

Fissão nuclear e transurânicos em nove traduções

Nuclear fission and transuranium in nine translations

Marinês Domingues Cordeiro | Universidade Federal de Santa Catarina

marines.cordeiro@ufsc.br

<https://orcid.org/0000-0001-9102-7441>

Larissa Moreira Ferreira | Universidade Federal de Santa Catarina

larissa.ferreira@ufsc.br

<https://orcid.org/0000-0002-4466-9262>

Rodrigo Guimarães Soares | Universidade Federal de Santa Catarina

rodrigosoares.rgs@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-9968-8842>

RESUMO Traduzimos nove artigos relativos às descobertas da fissão nuclear e dos elementos transurânicos, uma história de grande importância em razão dos caminhos erráticos trilhados pelos cientistas e das dificuldades de articular evidências experimentais com expectativas teóricas. Apresentamos dois trabalhos de Enrico Fermi, em que descreve suas investigações com o bombardeamento de vários elementos com nêutrons e conclui a possibilidade de ter produzido os primeiros elementos transurânicos; o artigo de Ida Noddack criticando as metodologias de Fermi, concluindo que elementos mais leves poderiam ter sido produzidos naquelas reações; o artigo de Otto Hahn e Fritz Strassmann, em que indicam detectar quimicamente o bário em reações de bombardeamento de urânio com nêutrons; a carta ao editor de Lise Meitner e Otto Frisch explicando fisicamente a quebra dos núcleos a partir das evidências apresentadas por Hahn e Strassmann; a carta ao editor escrita por Otto Frisch apresentando evidências empíricas da fissão nuclear; a carta ao editor escrita por Edwin McMillan e Philip Abelson em que apresentam a metodologia de síntese do elemento 93 e as análises químicas que confirmaram sua identidade e, enfim, duas cartas ao editor escritas por Glenn Seaborg, Edwin McMillan, Joseph Kennedy e Arthur Wahl, em que apresentam a síntese física do elemento 94 e as técnicas químicas de identificação. Na introdução, apresentamos o contexto histórico, que envolve o prelúdio e a eclosão da Segunda Guerra Mundial, perseguição nazista, mudanças de instituição, segredos científicos e introdução às linhas de raciocínio que levaram às conclusões dos trabalhos.

Palavras-chave história da ciência – síntese de elementos químicos – reações nucleares.

ABSTRACT *We translated nine papers on the discoveries of nuclear fission and transuranium elements, which are of great importance due to the erratic paths followed by the scientists and the difficulties in articulating experimental evidence with theoretical expectations. We present two papers by Enrico Fermi, describing his research on the bombardment of various elements with neutrons and concludes*

the possibility of having produced the first transuranium elements; Ida Noddack's criticism of the methodologies employed by Fermi and conclusion that those reactions might have yielded lighter elements; the paper by Otto Hahn and Fritz Strassmann, in which they indicate having chemically detected barium in the products of uranium bombardment with neutrons; the letter to the editor by Lise Meitner and Otto Frisch, physically explaining nuclear fission, based on the evidences of the latter paper; the letter to the editor by Frisch, presenting empirical evidence for nuclear fission; the letter to the editor by Edwin McMillan and Philip Abelson, in which they alleged synthesizing element 93 and present the chemical analysis to confirm it, and, finally, two letters to the editor by Glenn Seaborg, Edwin McMillan, Joseph Kennedy and Arthur Wahl, presenting the synthetization of element 94 and the chemical techniques employed to confirm it. In the introduction, we present the historical context, which involved the prelude and outbreak of the Second World War, Nazi persecution, changes of institutions, scientific secrets, and introduction to the trains of thought that led to the conclusions of the papers.

Keywords: *history of science – synthesis of chemical elements – nuclear reactions.*

Introdução

A descoberta do nêutron por James Chadwick ocorreu no início da década de 1930. A constatação da existência dessa partícula é, em si, um grande feito científico. Entretanto, muito mais do que o avanço sobre a compreensão da natureza, a descoberta do nêutron abriu caminho para uma revolução científica, tecnológica e social onipresente na atualidade. Afinal, sem o conhecimento sobre o efeito dos nêutrons sobre átomos pesados, não haveria energia nuclear ou debates sobre os efeitos de uma bomba atômica. Esse efeito, hoje conhecido como fissão nuclear, não foi prontamente compreendido. Pelo contrário: o reconhecimento de que o átomo se parte ao ser atingido por nêutrons foi produto de uma série de experimentos, hipóteses equivocadas e algumas desventuras científicas por personagens em variadas localizações geográficas.

Este trabalho, portanto, visa a apresentar o leitor, em língua portuguesa, a nove trabalhos científicos expressivos dessa história, que se iniciou com os famosos experimentos de irradiação de urânio com nêutrons e levou à interpretação, ao longo de quatro anos, de que tais experimentos produziam elementos transurânicos. Ao fim desse período, tal interpretação foi revisada – na maioria dos casos, essa irradiação levava à quebra dos núcleos. Apenas um ano após a revisão, o primeiro elemento transurânico, neptúnio, como o conhecemos hoje, foi produzido sistematicamente com auxílio de aceleradores de partículas. De especial importância foi a produção do elemento 94, plutônio, que viria a ser a fonte fissionável da bomba atômica lançada sobre Nagasaki em 9 de agosto de 1945.

Os dois primeiros trabalhos que traduzimos aqui – “*Radioactivity induced by neutron bombardment*” (Fermi, 1934a) e “*Possible production of elements of atomic number higher than 92*” (Fermi, 1934b) – são cartas ao editor da revista *Nature*, de autoria de Fermi, que descrevem resultados dos experimentos realizados pelos célebres *ragazzi di Via Panisperna*, ou seja, os rapazes do Instituto de Física da Universidade de Roma, localizado na rua Panisperna. O grupo liderado por Fermi tinha, entre seus membros, Emilio Gino Segrè. À exceção de Oscar D’Agostino, que era químico, todos os membros do grupo eram físicos. Nessas comunicações, Fermi descreve os resultados preliminares das experiências de sua equipe com o bombardeamento de variados elementos de massa intermediária da tabela periódica. Ele afirma que continuará executando a irradiação em outros elementos; é possível inferir que ele se refere a elementos de maior número atômico, como de fato se constata na comunicação posterior. Nesta última, ele apresenta uma

série de investigações experimentais envolvendo o bombardeamento de elementos pesados com nêutrons, concluindo a possibilidade de ter produzido os elementos 93 e 94, em razão de uma série de evidências analíticas.

Justamente em virtude de ser eletricamente neutro, o nêutron tem potencial de mediar uma investigação nuclear. Embora cientistas duvidassem da capacidade técnica de fontes de nêutrons serem capazes de interagir com núcleos atômicos, Fermi viu potencial nas novas partículas. Além de não interagirem eletricamente com os núcleos, os nêutrons também não o fazem com elétrons; seu alcance, portanto, torna-se longo, aumentando a probabilidade de colidirem com o núcleo ao passo em que compensam seus baixos rendimentos de produção (Fermi, 1965).

Para melhor compreensão da segunda comunicação, é essencial frisar que as evidências coletadas por Fermi e sua equipe – que eliminavam boa parte dos elementos naturalmente radioativos – foram baseadas no conhecimento químico da época. A série dos actinídeos ainda não havia sido proposta. Assim, classificava-se o urânio como metal de transição – sua posição na tabela periódica naquela época é atualmente ocupada pelo seabórgio no atual grupo 6 (na década de 1930, família VI). Esperava-se, portanto, que um elemento mais positivo que o urânio ocupasse a posição ao lado, diretamente abaixo do rênio – o que gerava a expectativa de que esse transurânico tivesse características daquela família.

Essa segunda comunicação de Fermi (1934b) ganhou rápida notoriedade e recebeu algumas críticas. Trazemos aqui aquela feita pela química analítica alemã Ida Noddack no trabalho “Über das Element 93” (Noddack, 1934), publicado na revista *Angewandte Chemie*. No artigo, Noddack introduz uma série de críticas às metodologias de análise e de controle de variáveis apresentadas por alguns cientistas, incluindo Fermi, que relataram ter produzido elementos transurânicos. De especial interesse para este trabalho de tradução é sua afirmação de que as evidências corroboravam igualmente bem uma hipótese menos ortodoxa, a de que elementos médios poderiam ter sido produzidos por aquela reação de bombardeamento com nêutrons. Baseamos a tradução aqui apresentada na associação de dois documentos – o artigo original e a tradução em língua inglesa, feita por Hans Graetzer e publicada na obra de Graetzer e Anderson (1971) – preferindo a organização de parágrafos e certos termos do artigo original, já que a tradução de Graetzer apresenta algumas pequenas modificações para termos mais atuais, bem como a fusão de determinados parágrafos.

Não se pode alegar que o trabalho de Noddack não chegou ao conhecimento dos cientistas interessados. Ao que tudo indica, quase todos os grupos importantes – o de Fermi, na Itália, o dos Joliot-Curie, na França, Meitner e Hahn, no Kaiser Wilhelm na Alemanha e até mesmo na Califórnia, Berkeley – souberam do artigo; Noddack enviou uma cópia do trabalho até mesmo aos italianos (Hook, 2007; Seaborg, 2007; Alvarez, 1987). Algumas de suas críticas foram endereçadas em trabalhos posteriores de Fermi, como a exclusão do polônio como possível produto daquela reação (Fermi et al., 1934; Amaldi et al., 1935). Sua crítica conceitual, contudo – aquela de que uma hipótese igualmente bem suportada pelas evidências era a da quebra dos núcleos – não foi considerada.

Uma possibilidade levantada para essa espécie de negligência foi o fato de Noddack ser percebida amplamente como nazista e de personalidade desagradável. Outra, de que ela havia quebrado o *ethos* da ciência na década de 1920, quando ela e seu marido alegaram ter descoberto o elemento de número atômico 43, que batizaram de masúrio (Hook, 2007; Silva,

2019). Sobre essa segunda razão, é interessante notar que, apesar de nunca terem oferecido maiores evidências da descoberta, os Noddack eram considerados eminentes químicos, tendo sido indicados ao Prêmio Nobel de Química quatro vezes entre os anos de 1932 e 1937 e recebendo outras importantes lãureas (Santos, 2014). Cabe destacar que o masúrio foi aceito como elemento químico por algum tempo, tanto que é referenciado no artigo aqui traduzido de Meitner e Frisch (1939).

A razão mais sólida oferecida por cientistas e analistas desse caso histórico é a falta de coerência física da interpretação, embora ela apresentasse consistência com a química analítica. Com o modelo nuclear da época, a quebra de um núcleo pesado – uma estrutura rígida, composta por centenas de partículas, que perdia no máximo uma partícula alfa por vez – por um simples nêutron era impensável. Era mais fácil conceber que o nêutron promovesse alterações no núcleo do urânio que o tornavam um emissor beta. Cabe enfatizar que tampouco Noddack deu continuidade à investigação (Alvarez, 1987; Hook, 2007).

Como mencionado, mesmo com a crítica de Noddack, a interpretação de que o bombardeamento de urânio com nêutrons produzia elementos transurânicos durou pouco mais de quatro anos. Um dos artigos fundamentais que traz bases para a reinterpretação do fenômeno foi escrito por Otto Hahn e Fritz Strassmann, aqui também traduzido. “Über den Nachweis und das Verhalten der bei der Bestrahlung des Urans mittels Neutronen entstehenden Erdalkalimetalle” (Hahn; Strassmann, 1939) foi publicado na revista *Die Naturwissenschaften*, no começo de 1939, mas recebido em 22 de dezembro de 1938 – poucos dias após Fermi receber o Prêmio Nobel de Física por “por suas demonstrações da existência de novos elementos radioativos produzidos pela irradiação do urânio e por sua descoberta correlata das reações nucleares provocadas por nêutrons lentos”.¹

No artigo de Hahn e Strassmann, há a primeira afirmação de que o bombardeamento de U^{239} por nêutrons resulta na produção de elementos como bário, o que foi visto historicamente como a primeira evidência química de uma possível quebra do núcleo do urânio. A tradução aqui apresentada baseia-se em duas fontes: a original, em alemão, e também a tradução, feita por Hans G. Graetzer e publicada na *American Journal of Physics*, em 1964, em comemoração aos 25 anos da descoberta da fissão nuclear (Graetzer, 1964). As figuras apresentadas foram retiradas do artigo original e, por essa razão, têm indicações em alemão que são traduzidas em notas de rodapé. Junto às figuras, apresenta-se a tradução das legendas em português. Preferimos manter a organização dos parágrafos e os termos do original, já que a tradução de Graetzer (1964) usa termos mais atuais e conflui certos parágrafos.

As evidências químicas apresentadas por Hahn e Strassmann ganharam, em 11 de fevereiro de 1939, uma explicação física contida na carta ao editor da revista *Nature* escrita por Lise Meitner e seu sobrinho Otto Frisch. A comunicação intitulada “Disintegration of uranium by neutrons: a new type of nuclear reaction” (Meitner; Frisch, 1939) foi escrita por telefone, após um encontro natalino, quando discutiram o assunto (Sime, 1989). O trabalho propõe uma interpretação física para o fenômeno identificado pelos químicos alemães, desenvolvido pela equipe composta por Meitner, Hahn e Strassmann, antes da emigração. À época, Meitner estava separada da equipe, trabalhando na Suécia, em função da perseguição que vinha sofrendo pelos nazistas. Nesse trabalho, o termo fissão nuclear é cunhado.

1 The Nobel Prize in Physics 1938. NobelPrize.org. Nobel Prize Outreach 2025. Disponível em: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1938/summary/>. Acesso em: 29 jan. 2025. (Nossa tradução).

Outra carta ao editor foi assinada no mesmo dia que a de Meitner e Frisch (1939), desta vez, apenas por Frisch (1939). Ela apresenta os resultados de um trabalho de continuação feito por ele; nela são apontadas uma metodologia física de investigação da hipótese da fissão nuclear e as evidências físicas experimentais dela resultadas. "*Physical evidence for the division of heavy nuclei under neutron bombardment*" (Frisch, 1939) foi também publicada na revista *Nature*, uma semana após a comunicação de Meitner e Frisch (1939).

É fato que, antes dos resultados das investigações de Hahn, Strassmann, Meitner e Frisch, a interpretação dos transurânicos acumulava anomalias. Uma nova proposta de modelo nuclear de gota líquida carregada, feita por Bohr em 1936, parecia permitir que partículas energéticas, ao colidirem com o núcleo incessantemente, deslocassem outras partículas nucleares a ponto de, eventualmente, provocar uma explosão. Frisch conhecia Bohr e, logo depois de seu encontro com Meitner, apresentou-lhe os desenvolvimentos. Aparentemente, Bohr não precisou de mais de cinco minutos para associar sua especulação aos resultados químicos e à interpretação física dada por Meitner e Frisch, com respaldo em seu modelo de gota líquida carregada. Fortuitamente, Bohr estava embarcando para os Estados Unidos, onde, ao chegar, divulgou os resultados, que rapidamente chegaram a Berkeley (Stuewer, 1985).

Com os trabalhos de Hahn e Strassmann (1939), Meitner e Frisch (1939) e Frisch (1939), passava-se a compreender que boa parte das reações produzidas eram quebras de núcleo, em vez de produção de transurânicos. Há dois relatos de cientistas que trabalhavam no assunto naquela época que mostram claramente o impacto provocado por essa que se mostrava uma explicação simples para um fenômeno que, há quatro anos, acumulava anomalias. Segundo Alvarez (1987, p.73), em 1934, "a explicação correta demandava uma dissociação tão radical com a compreensão contemporânea que ninguém deu continuidade ao assunto"; Seaborg (2007, p. 73), por sua vez, afirma: "li e reli todo e qualquer artigo publicado sobre o tópico. Sentia-me desafiado pela situação – quer intrigado pela conceituação decorrente da interpretação dos resultados experimentais dos transurânicos, quer perturbado pelas inconsistências de tais interpretações". Analisar curvas de decaimento não é tarefa fácil e o que eles antes achavam ser três ou quatro elementos transurânicos eram, de fato, dezenas de isótopos diferentes, componentes de variadas cadeias.

Os transurânicos, como os conhecemos hoje, foram sistematicamente produzidos a partir de 1941, com a investigação de uma meia-vida de 23 minutos. Essa meia-vida foi indicada por Meitner e Frisch (1939) como a única com potencial de se revelar um elemento transurânico. As investigações foram feitas, agora, nos Estados Unidos da América, na Universidade da Califórnia – Berkeley, com acelerador de partículas. A carta ao editor publicada na revista *Physical Review* em 15 de junho e assinada em 17 de maio de 1940 por Edwin McMillan e Philip Abelson, "*Radioactive element 93*" (McMillan; Abelson, 1940), é considerada definidora da descoberta do primeiro elemento transurânico como conhecemos hoje, o neptúnio. É de particular interesse também por apresentar a sintetização física do elemento, assim como sua identificação por técnicas químicas.

"*Radioactive element 94 from deuterons on uranium*" (Seaborg et al., 1946; Seaborg; Wahl; Kennedy, 1946) são também cartas homônimas ao editor da revista *Physical Review*, de autoria de Glenn Seaborg, Edwin McMillan, Joseph Kennedy e Arthur Wahl. Os autores, que trabalhavam na Universidade da Califórnia – Berkeley, dão continuação às investigações de produção de transurânicos. Esse trabalho tem pontos notáveis. Primeiramente, e fundamental para a linha escolhida por este trabalho de tradução, é o relato, em duas partes, da possível sintetização do

elemento 94. As duas cartas são partes do mesmo trabalho experimental; o primeiro, de natureza física, em que explicam a sintetização do possível elemento 94. O segundo, de natureza química, em que narram as técnicas químicas desempenhadas para a identificação do elemento. O segundo ponto que torna esses trabalhos de especial interesse é o fato de terem sido redigidos em 28 de janeiro de 1941 e em 7 de março daquele mesmo ano. Como foram escritos justamente quando a Segunda Guerra Mundial se tornava mais intensa, foram “voluntariamente impedidos de publicação até o fim da guerra”,² o que explica a publicação quase cinco anos após os desenvolvimentos científicos.

Abaixo, apresentamos as traduções desses nove trabalhos. Pode-se notar alguns pontos importantes para a história das descobertas da fissão nuclear e dos elementos transurânicos. O primeiro que gostaríamos de destacar envolve a importância da associação entre química e física. A fissão é um fenômeno que, para ser investigado, demanda técnicas das duas ciências. A consolidação dos resultados vem justamente da associação de evidências físicas e químicas. O segundo ponto o qual convidamos o leitor a considerar envolve as dificuldades de interpretação de evidências, especialmente quando se trata de fenômenos nucleares. Os cientistas precisavam discernir entre uma variedade enorme de meias-vidas por métodos indiretos. Ademais, a linguagem usada para indicar isótopos e meias-vidas também variavam entre grupos e foram padronizadas com o tempo. Essa sofisticação do contexto de investigação e interpretação do fenômeno demonstra que concepções simplistas em relação à negligência à proposta de Noddack de quebra dos núcleos não se sustenta, mesmo que a explicação que lhe damos hoje seja relativamente simples de compreender.

Por fim, gostaríamos de esclarecer que, ao final de cada artigo, adicionamos um glossário, em que os termos usados pelos cientistas são transpostos para a nomenclatura atual. Para facilitar, os termos que são explorados no glossário estão marcados em negrito nos originais traduzidos. Isso é fundamental sobretudo para as denominações de isótopos. Em nota de rodapé, mantivemos aquelas dos originais, que podem ter comentários dos autores ou referências por eles inseridas. Itálicos provenientes dos originais são mantidos nas traduções. As figuras porventura adicionadas também são dos originais. Adicionamos termos em colchetes para facilitar a leitura quando a omissão de algum termo por parte dos autores não facilita a leitura do trabalho em língua portuguesa.

“Radioatividade induzida por bombardeamento de nêutrons” (Fermi, 1934a)

Foram executados experimentos para determinar se o bombardeamento de nêutrons pode produzir uma radioatividade induzida, originando produtos instáveis que se desintegram por emissão de partículas beta. Os resultados preliminares foram comunicados em correspondência a *La Ricerca Scientifica* (5, 282, 1934).

A fonte de nêutrons é um tubo de vidro lacrado contendo emanção de rádio e pó de berílio. A quantidade de emanção de rádio disponível variou, nos diferentes experimentos, entre 30 e 630 milicuries. Devemos muito ao prof. G.C. Trabacchi, Laboratorio Fisico della Sanità Pubblica, por nos disponibilizar tais fortes fontes.

2 Nota adicionada ao fim da publicação das duas cartas pela editoria da revista.

Os elementos ou, em alguns casos, compostos contendo-os, foram usados na forma de pequenos cilindros. Após a irradiação com a fonte por um período que variou de poucos minutos a várias horas, eles foram colocados perto de um contador Geiger com paredes de folha fina de alumínio (com espessura de aproximadamente 0,2 mm) e o número de impulsos por minuto foi registrado.

Até agora, obtivemos um efeito com os seguintes elementos:

Fósforo – efeito forte. Meia-vida de cerca de 3 horas. Os elétrons de desintegração puderam ser fotografados na câmara de Wilson. A separação química do produto ativo mostrou que o elemento instável formado em razão do bombardeamento é provavelmente o silício.

Ferro – período de cerca de 2 horas. Como resultado da separação química do produto ativo, esse deve ser o manganês.

Silício – efeito muito forte. Período de cerca de 3 minutos. Elétrons fotografados na câmara de Wilson.

Alumínio – efeito forte. Período de cerca de 12 minutos. Elétrons fotografados na câmara de Wilson.

Cloro – produz um período muito mais longo do que ocorre com qualquer outro elemento investigado atualmente.

Vanádio – período de aproximadamente 5 minutos.

Cobre – efeito bastante pequeno. Período de cerca de 6 minutos.

Arsênio – período de cerca de 2 dias.

Prata – efeito forte. Período de cerca de 2 minutos.

Telúrio – Período de aproximadamente uma hora.

Iodo – Efeito intenso. Período de cerca de 30 minutos.

Cromo – Efeito intenso. Período de cerca de 6 minutos. Elétrons fotografados na câmara de Wilson.

Bário – efeito pequeno. Período de cerca de 2 minutos.

Flúor – período de cerca de 10 segundos.

Os seguintes elementos também deram indicações de um efeito: sódio, magnésio, titânio, zircônio, zinco, estrôncio, antimônio, selênio e bromo. Alguns elementos dão indicação de terem dois ou mais períodos, o que pode ser parcialmente atribuído por serem constituídos de vários isótopos e também a sucessivas transformações radioativas. Continuam-se os experimentos para verificar esses resultados e estender a pesquisa a outros elementos.

A reação nuclear que causa esses fenômenos pode ser diferente em casos diferentes. A separação química executada nos casos do ferro e do fósforo parece indicar que, ao menos nesses dois casos, o nêutron é absorvido e um próton é emitido. O produto instável, pela emissão de uma partícula beta, retorna ao elemento original.

As separações químicas foram realizadas pelo Dr. O. D'Agostino. Os doutores E. Amaldi e Emilio Segre colaboraram na pesquisa física.

“Possível produção de elementos de número atômico maior que 92” (Fermi, 1934b)

Até recentemente, admitia-se de maneira geral que um átomo resultante de uma desintegração artificial normalmente corresponderia a um isótopo estável. O Sr. e a Sra. Joliot foram os primeiros a encontrar evidências de que não é necessariamente assim; em alguns casos, o átomo produzido pode ser radioativo com uma meia-vida mensurável, tomando forma estável apenas após a emissão de um pósitron.

O número de elementos que podem ser ativados pelo bombardeamento de uma partícula alfa (Joliot), de um próton (Cockcroft, Gilbert, Walton), ou de um deutério (Crane, Lauritsen, Henderson, Livingston, Lawrence) é necessariamente limitado pelo fato de que apenas elementos leves podem ser desintegrados, em razão da repulsão coulombiana.

Essa limitação não é efetiva no caso de bombardeamentos de nêutrons. A alta eficiência dessas partículas em produzir desintegrações compensa razoavelmente a fraqueza das fontes de nêutrons disponíveis, se comparada com fontes de partículas alfa ou prótons. De fato, mostrou-se³ que um grande número de elementos (47 dos 68 examinados até agora) de qualquer massa atômica podem ser ativados com o uso de fontes de nêutrons que consistem em um pequeno tubo de vidro cheio de pó de berílio e radônio de até 800 milicuries. Essa fonte rende cerca de um milhão de nêutrons por segundo.

Todos os elementos ativados por esse método com intensidade suficientemente forte para uma análise magnética do sinal da carga das partículas emitidas mostraram fornecer apenas elétrons negativos. Isso é compreensível teoricamente, já que a absorção dos nêutrons bombardeados produz um excedente no número de nêutrons presentes dentro do núcleo; portanto, alcança-se geralmente um estado estável por meio da transformação de um nêutron em um próton, o que está conectado à emissão de uma partícula beta.

Em vários casos, foi possível realizar uma separação química do elemento beta-ativo, executando a técnica usual de adicionar à substância radioativa pequenas quantidades de elementos vizinhos. Esses elementos são então separados por análise química e separadamente verificados para atividade beta com um contador Geiger-Müller. A atividade sempre seguia completamente um determinado elemento, com o qual o elemento ativo poderia assim ser identificado.

Em três casos (alumínio, cloro, cobalto), o elemento ativo formado pelo bombardeamento do elemento de número atômico Z tem número atômico $Z-2$. Em quatro casos (fósforo, enxofre, ferro, zinco), o número atômico do produto ativo é $Z-1$. Em dois casos (bromo, iodo), o elemento ativo é um isótopo do elemento bombardeado.

Essa evidência parece indicar que três principais processos são possíveis: (a) captura de um nêutron com a emissão instantânea de uma partícula alfa; (b) captura do nêutron com emissão de um próton; (c) captura do nêutron com emissão de uma radiação gama quântica, para [que o núcleo] se livre do excedente energético. Do ponto de vista teórico, a probabilidade dos processos (a) e (b) depende em grande parte da energia da partícula alfa ou H emitida; proporcionalmente ao aumento da massa atômica do elemento. A probabilidade do processo

3 Referências inseridas no original: E. Fermi. *Ricerca Scientifica*, 1, 5, 283; 6, 330; *Nature*, 133, 757, maio de 1934; E. Amaldi, O. D’Agostino, E. Fermi, F. Rasetti, E. Segré, *Ricerca Scientifica*, 8, 452, 1934.

(c) pode ser avaliada apenas muito aproximadamente no estado atual da teoria nuclear; no entanto, pareceria ser menor que o valor observado por um fator 100 ou 1.000.

Parecia valer a pena direcionar especial atenção aos elementos radioativos pesados tório e urânio, já que a instabilidade geral de núcleos nessa faixa de massa atômica pode dar origem a transformações sucessivas. Por essa razão, uma investigação desses elementos foi realizada pelo autor [Fermi] em colaboração com F. Rasetti e O. D'Agostino.

O experimento mostrou que ambos os elementos, previamente livres de impurezas ativas comuns, podem ser fortemente ativados por bombardeio de nêutrons. A atividade induzida inicial correspondeu, em nossa experiência, a cerca de 1.000 impulsos por minuto em um contador Geiger de folha de alumínio de 0,2 mm de espessura. As curvas de decaimento dessas atividades mostram que o fenômeno é bastante complexo. Um estudo estimado da atividade do tório mostrou, nesse elemento, pelo menos dois períodos.

Mais bem investigado é o caso do urânio; a existência de períodos de cerca de 10 segundos, 40 segundos, 13 minutos, além de mais ao menos dois períodos, de 40 minutos a um dia, está bem estabelecida. A grande incerteza nas curvas de decaimento, devida a flutuações estatísticas, torna muito difícil determinar se esses períodos representam processos sucessivos ou alternativos de desintegração.

Foram feitas tentativas de identificar quimicamente o elemento beta-ativo com o período de 13 minutos. O esquema geral dessa pesquisa consistiu em adicionar à substância irradiada (nitrato de urânio em solução concentrada, purificado de seus produtos de decaimento) quantidade suficiente de um elemento beta-ativo ordinário, para resultar em algumas centenas de impulsos por minuto no contador. Caso seja possível provar que a atividade induzida, reconhecível pelo seu período característico, possa ser quimicamente separada da atividade adicionada, é razoável presumir que as duas atividades não são devidas a isótopos.

A reação seguinte permite que se separe o produto de 13 minutos da maioria dos elementos mais pesados. A solução de urânio irradiada é diluída em ácido nítrico 50%; uma pequena quantidade de sal de manganês é adicionada e então o manganês é **precipitado** como dióxido (MnO_2) a partir da solução fervente, pela adição de clorato de sódio. O precipitado de dióxido de manganês carrega uma grande porcentagem da atividade.

Essa reação prova de imediato que a atividade de 13 minutos não é isotópica com o urânio. Para testar a possibilidade de que possa ser devida ao elemento 90 (tório) ou 91 (**paládio**), nós repetimos a reação dez vezes ao menos, adicionando uma quantidade de urânio **X1+X2**, correspondendo a cerca de 2.000 impulsos por minuto; cério e lantânio também foram adicionados para sustentar o **urânio X**. Nessas condições, a reação do manganês carregou apenas [o isótopo que corresponde a] a atividade de 13 minutos; nenhum traço dos 2.000 impulsos do **urânio X1** (período de 24 dias) foi encontrado na precipitação; e nada do **urânio X2**, mesmo que a operação tenha sido feita em menos de dois minutos desde a precipitação do dióxido de manganês, de forma que várias centenas de impulsos do urânio X1 (período de 75 segundos) seriam facilmente detectáveis.

Foram obtidas evidências similares para a exclusão dos números atômicos 88 (rádio) e 89 (actínio). Para isso, foram usados **mesotório-1** e **[mesotório]-2**, com a adição de bário e lantânio; a evidência foi completamente negativa, como no caso anterior. A eventual precipitação de urânio X1 e mesotório-1, que não emitem radiação beta suficientemente penetrante

para ser detectada por nossos contadores, teria sido revelada pela subsequente formação de, respectivamente, urânio X2 e mesotório-2.

Por fim, adicionamos à solução de urânio irradiada um pouco de chumbo e bismuto inativos, e provamos que as condições para a reação de dióxido de manganês poderiam ser reguladas de forma a obter a precipitação do dióxido de manganês com a atividade de 13 minutos, sem juntamente precipitar chumbo e bismuto.

Dessa forma, parece que excluímos a possibilidade de a atividade de 13 minutos ser devida a isótopos do urânio (92), paládio [protactínio] (91), tório (90), actínio (89), rádio (88), bismuto (83) [e] chumbo (82). Seu comportamento também exclui o **ekacaesium** (87) e **emanação** (86).

Essa evidência negativa acerca da identidade da atividade de 13 minutos relativa a um grande número de elementos pesados sugere a possibilidade de que o número atômico do elemento seja maior que 92. Se fosse um elemento 93, seria quimicamente homólogo ao manganês e ao rênio. Até certo ponto, essa hipótese também é sustentada pelo fato observado de que [o isótopo que corresponde a] a atividade de 13 minutos também é carregada pelo precipitado de sulfeto de rênio insolúvel em ácido clorídrico. Entretanto, como vários elementos são facilmente precipitados dessa forma, essa evidência não pode ser considerada muito forte.

A possibilidade de um número atômico 94 ou 95 não é fácil de distinguir da primeira [$Z=93$], em razão de suas propriedades químicas serem provavelmente bastante similares. Informações valiosas acerca dos processos envolvidos poderiam ser coletadas por uma investigação da possível emissão de partículas pesadas. Ainda não se realizou uma busca cuidadosa por tais partículas pesadas, em razão de demandarem, para sua observação, que o produto ativo esteja na forma de uma camada muito fina. Portanto, neste momento, parece prematuro formar qualquer hipótese definitiva sobre a cadeia das desintegrações envolvidas.

Quadro 1: Glossário do trabalho “Possível produção de elementos de número atômico maior que 92” (Fermi, 1934b)

No original	Explicação ou terminologia atual
Precipitado	O método de precipitação fracionada era empregado sob a premissa de que elementos do mesmo grupo da tabela periódica teriam o mesmo comportamento químico. Assim, usou-se manganês e rênio sob a hipótese de que precipitariam juntamente com o suposto elemento 93, que estaria no mesmo grupo.
91 (paládio)	Aqui, um pequeno equívoco de Fermi. O elemento 91 é chamado protactínio e sua descoberta ocorreu em 1913, naquela feita batizado de brevium. Seu nome atual, cunhado em 1918, deve-se ao fato de que ele é um elemento pai do actínio, na série de decaimento do U^{238} e foi determinado por Hahn, Meitner, Soddy e Cranston.
Urânio X1+X2	Isótopos do tório e do protactínio.
Urânio X	Isótopo do tório (234).
Urânio X1	Isótopo do tório (234).
Urânio X2	Isótopo do protactínio (234).
Mesotório-1	Isótopo do rádio (228).
Mesotório-2	Isótopo do actínio (228).
Ekacesium	Nome dado ao teoricamente presumido elemento 87, de acordo com suas características periódicas esperadas. Foi descoberto em 1939 e batizado de frâncio, nome atual. O prefixo eka significa “um” em sânscrito.
Emanação	O elemento 86, radônio, foi detectado primeiramente logo no início das investigações com radioatividade (1899) e era chamado comumente de emanação, por ser um gás radioativo.

Fonte: elaborado pelos autores.

“Sobre o elemento 93” (Noddack, 1934)

Cerca de quatro meses atrás, um artigo foi publicado nesta revista, acerca de elementos faltantes na tabela periódica.⁴ Ao fim daquele artigo, discutiu-se a possibilidade da descoberta de elementos transurânicos (ou seja, elementos acima do urânio na tabela periódica).

Poucas semanas depois, foi reportado, primeiramente nos jornais e depois também em periódicos técnicos, que dois cientistas, professor Fermi em Roma e Sr. Kobic em Joachimsthal, independentemente, haviam descoberto o elemento com número atômico 93.

Gostaríamos de primeiramente considerar o trabalho de Fermi.⁵ Fermi investigou a possibilidade de radioatividade induzida por nêutrons. A chamada radioatividade induzida fora descoberta por Curie e Joliot no bombardeamento de núcleos atômicos por partículas alfa.

Ele colocou pó de berílio e **emanação de rádio** em um contêiner de vidro. O radônio emite partículas alfa e quando estas colidem com núcleos de berílio, nêutrons são emitidos. Os nêutrons penetram nas paredes do contêiner de vidro e podem agir em materiais localizados nas cercanias. Fermi aproximou uma grande quantidade de materiais, tanto na forma de elementos, como em compostos, à fonte de irradiação de nêutrons. Os materiais irradiados foram então colocados em um contador Geiger. Notou-se que muitos elementos emitiam partículas beta por algum tempo depois de irradiados, o que corroborava a radioatividade induzida.⁶ Não discutiremos aqui a explicação proposta por Fermi das bastante complicadas observações,⁷ já que estamos interessados apenas no exemplo particular acerca da suposta produção do elemento 93. Para estudar a radioatividade induzida do urânio, Fermi pegou uma solução de nitrato de urânio, da qual todos os produtos radioativos foram retirados, e a aproximou da sua fonte de urânio. Com um contador Geiger, ele conseguiu mostrar que a solução tornou-se radioativa e emitia partículas beta após a irradiação. A análise da curva de decaimento mostrou que não apenas uma, mas, pelo menos, cinco meias-vidas diferentes foram produzidas. Fermi enfatizou que ainda era incerto se os diferentes decaimentos ocorriam em série ou em paralelo.

Fermi conseguiu fazer a separação química de um dos novos radioelementos, que tinha meia-vida de 13 minutos. Conseguiu isso adicionando sal de manganês e ácido nítrico concentrado à solução de nitrato de urânio, esquentando ao ponto de ebulição e adicionando clorato de sódio. Notou-se que o precipitado de dióxido de manganês continha quase toda a atividade beta da meia-vida de 13 minutos. Após, Fermi tentou mostrar que o radioelemento que é responsável por essa atividade beta não era um isótopo de nenhum elemento conhecido próximo ao urânio. Para mostrar isso, ele adicionou à solução de nitrato de urânio os seguintes isótopos emissores de partícula beta conhecidos: protactínio (91), tório (90), actínio (89), rádio (88), bismuto (83) e chumbo (82). Quando o clorato de sódio é adicionado para precipitar o dióxido de manganês, nenhum desses isótopos emissores de partículas beta são identificados na precipitação, de acordo com Fermi. Como o novo radioelemento desconhecido de fato precipita com o manganês e como ele, em função de suas propriedades, tampouco poderia ser

4 Referência inserida no original: I. Noddack, nesta revista [*Angewandte Chemie*], 47, 301 [1934].

5 Referência inserida no original: E. Fermi, *Nature*, 133, 898 [1934].

6 Nota inserida no original: “Naturalmente o número total de átomos na amostra não se torna radioativo, mas apenas uma quantidade imponderável, neste caso, algumas centenas de átomos”.

7 Referência inserida no original: E. Fermi, *Nature*, 133, 757 [1934].

um isótopo de radônio (86) ou **ekacesium** (87), Fermi conclui que ele deve ser o desconhecido elemento 93 (ou talvez 94 ou 95).

Esse método de prova não é válido. Fermi comparou seu novo emissor beta não apenas com o vizinho imediato do urânio, a saber, protactínio, mas também considerou vários outros elementos até o chumbo. Isso indica que ele pensou que uma série de decaimentos consecutivos era possível (com a emissão de elétrons, prótons e núcleos de hélio), o que eventualmente formaria o radioelemento com 13 minutos de meia-vida. Não fica claro por que ele não investigou o elemento polônio (84), que também fica entre o urânio (92) e o chumbo (82), ou por que ele escolheu parar no chumbo. A antiga ideia de que os elementos radioativos formam uma série contínua que termina no chumbo ou no tálio (81) é exatamente o que ele mencionou que foi refutado pelos experimentos de Curie e Joliot. Fermi deveria então ter comparado seu novo radioelemento com todos os elementos conhecidos.

Sabe-se da química analítica que vários elementos precipitarão com o dióxido de manganês se eles estiverem presentes como compostos, átomos ou colóides em uma solução de ácido nítrico.

Para testar como vários elementos se comportam com o método de precipitação de Fermi, nós fizemos 100 cm³ de uma solução de ácido nítrico a 55% contendo alguns miligramas de quase todos os elementos estáveis em forma dissolvida ou coloidal. 200 mg de nitrato de manganês foram adicionados a essa solução, que foi aquecida ao ponto de ebulição e então 2 g de clorato de potássio (seco) foram lentamente adicionados. O precipitado de dióxido de manganês resultante foi então química e espectroscopicamente testado para a presença de outros elementos. O precipitado continha os seguintes elementos: Ti, Nb, Ta, W, Ir, Pt, An e Si com quase a quantidade total de cada elemento que estava na solução; Sb, Ph, Bi, Ni, e Co em quantidades parciais.

Como apontado anteriormente, Fermi também não investigou se o polônio (84) estava no precipitado de manganês. Um experimento foi feito com polônio e mostrou que esse elemento precipita quase completamente com o MnO₂.⁸ Portanto, a prova de que o novo elemento (13 minutos) tem número atômico 93 não é bem-sucedida em nenhum sentido, já que o método para eliminar outras possibilidades não foi executado.

Pode-se assumir igualmente bem que quando os nêutrons são usados para produzir desintegrações nucleares, ocorrem algumas reações nucleares distintamente novas, que não foram observadas previamente com bombardeamento nuclear de prótons ou partículas alfa. No passado, achava-se que as transmutações dos núcleos só ocorrem com a emissão de elétrons, prótons ou átomos de hélio, de forma que os elementos pesados têm apenas pequenas alterações de massa, produzindo elementos vizinhos. Quando núcleos pesados são bombardeados por nêutrons, é concebível que o núcleo se quebre em vários grandes fragmentos, que seriam, é claro, isótopos de elementos conhecidos, mas que não seriam vizinhos do elemento irradiado.

A constatação de que o novo radioelemento precipita com sulfeto de rênio quando a precipitação ocorre em uma solução ácida não é suficiente para apontar para o elemento 93. Primeiramente, o sulfeto de rênio absorve prontamente outros materiais. Em segundo lugar, a predição das prováveis propriedades do elemento 93 não asseguram que esse elemento forme um sulfeto estável em ácido.

8 Nota inserida no original: "Pela cessão da preparação do polônio e pela medição da atividade nesse experimento, sou grata ao dr. J. Fränz."

Ademais, se a interpretação de Fermi acerca de seus experimentos estiver correta, então uma conclusão obrigatória adicional, que não foi dada por ele, é que o decaimento beta do elemento 93 produziria o elemento 94. Deveria ser relativamente fácil separá-lo quimicamente do elemento 93.

Deve-se esperar mais experimentos antes de se declarar que o elemento 93 realmente foi encontrado. O próprio Fermi é cauteloso nesse sentido, como mencionado, mas em um artigo⁹ sobre seus experimentos e também nas reportagens encontradas em jornais, faz-se parecer que os resultados já são seguros.

A *segunda declaração* sobre a descoberta do elemento 93 foi feita por Odolen Kobic.¹⁰ Ele reportou ter obtido uma quantidade substancial do elemento 93 em Joachimsthal a partir da água usada para lavar minério de **pechblenda** (acredita-se que a pechblenda tenha talvez 1% desse elemento). Ele descreveu propriedades químicas do elemento e seus compostos, determinou sua massa atômica, assumiu que ele é um pai radioativo do protactínio (91) e deu a ele o nome de “bohémium”, em homenagem à sua terra nativa. Essa declaração também foi aceita acriticamente e amplamente distribuída em jornais do mundo todo.

Com a ajuda do Dr. M. Speter, Mr. Kobic enviou-me duas amostras de seu material, com a solicitação de investigá-lo acerca da presença do elemento 93.

Tanto a análise química quanto o espectro de raios-X mostraram que o material não contém qualquer [elemento] 93; em vez disso, ele mostrava conter prata, vanadato de tálio e sais de tungstênio, com um excesso de ácido túngstico. Após ter sido avisado disso, Kobic convenceu-se da presença de tungstênio e retirou suas declarações da descoberta do elemento 93.¹¹

É desnecessário, portanto, discutir as reações que Kobic atribuiu ao novo elemento, já que todas podem ser explicadas como reações de uma mistura de vanádio e tungstênio.¹²

Há pouco tempo (11 de agosto de 1934), recebemos notícias dos Estados Unidos, de que Smith e Steinbach, em Nova Jersey, conseguiram encontrar um elemento de número atômico mais alto que o urânio. Entretanto, havia apenas algumas reportagens de jornais não muito claras disponíveis, então não é possível dizer o que foi feito até agora.

Quadro 2: Glossário do trabalho “Sobre o elemento 93” (Noddack, 1934)

No original	Explicação ou terminologia atual
Emanação de rádio	Gás de radônio, Z=86.
Ekacesium	Aqui, para o elemento 87, também Noddack utiliza a nomenclatura anterior ao descobrimento experimental do elemento, hoje chamado de frâncio. A tradução de Graetzer (Graetzer; Anderson, 1971) para o inglês utiliza a nomenclatura atual.
Pechblenda	Uraninita impura.

Fonte: elaborado pelos autores.

9 Referência inserida no original: *Nature*, 133, 863 [1934].

10 Referência inserida no original: O. Kobic, *Chemiker-Ztg.*, 58, 581 [1934].

11 Referência inserida no original: O. Kobic, [*ibid.*], 58, 683 [1934]. Áustria, *Chemiker-Ztg.*, 37, 140 [1934].

12 Nota inserida no original: “Em sua retratação, Sr. Kobic menciona apenas o tungstênio, mas omite o vanádio, embora tenha sido informado em uma carta sobre o conteúdo aproximado de suas preparações e as supostas reações produtoras do ‘bohémium’ serem explicadas por uma mistura de vanádio e tungstênio”.

“Acerca da existência de metais alcalinos terrosos resultantes da irradiação de urânio com nêutrons” (Hahn; Strassmann, 1939)

Em um artigo preliminar recente nesta revista,¹³ foi relatado que quando o urânio é irradiado por nêutrons, vários novos radioisótopos são produzidos, além dos elementos transurânicos – de 93 a 96 – descritos anteriormente por Meitner, Hahn e Strassmann. Esses novos produtos radioativos são aparentemente devidos ao decaimento do U^{239} pela emissão sucessiva de duas partículas alfa. Por esse processo, o elemento com carga nuclear de 92 deve decair para uma carga nuclear de 88; isto é, ao rádio. No artigo mencionado anteriormente foi proposto um esquema de decaimento provisório. Os três isótopos de rádio com suas meias-vidas aproximadas decaem para o actínio, que por sua vez decai para isótopos de tório.

Apontou-se uma observação bastante inesperada, a saber, que esses isótopos de rádio, que são produzidos por emissão alfa e que por sua vez decaem para tório, são obtidos não apenas com nêutrons rápidos, mas também com nêutrons lentos.

A evidência – de que esses três novos **isômeros-pai** são, na verdade, rádio – foi porque eles podem ser separados junto com sais de bário e que eles têm todas as reações químicas que são características do elemento bário. Todos os outros elementos conhecidos, desde os transurânicos até o urânio, protactínio, tório e actínio, têm propriedades químicas diferentes do bário e são facilmente separados dele. O mesmo vale para os elementos abaixo do rádio, isto é, bismuto, chumbo, polônio e **ekacésio**.

Portanto, o rádio é a única possibilidade, se eliminarmos o próprio bário.

A seguir, são descritos a separação da mistura de isótopos e o isolamento de cada espécie. A partir das mudanças na atividade dos vários isótopos, suas meias-vidas podem ser encontradas e também os produtos de decaimento podem ser determinados. As meias-vidas dos produtos-filhos da decomposição não podem ser totalmente descritas neste artigo devido à complexidade do processo. Existem pelo menos três, e provavelmente quatro, cadeias de decaimento isomérico, cada uma com três espécies. As meias-vidas de todos os produtos-filhos não puderam ser completamente investigadas até o momento.

É claro que o bário sempre foi usado como transportador do “isótopo do rádio”. Como primeiro passo, pode-se precipitar o bário como sulfato de bário, que é o sal de bário menos solúvel depois do cromato. No entanto, devido à experiência anterior e a alguns trabalhos preliminares, esse método de separação do “isótopo de rádio” por meio de sulfato de bário não foi utilizado. A razão é que esse precipitado também carrega consigo uma pequena quantidade de urânio e também uma quantidade não desprezível de isótopos de actínio e tório. Estes são os supostos produtos de decaimento do “isótopo de rádio” e, portanto, impediriam a preparação pura dos produtos de decaimento primários. Em vez do precipitado de sulfato, o cloreto de bário foi escolhido como agente precipitante, que é apenas ligeiramente solúvel em ácido clorídrico forte. Esse método funcionou muito bem.

Quando o urânio é bombardeado com nêutrons lentos, não é fácil entender, a partir de considerações de energia, como os isótopos de rádio podem ser produzidos. Portanto, foi necessária uma determinação muito cuidadosa das propriedades químicas dos novos radioelementos

13 Referência inserida no original: O. Hahn; F. Strassmann, *Naturwiss.*, 26, 756 (1938).

produzidos artificialmente. Vários grupos analíticos de elementos foram separados de uma solução contendo o urânio irradiado. Além do grande grupo de elementos transurânicos, alguma radioatividade sempre foi encontrada no grupo alcalino-terroso (bário como substância transportadora), grupo das terras raras (lantânio como substância transportadora) e também com elementos do grupo IV da tabela periódica (zircônio como substância transportadora). O precipitado de bário foi o primeiro a ser investigado mais profundamente, pois aparentemente contém os isótopos pais da série isomérica observada. O objetivo era mostrar que os elementos transurânicos, e também urânio, protactínio, tório e actínio sempre podiam ser separados fácil e completamente da atividade que precipita com o bário.

1. Por essa razão, o urânio irradiado foi tratado com sulfeto de hidrogênio, e o grupo transurânico foi separado com sulfeto de platina e dissolvido em água régia. O cloreto de bário foi precipitado dessa solução com ácido clorídrico. Do filtrado restante, a platina foi novamente precipitada com sulfeto de hidrogênio. O cloreto de bário era inativo, mas o sulfeto de platina ainda tinha uma atividade de cerca de 500 partículas/minuto. Experimentos semelhantes com os elementos transurânicos de vida mais longa deram o mesmo resultado.
2. Um precipitado com cloreto de bário foi feito usando 10 g de nitrato de urânio não irradiado. O U estava em equilíbrio radioativo com UX1 + UX2 (isótopos tório e protactínio) e tinha uma atividade de cerca de 400.000 partículas/minuto. O precipitado apresentou uma atividade de 14 partículas/min; ou seja, praticamente nenhuma atividade. Isso significa que nem urânio, nem protactínio, nem tório saem da solução quando o cloreto de bário cristaliza.
3. Finalmente, usando uma solução de actínio (**MsTh2**) com uma atividade de cerca de 2.500 partículas/min, um precipitado de cloreto de bário foi separado. Isso deu apenas cerca de 3 partículas/min, o que também é praticamente inativo.

De maneira semelhante, os precipitados de cloreto de bário obtidos da solução de urânio irradiada foram cuidadosamente investigados. No entanto, os precipitados de sulfeto feitos a partir da solução de bário radioativo eram praticamente inativos. Além disso, os precipitados de lantânio e zircônio tiveram apenas pequenas atividades, cuja origem pode ser facilmente atribuída à atividade dos precipitados de bário.

Um simples precipitado com BaCl₂ de uma solução forte de ácido clorídrico naturalmente não permite distinguir entre bário e rádio. De acordo com as reações resumidamente indicadas acima, a radioatividade que precipita com os sais de bário só pode vir do rádio, se por enquanto eliminarmos o próprio bário por ser muito improvável.

Discutimos agora brevemente os gráficos das atividades obtidas com o cloreto de bário. Eles nos permitem determinar o número de "isótopos de rádio" presentes e também suas meias-vidas.

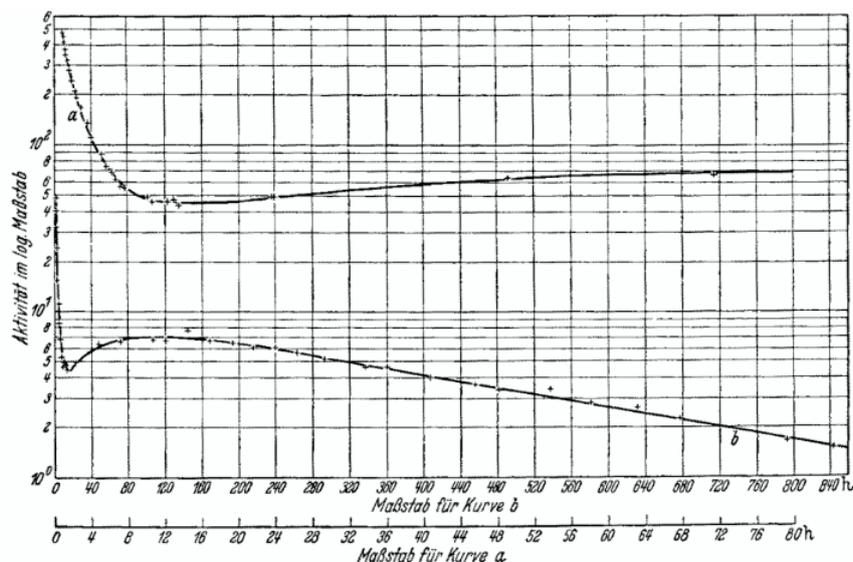


Figura 1: Os três "isótopos de Ra" após irradiação longa. A curva "a" é devida a uma irradiação de quatro dias, medida por cerca de 70 h. A curva "b" é reduzida por um fator de 10 em relação à curva superior, mostrando os dados para cerca de 800 h.¹⁴

A Figura 1 mostra a atividade do cloreto de bário radioativo após quatro dias de irradiação de urânio. A curva "a" fornece as medições para as primeiras 70 h; a curva "b" fornece as medições na mesma amostra continuadas por 800 h. A curva inferior é plotada em 1/10 da escala da curva superior. Inicialmente, há uma rápida diminuição da atividade, que se torna um aumento gradual após cerca de 12 horas. Após cerca de 120 h, inicia-se novamente uma diminuição exponencial muito gradual da atividade, com uma meia-vida de cerca de 13 dias.

A forma das curvas mostra claramente que deve haver várias espécies radioativas presentes. No entanto, não se pode dizer com certeza o que são. Eles podem ser vários "isótopos de rádio" ou um "isótopo de rádio" com uma série de produtos filhos radioativos.

Os três "isótopos de rádio" que foram relatados anteriormente no artigo preliminar foram confirmados aqui. Eles são designados, por enquanto, como **Ra II**, **Ra III** e **Ra IV** (por causa de um presumido **Ra I** relatado abaixo).

Sua identificação e a determinação de suas meias-vidas são explicadas brevemente com a ajuda das figuras.

A Figura 2 mostra o decaimento radioativo do "rádio" após uma irradiação de urânio de 6 minutos.

14 Nota dos tradutores: eixo das abscissas superior: escala para a curva "b", em horas; eixo das abscissas inferior: escala para a curva "a", em horas; eixo das ordenadas: atividade em escala logarítmica.

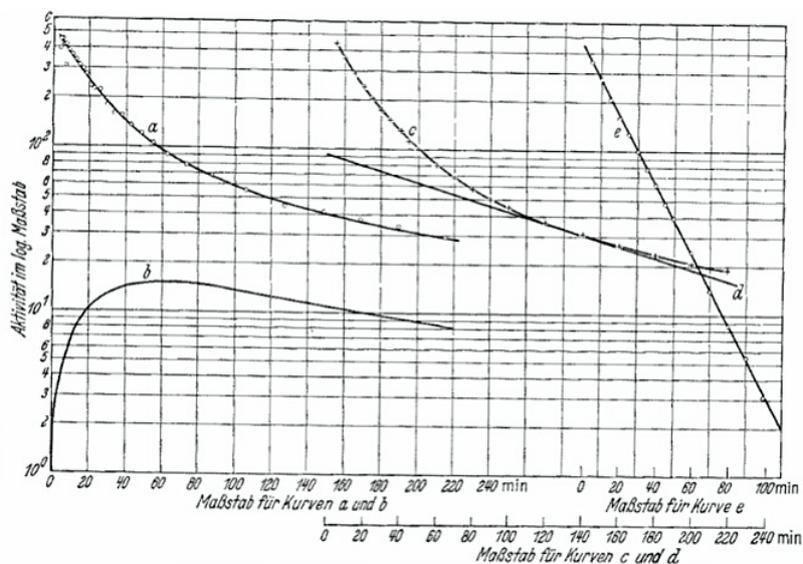


Figura 2: Determinação da meia-vida do Ra II (após irradiação curta). A curva a mostra a taxa de decaimento de todas as atividades de Ra após uma irradiação de 6 min. A curva b é a curva de crescimento teórico do Ac II de 2,5 h. A curva c é a diferença. A curva d é devida ao Ra III com meia-vida de 86 min. A curva e, rendendo uma meia-vida de 14 min para Ra II.¹⁵

A curva "a" é a atividade total, medida por 215 min. Essa curva é um composto da atividade de dois "isótopos de rádio", Ra II e Ra III (compare a Figura 3), e também uma pequena quantidade de actínio, que é formado pelo decaimento de Ra II. Esta última substância, designada por **Ac II**, tem uma meia-vida de cerca de 2,5 h. Isso foi mostrado em outro experimento, que não é descrito aqui. A curva de crescimento teórico para tal isótopo de actínio resultante de Ra II é mostrada na figura como curva "b". Aqui, considera-se de 14 minutos a meia-vida de Ra II, em antecipação aos resultados posteriores. Quando a curva "b" é subtraída da curva "a", então a curva "c", na Figura 2, é obtida. Esta atividade restante deve agora vir dos isótopos de rádio, principalmente devido ao Ra II de vida curta, e com uma ligeira contribuição do Ra III com sua meia-vida mais longa. Este último tem uma meia-vida de cerca de 86 min, como pode ser visto na Figura 3. A curva "d" na Figura 2 mostra a atividade devida ao Ra III. Quando d é subtraída de "c", obtém-se finalmente a curva "e", que é a atividade devida ao Ra II puro. Tem uma diminuição exponencial com uma meia-vida de 14 min. Este valor deve estar correto dentro de ± 2 min.

15 Nota dos tradutores: no eixo das abscissas superior à esquerda: "para curvas a e b (minutos)"; eixo das abscissas superior à direita: "para a curva e (min)"; eixo das abscissas inferior: "para curvas c e d (minutos)"; eixo das ordenadas: "atividade (escala logarítmica)".

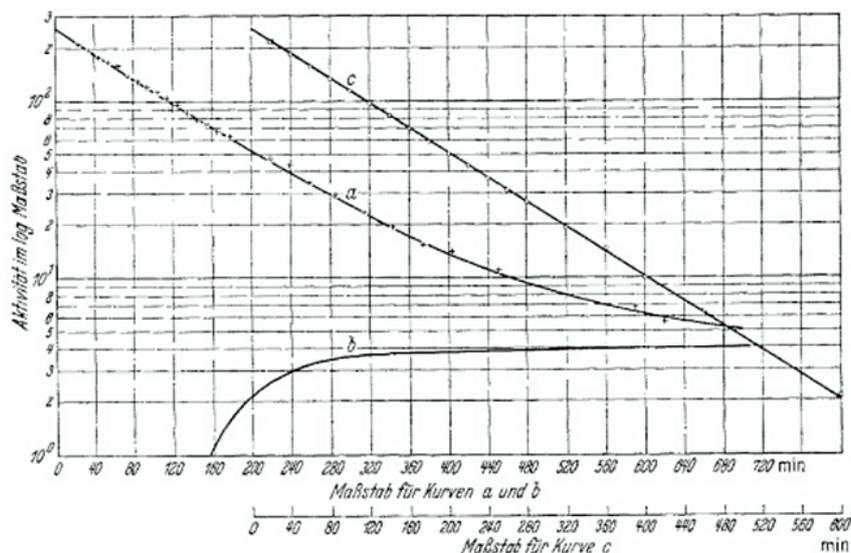


Figura 3: Determinação da meia-vida do Ra III após 2,5 h de irradiação. A curva "a" mostra a atividade do Ra III. Três horas após a irradiação, removeu-se o actínio. A curva "b" é a curva de crescimento do actínio de vida longa resultante do decaimento do Ra III. A curva , rendendo uma meia-vida de aproximadamente 86 min apenas para o Ra III.¹⁶

Agora chegamos à identificação e determinação da meia-vida do Ra III. Uma amostra de urânio é irradiada por uma ou várias horas. A princípio, encontra-se uma rápida diminuição na atividade, depois uma atividade ainda bastante intensa que diminui para a metade em cerca de 100-110 min e, em seguida, uma nova diminuição. A fim de mostrar que essa atividade também era principalmente devida a um isótopo de rádio, o seguinte procedimento foi usado. O "rádio" foi separado da amostra de urânio irradiada com cloreto de bário; após 2,5 h, o cloreto de bário foi novamente dissolvido e reprecipitado. O Ra II de vida curta decaiu completamente durante esse tempo, e o Ac II (meia-vida de 2,5 h), que foi formado a partir do Ra II no cloreto de bário, é removido no processo de recristalização. O cloreto de bário ainda tem atividade considerável, então um "isótopo de rádio" ainda deve estar presente. O procedimento aqui é semelhante ao usado por Meitner, Strassmann e Hahn¹⁷ para a investigação dos produtos artificiais radioativos derivados do tório. A atividade resultante que permanece é mostrada na Figura 3, curva "a".

Durante a primeira hora, a taxa de diminuição é quase exatamente exponencial, com uma meia-vida de cerca de 86 minutos. Uma pequena atividade residual permanece, sem dúvida devido a um "isótopo de actínio" de longa duração formado pelo decaimento de Ra III. O decaimento da atividade do actínio pode ser aproximadamente determinado pelo afastamento da curva a de uma exponencial pura. Isso é mostrado na Figura 3 como curva b. (Também foi demonstrado quimicamente que o decaimento de Ra III leva a um "isótopo de actínio" com uma vida relativamente longa.) Subtraindo-se "b" de "a", obtém-se a curva "c" apenas para Ra III. A curva mostra uma diminuição exponencial muito boa com uma meia-vida de 86 min. Esse valor deve estar correto dentro de ± 6 min.

16 Nota dos tradutores: eixo das abscissas superior: "escala para as curvas "a" e "b" (minutos)"; curva das abscissas inferior: "escala para a curva "c" (minutos)"; eixo das ordenadas: "atividade (escala logarítmica)".

17 Referência inserida no original: L. Meitner; F. Strassmann; O. Hahn, *Z. Physik*, 109, 538 (1938).

Agora chegamos ao terceiro "isótopo de rádio", que é designado aqui como Ra IV. Na Figura 1, curva "b", foi indicada uma substância com meia-vida de cerca de 12 a 13 dias. De maneira bastante semelhante à usada para Ra III, foi demonstrado que essa atividade decrescente mais lenta deve ser praticamente toda devida a um "isótopo de rádio". Foi feita uma longa irradiação de urânio, então a fonte de nêutrons foi removida e, esperando cerca de um dia, os isótopos Ra II e Ra III foram deixados para decair completamente. Se fizermos um precipitado de bário agora e cuidadosamente recristalizarmos novamente, então qualquer atividade encontrada com o cloreto de bário só pode ser devida a outro "isótopo de rádio". Tal atividade sempre foi encontrada, mesmo após vários dias de espera. A taxa de decaimento segue um padrão característico. Aumenta gradualmente por vários dias, atinge um máximo e depois diminui com uma meia-vida de cerca de 300 h (12,5 dias).

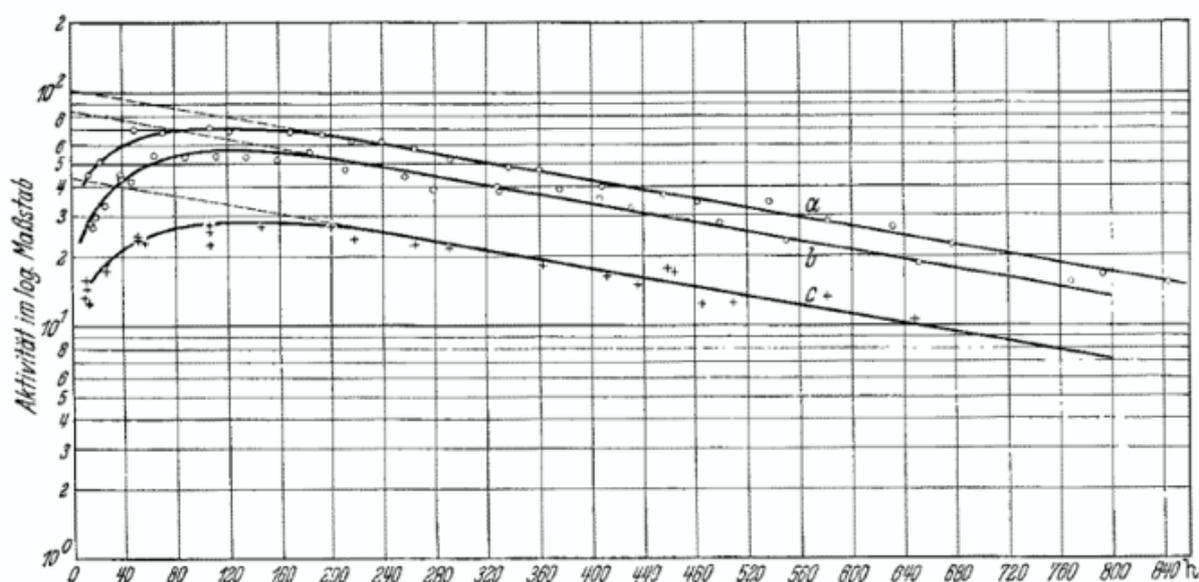


Figura 4: Determinação da meia-vida do Ra IV com diferentes tempos e intensidades de irradiação. Curva "a", 4 dias de alta intensidade de irradiação. Curva "b", 2,6 dias de alta intensidade de irradiação, com separação química do Ra 15 h após a irradiação ter sido completada. Curva "c", 2,6 dias de baixa intensidade de irradiação. Para as curvas "a", "b" e "c" as meias-vidas são, respectivamente, cerca de 311, 310 e 300 h.¹⁸

Na Figura 4 são mostradas várias dessas curvas. A amostra da curva "c" foi preparada a partir de uma solução de urânio que foi irradiada com baixa intensidade, e as demais curvas são devidas a precipitados de bário de soluções de urânio irradiadas mais intensamente. (As curvas não podem ser usadas para determinar diretamente o fator de intensidade relativa, pois o arranjo geométrico não era idêntico. Sob condições idênticas, como quantidades iguais de urânio sendo irradiadas etc., descobrimos que o fator de intensidade relativa era de cerca de 7.) As formas das três curvas são muito semelhantes. O crescimento da atividade tem uma meia-vida inferior a 40 h e o decaimento, cerca de 300 h. No entanto, o "Ra IV" de vida longa, sem dúvida, tem uma meia-vida de pouco menos de 300 h, porque o **Ac IV**, que é o principal responsável pelo crescimento inicial da atividade, provavelmente decai para um "isótopo de tório" de vida longa. Portanto, a meia-vida de Ra IV não pode ser determinada com precisão,

18 Nota dos tradutores: eixo das abscissas: "horas"; eixo das ordenadas: "atividade (escala logarítmica)".

mas um valor de 250-300 h provavelmente está próximo do correto. A partir das curvas "a", "b" e "c", pode-se ver claramente que os raios beta de Ra IV são muito menos penetrantes do que os de seu produto filho, pois de outra forma não ocorreria um aumento tão acentuado.

Para resumir nossos resultados, identificamos três metais alcalino-terrosos que são designados como Ra II, Ra III e Ra IV. Suas meias-vidas são 14 ± 2 min, 86 ± 6 min e 250-300 h. Deve-se notar que a atividade de 14 min não foi designada como Ra I nem os outros isômeros como Ra II e Ra III. A razão é que acreditamos que existe um isótopo de "Ra" ainda mais instável, embora não tenha sido possível observá-lo até agora. Em nosso primeiro artigo sobre esses novos produtos de decaimento radioativo, relatamos um isótopo de actínio com meia-vida de cerca de 40 min. Nossa suposição inicial era que esse actínio menos estável resultou do decaimento do isótopo de rádio menos estável. Enquanto isso, determinamos que o rádio de 14 min (anteriormente dado como 25 min) decai para actínio com uma meia-vida de 2,5 h (anteriormente dado como 4 h). No entanto, o isótopo de actínio menos estável mencionado acima também está presente. Sua meia-vida é um pouco mais curta do que a relatada anteriormente, talvez um pouco menos de 30 minutos. Este "isótopo de actínio" não pode resultar do decaimento do "Ra" de 14 minutos, 86 minutos ou de vida longa. Além disso, este "isótopo de actínio" pode estar presente após apenas 5 minutos de irradiação de urânio. A explicação mais simples é assumir a formação de um "isótopo de rádio" cuja meia-vida deve ser menor que 1 min. Se tivesse uma meia-vida superior a 1 minuto, deveríamos ser capazes de detectá-lo. Procuramos com muito cuidado. Portanto, designamos esse pai até então desconhecido do "isótopo de actínio" menos estável como "Ra I". Com uma fonte de nêutrons mais intensa, sem dúvida deve ser detectável.

O esquema de decaimento que foi dado em nosso artigo anterior agora deve ser corrigido. O esquema a seguir leva em consideração as mudanças necessárias e também fornece as meias-vidas determinadas com mais precisão para o pai de cada série:

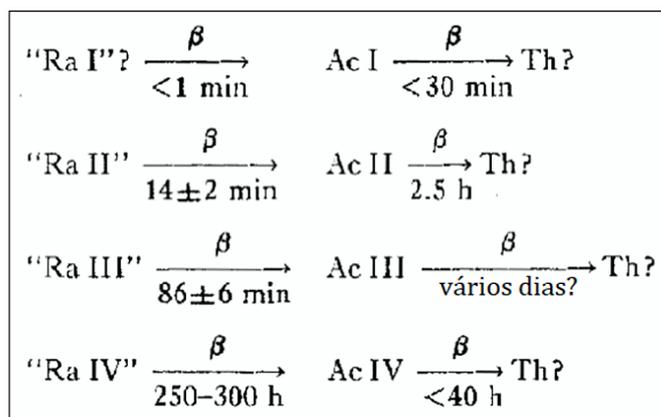


Figura 5: Propostas de esquemas de decaimento.

Até agora, o grande grupo de elementos transurânicos não tem nenhuma relação conhecida com essas séries isoméricas.

As quatro séries de decaimento listadas acima podem ser consideradas indubitavelmente corretas em sua relação genética. Já pudemos verificar alguns dos produtos finais "tório" da série isomérica. No entanto, como as meias-vidas ainda não foram determinadas com precisão, decidimos abster-nos completamente de relatá-las no momento.

Agora ainda temos que discutir alguns experimentos mais recentes, que publicamos com bastante hesitação, devido a seus resultados peculiares. Queríamos identificar, sem sombra de dúvida, as propriedades químicas dos membros pais da série radioativa que foram separados com o bário e que foram designados como "isótopos de rádio". Realizamos cristalizações fracionadas e precipitações fracionadas, um método bem conhecido para concentrar (ou diluir) rádio em soluções de sais de bário.

O brometo de bário aumenta muito a concentração de rádio em um processo de cristalização fracionada e o cromato de bário ainda mais, quando os cristais são formados lentamente. O cloreto de bário aumenta a concentração menos que o brometo, e o carbonato de bário a diminui ligeiramente. Quando fizemos testes apropriados com amostras de bário radioativo que estavam livres de quaisquer produtos de decaimento posteriores, *os resultados foram sempre negativos. A atividade foi distribuída uniformemente entre todas as frações de bário*, pelo menos na medida em que pudemos determiná-la dentro de um erro experimental apreciável. Em seguida, um par de experimentos de fracionamento foi feito, usando o isótopo de rádio ThX e também o isótopo de rádio **MsTh1**. Esses resultados foram exatamente os esperados de todas as experiências anteriores com o rádio. Em seguida, o "método indicador (isto é, marcador)" foi aplicado a uma mistura de "Ra IV" purificado de longa duração e MsTh1 puro; essa mistura com brometo de bário como veículo foi submetida a cristalização fracionada. *A concentração de MsTh1 foi aumentada, e a concentração de "Ra IV" não foi*, mas sua atividade permaneceu a mesma para frações com um teor de bário equivalente. Chegamos à conclusão de que nossos "isótopos de rádio" têm as propriedades do bário. Na verdade, como químicos, deveríamos afirmar que os novos produtos não são o rádio, mas sim o próprio bário; outros elementos que não sejam o bário ou o rádio estão fora de questão.

Finalmente, fizemos um experimento traçador com nosso puro "Ac II" separado (meia-vida de cerca de 2,5 h) e o isótopo de actínio puro MsTh2. Se nossos "isótopos Ra" não são rádio, então os "isótopos Ac" também não são actínio, mas deveriam ser lantânio. Pela técnica de Curie,¹⁹ realizamos o fracionamento do oxalato de lantânio, que continha ambas as substâncias ativas, em solução de ácido nítrico. Assim como a Sra. Curie relatou, o MsTh2 tornou-se muito concentrado nas frações finais. Sem "Ac II", não houve aumento observável na concentração no final. Concordamos, com as descobertas de Curie e Savitch²⁰ para sua atividade de 3,5 h (que, no entanto, não era apenas uma única espécie), que o produto resultante do decaimento beta de nosso metal alcalino-terroso radioativo não é o actínio. Queremos fazer um teste experimental mais cuidadoso da afirmação feita por Curie e Savitch de que eles aumentaram a concentração em lantânio (o que argumentaria contra uma identidade com lantânio), pois na mistura com a qual eles estavam trabalhando pode ter havido uma falsa indicação de enriquecimento.

Ainda não foi demonstrado se o produto final da "amostra Ac-La", que foi designada como "tório" em nossa série isomérica, seria o cério.

O "grupo transurânico" de elementos é quimicamente relacionado, mas não idêntico aos seus homólogos inferiores, rênio, ósmio, irídio e platina. Ainda não foram feitas experiências para ver se eles podem ser quimicamente idênticos aos homólogos ainda mais baixos, tecnécio, rutênio, ródio e paládio. Afinal, não se podia nem considerar isso como uma possibilidade antes. A soma dos números de massa de bário + tecnécio, 138 + 101, é 239!

19 Referência inserida no original: Mme. Pierre Curie, *J. Chim. physique* etc. 27, 1 (1930).

20 Referência inserida no original: I. Curie & P. Savitch, *C. r. Acad. Sci. Paris*, 206, 1643 (1938).

Como químicos, devemos revisar o esquema de decaimento dado acima e inserir os símbolos Ba, La, Ce, no lugar de Ra, Ac, Th. No entanto, como “químicos nucleares”, trabalhando muito próximo ao campo da física, não podemos ainda dar um passo tão drástico que vai contra todas as experiências anteriores em física nuclear. Talvez possa haver uma série de coincidências incomuns que nos deram falsas indicações.

Pretende-se realizar mais experimentos de traçadores com os novos produtos de decaimento radioativo. Em particular, um fracionamento combinado será tentado, usando o isótopo de rádio resultante da irradiação de nêutrons rápidos do tório (investigado por Meitner, Strassmann e Hahn²¹) junto com nossos metais alcalino-terrosos resultantes do urânio. Em locais onde fontes fortes de nêutrons estão disponíveis, esse projeto pode ser realizado com muito mais facilidade.

Em conclusão, gostaríamos de agradecer à Srta. Cl. Lieber e Miss I. Bohne por sua ajuda eficiente nas numerosas precipitações e medições.

Quadro 3: Glossário do trabalho “Acerca da existência de metais alcalinos terrosos resultantes da irradiação de urânio com nêutrons” (Hahn; Strassmann, 1939)

No original	Explicação ou terminologia atual
Isômeros-pai	Isomerismo nuclear era um fenômeno detectado mas pouco compreendido à época – o de mesmos isótopos criados da mesma forma apresentarem meias-vidas diferentes. O que era ainda mais estranho era que esse isomerismo nuclear aparentava propagar-se pela série de decaimentos desses isótopos. Havia duas interpretações na época: de que estruturas nucleares resistiam ao decaimento ou, a atualmente mais aceita, de que se devia a alterações no momento angular do núcleo ou de uma partícula nuclear (Frisch; Wheeler, 1967). É importante enfatizar que a isomeria nuclear não deve se confundir com a isomeria da química orgânica.
Ekacesium	Frâncio. No original em alemão, Hahn e Strassmann mencionam apenas “ <i>ekacesium</i> ”. Graetzer (1964) introduz a identidade com o frâncio na sua tradução.
MsTh2	Mesotório II, é atualmente identificado com o Ac-228.
Ra II	Ra II, de 14 min, hoje é compreendido como Ba ¹⁴¹ , de 18 min. (Graetzer, 1964).
Ra III	Ra III, de 86 min, hoje é compreendido como Ba ¹³⁹ , de 85 min. (Graetzer, 1964).
Ra IV	Ra IV, de 300 h, hoje é compreendido como Ba ¹⁴⁰ , de 307 min. (Graetzer, 1964).
Ra I	Não está claro a quais isótopos a atividade Ra I se refere (Graetzer, 1964).
Ac II	Ac II, de 2,5 h, hoje é compreendido como La 141, de 2,9 h (Graetzer, 1964).
Ac IV	Ac IV, de meia-vida maior que 40 h, hoje é compreendido como La ¹⁴⁰ , de 40,2 h (Graetzer, 1964).
Ac III (fig. 5)	Ac III, de meia-vida de vários dias, hoje é compreendido como La ¹³⁹ , estável. Não está claro de que isótopo se trata o Ac I (Graetzer, 1964).
MsTh1	Isótopo do rádio (228).

Fonte: elaborado pelos autores.

21 Referência inserida no original: L. Meitner, F. Strassmann & O. Hahn, 1.c.

“Desintegração do urânio por nêutrons: um novo tipo de reação nuclear” (Meitner; Frisch, 1939)

Ao bombardear urânio com nêutrons, Fermi e colaboradores²² observaram que, pelo menos, quatro substâncias radioativas foram produzidas, a duas das quais foram atribuídos números atômicos maiores que 92. Investigações posteriores²³ demonstraram a existência de, pelo menos, nove períodos radioativos, seis dos quais foram atribuídos a elementos de número atômico maior que o do urânio, e teve-se que assumir isomerismo nuclear para explicar seus comportamentos químicos em associação a suas relações genéticas.

Ao fazer atribuições químicas, sempre se assumiu que esses corpos radioativos tinham números atômicos próximos ao do elemento bombardeado, já que se compreendia que apenas partículas com uma ou duas cargas seriam emitidas de núcleos. Um corpo, por exemplo, com propriedades semelhantes às do ósmio, era considerado eka-ósmio ($Z = 94$), em vez de ósmio ($Z = 76$) ou rutênio ($Z = 44$).

Seguindo uma observação de Curie e Savitch,²⁴ Hahn e Strassmann²⁵ descobriram que um grupo de, pelo menos, três corpos radioativos, formados a partir de urânio sob bombardeamento de nêutrons, eram quimicamente semelhantes ao bário e, portanto, presumivelmente isótopos do rádio. Uma investigação adicional,²⁶ porém mostrou que era impossível separar esses corpos do bário (embora o mesotório, um isótopo do rádio, tenha sido prontamente separado no mesmo experimento), de modo que Hahn e Strassmann foram forçados a concluir que os *isótopos de bário ($Z = 56$) são formados como consequência do bombardeamento de urânio ($Z = 92$) com nêutrons*.

À primeira vista, esse resultado parece muito difícil de entender. A formação de elementos muito abaixo do urânio já foi considerada antes, mas sempre foi rejeitada por razões físicas, enquanto evidências químicas não fossem totalmente claras. A emissão, em curto espaço de tempo, de um grande número de partículas carregadas pode ser considerada excluída pela pequena penetrabilidade da “barreira de Coulomb”, indicada pela teoria de Gamov para o decaimento alfa.

Contudo, com base nas ideias atuais sobre o comportamento de núcleos pesados,²⁷ um quadro totalmente diferente e essencialmente clássico desses novos processos de desintegração se apresenta. Em razão de seu empacotamento muito próximo e de sua forte troca de energia, espera-se que as partículas em um núcleo pesado se movam de maneira coletiva, que tem alguma semelhança com o movimento de uma gota líquida. Se o movimento for suficientemente violento pela adição de energia, tal gota pode dividir-se em duas gotas menores.

22 Referência inserida no original: Fermi, E.; Amaldi, F.; D’Agostino, O.; Rasetti, F.; Segré, E. *Proc. Roy. Soc., A*, 146, 483 (1934).

23 Referência inserida no original: ver Meitner, L.; Hahn, O.; Strassmann, F., *Z. Phys.*, 106, 249 (1937).

24 Referência inserida no original: Curie, I.; Savitch, P., *C. R.*, 208, 906, 1643 (1938).

25 Referência inserida no original: Hahn, O.; Strassmann, F., *Naturwiss.*, 26, 756 (1938).

26 Referência inserida no original: Hahn, O.; Strassmann, F., *Naturwiss.*, 27, 11 (1939).

27 Referência inserida no original: Bohr, N., *Nature*, 137, 344, 351 (1936).

Na discussão das energias envolvidas na deformação dos núcleos, o conceito de tensão superficial tem sido usado²⁸ e seu valor foi estimado a partir de considerações simples sobre as forças nucleares. Deve-se lembrar, no entanto, que a tensão superficial de uma gota carregada é diminuída por sua carga, e uma estimativa aproximada mostra que a tensão superficial dos núcleos, que diminui com o aumento da carga nuclear, pode tornar-se zero para números atômicos da ordem de 100.

Desse modo, parece possível que o núcleo de urânio tenha apenas uma pequena estabilidade de forma e possa, após a captura do nêutron, dividir-se em dois núcleos de tamanho aproximadamente igual (a proporção precisa entre os tamanhos depende de características estruturais e talvez, em parte, do acaso). Esses dois núcleos se repelem e devem ganhar uma energia cinética total de cerca de 200 MeV, calculada a partir do raio nuclear e da carga. Pode-se esperar, de fato, que essa quantidade de energia esteja disponível a partir da diferença na fração de empacotamento entre o urânio e os elementos no meio do sistema periódico. Todo o processo de "fissão" pode assim ser descrito de uma maneira essencialmente clássica, sem a necessidade de considerar os "efeitos de tunelamento" da mecânica quântica, que realmente seriam extremamente pequenos, por conta das grandes massas envolvidas.

Após a divisão, a alta razão nêutron/próton do urânio tende a reajustar-se por decaimento beta para a de menor valor, adequado para elementos mais leves. Provavelmente cada parte dá origem a uma cadeia de desintegrações. Se uma das partes é um isótopo de bário,²⁹ o outro será o criptônio (Kr), que pode decair através de rubídio, estrôncio e ítrio para o zircônio. Talvez uma ou duas das supostas cadeias bário-lantânio-cério sejam, na verdade, cadeias de estrôncio-ítrio-zircônio.

É possível³⁰ e parece-nos bastante provável, que os períodos que foram atribuídos a elementos além do urânio também sejam devidos a elementos leves. A partir da evidência química, os dois períodos curtos (10 s e 40 s) até agora atribuídos ao ^{239}U podem ser isótopos de **masúrio** ($Z = 43$), decaindo através de rutênio, ródio, paládio e prata em cádmio.

Em todos esses casos, pode não ser necessário assumir a isomeria nuclear, mas os diferentes períodos radioativos pertencentes ao mesmo elemento químico podem então ser atribuídos a diferentes isótopos desse elemento, uma vez que proporções variáveis de nêutrons podem ser dadas às duas partes do núcleo de urânio.

Ao bombardear o tório com nêutrons, obtêm-se atividades atribuídas a isótopos de rádio e actínio.³¹ Alguns desses períodos são aproximadamente iguais aos períodos dos isótopos de bário e lanfânio resultantes do bombardeio de urânio. Gostaríamos, portanto, de sugerir que esses períodos são devidos a uma "fissão" do tório, que é como a do urânio e resulta parcialmente nos mesmos produtos. Logicamente, isso seria especialmente interessante se fosse possível obter um desses produtos a partir de um elemento leve, por exemplo, por captura de nêutrons.

28 Referência inserida no original: Bohr, N.; Kalckar, F., *Kgl. Danske Vid. Selskab, Math. Phys. Medd.* 14, nr. 10 (1937).

29 Referência inserida no original: ver Meitner, L.; Strassmann, F.; Hahn, O., *Z. Phys.*, 109, 538 (1938).

30 Referência inserida no original: ver Meitner, L.; Strassmann, F.; Hahn, O., *Z. Phys.*, 109, 538 (1938).

31 Referência inserida no original: ver Meitner, L.; Strassmann, F.; Hahn, O., *Z. Phys.*, 109, 538 (1938).

Pode-se mencionar que o corpo com meia-vida 24 min³² que foi quimicamente identificado como urânio é provavelmente de fato o ^{239}U e se transforma em **eka-rênio**, que parece inativo, mas pode decair lentamente, provavelmente com emissão de partículas alfa. (A partir da inspeção dos elementos radioativos naturais, não se pode esperar que o ^{239}U sofra mais que um ou dois decaimentos beta; a longa cadeia de decaimentos observados sempre nos intrigou.) A formação desse corpo é um processo de ressonância típico,³³ o estado composto deve ter um tempo de vida milhões de vezes mais longo do que o tempo que o núcleo levaria para se dividir. Talvez esse estado corresponda a algum tipo de movimento altamente simétrico de matéria nuclear que não favoreça a “fissão” do núcleo.

Quadro 4: Glossário do trabalho “Desintegração do urânio por nêutrons: um novo tipo de reação nuclear” (Meitner; Frisch, 1939)

No original	Explicação ou terminologia atual
Masúrio	Meitner e Frisch denominam o elemento 43 de masúrio, nome antigo relativo à sua “primeira descoberta” (ver introdução).
Eka-rênio	Um dos nomes dado ao transurânico $Z = 93$ quando foi “descoberto” em 1934.

Fonte: elaborado pelos autores.

“Evidência física da divisão dos núcleos pesados sob bombardeamento de nêutron” (Frisch, 1939)

A partir de evidências químicas, Hahn e Strassmann³⁴ concluem que os núcleos de bário radioativos (número atômico) são produzidos quando o urânio () é bombardeado por nêutrons. Foi apontado³⁵ que isso pode ser explicado como resultado de uma “fissão” do núcleo do urânio, semelhantemente à divisão de uma gota em duas. Estimou-se que a energia liberada em tais processos seria de cerca de 200 MeV, tanto por considerações de defeito de massa quanto pela repulsão dos dois núcleos resultantes do processo de “fissão”.

Se esse quadro está correto, espera-se que núcleos de alta velocidade, de números atômicos 40-50 e massa atômica 100-150, e de até 100 MeV de energia emergam de uma camada de urânio bombardeado com nêutrons. Apesar de suas altas energias, esses núcleos deveriam ter um alcance, no ar, de apenas alguns poucos milímetros, em razão de suas cargas efetivas (estimadas em cerca de 20), o que implica uma ionização muito densa. Cada partícula deveria produzir um total de aproximadamente três milhões de pares iônicos.

Por meio de uma câmara de ionização revestida de urânio, conectada a um amplificador linear, consegui demonstrar a ocorrência de tais rajadas de ionização. O amplificador foi conectado a um **tiratron** que foi ajustado de modo a contar apenas pulsos correspondentes

32 Referência inserida no original: ver Meitner, L.; Hahn, O.; Strassmann, F., *Z. Phys.*, 106, 249 (1937).

33 Referência inserida no original: Bethe, A.H.; Placzec, G., *Phys. Rev.*, 51, 405 (1937).

34 Referência inserida no original: Hahn, O.; Strassmann, F., *Naturwiss.*, 27, 11 (1939).

35 Referência inserida no original: Meitner, L.; Frisch, O. R., *Nature* [143, 239 (1939)].

a pelo menos pares iônicos. Cerca de 15 partículas por minuto foram registradas quando 300 miligramas de rádio, misturado com berílio, foram colocados a um centímetro do revestimento de urânio. Nenhum pulso foi registrado durante as repetidas verificações de várias horas de duração total, nem quando a fonte de nêutrons ou revestimento de urânio foram removidos. Com a fonte de nêutrons a uma distância de quatro centímetros do revestimento de urânio, envolver a fonte com cera de parafina aumentou o efeito por um fator de dois.

Foi verificado que o número de pulsos dependia linearmente da força da fonte de nêutrons; isso foi feito para excluir a possibilidade de que os pulsos fossem produzidos pela soma acidental de pulsos menores. Quando o amplificador era conectado a um oscilógrafo, os pulsos grandes podiam ser vistos muito distintamente ao fundo de pulsos muito menores devido às partículas alfa de urânio.

Variando o ajuste do tiratron, descobriu-se que o tamanho máximo dos pulsos corresponde a pelo menos 2 milhões de pares de íons, ou uma perda de energia de 70 MeV da partícula dentro da câmara. Como o caminho mais longo de uma partícula na câmara era de 3 centímetros e a câmara estava cheia de hidrogênio à pressão atmosférica, as partículas devem se ionizar tão fortemente que podem formar 2 milhões de pares de íons em um caminho equivalente a 0,8 cm de ar ou menos. A partir disso, pode-se estimar que as partículas ionizantes devem ter um peso atômico de, pelo menos, setenta, assumindo uma conexão razoável entre o peso atômico e a carga efetiva. Esta parece ser uma evidência física conclusiva para a quebra de núcleos de urânio em partes de tamanho comparável, conforme indicado pelos experimentos de Hahn e Strassmann.

Experimentos com tório, em vez de urânio, resultaram bastante semelhantes, exceto que envolver a fonte de nêutrons com parafina não aumentou, mas diminuiu ligeiramente o efeito. Isso é evidência a favor da sugestão de que também no caso do tório algumas, senão todas as atividades produzidas pelo bombardeio de nêutrons, devem ser atribuídas a elementos leves. Deve-se lembrar que nenhum aumento pela parafina foi encontrado para as atividades produzidas no tório³⁶ (exceto por uma que é isotópica ao tório e quase certamente é produzida pela simples captura do nêutron).

A prof. Meitner sugeriu outro experimento interessante. Se uma placa de metal for colocada próxima a uma camada de urânio bombardeada com nêutrons, seria de se esperar que se formasse na placa um depósito ativo dos átomos leves emitidos na "fissão" do urânio. Esperamos realizar tais experimentos, usando a poderosa fonte de nêutrons que nosso aparato de alta tensão poderá fornecer em breve.

Quadro 5: Glossário do trabalho "Evidência física da divisão dos núcleos pesados sob bombardeamento de nêutron" (Frisch, 1939)

No original	Explicação ou terminologia atual
Tiratron	Câmara com válvula que contém um filamento de cátodo e uma placa de ânodo, usada com variados gases ionizáveis.

Fonte: elaborado pelos autores.

36 Referência inserida no original: ver Meitner, L.; Strassmann, F.; Hahn, O., l., 109, 538 (1938).

“Radioactive Element 93” (McMillan; Abelson, 1940)

No ano passado, foi descoberto um período estável de 2,3 dias em urânio ativado com nêutrons³⁷, e uma tentativa³⁸ foi feita para identificá-lo quimicamente, levando à conclusão que é uma terra rara. Impressionados com as dificuldades levantadas por essa identificação, os autores decidiram independentemente que o assunto merecia uma investigação mais aprofundada. Em Berkeley, descobriu-se que: (1) se uma camada de $(\text{NH}_4)_2\text{U}_2\text{O}_7$, com um poder refrador equivalente a 0,1 mm de ar, colocado em contato com um filme de **colódio** equivalente a 2 mm de ar, é ativada por nêutrons do ciclotron, o período de 2,3 dias surge fortemente na camada de urânio, mas não aparece no colódio, o que mostra uma curva de decaimento paralela a, e a 1/7 da força de, aquela de um papel “coletor de fissão” atrás dela. Um dia após o bombardeamento, a camada de urânio tem cinco vezes a atividade do coletor de fissão. Isso mostra que o período de 2,3 dias tem um alcance de <0,1 mm de ar e uma intensidade maior do que todos os produtos de longo período de fissão juntos. (2) Quando uma fina camada de urânio é bombardeada com e sem cádmio ao seu redor, a intensidade do produto de fissão é alterada por um grande fator, enquanto o período de 2,3 dias e o período de urânio de 23 minutos sofrem apenas ligeiras alterações, e sua proporção permanece constante. Ainda, a absorção de nêutrons de ressonância pelo urânio altera esses dois períodos na mesma proporção, sugerindo uma relação genética entre eles e a consequente identificação do período mais longo com o elemento 93. Em Washington, observou-se que o período de 2,3 dias provavelmente não se comporta consistentemente a uma terra rara, já que as tentativas de concentrá-lo quimicamente com as terras raras de urânio ativado falharam, embora seja conhecido por ter uma intensidade grande em comparação com os produtos de fissão de uma terra rara.

Nesta fase da investigação, um dos autores (**P.H.A.**) veio a Berkeley em uma visita, e um ataque combinado foi feito. Com substância pura de 2,3 dias [oriunda] de finas camadas de urânio, as propriedades químicas foram investigadas, e logo se encontrou uma diferença muito característica às terras raras; especificamente, a substância não precipita com HF na presença de um agente oxidante (bromato em ácido forte). Na presença de um agente redutor (SO_2), ele precipita quantitativamente com HF. O cério foi usado como substância transportadora. Essa propriedade explica a natureza errática dos experimentos químicos anteriores, em que o poder oxidativo da solução não foi controlado. Experimentos químicos posteriores mostraram que, em um estado reduzido com tório como substância transportadora, ele precipita com iodato e, no estado oxidado, com urânio como acetato de sódio e uranila. Ele também precipita com tório com a adição de H_2O_2 . Precipita em solução básica se o carbonato é cuidadosamente excluído. Essas propriedades indicam que os dois estados de valência são muito similares àqueles do urânio (U^{++++} e UO_2^{++} ou U_2O_7^-), a maior diferença daquele elemento sendo no valor do potencial de oxidação entre duas valências, de tal maneira que o estado mais baixo é mais estável no novo elemento. É interessante notar que o novo elemento tem pouca ou nenhuma semelhança com seu homólogo rênio, pois não precipita com H_2S em solução ácida, não é reduzido ao metal pelo zinco em solução ácida e não tem um óxido volátil no calor vermelho. Esse fato, junto à aparente semelhança com o urânio, sugere que pode haver um segundo grupo de “terras raras” de elementos similares começando com urânio.

37 Referência inserida no original: E. McMillan, *Phys. Rev.*, 55, 510 (1939).

38 Referência inserida no original: E. Segré, *Phys. Rev.*, 55, 1104 (1939).

A prova final de que a substância de 2,3 dias é filha do urânio de 23 minutos é a demonstração de seu crescimento a partir dele. Para este experimento, o urânio ativado foi purificado duas vezes por precipitação como acetato de sódio e uranila, que foi dissolvido em HF e saturado com SO₂. Em seguida, quantidades iguais de cério foram adicionadas em intervalos de vinte minutos e os precipitados foram filtrados. O primeiro precipitado, feito imediatamente após a purificação, carregou todas as contaminações precipitáveis por flúor e foi descartado; sua fraqueza indicava uma purificação muito boa. As atividades dos outros são plotadas na Figura 6.³⁹

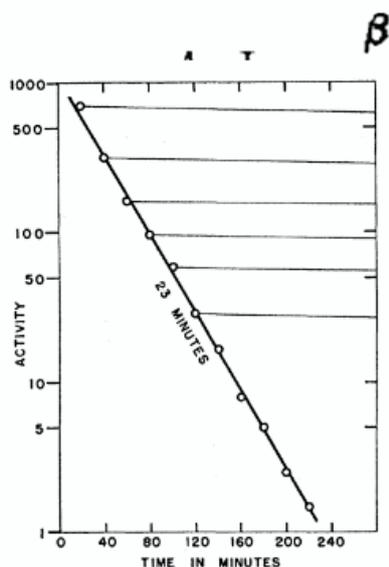


Figura 6: Crescimento do isótopo 93^{239} de 2,3 dias a partir de um U^{239} de 23 minutos. Os pontos indicam as atividades de sucessivas extrações de flúor, traçados nos tempos de extração. Medidas de decaimento foram feitas um dia depois nas primeiras seis extrações e as inclinações resultantes são mostradas no gráfico.⁴⁰

Um estudo preliminar das radiações de 93^{239} mostra que ele emite partículas beta negativas contínuas com um limite superior de 0,47 MeV, e um espectro complexo fraco de raios gama de baixa energia (<0,3 MeV) e provavelmente raios-X. Surge imediatamente a questão do comportamento de seu produto filho 94^{239} . Nosso primeiro pensamento foi que deve ir para o **actino-urânio** emitindo uma partícula alfa. Investigamos isso preparando uma amostra forte (11 milicuries) de 93 purificado e colocando-a perto de um amplificador linear em um campo magnético para defletir as partículas beta. Desta experiência concluímos que, se as partículas alfa são emitidas, sua meia-vida deve ser da ordem de um milhão de anos ou mais; o mesmo experimento mostrou que, se ocorrer fissão espontânea, sua meia-vida deve ser ainda maior. Desejamos expressar nossa gratidão à Rockefeller Foundation e a Research Corporation, cujo apoio financeiro tornou este trabalho possível.

Quadro 6: Glossário do trabalho "Elemento radioativo 93" (McMillan; Abelson, 1940)

No original	Explicação ou terminologia atual
P.H.A.	Philip Hauge Abelson.
Actino-urânio	Um isótopo do urânio (U^{235}).
Colódio	Provavelmente, refere-se a colódio de nitrocelulose, que, à época, era utilizado no processo de registros fotográficos

Fonte: elaborado pelos autores.

³⁹ No artigo original, Figura 1.

⁴⁰ Nota dos tradutores: eixo das abscissas: "tempo em minutos"; eixo das ordenadas: "atividade"; curva no gráfico: "23 minutos".

“Elemento radioativo 94 a partir de dêuterons no urânio” (Seaborg et al., 1946)

Escrevemos para informar alguns resultados obtidos com o bombardeamento de urânio com nêutrons no ciclotron de 60 polegadas.

O urânio foi bombardeado na forma de U_3O_8 e os dêuterons tiveram que passar por uma folha de alumínio de espessura de **2-mil** antes de atingir o alvo de urânio. A fração cuidadosamente purificada do elemento 93 continha uma atividade beta cuja curva de absorção no alumínio (tomada em câmara de ionização conectada a um tubo FP-54 e também em um eletroscópio Lauritsen) era distintamente diferente da curva de absorção de uma amostra de $^{93}_{239}$ de 2,3 dias (formados de urânio mais nêutrons), feita sob condições idênticas. O limite superior das partículas-beta provenientes dessa atividade 93 é de cerca de 1 MeV, comparado com 0,5 MeV para o $^{93}_{239}$. A proporção de raios gama por ionização por partículas beta é cerca de cinco vezes maior do que para $^{93}_{239}$. A parte inicial da curva de absorção deste 93 de urânio mais dêuterons é muito semelhante à parte inicial da absorção da curva do $^{93}_{239}$. Espera-se, logicamente, a produção de $^{93}_{239}$ a partir do bombardeamento de urânio com dêuterons, a partir da reação $U^{238}(d, n)^{93}_{239}$. A partir da curva de absorção, é impossível deduzir as intensidades relativas do novo 93 e do $^{93}_{239}$, já que as partes iniciais das curvas individuais de absorção dessas duas atividades podem ser quase idênticas. A taxa de decaimento das partículas beta de alta energia (0,5-1 MeV) e dos raios gama do 93 do urânio mais dêuterons foi determinada. Ela resultou em uma meia-vida de cerca de 2 dias para o novo 93. Essa atividade deve ser atribuída provavelmente a U^{238} , U^{236} ou U^{235} , formados nas reações $U^{238}(d, 2n)^{93}_{238}$, $U^{235}(d, n)^{93}_{236}$ ou $U^{235}(d, 2n)^{93}_{235}$, respectivamente.

Então procurou-se o crescimento de partículas alfa, que pode ser devido ao elemento 94, filho do 93 de 2 dias. De fato, observamos o crescimento de partículas alfa nas frações de 93 muito cuidadosamente purificada, assim como na semipurificada, e as curvas de crescimento indicam uma meia-vida de aproximadamente 2 dias para o pai do emissor alfa. A contagem final de partículas alfa chega a várias centenas de contagens por minuto para um bombardeio de 200 microamperes-horas. Esse trabalho foi feito com um contador tipo proporcional. Planejamos redeterminar o crescimento da curva de partículas alfa curva mais precisamente usando uma câmara de ionização e um amplificador linear com a ajuda de um campo magnético para desviar o fundo muito forte de partículas beta. As partículas alfa têm um alcance de aproximadamente 3,9 cm no ar.

Essa atividade alfa é quimicamente separável do urânio e do 93. Os experimentos químicos até agora indicam uma similaridade ao tório e a atividade ainda não foi separada do tório. Mais experimentos químicos devem definitivamente ser realizados antes que se possa considerar como provado que as partículas alfa são devidas a um isótopo do elemento 94.

Quadro 7: Glossário do trabalho “Elemento radioativo 94 a partir de dêuterons no urânio” (Seaborg et al, 1946)

No original	Explicação ou terminologia atual
2-mil	Medida de espessura de 0,002 polegadas, ou 0,0508 mm.

Fonte: elaborado pelos autores.

“Elemento radioativo 94 a partir de dêuterons no urânio” (Seaborg; Wahl; Kennedy, 1946)

Gostaríamos de relatar mais alguns resultados que descobrimos sobre o elemento 94 alfa-radioativo formado no bombardeamento de urânio com 16 MeV de dêuteron. Enviamos um primeiro relatório⁴¹ deste trabalho em uma Carta ao Editor de 28 de janeiro de 1941. Nesse ínterim, realizamos mais experimentos a fim de estudar o comportamento químico deste isótopo alfa-radioativo. A radioatividade pode ser precipitada, no que é provavelmente o estado de valência +4, como um fluoreto ou iodato usando uma terra rara ou tório como material de suporte, e como peróxido usando tório como material de transporte. No entanto, na presença do agente oxidante extremamente forte íon persulfato ($S_2O_8^{2-}$), mais Ag como catalisador, esse isótopo radioativo oxida-se para um estado de valência mais alto, que não precipita como um fluoreto. O agente oxidativo íon bromato (BrO_3^-) não é poderoso o suficiente para oxidá-lo até esse estado de valência mais alto e, portanto, a radioatividade precipita como um fluoreto mesmo na presença do íon bromato. Com o auxílio do íon persulfato, foi possível separar quantitativamente essa radioatividade do tório, pelo uso do **UX1** beta-ativo como um indicador para o tório. É extremamente possível que esses experimentos estejam indicando que essa radioatividade [emissora de partículas] alfa seja devida a um isótopo de elemento 94. Os experimentos continuam.

Quadro 8: Glossário do trabalho “Elemento radioativo 94 a partir de dêuterons no urânio” (Seaborg; Wahl; Kennedy, 1946)

No original	Explicação ou terminologia atual
UX1	Isótopo do tório (234).

Considerações finais

Pouco depois dessas descobertas, os Estados Unidos entraram oficialmente na Segunda Guerra Mundial. A fissão nuclear já era compreendida como fenômeno potencial para a produção bélica. A Tchecoslováquia, invadida pela Alemanha dois anos antes, tinha ricas minas de urânio na região de Joachimsthal – o rádio, por exemplo, foi descoberto entre os minérios de urânio daquelas minas por Marie e Pierre Curie, em 1898. Sabendo disso, cientistas como Albert Einstein urgiram o governo americano a iniciar seu próprio programa nuclear, sob a premissa de que a Alemanha estaria, em grande probabilidade, fazendo o mesmo. O movimento de expatriação de cérebros europeus estava intenso, e os Estados Unidos receberam boa parte dos grandes nomes da história que os artigos aqui traduzidos apresentam, especialmente os italianos.

É necessário enfatizar nestas conclusões o papel essencial desempenhado por ambas as ciências – química e física – nos desenvolvimentos que apresentamos aqui. Desde o início, a preocupação com o suporte de ambas fica muito claro. Há trabalhos que são basicamente sobre química e radioquímica, como os de Noddack (1934) e Hahn e Strassmann (1939); outros, são

41 Referência inserida pelos autores: G.T. Seaborg; E.M. McMillan; J.W. Kennedy; A.C. Wahl, *Phys. Rev.*, 69, 366 (1946).

basicamente físicos, como os de Meitner e Frisch (1939) e Frisch (1939); contudo, todos são comunicações entrelaçadas com evidências de uma área ou de outra. Talvez a única dispersão seja encontrada no trabalho de Noddack, que descreve interpretações especificamente analíticas, embora levante a famosa hipótese, de natureza mais física. Desde a descoberta da radioatividade natural, essa era a estrutura da nova área e membros multidisciplinares compunham as equipes, como regra geral. É interessante que justamente esses desenvolvimentos levaram à criação da série dos actínídeos, provocada pela sintetização do plutônio (Seaborg, 2007). A não existência dessa série em 1934 ajuda a explicar as dificuldades encontradas por Fermi em compreender o que era possível esperar do elemento 93, em termos de comportamento químico. Assim, entendemos que, para apreciar as belezas cognitivas e metodológicas dessa parte da história da ciência, o leitor deve também estar preparado para se aventurar nos dois domínios.

Gostaríamos também de frisar o esforço que foi necessário para traduzir alguns dos termos variados que os cientistas usaram. Como se pode notar, até 1939 havia uma série de termos para os mesmos isótopos, por exemplo. Contudo, é possível notar essa variedade terminológica diminuiu conforme as anomalias foram sendo resolvidas. Mesotório, urânio X, tório X, rádio I, ekacesio, ekarênio, emanção, assim como vários outros, foram termos paulatinamente abandonados, em preferência a outros, com notação isotópica. Um sinal da área alcançando maturidade, em razão de uma precisão cada vez maior, talvez.

Gunther Stent, propositor da concepção de prematuridade na descoberta científica, afirmou sobre a fissão nuclear que ela “é provavelmente o caso mais pejado de consequências da prematuridade de uma descoberta na história do mundo” (Stent, 2007, p. 533). Infelizmente, ele não continua elaborando sua alegação. Podemos concluir dela as grandes alterações provocadas na química e na física, embora isso não seja suficiente para justificar sua escolha de ampliar o escopo para “a história do mundo”. Com grande possibilidade, ele fala do fato de que tanto a fissão nuclear quanto os elementos transurânicos foram essenciais na corrida bélica da Segunda Guerra Mundial. Sendo o fenômeno fundamental das bombas e a matéria-prima de uma delas, eles garantiram uma grande vantagem aos Estados Unidos. Os artigos que comunicavam a produção do plutônio foram deliberadamente omitidos pela *Physical Review* por cinco anos. Quando da submissão, os estadunidenses ainda não tinham entrado oficialmente na guerra, mas eram patrocinadores e fornecedores de material bélico para os Aliados. Embora possamos considerar que a mesma vantagem poderia ter sido dada a Hitler, se os Noddack dessem continuidade às investigações, uma série de outras condições teriam de ser consideradas. Em história, só podemos analisar o que efetivamente aconteceu, mas, nesse caso, aquilo que não aconteceu captura a atenção.

Agradecimentos

Agradecemos a Nathalia Walendowsky Knihis por toda a ajuda com a tradução dos originais em alemão.

Referências bibliográficas

- ALVAREZ, L.W. *Adventures of a physicist*. New York: Basic Books, 1987.
- AMALDI, E.; D'AGOSTINO, O.; FERMI, E.; PONTECORVO, B.; RASETTI, F.; Segrè, E. Artificial radioactivity produced by neutron bombardment - II. *Proceedings of The Royal Society A*, v. 149, n. 868, p. 522-558, 1935.
- FERMI, E. Radioactivity induced by neutron bombardment. *Nature*, v. 133, p. 757, 1934a.
- FERMI, E. Possible production of elements of atomic number higher than 92. *Nature*, v. 133, p. 898-899, 1934b.
- FERMI, E. Artificial radioactivity produced by neutron bombardment [1938]. In: *Nobel Lectures: Physics 1922-1941*. Amsterdam: Elsevier, 1965.
- FERMI, E.; AMALDI, E.; D'AGOSTINO, O.; RASETTI, F.; SEGRÈ, E. Artificial radioactivity produced by neutron bombardment. *Proceedings of The Royal Society A*, v. 146, n. 857, p. 483-500, 1934.
- FRISCH, O.R. Physical evidence for the division of heavy nuclei under neutron bombardment. *Nature*, v. 143, p. 276, 1939.
- FRISCH, O.R.; WHEELER, J.A. The discovery of fission: how it all began. *Physics Today*, v. 20, n. 11, p. 43, 1967.
- GRAETZER, H.G. Discovery of nuclear fission. *American Journal of Physics*, v. 32, n. 1, p. 2-8, 1964.
- GRAETZER, H.G.; ANDERSON, D.L. *The discovery of nuclear fission: a documentary history*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1971.
- HAHN, O.; STRASSMANN, F. Über den Nachweis und das Verhalten der bei der Bestrahlung des Urans mittels Neutronen entstehenden Erdalkalimetalle. *Die Naturwissenschaften*, v. 27, p. 11-15, 1939.
- HOOK, E.B. Dissonância interdisciplinar e prematuridade: a sugestão de Ida Noddack de fissão nuclear. In: Hook, E.B. *Prematuridade na descoberta científica: sobre resistência e negligência*. São Paulo: Perspectiva, 2007. p. 201-237.
- MCMILLAN, E.; ABELSON, P.H. Radioactive Element 93. *Physical Review*, v. 57, n. 1185-1186, 1940.
- MEITNER, L.; FRISCH, O.R. Disintegration of uranium by neutrons: a new type of nuclear reaction. *Nature*, v. 143, p. 239-240, 1939.
- NODDACK, I. Über das element 93. *Zeitschrift für Angewandte Chemie*, v. 47, n. 37, p. 653, 1934.
- SANTOS, G.M. A tale of oblivion: Ida Noddack and the "universal abundance" of matter. *Notes and Records: The Royal Society Journal of the History of Science*, v. 68, n. 4, p. 373-389, 2014.
- SEABORG, G.T. Prematuridade, fissão nuclear e os elementos actínídeos transurânicos. In: HOOK, E.B. *Prematuridade na descoberta científica: sobre resistência e negligência*. São Paulo: Perspectiva, 2007. p. 69-80.
- SEABORG, G.T.; MCMILLAN, E.M.; KENNEDY, J.W.; WAHL, A.C. Radioactive element 94 from deuterons on uranium. *Physical Review*, v. 69, n. 7-8, p. 366, 1946.
- SEABORG, G.T.; WAHL, A.C.; KENNEDY, J.W.; Radioactive element 94 from deuterons on uranium. *Physical Review*, v. 69, n. 7-8, p. 367, 1946.
- SILVA, V.C. Da fissão nuclear aos elementos transurânicos: questões epistemológicas no caso Fermi-Noddack. *Revista Brasileira de História da Ciência*, v. 12, n. 1, p. 54-87, 2019.
- SIME, R.L. Lise Meitner and the discovery of fission. *Journal of Chemical Education*, v. 66, n. 5, p. 373-376, 1989.
- STENT, G.S. Comentários. In: HOOK, E.B. *Prematuridade na descoberta científica: sobre resistência e negligência*. São Paulo: Perspectiva, 2007. p. 533-545.
- STUEWER, R.H. Bringing the news of fission to America. *Physics Today*, v. 38, n. 10, p. 49-51, 1985.

Recebido em 27/10/2023

Aceito em 10/09/2024