookes



Fonte: https://cerebromente.org.br/n20/history/neuroimage2_p.htm

Figura 4 - Tubo de Crookes ligado a uma fonte de corrente elétrica



Fonte: https://cerebromente.org.br/n20/history/neuroimage2_p.htm

Ademais, alguns fenômenos ocorreram durante esses estudos. Segundo Resquetti (2013):

Quando os raios que emergiam do terminal negativo incidiam no eletrodo positivo, feito de folha de alumínio em forma de cruz (cruz de Malta), obtinha-se uma sombra 45 bem-definida sobre a parede de vidro atrás do ânodo. Crookes percebeu que a parede de vidro onde os raios incidiam tornava-se luminescente, com um brilho amarelo-esverdeado, mas não conseguiu explicar tal luminescência. (RESQUETTI, p. 44. 2013).

Esse fenômeno é explicado da seguinte maneira: estes raios, como citado anteriormente, provém da diferença de potencial entre dois eletrodos que estão conectados em um tubo que contém gases rarefeitos em seu interior e, ao acionar a corrente elétrica, produzem um feixe de elétrons caracterizando a luz esverdeada na extremidade do tubo.

Posteriormente, diversos cientistas se inspiraram na ideia e iniciaram seus estudos a respeito da natureza desse raio realizando alterações no tubo. Heinrich Hertz e seu assistente Philipp Lenard barraram o escape dos raios catódicos com uma janela de alumínio e um anteparo fluorescente, no intuito de poder verificar a incidência dos raios na tela.

Com essa modificação, o cientista notou que em uma distância de oito centímetros era possível detectar luminescência visível no ar, e que graças aos raios, os corpos luminescentes ficavam luminosos e as chapas fotográficas ficaram sensibilizadas. (MARTINS, 2012; OKUNO; YOSHIMURA, 2010).

Röntgen, interessado pelo experimento de Hertz e Lenard, iniciou suas próprias pesquisas, em 1894, a respeito dos raios catódicos utilizando de tubos de descarga e indutância (produção de uma grande quantidade de volts). Wilhelm Conrad Röntgen foi um físico e engenheiro mecânico alemão.

Figura 5 - Wilhelm Conrad Röntgen



Fonte: <https://www.medmuseum.siemens-healthineers.com/en/stories-from-the-museum/Röntgen-gone-mad>

Para evitar que a luminescência não atrapalhasse a visão no anteparo fluorescente, Wilhelm embrulhou a ampola com um papel preto. Seus testes focaram na luminescência dos raios. Ao apagar a luz do laboratório, afastou o anteparo fluorescente em dois metros e observou a luminescência. Ao ligar e desligar o tubo diversas vezes notou que esta desaparecia. Com isso, concluiu-se que os raios que provinham do tubo não eram os catódicos e, assim, algum outro, que não se alterava com campos elétricos e nem magnéticos.

Seus testes utilizaram diversos materiais e até certos líquidos, segundo Okuno e Yoshimura (2010), durante um dos testes notou o contorno dos ossos do seu dedo refletindo na tela fluorescente. Com isso, em 1895, Röntgen criou a primeira radiografia de um corpo humano utilizando a mão de sua esposa, Anna Bertha.

Figura 6- Primeira Radiografia

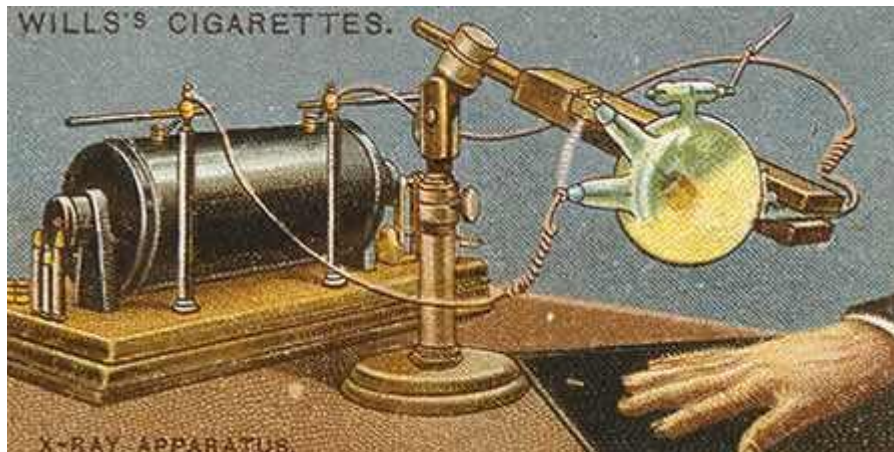


Fonte: https://cerebromente.org.br/n20/history/neuroimage2_p.htm

O tal fenômeno foi nomeado de raios-X por Röntgen, por não saber do que se tratava especificamente e em 1896 seu primeiro artigo a respeito foi publicado nos jornais, inspirando diversas outras pesquisas. Contudo, sua “descoberta” também gerou grande desconforto em outros cientistas, que alegam já ter notado o fenômeno antes. Entre eles, estava o Lenard:

Ele [Lenard] nunca utilizou o nome de Röntgen ao se referir aos raios. Considerou como uma afronta pessoal qualquer reconhecimento inadequado de seu trabalho e era incapaz de alguma generosidade, ou mesmo justiça, com relação a qualquer um que, em sua opinião, tivesse falhado em apreciar qualquer aspecto de seus serviços à ciência (ANDRADE, 1947, apud MARTINS, 2012, p. 35).

Figura 7 - Reconstituição da primeira radiografia da mão

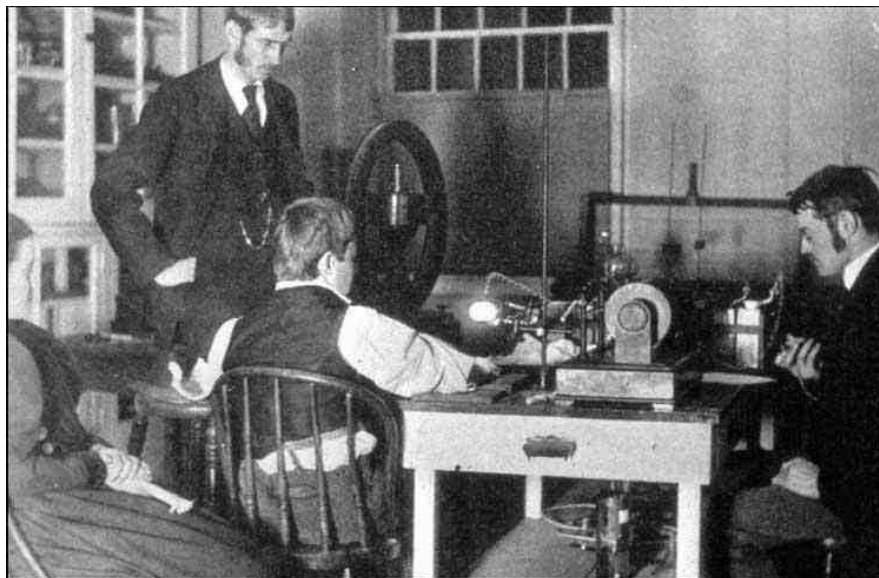


Fonte: https://cerebromente.org.br/n20/history/neuroimage2_p.htm

5.2 Radioatividade

A pesquisa dos raios X por Röntgen culminou em novas concepções científicas e de fato fez com que muitos cientistas estudassem o fenômeno, fazendo com que repercutisse em diversas áreas de aplicação. Como a medicina; as clínicas de radiografia eram criadas.

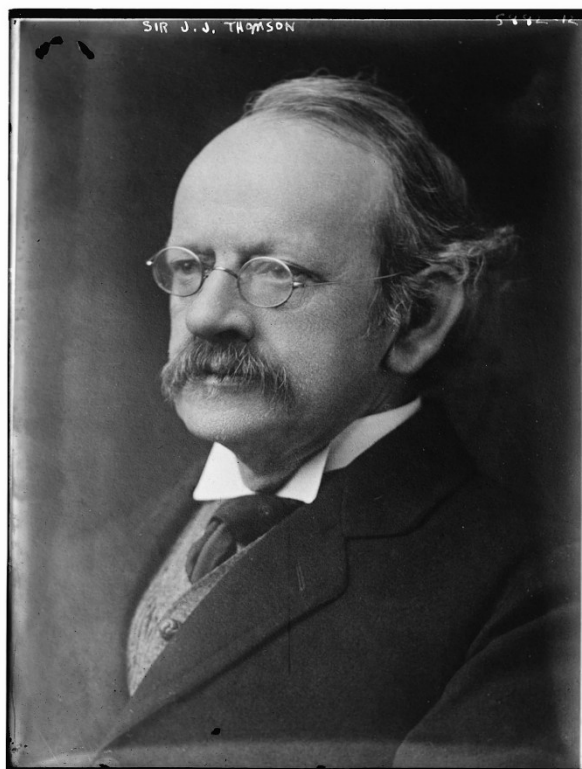
Figura 8 - Primeiras aplicações clínicas da radiografia nos EUA (fratura do antebraço) na clínica do Dr. Edwin Frost (1896)



Fonte: https://cerebromente.org.br/n20/history/neuroimage2_p.htm

Os raios catódicos foram ainda mais explorados por Joseph John Thomson, mais conhecido como J. J. Thomson, foi um físico britânico, a quem é creditado a descoberta dos elétrons.

Figura 9 - Joseph John Thomson



Fonte: https://pt.wikiquote.org/wiki/Joseph_John_Thomson

Em 1897, Thomson constatou que os raios catódicos são compostos por partículas subatômicas que apresentam carga negativa, os elétrons. Assim,

A partir de medições cuidadosas feitas com o tubo de descarga, o físico conseguiu determinar que todos os elétrons são iguais e supôs que possuem massa bem definida muito menor que a do átomo (HEWITT, 2011, apud RESQUETTI, 2013, p 186).

De volta a 1896, ao ter conhecimento dessa pesquisa, Becquerel começou a estudar compostos de urânio que se tornavam fluorescentes após entrarem em contato com a luz solar. Como dito anteriormente, Becquerel pertencia a uma família repleta de cientistas, seu avô, Antoine Becquerel, nasceu em 1788, estudava os fenômenos elétricos e magnéticos; seu pai, Edmond, focou em radiações ultravioleta e dos fenômenos de fosforescência e fluorescência. O que favoreceu o seu estudo nessa área, principalmente na de óptica e fosforescência, posteriormente sendo conhecido como o ilustre pesquisador que descobriu a radioatividade.

Todavia, há indícios de que o que Becquerel observou em seus experimentos era algo ainda desconhecido.

Dessa forma, era de se esperar o seu interesse pelos raios X. Entretanto, seu trabalho foi influenciado principalmente pela hipótese da relação entre a fluorescência do vidro e a emissão dos raios.

Sua hipótese sugeria que os compostos de urânio também emitem raios X e por isso tinham forte fluorescência ao atingirem certas substâncias. Assim, para validar sua hipótese, Becquerel colocou uma amostra de uma substância luminescente - o sulfato duplo de urânio e potássio ($K_2(UO_2)(SO_4)_2$) - sobre uma placa fotográfica envolta em duas folhas de papel negro muito espesso e a expôs à luz solar (RESQUETTI, p. 48. 2013). Observou-se que o material de fato emitia raios X quando em luz, mas ao guardar o material em uma gaveta, constatou-se que os sais de urânio continuavam a sensibilizar as chapas fotográficas: “Talvez esse fato possa ser comparado a conservação indefinida, em certos corpos, da energia que absorveram e que é emitida quando são aquecidos, fato sobre o qual já chamei atenção em um trabalho (de 1891) sobre a fosforescência pelo calor” (BECQUEREL apud MARTINS, p. 36, 1990).

Em suas observações é claro que Becquerel insistia em se basear em fenômenos já conhecidos. Seus experimentos continuaram, mas, dessa vez, analisando outros materiais fosforescentes. No entanto, foi constatado que esse fenômeno independia da exposição à luz solar. Becquerel acreditava que a radiação se reflete e refrata, semelhante a luz, ao contrário dos raios X.

Após esse experimento, os seus resultados apresentados eram confusos e difíceis de serem compreendidos o que o leva a pensar que

ou existiram efeitos que não podem ser explicados por nossos conhecimentos, ou Becquerel se enganou em suas observações – e, nesse caso, pode ter sido induzido por suas expectativas teóricas a ver fenômenos inexistentes (MARTINS, 1998, p. 38).

Depois de observar todos os compostos de urânio, luminescentes ou não, se emitem as mesmas radiações invisíveis, Becquerel parte para o teste do urânio metálico e percebe o mesmo efeito e determina que se trata de uma fosforescência invisível e abandona a pesquisa após isso:

Ao continuar o estudo desses novos fenômenos, penso ser de grande importância apontar para a emissão produzida pelo urânio que acredito ser o primeiro exemplo de um metal que apresenta um fenômeno da ordem de uma fosforescência invisível. (BECQUEREL apud CORDEIRO, 2011, p. 91)

5.3 Contribuições de Marie Curie

Figura 10 - Maria Salomea Sklodowska



Fonte: <https://revistagalileu.globo.com/Ciencia/noticia/2016/07/5-coisas-que-voce-precisa-saber-sobre-marie-curie.html>

Maria Salomea Sklodowska, nasceu em Varsóvia, na Polônia, no dia 7 de novembro de 1867. Foi uma grande física e matemática, conhecida popularmente como Marie Curie.

Sua jornada de pesquisa se iniciou em 1891 quando Marie se dirigiu para Sarbonne, em Paris, a fim de iniciar seus estudos em Física. Logo em 1893 se graduou em Física e em 1894 em Matemática. Em 1895, conheceu Pierre Curie, um notável físico e químico francês que estudava magnetismo e eletricidade, e logo se casou.

Marie estava à procura de um tema para a tese de seu doutorado quando se deparou com a pesquisa de Becquerel que chamou sua atenção. A partir disso, iniciou suas pesquisas sobre radioatividade em 1896 (vale ressaltar que o termo radioatividade ainda não existia na época), em um porão provido pela sua instituição. Neste espaço, ela e o marido evidenciaram que os sais de tório emitiam raios semelhantes aos sais de urânio.

Ainda em 1898, interessados pela pesquisa abandonada de Becquerel, Marie Curie e G. C. Schmidt, pesquisaram sobre a emissão de radiações do mesmo tipo, partindo de outros materiais. Em abril, ambos publicaram a descoberta de que compostos de tório emitem radiações, como o urânio. Tem se que, a respeito do modo que fizeram a pesquisa:

O método de estudo não foi fotográfico e sim com o uso de uma câmara de ionização, observando-se a corrente elétrica produzida, no ar, entre duas placas eletrizadas, quando se colocava um material que emita radiações entre as placas. Esse método de

estudos era mais seguro do que o uso de chapas fotográficas, já que estas, como vimos, podem ser afetadas por muitos tipos de influências diferentes. (MARTINS, 1990, p. 39)

Gerhard Carl Schmidt era um químico alemão e a partir de sua pesquisa, constatou-se que a radiação que o tório emitia efeitos fotográficos era mais penetrante que a do urânio. Afirmou ainda, que não conseguiu observar reflexão e nem polarização dos raios.

Já Marie, contribuiu com a pesquisa estudando diversos minerais, e observou que assim como Schmidt, a radiação emitida pelo urânio e tório. Contudo, observou um fenômeno novo. Todos os minerais que havia estudado e que eram ativos, se mostravam com elementos ativos, o que a levou a pensar que poderia haver um elemento muito mais ativo que o urânio.

A partir do estudo da pechblenda (óxido de urânio) e da calcolita (fosfato de cobre e uranila), observou-se que esses minerais apresentavam atividade radioativa superior à do próprio urânio, o que levou à hipótese de que poderiam conter um elemento ainda mais ativo. Além disso, considerou-se que a longa duração da radiação provavelmente não se originava do próprio elemento, pois a quantidade de energia emitida tornaria essa hipótese pouco plausível. Assim, sugeriu-se a possibilidade de que o ambiente estivesse preenchido por uma radiação altamente penetrante, capaz de ser absorvida pelos elementos e posteriormente reemitida, tornando possível sua observação. (MARTINS, 1990, p. 40).

Graças a essas observações, Marie define que os raios de Becquerel eram na realidade um fenômeno generalizado, e assim introduz o termo radioatividade ao mundo, que pode ser aplicado a todas radiações semelhantes.

Chamarei de radioativas as substâncias que emitem raios de Becquerel. O nome de hiperfosforescência, que foi proposto para o fenômeno, parece-me dar uma falsa ideia de sua natureza. (CURIE apud MARTINS, 1990, p. 40)

Após a descoberta do tório, retomou seus estudos a respeito de haver um elemento ainda mais radioativo na pechblenda, e dedicou o seu tempo a isolar essa substância.

Para isso, dedica-se a um trabalho de química analítica, separando progressivamente os constituintes da pechblenda, testando-os pelo método elétrico, de modo a separar as frações radioativas das inativas. Primeiramente, partindo da pechblenda que era duas vezes e meia mais ativa do que o urânio, foi feita a dissolução do mineral em ácido. Depois, borbulhou-se ácido sulfídrico (H₂S) pelo líquido, havendo formação de vários sulfetos insolúveis, que se precipitaram. O urânio e o tório permaneciam dissolvidos. O precipitado era muito ativo. Adicionando-lhe sulfeto de amônia, os sulfetos de arsênio e de antimônio (não ativos) se dissolvem. O resíduo passa por outros processos de separação. Por fim, o material ativo fica unido ao bismuto, não sendo separável dele pelos processos usuais. Não era, portanto, nenhum elemento conhecido. Através de processos de sublimação fracionada foi possível obter um

material (ainda unido ao bismuto) que era 400 vezes mais ativo do que o urânio puro. (MARTINS, 1990, p. 40).

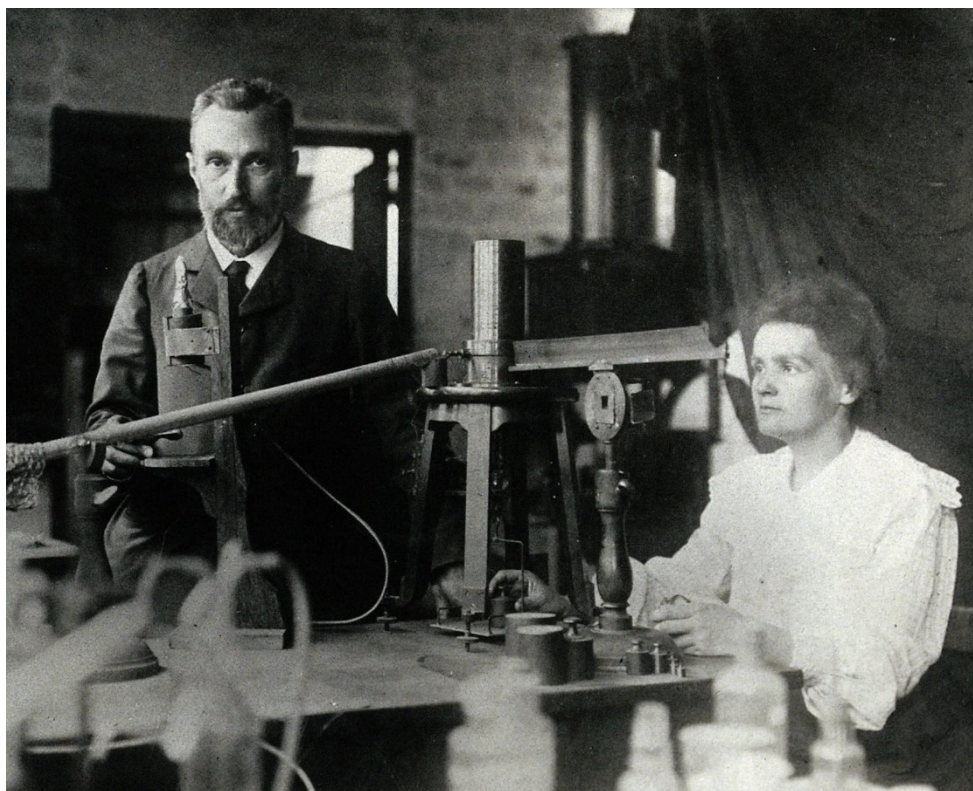
Não se tinha a certeza de que se tinha de fato descoberto um novo elemento, pois o metal era muito semelhante como bismuto. Contudo, hoje se tem o conhecimento que o elemento descrito era o polônio, nomeado assim em homenagem a Polônia, país de origem de Marie.

Posteriormente, em estudos análogos, Marie afirma que a radioatividade provém da propriedade atômica dos elementos, e nega a sua intensificação pela exposição ao sol, sua reflexão, refração e polarização, todos propostos por Becquerel.

No final de 1898, na última reunião da Academia de Ciências, os Curies e Bémont desenvolveram um trabalho que repercutiu em toda a comunidade acadêmica. Um novo elemento, também extraído da pechblenda, 900 vezes mais ativo que o urânio, descobrindo mais tarde ser o elemento Rádio.

Em 1903, o casal Curie recebeu o Nobel de Física, sendo o primeiro Nobel premiado a uma mulher, que dividiram com Henri Becquerel, por ter as primeiras investigações a respeito da radioatividade.

Figura 11 - Casal Curie



Fonte: <https://revistagalileu.globo.com/Ciencia/noticia/2021/05/conheca-pierre-curie-marido-de-marie-que-tambem-pesquisou-radioatividade.html>

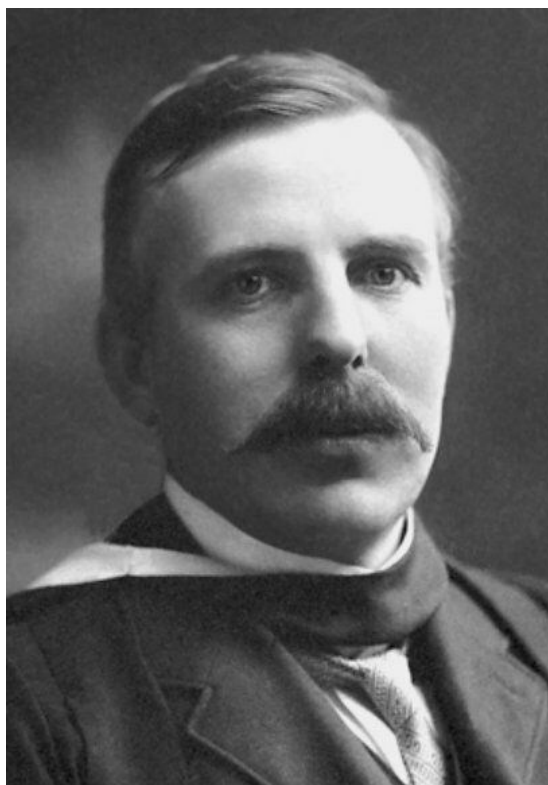
Marie Curie, em 1911, receberia o Nobel novamente, desta vez em química, no qual falou pela primeira vez sobre a pesquisa laureada em 1903:

Cerca de 15 anos atrás, a radiação do urânio foi descoberta por Henri Becquerel. Dois anos depois, o estudo desse fenômeno foi estendido a outras substâncias, primeiramente por mim e depois por mim e Pierre Curie. Esse estudo rapidamente nos levou à descoberta de novos elementos cujas radiações, apesar de análogas às do urânio, eram muito mais intensas. Chamei todos os elementos que emitiam tal radiação de radioativos e a nova propriedade da matéria revelada nessa emissão recebeu então o nome radioatividade. Graças à descoberta das novas e muito poderosas substâncias radioativas, particularmente o rádio, o estudo da radioatividade progrediu com maravilhosa rapidez: às descobertas seguiram-se outras descobertas numa rápida sucessão e ficou óbvio que uma nova ciência estava em desenvolvimento. A Academia Sueca de Ciências foi bastante gentil em celebrar o nascimento dessa ciência, oferecendo o Prêmio Nobel de Física aos primeiros trabalhadores no campo: Henri Becquerel, Pierre Curie e Marie Curie (1903). (MARIE apud CORDEIRO, 2011, p. 76).

5.4 Ernest Rutherford

Alguns cientistas são lembrados por uma única e extraordinária descoberta. Uma medida da grandiosidade de Rutherford é que a ele se pode creditar, ao menos, três (BADASH, 1969).

Figura 12 - Ernest Rutherford



Fonte: <https://www3.unicentro.br/petfisica/2015/12/22/ernest-rutherford-1871-1937/>

Vimos que os estudos da indução radioativa por Curie garantiram, em 1903, o Prêmio Nobel de Física, juntamente com Pierre e também a Becquerel, por ter dado os primeiros passos na investigação. Posteriormente, seus experimentos, auxiliaram na pesquisa sobre a natureza da radioatividade de Rutherford, assim como Becquerel havia sido para o casal.

Ernest Rutherford foi um físico neozelandês conhecido por revolucionar a ideia de modelo atômico, introduzindo o novo modelo planetário, paralelo ao Sistema Solar, estabeleceu um novo parâmetro de estudo para a radioatividade ao descobrir as radiações alfas e beta, o decaimento radioativo, o tempo de meia vida, entre outras inúmeras pesquisas que serão destrinchadas posteriormente¹.

Em 1895 Rutherford foi agraciado com uma bolsa de estudos na Universidade de Cambridge, Inglaterra, na qual foi orientado diretamente por Thomson em suas pesquisas. Em meados do seu período estudando nessa universidade, teve contato com a pesquisa de Becquerel, a respeito dos raios de urânio. A partir desse momento, a radioatividade tornou-se parte dos estudos e foco².

Em 1898, Rutherford foi contemplado para o cargo de professor na Universidade de McGill, onde continuou seus estudos na área de radioatividade, mas desta vez, com uma equipe, constituída por Frederick Soddy, Otto Hahn e Bertram Boltwood.

Frederick Soddy foi um químico inglês que nasceu em Eastbourne, Inglaterra e foi responsável por inúmeras contribuições na química. Juntamente com Rutherford, estudou o comportamento anômalo dos elementos radioativos.

¹ As informações biográficas sobre Ernest Rutherford apresentadas de forma sintética neste trabalho podem ser encontradas de maneira mais detalhada em MARQUES, Deividi Márcio. As investigações de Ernest Rutherford sobre a estrutura da matéria: contribuições para o ensino de química. [S.l.]: Universidade Estadual Paulista (Unesp), 24 fev. 2006.

Figura 13 - Frederick Soddy



Fonte: https://cooperative-individualism.org/soddy-frederick_the-role-of-money-1934.htm

Rutherford, iniciou seus estudos sobre os raios de Becquerel em 1898, como já citado, e constatou, com base neles, que as substâncias radioativas, emitem dois tipos de radiação, identificada por meio de sua trajetória ao passar por um campo magnético. (RESQUETTI, p. 191, 2013).

Sua parceria com Soddy foi extremamente significativa para todos os seus experimentos e descobertas que estavam por vir. A primeira se consolidou com a descoberta da desintegração atômica dos elementos em 1903. Além disso, seu período nesse laboratório o proporcionou a constatação e classificação das radiações alfa, beta, a carga das partículas e o conceito de meia vida.

De acordo com Cordeiro (2011), em 1900 que se deu a definição do conceito de meia-vida, por meio do experimento com compostos de tório por Rutherford. Neste, colocou várias camadas de papel para atuarem como obstáculo para com a radiação do tório, medindo sua corrente de ionização. Dessa forma, foi possível calcular o período em que a intensidade da radiação caía pela metade.

Posteriormente, em virtude às descobertas de Marie Curie sobre o rádio, a radioatividade finalmente se mostrou como uma ciência consolidada. A novidade dos novos minerais de urânio atraiu ainda mais a atenção da comunidade científica. Rutherford continuava com seus experimentos e publicou em 1899 um trabalho a respeito de seus resultados. Esta foi a primeira

vez que os termos alfa e beta eram introduzidos à radioatividade. O experimento desta vez, consistia em medir a radiação a partir de diversas camadas finas de metais, o que o levou a concluir que a radiação - do urânio - era complexa e apresentava no mínimo 117 tipos distintos, uma que era de fácil absorção, denominada alfa, e outra mais penetrante, beta. (RUTHERFORD, 1899 apud CORDEIRO, 2011, p 117) .

O físico classificou esses dois tipos pela sua capacidade de penetração, assim a menos penetrante seriam os raios alfas, e que tinha a capacidade maior, de raios betas.

Em outro momento surgiria outro tipo de radiação, uma ainda mais penetrante que os raios betas, a radiação gama, evidenciada por Paul Villard, que diferente das anteriores, não sofria deflexão por campos magnéticos. Contudo, o Rutherford constatou que a alfa sofria deflexão magnética e elétrica, sendo assim, uma partícula com carga positiva. (OKUNO, 2007).

Em 1907 e pelos próximos doze anos, Rutherford se mudou para a Universidade de Manchester, ocupando o cargo de Físico de Arthur Schuster, nesse novo ambiente deu continuidade às suas pesquisas, agora com novos parceiros. Hans Geiger e Ernest Marsden se juntaram ao pesquisador para o experimento a respeito do espalhamento das partículas alfa, que logo em seguida culminou no novo modelo atômico nuclear.

Johannes Wilhelm Geiger foi um físico alemão e Ernest Marsden FRS foi um físico inglês.

Figura 14 - Johannes Wilhelm Geiger e Ernest Marsden



Fontes: https://www.researchgate.net/figure/Ernest-Marsden-secretary-of-New-Zealands-Department-of-Scientific-and-Industrial_fig4_286920766

<https://www3.unicentro.br/petfisica/2015/12/22/ernest-rutherford-1871-1937/>

Em virtude de todas as suas pesquisas e contribuições científicas, foi laureado em 1908 pelo Prêmio Nobel em Química. Após esse período, comunicou uma conferência intitulada “A natureza química das partículas alfa de substâncias radioativas”, em que traz suas descobertas detalhadamente. Nesse momento, já era possível notar que Rutherford tinha indícios de que a partícula alfa apresentava natureza atômica e de um elemento mais leve.

A nova ideia recebeu apoio de William Ramsay e Soddy que por meio de suas análises espectrais da atividade de emissão do rádio, encontraram o espectro do hélio. (RAMSAY; SODDY, 1903 apud CORDEIRO, 2011, p 119).

Essa manifestação foi muito importante, graças a essas evidências, Rutherford e Soddy redirecionaram suas pesquisas no intuito de estudar a natureza atômica da partícula alfa. A constatação do hélio, abriu portas para a investigação de que, talvez, outros elementos também passaram por transformações constantes do seu núcleo atômico. Trabalharam principalmente com o rádio, urânio e tório.

E foi a partir dessas pesquisas que a teoria da desintegração dos elementos se solidificou:

Como, portanto, a radioatividade é um fenômeno atômico e acompanhado por mudanças químicas, nas quais novos tipos de matéria são produzidos, essas mudanças devem estar ocorrendo dentro do átomo e os elementos radioativos devem estar passando por transformações espontâneas. Os resultados até agora obtidos [...] deixam claro que as mudanças em questão são de caráter diferente de qualquer outra anteriormente lidada na química. [...] A radioatividade deve, portanto, ser considerada uma manifestação das mudanças químicas subatômicas (RUTHERFORD; SODDY, 1902, apud CORDEIRO, 2011, p. 121).

Contudo, ainda houve muita resistência na época por parte de alguns pesquisadores, como por exemplo Mendeleev, que acreditava que o átomo era imutável e que todas as novas descobertas eram frutos da alquimia. (KRAGH, 2000 apud CORDEIRO, 2011, p. 122).

Essa descrença é comentada posteriormente por Soddy em 1922 na sua Conferência Cobel, em que dialoga a respeito do decaimento radioativo e o modo que afetou a Química como um todo:

Assim, se um químico fosse purificar, digamos, o chumbo da prata e notasse que, sempre que fizesse o processo, a prata se formasse novamente, ele concluiria que o chumbo estava se transformando em prata. O fato de que isso não ocorre está na base da crença na imutabilidade dos elementos (SODDY, 1966 apud CORDEIRO, 2011, p. 122).

Apesar de toda pesquisa, evidências, indícios e estudos, os pesquisadores ainda não haviam conseguido elucidar a compreensão da natureza da relação entre o átomo de hélio ionizado e a partícula alfa. Esse esclarecimento só viria a acontecer em 1909, quando foi

publicado o artigo “A natureza da partícula alfa das substâncias radioativas.” por Rutherford e Rodys.

Em 1911, Ernest Rutherford publicou os resultados de seus estudos sobre o espalhamento de partículas alfa, conduzindo a uma nova interpretação da estrutura da matéria e à proposição do modelo atômico nuclear (RUTHERFORD, 1911). O modelo vigente antes de sua proposta era o de J. J. Thomson, que descrevia o átomo como uma esfera de carga positiva na qual os elétrons estariam distribuídos em seu interior, frequentemente representados como dispostos em arranjos concêntricos.

Rutherford junto com seus estudantes determinaram que o átomo é, em sua maioria, um espaço vazio, com um núcleo extremamente positivo, embora defendeu a ideia que também havia cargas negativas neste núcleo. Assim, anulou o átomo de Thomson, que apresentava uma estrutura maciça. No modelo de Rutherford os elétrons giram em torno do núcleo igual aos planetas ao redor do Sol, diferente de Thomson, que apresentava uma esfera maciça positiva com elétrons em sua superfície.

Esse novo modelo proveio da necessidade de explicar os desvios causados pelas partículas alfa ao atravessarem as folhas de diferentes metais, fato observado por Hans Geiger e Ernest Marsden (MARQUES, 2006, p. 14), interpretado e publicado por Rutherford em 1911. Diante da sua interpretação, Rutherford considerou que os espalhamentos eram ocasionados devido ao choque das partículas com os átomos do metal, já que a probabilidade de um segundo encontro era mínima. O átomo proposto por Thomson não continha estrutura suficiente para explicar tal fenômeno. Entretanto, vale dar ênfase que o modelo de Rutherford também apresentava problemas, como incoerências com as leis do eletromagnetismo, mas ainda assim, incentivou outros pesquisadores a aprofundar nessa área, como Niels Bohr.

Dessa forma, o modelo de Rutherford tem a funcionalidade de analisar encontros simples, deflexão dos ângulos, colisão atômica e velocidade.

Em adição a esse fato, Rutherford conclui que:

Considerando as evidências por inteiro, parece mais simples supor que o átomo contenha uma carga central distribuída em um volume muito pequeno, e que as grandes deflexões se devam à carga central como um todo, e não a seus constituintes. [...] Os dados gerais disponíveis indicam que o valor dessa carga central para átomos diferentes é aproximadamente proporcional às suas massas atômicas, a qualquer taxa, para átomos mais pesados que o alumínio. (RUTHERFORD, 1911 apud CORDEIRO, 2011, p. 130).

A influência que Rutherford desencadeou por conta de seus estudos, pesquisas, conferências, foi imensa. Diversos pesquisadores o utilizavam como fonte e inspiração. Suas

contribuições mudaram a Física e Química. Na conferência Nobel de 1911, Marie Curie, em seu discurso, estimou Rutherford e seus grandes feitos à ciência:

Daquele momento em diante, numerosos cientistas devotaram-se ao estudo da radioatividade. Permitam-me lembrá-los de um deles, que, pela certeza de seu julgamento, pela audácia de sua hipótese e através de muitas investigações feitas por ele e seus pupilos, obteve sucesso não apenas em expandir nosso conhecimento, mas também em classificá-lo com grande clareza; ele proveu a espinha dorsal da nova ciência, na forma de uma teoria muito precisa, que admiravelmente se encaixava nos estudos dos fenômenos. Fico feliz em relembrar que Rutherford veio a Estocolmo em 1908 para receber o Prêmio Nobel, reconhecimento bem merecido por seu trabalho. (MARIE apud CORDEIRO, 2011, p. 76)

Graças a esses estudos, trabalhados durante anos e por muitos pesquisadores, a respeito da natureza da radioatividade, suas informações começaram a ficar mais ricas, adequadas e abrangentes:

Posteriormente a esses estudos, a natureza da radioatividade começou a ficar mais clara. Concluiu-se que os raios alfa são núcleos do átomo do elemento hélio, composto por dois prótons e dois nêutrons e, logo depois, que os raios betas podem ser de dois tipos: elétrons ou pósitrons. Posteriormente, constatou-se que os raios gamas são fótons ou ondas eletromagnéticas muito energéticas, de comprimento de onda muito pequeno. Concluiu-se, então, que os raios de Becquerel não eram diferentes tipos de raios X, mas sim, radiações nucleares (originadas dentro do núcleo atômico). (RESQUETTI, p.52, 2013).

5.5 Geiger e Marsden

A pedido de Rutherford, seus dois assistentes, Geiger e Marsden realizaram a experiência, em 1909, no intuito de conferir se os seus cálculos matemáticos a respeito do espalhamento das partículas alfa estavam corretos.

Johannes Wilhelm Geiger foi um físico alemão e Ernest Marsden FRS foi um físico inglês que viveu a maior parte de suas vidas na Nova Zelândia, ficaram conhecidos pelo famoso experimento Geiger-Marsden, sob orientação do professor Ernest Rutherford. Dessa forma, por meio da análise dos artigos escritos por Geiger e Marsden, tem-se a descrição completa da forma em que foi realizado o experimento sobre uma reflexão difusa das partículas α .

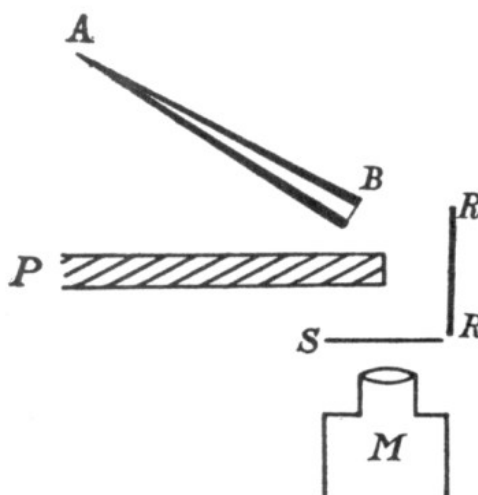
No momento em que as partículas β caem sobre uma placa, temos uma intensa radiação que irá emergir do mesmo lado em que essas partículas caíram. Esta radiação por sua vez, é considerada por alguns como radiação secundária, mas experimentos atuais mostram que estas partículas são primárias, que ao serem espalhadas dentro do material, emergem novamente no mesmo lado da placa. Já para as partículas α esse efeito não foi observado e não é esperado, em virtude ao seu espalhamento pequeno ao penetrar a matéria.

Contudo, nos experimentos a seguir foi constatado que existem reflexões difusas das partículas α . Por analogia, algumas dessas partículas têm sua direção alterada de tal forma que emergem novamente ao lado da incidência.

Com base na ideia de como este efeito ocorre, três pontos principais foram investigados:

- (1) A quantidade relativa de reflexão de diferentes metais.
- (2) A quantidade relativa de reflexão de um metal de espessura variável.
- (3) A fração das partículas α incidentes que são refletidas.

Figura 15: Esquema ilustrativo do aparato experimental



Fonte: Adaptado de Geiger, H.; Marsden, E. *On a Diffuse Reflection of the α -Particles*. Proceedings of the Royal Society, v. 82, p. 495, 1909.

Para observar as partículas refletidas, foi utilizado o método de cintilação em todos os experimentos. Em relação aos detalhes do método, referimos aos papéis de Regener, de Rutherford e Geiger.

Foi necessário ao longo do experimento, se utilizar de uma intensa fonte de raios α , já que a sua quantidade de reflexão é relativamente pequena. Esta fonte consistia em um tubo de vidro AB, traçado cônico e cheio com emanção de rádio. A extremidade B do tubo foi fechada hermeticamente por meio de uma janela de mica, que tinha espessura de 1 cm de ar, para que assim, as partículas α pudessem passar através dele.

O tubo continha uma quantidade de emanção equivalente a cerca de 20 miligramas RaBr₂ a uma pressão de alguns centímetros, já que é necessário que a pressão do gás esteja o mais baixa possível. Essa emanção foi purificada de acordo com os métodos do Rutherford. O

número de partículas α expelidas por segundo através da janela era muito grande e conseguia lidar com a pequena pressão dentro do tubo. Assim, os diferentes intervalos das partículas α dos três produtos (ou seja, emissão, RaA e RaC) foram bem definidos.

A tela de sulfeto de zinco S foi fixada atrás da placa de chumbo P, de forma que nenhuma partícula α conseguiria atingir seu diretório. No momento em que um refletor foi posicionado na posição RR a 1 cm da extremidade do tubo, as cintilações foram observadas rapidamente. No mesmo momento, a tela também se iluminou por conta das partículas β refletidas.

Ao decorrer da experiência, foi utilizado um microscópio de baixa potência e o número de cintilações por minuto em um milímetro quadrado definido da tela foi contado para refletores de diferentes materiais. Analogamente, os diferentes refletores foram colocados cuidadosamente na mesma posição sempre.

É comum que se espere que o número de partículas α refletidas da placa seja diferente em diferentes direções. Contudo, neste experimento, nenhum valor considerável de diferença foi de fato encontrado para diferentes ângulos. Esse evento ocorre graças à necessidade de se ter um tubo próximo ao refletor. Um experimento que observe a variação do efeito com os ângulos de incidência e emergência exigiria um paralelo e fonte muito intensa de raios α homogêneos, que não podem ser realizados.

Na figura 16, o número de cintilações observadas por minuto é registrado na coluna 3; na coluna 4 a razão para o peso atômico é calculada, e esta razão diminui com a diminuição da massa atômica. O caso do chumbo aparenta ser uma exceção, que pode ser devido a pequenas impurezas presentes neste.

Figura 16: Dados quantitativos do experimento de espalhamento

1.	2.	3.	4.
Metal.	Atomic weight, A.	Number of scintillations per minute, Z	A/Z
Lead	207	62	30
Gold	197	67	34
Platinum	195	63	33
Tin	119	34	28
Silver	108	27	25
Copper	64	14.5	23
Iron	56	10.2	18.5
Aluminium	27	3.4	12.5

Fonte: Adaptado de Geiger, H.; Marsden, E. *On a Diffuse Reflection of the α -Particles*. Proceedings of the Royal Society, v. 82, p. 495, 1909.

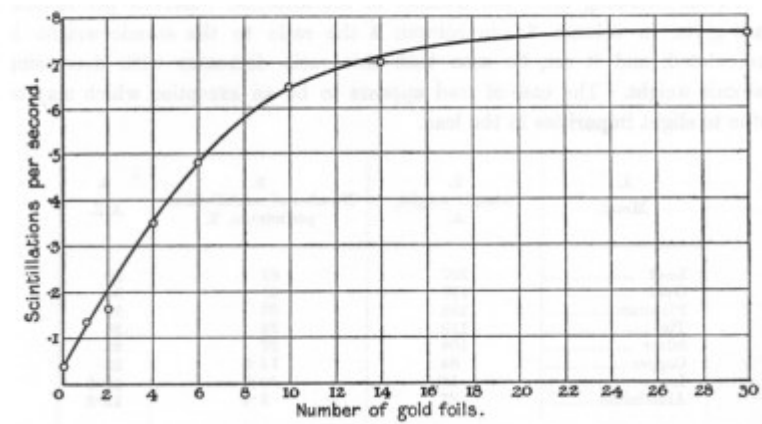
Uma cintilação por minuto pode ser observada, mesmo que estivesse na ausência de qualquer refletor, isso se deve a uma reflexão no ar, através do qual as partículas α passaram. Os números na mesa são corrigidos para este efeito.

Para as partículas β , o número de partículas refletidas diminui com o peso atômico do refletor. Mas enquanto para partículas β , o número refletido do ouro é apenas cerca de duas vezes maior quanto ao alumínio, já para as partículas α a mesma proporção é de cerca de vinte.

Já que o ouro pode ser obtido em lâminas muito finas e uniformes, esses filmes foram utilizados como refletores. Cada folha foi equivalente em poder de parada para cerca de 0,4 mm de ar. Assim, foi preciso montar as folhas em placas de vidro, contudo, o número refletido do próprio vidro encontrado era muito pequeno em comparação com o número de uma folha de ouro. A curva dá o resultado das medições.

O número de cintilações que provem graças à reflexão do ar é subtraído de cada análise. Temos que o primeiro ponto da curva representa o número de cintilações observadas para uma placa de vidro isoladamente como refletor; e o último ponto (marcado 30) mostra o número de cintilações quando se utiliza-se de uma placa grossa de ouro.

Figura 17: Curva experimental obtida a partir das medições de cintilações

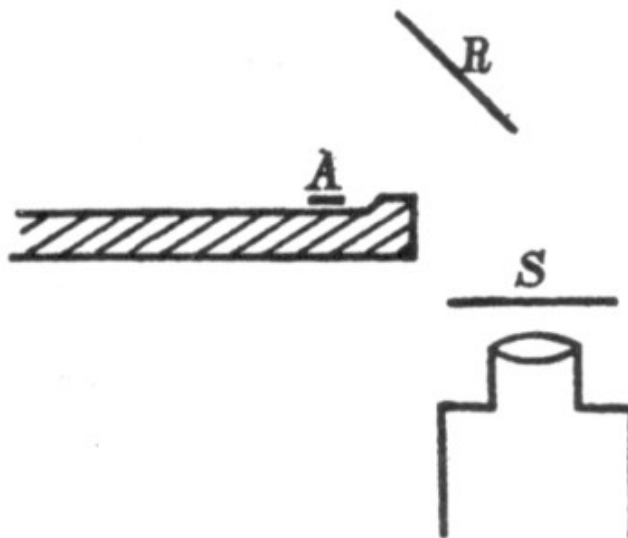


Fonte: Adaptado de Geiger, H.; Marsden, E. *On a Diffuse Reflection of the α -Particles*. Proceedings of the Royal Society, v. 82, p. 495, 1909.

A curva é semelhante às que foram constatadas para as reflexões das partículas β . Com isso, temos que a reflexão é um efeito de volume e não uma superfície. Esse efeito é confinado a uma camada fina, considerando a capacidade que uma partícula α tem de penetrar uma espessura de ouro.

Neste experimento, cerca de metade das partículas refletidas foram refletidas de uma camada equivalente a cerca de 2 mm de ar. Se levar em consideração a alta velocidade e massa da partícula α , algumas das partículas α , como o experimento mostra, podem ser giradas dentro de uma camada de 6×10^{-5} cm ouro através de um ângulo de 90 graus. Para produzir um efeito semelhante por um campo magnético, o enorme campo de 10 graus unidades absolutas é preciso.

Figura 18: Configuração experimental para análise da distribuição angular



Fonte: Adaptado de Geiger, H.; Marsden, E. *On a Diffuse Reflection of the α -Particles*. Proceedings of the Royal Society, v. 82, p. 495, 1909.

Assim, nenhuma variação apreciável do número foi encontrada com diferentes ângulos de energia.

A quantidade de rádio C depositada na placa foi determinada pela sua atividade de raios γ . Assumindo que $3,4 \times 10^{10}$ partículas são expelidas por segundo de uma quantidade de RaC equivalente a 1 grama de Ra, o número de partículas α expelidas por segundo da placa ativa foram determinadas.

O número caindo no refletor de platina pode ser calculado a partir de sua conhecida distância e área. Desse modo, para encontrar o número total de partículas refletidas, assumiu-se que estavam distribuídas uniformemente em torno de uma meia esfera com o meio do refletor como centro.

Três determinações diferentes mostraram que das partículas α incidentes, cerca de 1 em 800 foram refletidas

Em baixa pressão, foi conduzido um experimento especial, que mostrou que no caso de incidência de pastejo o número de partículas refletidas em um ângulo muito pequeno para o refletor é em grande parte superior ao número calculado a partir do acima.

Este espalhamento tangencial é de muito importante em alguns experimentos. Um exemplo é se partículas α de uma fonte radioativa são disparadas ao longo de um tubo de vidro de comprimento apreciável as condições são muito favoráveis para este efeito.

O número de cintilações contadas em uma tela selada para a outra extremidade do tubo é composta pelas partículas que atingem a tela diretamente e também daqueles que foram refletidos das paredes de vidro do tubo. A correção para o último efeito pode ser apreciável, e seria ainda maior no caso da utilização de um tubo de metal.

Nos experimentos de contagem de Rutherford e Geiger este efeito não influenciou o resultado final, sendo o arranjo tal que as partículas refletidas foram impedidas de entrar na abertura do vaso de ionização pela construção estreita de uma torneira.

Com base nos experimentos, é notável que o número de partículas refletidas também dependa sobre a velocidade das partículas α que caem no refletor. Assim, no caso das partículas de rádio C, estas tiveram que percorrer mais de um centímetro de ar antes de atingir o refletor. As partículas refletiam ainda uma velocidade considerável, pois, pela interposição de uma folha de alumínio de espessura equivalente em poder de parada a $1/2$ cm de ar, o número de cintilações contadas não foi alterado. Isso pode ser esperado do Experimento (II), que mostrou que as partículas α são refletidas a partir de uma camada relativamente fina.

Posteriormente, no desenvolvimento das pesquisas do professor Rutherford e Geiger para determinar o número de partículas alfas expelidas em uma 1 de rádio, houve uma maior atenção para a dispersão das partículas alfa que passavam pela matéria.

Esse efeito de dispersão das partículas alfas pela matéria já era bastante conhecido para as partículas betas que tinham um feixe de raios betas, logo após passar por uma placa de metal. Por analogia, esse mesmo efeito, só que tem uma extensão muito menor, também era conhecido para as partículas alfa.

Ademais, o professor Rutherford exemplificou que quando uma fenda estreita, produzida por raios alfas em uma chapa fotográfica, é coberta por uma fina folha de mica, tem a sua imagem larga. Enquanto as imagens ficam bem definidas quando tem a sua fenda descoberta no vácuo.

Dessa forma, foram realizados alguns experimentos usando o método chamado cintilação para conseguir determinar a magnitude das partículas alfa no momento em que passam pela matéria.

O aparelho usado é mostrado na fig. 18. A parte principal consiste em um tubo de vidro com cerca de 2 metros de comprimento e 4 cm de diâmetro. As partículas alfa de uma fonte forte e pequena são colocadas em R, que passará pela estreita fenda em S e irá produzir a imagem dessa fenda na tela fosforescente Z (tela que foi cimentada na extremidade do tubo de vidro).

A amplitude da fenda era de 09 mm., e a largura da imagem geométrica na tela foi de cerca de 2 mm., dependendo das dimensões e da distância da fonte. Para contar o número de cintilações em diferentes pontos da tela foi utilizado um microscópio M de ampliação de 50 vezes e a sua área que pode ser vista através do microscópio foi de cerca de 1 mm.².

Ao decorrer da experiência o número de cintilações variou entre dois ou três por minutos, durante cerca de 80 minutos. O microscópio usado foi montado em uma lâmina PP, lido em escala milimétrica fixada nesta, para assim, as cintilações que fossem produzidas em distâncias variadas do centro do feixe pudessem ser observadas.

Os primeiros experimentos realizados, utilizaram rádio C. O experimento foi realizado de forma que, foi depositado uma quantidade desse rádio em um pedaço de metal, como fonte de raios alfa. Contudo, ao comprovar que devido a sua taxa rápida de decadência, não era possível obter resultados definitivos.

No intuito de evitar esse problema, foram colocados miligramas de RaBr₂ sob baixa pressão dentro de um vidro inclinado de tubo R. Uma das extremidades, com menos de 2mm, desse tubo foi fechada hermeticamente por uma folha de mica fina, na qual as partículas alfa podem escapar. Assim, foi obtida uma intensa fonte de seção transversal e as cintilações foram contadas em diferentes pontos sem nenhuma dificuldade.

Foi observado que quando em vácuo, o número de cintilação fora da imagem geométrica da fenda é quase nulo. Entretanto, ao permitir a entrada de um pouco de ar no tubo, a sua quantidade aumenta consideravelmente.

Ao mover o microscópio ao longo de toda a tela, contando o número de cintilações em intervalos definidos, a cada segundo milímetro, foi obtida uma curva da distribuição das partículas alfa. A partir disto, foi possível constatar que o número de cintilações foi pequeno no limite extremo da tela, mas aumentou rapidamente quando em direção ao centro do feixe. Esses resultados foram obtidos também no vácuo quando a fenda fosse coberta por folha de ouro ou alumínio.

Analogamente, estas folhas foram fixadas em pequenas molduras, postas em uma lâmina AA conectada com a fenda S, e a medida da distribuição das partículas atingindo a tela foi a mesma que antes.

A figura 17 mostra alguns exemplos típicos das curvas obtidas. A curva A mostra a distribuição das cintilações no vácuo de carvão, que pode ser observado um leve espalhamento, provavelmente dos últimos vestígios de ar no tudo. A segunda curva B mostra o efeito se a fenda é coberta com uma folha de ouro e nessa, as cintilações observadas foram mais amplas e

sua distribuição poderia ser notada a olho nu. As medidas reais são dadas na curva B. A terceira curva C mostra o efeito de duas folhas de ouro juntas.

As curvas da figura 17 são referentes a absorção das folhas de metal que ocorreram, já que partículas alfa de diferentes velocidades foram notadas. Foram realizados experimentos com a folha de alumínio, que mostrou um efeito de espalhamento claramente, mas em uma extensão menor comparado com a folha de ouro, com espessuras equivalentes.

Essas observações evidenciam que há uma dispersão muito marcado dos raios alfa quando passam pela matéria, seja gasosa ou sólida. Foi notado que ao passar por folhas finas (que tinham o poder de parada como 1mm de ar), as partículas alfa foram desviadas por um ângulo notável.

Há também o artigo que aborda As Leis da Deflexão de Partículas α Através de Grandes ângulos ainda por H. Geiger e E. Marsden em que descrevem que o professor Rutherford desenvolveu uma teoria para explicar o espalhamento de partículas α através desses grandes ângulos, sendo a suposição que as deflexões são o resultado de um encontro íntimo de uma partícula α com um único átomo da matéria atravessada.

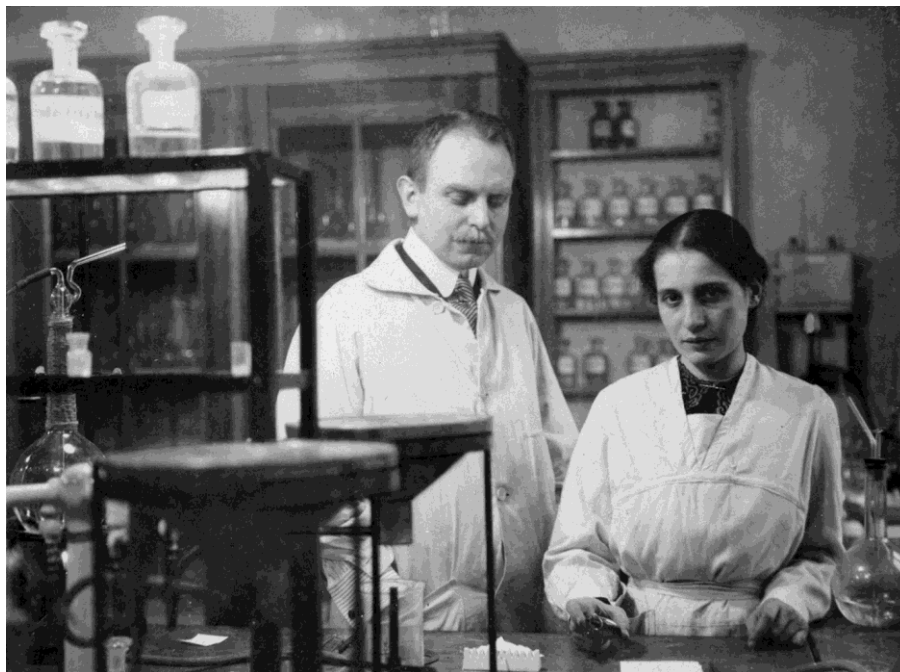
5.6 Era da radioatividade

Com o fenômeno da radioatividade se expandindo pelo mundo, não demorou muito tempo para o seu uso e aplicação ser intensamente utilizado. Suas pesquisas foram cada vez mais financiadas e incentivadas, principalmente nas áreas bélicas, energéticas e medicinais.

Em 1930 muitos cientistas devotaram imensos esforços investigando suas aplicações, principalmente a transmutação dos elementos por meio do bombardeamento com nêutrons. O intuito era a descoberta de novos elementos, utilizando o urânio, o que resultou na descoberta da fissão nuclear. Os Curies, em seus primeiros estudos, haviam bombardeado o alumínio, utilizando das partículas alfa, mas se constatou um rendimento muito baixo por conta da repulsão das partículas.

Em 1935 se tem os primeiros indícios de uma iminente guerra. Os países estavam em alarme total, muitos pesquisadores tiveram que deixar seus países, entre eles está Lise Meitner.

Figura 19 - Lise Meitner



Fonte: <https://universoracionalista.org/lise-meitner-uma-fisica-que-nunca-perdeu-sua-humanidade/>

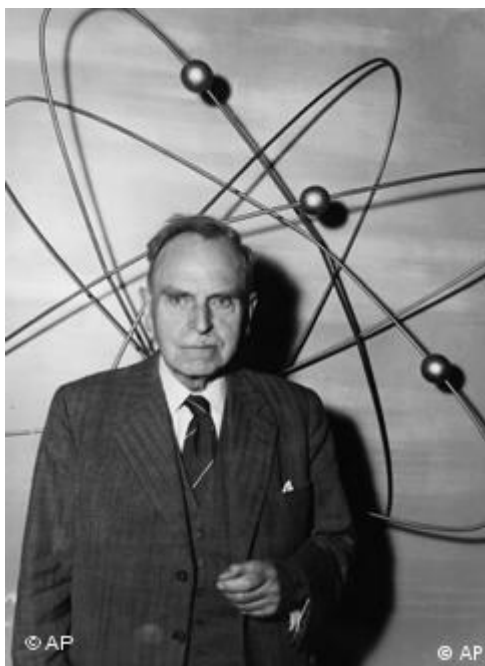
Lá, recebeu asilo de Bohr, e continuou a se comunicar com seus amigos cientistas alemães. Ainda 1938:

Os químicos experimentais alemães Otto Hahn e Fritz Strassmann haviam detectado o elemento bário após bombardearem com nêutrons uma amostra de urânio puro, mas os cientistas não conseguiram explicar o aparecimento do bário. A explicação foi dada por Meitner com a colaboração de seu sobrinho Otto Frisch. Meitner chegou à conclusão de que os núcleos de urânio haviam sido quebrados em núcleos menores, incluindo os de bário, havendo grande liberação de energia. Sua hipótese foi logo confirmada experimentalmente por Frisch. Meitner havia decifrado o processo de fissão, termo emprestado da biologia. (RESQUETTI, p. 54. 2013)

De acordo com Hewitt, em dezembro do mesmo ano, Hahn contatou a física para relatar a detecção do bário, e obteve uma carta em resposta a respeito de suas ideias. conta que, em dezembro de 1938, Hahn escreveu a Meitner relatando sobre a detecção do bário.

Em 1939 Hahn e Strassmann publicaram um artigo a respeito do experimento quando o urânio era bombardeado com nêutrons. Em 1944 Hahn recebeu, sozinho, o Prêmio Nobel de Química, pela descoberta da fissão nuclear, sem nunca mencionar o papel desempenhado por Meitner e Fritz (RESQUETTI, p. 54. 2013).

Figura 20 - Otto Hahn



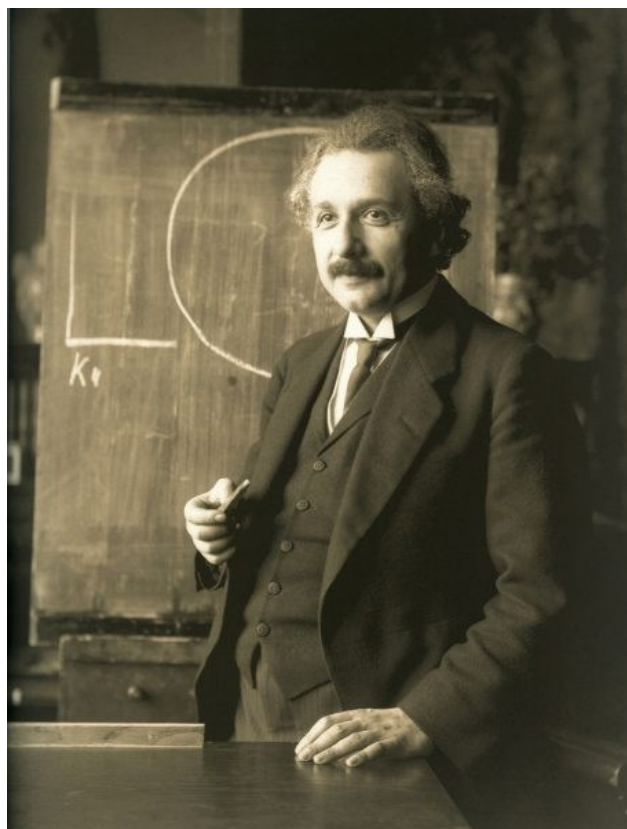
Fonte: <http://historiaupf.blogspot.com/2012/12/1938-otto-hahn-descobre-fissao-nuclear>.
<http://historiaupf.blogspot.com/2012/12/1938-otto-hahn-descobre-fissao-nuclear.html>

A fissão nuclear, por meio da emissão de nêutrons fez com que os cientistas começassem a pensar sobre as suas reações em cadeias e poder bélico

Em 1939, a invasão da Polônia pela Alemanha nazista marcou o início da Segunda Guerra Mundial, intensificando um contexto já caracterizado pela ascensão do regime nazista e pela perseguição sistemática a judeus e opositores políticos. Esse cenário levou à migração de diversos cientistas europeus para os Estados Unidos, especialmente aqueles de origem judaica ou que sofriam restrições acadêmicas e políticas impostas pelo regime. Entre eles encontrava-se Albert Einstein, cuja saída da Europa já havia ocorrido anteriormente, mas que se insere nesse movimento mais amplo de deslocamento intelectual forçado.

Albert Einstein foi um físico teórico nascido na Alemanha que, diante da ascensão do regime nazista ao poder em 1933 e do ambiente de perseguição política e racial instaurado no país, optou por não retornar à Alemanha, renunciando posteriormente à sua cidadania alemã e estabelecendo-se definitivamente nos Estados Unidos.

Figura 21 - Albert Einstein



Fonte: <https://www.infoescola.com/wp-content/uploads/2008/07/albert-einstein.jpg>

O cenário mundial era de um intenso conflito, novas descobertas sobre o poder de destruição por meio das reações em cadeia em um lado, e de outro uma guerra se iniciava. Com medo da ameaça alemã, os cientistas húngaros Leo Szilard, Edward Teller e Eugene Wigner, procuraram apoio de Einstein a respeito das armas nucleares alemãs.

De acordo com Rhodes (2012), os pesquisadores apresentaram os cálculos da reação em cadeia do urânio para Einstein. Após discutir com o físico, Szilard escreveu uma carta, assinada por Einstein e entregue pelo presidente americano Franklin Delano Roosevelt. Esta, abordava sobre a iminente ameaça alemã e a construção de armas nucleares. Posteriormente, graças a carta, se deu início ao projeto Manhattan. O Projeto Manhattan tinha como objetivo construir a primeira bomba atômica do mundo.

6. Considerações finais.

Ao longo deste trabalho, buscou-se analisar o desenvolvimento histórico da radioatividade. A revisão histórica evidenciou que a radioatividade não se constituiu de forma

linear ou isolada, mas a partir de debates, experimentações, reformulações conceituais e contribuições coletivas, aspectos que nem sempre são contemplados no ensino escolar.

Diante desse cenário, a História da Ciência pode permitir a compreensão da ciência como uma atividade humana, dinâmica e situada historicamente. Ao integrar aspectos históricos, conceituais e epistemológicos, essa abordagem contribui para uma aprendizagem mais significativa, favorecendo a articulação entre conceitos da Química e da Física e promovendo uma visão mais crítica e reflexiva do conhecimento científico.

Dessa forma, considera-se que o objetivo proposto neste trabalho, de analisar episódios históricos relacionados ao desenvolvimento das investigações sobre radioatividade e sua relação com a compreensão da estrutura da matéria, foi alcançado na medida em que a análise documental permitiu evidenciar como diferentes experimentos e interpretações científicas contribuíram para a construção desses conhecimentos. A partir dessa perspectiva, o estudo buscou também evidenciar o potencial da História da Ciência como recurso para o ensino de radioatividade no Ensino Médio, ao possibilitar a contextualização histórica dos conceitos e a compreensão da ciência como um processo dinâmico e coletivo. Como limitações da pesquisa, destaca-se o recorte adotado, que privilegiou determinados cientistas e episódios históricos, não contemplando a totalidade das contribuições existentes sobre o tema. Nesse sentido, pesquisas futuras podem ampliar essa abordagem ao investigar outros episódios históricos relacionados à radioatividade ou ao desenvolver e aplicar propostas didáticas baseadas na História da Ciência em contextos reais de sala de aula, avaliando seus impactos no processo de ensino e aprendizagem.

7. REFERÊNCIAS

ALFONSO-GOLDFARB, Ana Maria; WAISSE, Silvia; FERRAZ, Márcia H. M. A historiografia contemporânea e as ciências da matéria: uma longa rota cheia de percalços. In: *Escrevendo a História da Ciência: tendências, propostas e discussões historiográficas*. São Paulo: Educ, 2004.

BADASH, L. Rutherford and Boltwood: Letters on Radioactivity. 377 p. New Haven e Londres: Yale University Press. 1969. BECQUEREL, H. Émission de radiations nouvelles par BECQUEREL, H. El descubrimiento de la radioactividad. Introdução e trad. De Cortés Pla. Buenos Aires: espasa-Calpe, 1946.

CORDEIRO, Marinês Domingues. DOS CURIE A RUTHERFORD: ASPECTOS HISTÓRICOS E EPISTEMOLÓGICOS DA RADIOATIVIDADE NA FORMAÇÃO CIENTÍFICA. 2011. 5 v. Dissertação (Mestrado) - Curso de Educação Científica e Tecnológica, Educação Científica e Tecnológica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011. Cap. 2 e 3. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/95575/294038.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 18 set. 2022.

<https://doi.org/10.36524/profept.v5i2.1400>

GEIGER, H.; FELLOW, John Harling. A Dispersão das Partículas α pela Matéria. 1908. Disponível em: <https://docs.google.com/document/d/1YTATMrsSK9neZUDVA68v76pgqbI4uvXftSRYrku137I/edit?usp=sharing>. Acesso em: 12 set. 2022.

GEIGER, H.; MARSDEN, E.. Sobre uma reflexão difusa das partículas α . 1909. Disponível em: <https://docs.google.com/document/d/1b87iFC1jg2-yIm764aBwuFs5FF7xrFLuOBYsJPvqPfk/edit?usp=sharing>. Acesso em: 13 set. 2022.

GEIGER, H.; MARSDEN, E.. As Leis da Deflexão de Partículas α Através de Grandes angulos. 1913. Disponível em: https://docs.google.com/document/d/1fF1eOowqSEB1N1ZjfNmD0we28MzdKHp_IC5J7qdsrQo/edit?usp=sharing. Acesso em: 12 set. 2022.

GIL, Antônio Carlos. Métodos e técnicas de pesquisa social. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

HEWITT, P. G. Física conceitual. Tradução: Trieste Freire Ricci. 11. ed. Porto Alegre: Bookman, p 744, 2011.

MARQUES, Deividi Marcio. AS INVESTIGAÇÕES DE ERNEST RUTHERFORD SOBRE A ESTRUTURA DA MATÉRIA: CONTRIBUIÇÕES PARA O ENSINO DE QUÍMICA. 2006. 183 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Educação Para A Ciência, Concentração em Ensino de Ciências, Unesp, Bauru, 2006. Cap. 1. Disponível em: file:///home/chronos/u-e9bc490851254f2145a7b2ca975a86a10ec23b09/MyFiles/Downloads/DIS_MEST20060224_MARQUES%20DEIVIDI%20MARCIO.pdf. Acesso em: 12 set. 2022.

MARTINS, J. B. História da energia nuclear. Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN. Apostilas educativas. Rio de Janeiro: CNEN, [200-]. Disponível em: <http://www.cnen.gov.br/ensino/apostilas/historia.pdf>.

MARTINS, R. A. A descoberta da radioatividade. Campinas: [s.n.], 1998. Disponível em: <http://www.ghc.usp.br/server/pdf/ram-59.pdf>. Acesso em: 28 mar. 2012. Artigo científico.

MARTINS, Roberto de A.. COMO BECQUEREL NÃO DESCOBRIU A RADIOATIVIDADE. 1990, p. 28, 36, 39 e 40.. Disponível em: file:///home/chronos/u-e9bc490851254f2145a7b2ca975a86a10ec23b09/MyFiles/Downloads/10061-Texto%20do%20Artigo-50402-1-10-20101116%20(1).pdf. Acesso em: 13 set. 2022.

OKUNO, E. Radiação: efeitos, riscos e benefícios. São Paulo: HARBRA, 2007, 81p.-

OKUNO, E.; YOSHIMURA, E. Física das radiações. São Paulo: Oficina de Textos, p. 296. 2010.

PORTO, Paulo Alves. História e Filosofia da Ciência no Ensino de Química: em busca de objetivos educacionais. Química Nova na Escola, v. 32, n. 1, p. 12–18, 2010.

RESQUETTI, Silvia Oliveira. UMA SEQUÊNCIA DIDÁTICA PARA O ENSINO DA RADIOATIVIDADE NO NÍVEL MÉDIO, COM ENFOQUE NA HISTÓRIA E FILOSOFIA DA CIÊNCIA E NO MOVIMENTO CTS. 2013. 281 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência e A Matemática, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2013. Cap. 3 e 6, p. 44, 48, 52, 54 e 191. Disponível em: <http://repositorio.uem.br:8080/jspui/bitstream/1/4554/1/000211302.pdf>. Acesso em: 12 set. 2022.

RHODES, R. The making of the atomic bomb. 25 ed. Nova Iorque: Simon & Schuster Paperbacks, p. 838, 2012.

RUTHERFORD, Ernest. The scattering of α and β particles by matter and the structure of the atom. Philosophical Magazine, London, v. 21, p. 669–688, 1911.

<https://doi.org/10.1080/14786440508637080>