

## Entre os transurânicos e a fissão nuclear: um exemplo do papel da interdisciplinaridade em uma descoberta científica<sup>†\*</sup>

---

*Marinês D. Cordeiro*

Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em  
Educação Científica e Tecnológica – UFSC

*Luiz O. Q. Peduzzi*

Departamento de Física – UFSC  
Florianópolis – SC

### Resumo

*Parte das investigações físicas e químicas dos núcleos ganharam novas perspectivas com as descobertas do nêutron, em 1932, e da radioatividade artificial, em 1933. Irradiando diversos elementos com nêutrons, Enrico Fermi e seus colaboradores pensaram ter produzido os primeiros transurânicos. Entretanto, com o passar dos anos, essa concepção fez surgir muitas anomalias. Somente em 1939, Otto Hahn e Fritz Strassmann observaram que a irradiação do urânio com nêutrons produzia, na realidade, elementos muito mais leves, como o bário, e Lise Meitner e Otto Frisch identificaram o fenômeno como a fissão nuclear. Este trabalho enfatiza que a característica interdisciplinar das investigações nucleares exerceu papel duplo, evitando que sua descoberta fosse feita em 1934, mas também oferecendo paulatinamente as metodologias e novas possibilidades teóricas nos anos que se seguiram, até 1939, facilitando tal descoberta. Por fim, são analisadas algumas perspecti-*

---

<sup>†</sup> Between transuranic elements and nuclear fission: the role played by interdisciplinarity in a scientific discovery

<sup>\*</sup> *Recebido: novembro de 2013.  
Aceito: maio de 2014.*

*vas para a educação científica, especialmente no que concerne o ensino de certos aspectos da natureza da ciência.*

**Palavras-chave:** *Fissão nuclear. Interdisciplinaridade. Descoberta Científica. História e Filosofia da Ciência.*

### **Abstract**

*Part of the physical and chemical investigations of nuclei gained new perspective as the neutron and artificial radioactivity were discovered in 1932 and 1933. Radiating different elements with neutrons, Enrico Fermi and his coworkers thought they have produced the first transuranic elements. However, over the years, this finding allowed many anomalies to rise. Only in 1939, Otto Hahn and Fritz Strassmann observed that the neutron irradiation of uranium actually produced much lighter elements such as barium, and Lise Meitner and Otto Frisch identified the phenomenon as a nuclear fission. This paper emphasizes that the interdisciplinary character of nuclear research exerted dual role, preventing its discovery in 1934, but gradually offering new methodologies and theoretical possibilities in the years that followed, until 1939, paving the way for the discovery. Finally, some perspectives for Science education are discussed, especially regarding the teaching of certain aspects of the nature of Science.*

**Keywords:** *Nuclear fission. Interdisciplinarity. Scientific Discovery. History and Philosophy of Science.*

## **I. Introdução**

A partir de 1905, após a descoberta da radioatividade e a consolidação da teoria da desintegração atômica, o estudo das séries de decaimento gerou um grande interesse entre os cientistas. Métodos específicos de identificação de elementos foram desenvolvidos paralelamente ao crescimento da área de investigação denominada radioquímica. Com isso, mais de trinta novos elementos radioativos foram ‘descobertos’, nas séries de decaimento (CURIE, 1911, in CORDEIRO; PEDUZZI, 2010). O tório X, o mesotório, o radiotório, o actínio X e o íônio foram alguns desses elementos, assim considerados por terem meias-vidas nunca antes detecta-

das, e que começaram a intrigar os físicos e químicos da época, por serem inseparáveis de elementos conhecidos, como o rádio e o tório.

Foram necessários quase dez anos de pesquisa, a proposição de um novo modelo de átomo, a descoberta do número atômico e o aperfeiçoamento de metodologias bastante sofisticadas e altamente eficientes, para que o químico escocês Frederick Soddy estabelecesse que o tório X, o mesotório, o radiotório, o actínio X e o iônio eram, de fato, os próprios tório e rádio. Eles diferiam apenas em suas atividades e massa, mas tinham o mesmo número atômico. Foram chamados de isótopos radioativos e oportunizaram uma melhor organização da tabela periódica (SODDY, 1922).

Desde 1919, com a descoberta de Rutherford da transmutação artificial, a ideia de produzir transurânicos, com o auxílio de irradiações de partículas, configurava-se um desafio, mas pouco viável. Os únicos projéteis à disposição eram as partículas alfa, que eram repelidas pela barreira coulombiana dos núcleos pesados. As descobertas do nêutron e da radioatividade artificial, no início da década de 1930, abriram aos físicos e químicos da época novas possibilidades de investigação dos núcleos, tanto em nível teórico quanto experimental, com o emprego de nêutrons no bombardeamento de diversos elementos. O conhecimento da época fez com que acreditassem ter conseguido produzir os elementos transurânicos<sup>1</sup>.

Curiosamente, a proposição da ‘descoberta’ dos transurânicos era, de certa forma, semelhante ao que ocorrera com as ‘emanações’, que de fato eram isótopos, três décadas antes. Mais interessante ainda é que a física austríaca Lise Meitner e o químico alemão, Otto Hahn, protagonistas das pesquisas com bombardeamento de urânio, tenham sido participantes ativos da descoberta dos isótopos. Eles desenvolveram métodos de análise precisos e descobriram inseparabilidades entre elementos conhecidos e seus isótopos, e se tornaram dois dos maiores especialistas em radioquímica (SIME, 1996). Novamente na década de 1930, viram-se diante de identidades químicas, meias-vidas desconhecidas e uma série de anomalias que a concepção de transurânicos não conseguia explicar. Após a compreensão do fenômeno da fissão nuclear, os novos elementos químicos supostamente produzidos em

---

<sup>1</sup> Neste artigo, trata-se especificamente do equívoco de interpretação de Fermi e seus colaboradores sobre os produtos do bombardeamento de urânio. Em termos físicos, é possível inferir que a equipe italiana tenha produzido também elementos transurânicos, mas em quantidades irrisórias e, à época, indetectáveis, frutos do bombardeamento do U-238 (MARQUES, 2009). O equívoco do qual se trata neste trabalho, portanto, foi o da identificação dos produtos oriundos do U-235.

1934 – transurânicos que até mesmo foram batizados<sup>2</sup>, como o *ausenium* ( $Z = 93$ ) e o *hesperium* ( $Z = 94$ ) – foram identificados por Meitner e Hahn como elementos já conhecidos, como criptônio, rubídio, estrôncio e assim por diante.

Muitas vezes, convicções teóricas fortemente estabelecidas podem ofuscar a interpretação dos fenômenos investigados, em particular, quando se apresentam novos e imprevisíveis resultados. Logicamente, cientistas são formados e trabalham à luz de corpos de conhecimento bem estruturados e amplamente aceitos. Assim, buscam em suas investigações a coerência com os cânones vigentes da ciência, realizando pesquisas típicas de períodos de ciência normal (KUHN, 1996). Portanto, nada mais natural do que a resistência à possibilidade de um conhecimento novo, quando uma descoberta tem a característica de provocar transformações no corpo de conhecimentos aceito. O caso da descoberta da fissão nuclear, neste sentido, é exemplar: duas premissas teóricas, uma da física e outra da química, impediram que conjecturas da cisão fossem investigadas, como ocorreu com a argumentação de Ida Noddack aos transurânicos de Fermi, em 1934, e guiaram por caminhos bastante sinuosos as pesquisas de Hahn e Meitner.

Se a dissonância entre química e física e seus enunciados teóricos provocaram empecilhos para a descoberta da fissão nuclear, foi justamente a relação íntima entre as duas disciplinas que permitiu, numa dinâmica bastante profícua entre suas metodologias, que se resolvessem as anomalias que a concepção de transurânicos provocavam. Não é sem razão que as três principais equipes de cientistas envolvidas com as pesquisas em ‘transurânicos’ eram heterogêneas. Em Paris, Irène e Frédéric Joliot-Curie tinham formação em física, mas, assim como Marie Curie, fizeram contribuições na química, por trabalharem com física nuclear e radioquímica, áreas fronteiriças. Mais à frente, o físico-químico iugoslavo Pavle Savitch (Savić) juntou-se à equipe francesa. Em Roma, a equipe liderada por Fermi<sup>3</sup> era formada predominantemente por físicos – o único químico, Oscar D’Agostino, fez um trabalho colaborativo na França, no grupo dos Joliot-Curie,

---

<sup>2</sup> Esses nomes foram dados pela equipe italiana aos primeiros ‘transurânicos’ detectados (FERMI, 1938); em Berlim, chamavam os elementos 93 e 94 de eka-rênio e eka-ósmio, respectivamente, em virtude da premissa muito forte da química da época de que os elementos transurânicos seriam elementos de transição semelhantes a seus homólogos mais baixos, nesses casos, o rênio e o ósmio.

<sup>3</sup> Essa equipe foi apelidada de “meninos da Via Panisperna”, em homenagem à rua onde se situava o Instituto de Física. Além de Fermi e D’Agostino, também faziam parte do grupo os físicos Emilio Segré, Edoardo Amaldi, Franco Rasetti, Ettore Majorana e Bruno Pontecorvo.

voltando mais tarde a reintegrar a equipe romana. Interessantemente, sua saída do grupo coincidiu com a mudança de objetivos dos italianos, que pararam de buscar compreender os produtos da irradiação do urânio e passaram a se dedicar à produção de nêutrons térmicos (SEGRÉ, 1989). Por fim, o grupo de Berlim também tinha formação diversa: Hahn era químico por formação; Meitner, física. Ambos, no entanto, trabalharam juntos, desde 1909, em radioquímica e, depois, em física nuclear. Em 1938, Fritz Strassmann, químico, juntou-se à equipe. Havia também equipes com os mesmos objetivos nos Estados Unidos e na Inglaterra. Grupos heterogêneos pesquisando o domínio nuclear agregavam uma maior riqueza metodológica, pertinente a esse tipo de pesquisa.

Neste artigo, discute-se a história da descoberta da fissão, desde as primeiras manipulações artificiais dos átomos até a compreensão do fenômeno, em 1939. Por muito tempo, foi atribuída a Hahn (e, às vezes, a Strassmann) a autoria da descoberta desse fenômeno. Entretanto, nas últimas décadas, o resgate de cartas trocadas entre Hahn e Meitner provocou dúvida sobre os papéis desempenhados por estes dois cientistas nessa realização. A associação das cartas trocadas entre ambos às datas de submissão dos artigos mais importantes sobre a fissão mostra a importância do intercâmbio de conhecimentos químicos e físicos naquele momento, e tem gerado dúvidas quanto a quem se deve atribuir a descoberta do fenômeno.

Definitivamente, o trabalho colaborativo de mais de trinta anos entre Hahn e Meitner não acabou com a emigração da física austríaca para evitar a perseguição nazista. Assim, para além da atribuição espaço-temporal da descoberta, a história da fissão é uma história de intensa interdisciplinaridade – e dessa característica a educação científica pode se beneficiar. Ademais, a história das pesquisas do grupo de Berlim tem o potencial de ilustrar outros aspectos da natureza da ciência, como a pluralidade metodológica, a subdeterminação de teorias pela evidência e a importância de “experimentos cruciais”. No caso da fissão, esses aspectos evidenciam que descobertas são construções históricas e coletivas, envolvem grandes trocas de conhecimentos e, não raro, ocorrem por caminhos tortuosos, cheios de anomalias e provocam perplexidade na comunidade científica.

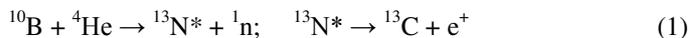
## **II. As investigações nucleares e o caminho para a equivocada vindicação dos transurânicos**

No começo do século XX, as pesquisas em radioatividade evidenciaram que certos elementos, chamados radioativos, transformavam-se em outros, emitindo partículas  $\alpha$  (átomos de hélio duplamente ionizados), partículas  $\beta$  (elétrons) e raios  $\gamma$  – um processo natural e espontâneo. Em 1919, Ernest Rutherford realizou a

primeira transmutação artificial: bombardeando nitrogênio com partículas  $\alpha$ , ele obteve um isótopo do oxigênio e um núcleo de hidrogênio. Além de prover evidências da existência de uma partícula nuclear – o próton – essa reação evidenciava a possibilidade concreta da manipulação de um átomo. Contudo, outras opções de reações nucleares similares mostravam-se bastante difíceis de alcançar: as partículas  $\alpha$ , por serem projéteis carregados positivamente, sofriam forte repulsão coulombiana, proporcional ao número atômico do elemento.

A década de 1930 trouxe novas esperanças para a manipulação artificial dos átomos, com as descobertas do pósitron e do hidrogênio pesado. Foi a descoberta do nêutron, entretanto, a mais frutífera delas, pois com ele foi possível desenvolver um modelo de composição nuclear para os elementos químicos, inclusive para o recém descoberto hidrogênio pesado, ou deutério. Ademais, o nêutron representava, para as investigações nucleares da época, um projétil que, devido à sua carga elétrica neutra, não sofria interações eletromagnéticas.

As importantes descobertas da década de 1930 continuaram e, em 1934, Irène e Frédéric Joliot-Curie, ao bombardearem o boro e o alumínio com partículas  $\alpha$ , produziram nêutrons e nitrogênio e fósforo, respectivamente. O que havia de diferente nesse fenômeno era a forma instável dos elementos produzidos, que depois de algum tempo decaíam, com a emissão de um pósitron, em outro elemento (carbono e silício). Eram, portanto, isótopos radioativos produzidos artificialmente.



Como afirma Hahn, com essa descoberta, “foi então aberto um novo e amplo campo para pesquisas posteriores. Ao mesmo tempo, foram fundamentalmente expandidas as possibilidades experimentais para a investigação física dos núcleos” (HAHN, 1946, p. 54). Os fenômenos emergentes, associados a cada vez mais poderosos aceleradores de partículas, permitiram que diversas novas reações nucleares fossem produzidas.

Enquanto o comportamento geral dos cientistas em diversos grupos foi o de reproduzir os experimentos dos Joliot-Curie, bombardeando outros elementos com partículas  $\alpha$ , o grupo italiano liderado por Enrico Fermi começou a bombardear diversos elementos com nêutrons térmicos, produzidos também por eles (FRISCH, 1967). Esses nêutrons lentos eram capturados mais facilmente pelos núcleos irradiados, que, tornando-se instáveis, decaíam com a emissão de uma partícula  $\beta$  em um elemento químico de posição mais alta na tabela periódica.



A equipe italiana, segundo Hahn (1946), foi testando os elementos da tabela periódica, aumentando o número atômico de cada núcleo irradiado. O resultado era sempre a captura de um nêutron, provocando a instabilidade e um decaimento  $\beta^-$ . Ao bombardearem o urânio, Fermi e seu grupo observaram a produção de quatro atividades, ou seja, quatro elementos com meias-vidas diferentes. O urânio, no entanto, tinha apenas três isótopos bem conhecidos e estudados. Concluíram que a atividade desconhecida, de meia-vida de 13 minutos, era referente ao elemento 93, produzido com o decaimento  $\beta$  de um dos isótopos de urânio (SPARBERG, 1964). Chegaram à conclusão de que haviam criado os elementos 93 e 94, nunca antes encontrados na natureza, denominados *transurânicos*.

Algumas dúvidas foram levantadas acerca dos resultados dos experimentos do grupo italiano – que também se mantinha reticente em relação à sua própria descoberta (HOOK, 2007; FERMI, 1934) – sobretudo pela química alemã Ida Noddack. Ela enfatizou que, apesar de Fermi ter descartado a produção de diversos elementos de número atômico menor que o urânio, ele e seu grupo não excluíram uma possível produção do elemento de número 84, o polônio, além de outros elementos de números ainda menores na tabela periódica. Para Hahn (1946, p. 55), no entanto, a produção de elementos muito mais leves a partir da irradiação do urânio, no ano de 1934, “parecia estar em oposição a todas as concepções da física nuclear”. Segré (1989), membro da equipe de físicos italianos, considerou um erro não ter prestado atenção ao artigo de Noddack (1934) que, apesar de publicado em uma revista alemã pouco conhecida entre físicos, também foi enviado por ela aos grupos italiano, francês e alemão. Ela apontava diversos problemas de natureza química nos métodos do grupo de Fermi, que poderiam ter levado à descoberta da fissão no ano de 1935. Contudo, nem a própria Noddack continuou suas investigações.

Além das objeções de Noddack, o químico alemão Aristid von Grosse, fazendo pesquisa nos Estados Unidos, observou que o produto de meia-vida de 13 minutos se comportava tal qual o protoactínio. Ele escreveu a Meitner e Hahn, sugerindo a continuação da pesquisa, pois eles estavam bastante familiarizados com o protoactínio, por terem sido os primeiros a isolar esse elemento, postulado teoricamente para a explicação da série de decaimento do actínio (SODDY, 1922). Empenhados nessa tarefa, determinaram com grande precisão que o elemento de 13 minutos não era o protoactínio – nem o urânio, o tório ou o actínio. Assim, “de acordo com a posição da ciência na época, a suposição de Fermi deveria estar correta, e o elemento de 13 minutos deveria ser um representante do elemento 93, isto é, ‘transurânico’” (HAHN, 1946, p. 56).

### III. A explicação mais simples gera novas complicações

O trabalho de Hahn e Meitner com os produtos de bombardeamento do urânio com nêutrons não terminou com a conclusão de que o elemento de 13 minutos não era o protoactínio. Segundo Frisch (1967), o fenômeno era tão intrigante e apresentava tantos problemas não respondidos, que eles continuaram a pesquisa. Os produtos do bombardeamento do urânio eram muitos e, durante anos, Hahn, Meitner e mais tarde, em 1938, Strassmann tentaram identificá-los. Eles pareciam ser isótopos do urânio de meia-vida curta, que decaíam com a emissão de partículas  $\beta$ . Esquemas de decaimento foram traçados chegando, inclusive, aos elementos 95 e 96. Outras equipes de físicos e químicos reproduziram os experimentos, e chegaram a resultados semelhantes. Era, no entanto, bastante complicado manter essa explicação: ela requeria que séries de decaimento paralelas acontecessem, e o conceito de isomerismo nuclear<sup>4</sup>, necessário para explicar esses decaimentos, era ainda pouco compreendido na época. Além disso, as séries eram muito longas e indicavam haver isótopos de urânio que emitiam partículas  $\beta$ , algo nunca observado previamente (FRISCH, 1967).

Independentemente das pesquisas alemãs, Irène Joliot-Curie e Pavlé Savitch, em Paris, buscavam a série de decaimento nunca antes vista –  $4n + 1$  – com irradiações de nêutrons. Como produto desses bombardeamentos, observaram um elemento de 3,5 horas de meia-vida, cujas propriedades eram difíceis de identificar. Inicialmente, pensaram ser o tório. A essa altura sem Meitner, que se encontrava na Suécia em virtude do regime nazista, a equipe de Berlim testou a amostra e enviou uma carta à equipe de Paris, assegurando não ser o tório. Hesitantes, Joliot-Curie e Savitch sugeriram que fosse um dos elementos transurânicos, mas que se comportava de modo similar ao actínio e ao lantânio (FRISCH, 1967), “porém as possibilidades expostas por eles pareciam difíceis de entender e pouco satisfatórias” (HAHN, 1946, p. 57). Por este motivo, Hahn e Strassmann repetiram o experimento, e concluíram que, depois de dois decaimentos  $\alpha$ , um isótopo do rádio era produzido, que decaía, enfim, em um isótopo do actínio. Decidiram, então, separar cada um desses produtos de decaimento da série.

---

<sup>4</sup> Núcleos isômeros são núcleos com mesmos números atômicos e de massa, mas de diferentes propriedades radioativas (SIME, 1989), o que explica as séries de decaimento paralelas. Em 1938, suas causas eram desconhecidas, e haviam duas hipóteses para o fenômeno: a primeira e atualmente aceita, de que seriam causados por altos momentos angulares, ou ainda, de que se deviam à existência de estruturas rígidas dentro dos núcleos. A segunda explicação permitia a inferência de que tais estruturas rígidas sobreviveriam a decaimentos  $\alpha$ , influenciando a meia-vida dos produtos subsequentes (FRISCH, 1967).

Os problemas começaram a surgir e a desafiar as interpretações dos dois químicos. “[...] a produção de rádio sob essas condições de radiação era bastante notável: decaimentos  $\alpha$  nunca haviam sido observados com nêutrons de baixa energia, e ainda assim, aqui e no caso de transurânicos, diversos isótopos apareciam simultaneamente” (HAHN, 1946, p. 57). Além disso, após precipitarem o rádio com sais de bário, não conseguiram isolar ou mesmo enriquecer o rádio.

Nessa época, Hahn e Meitner se correspondiam sobre a atividade de 3,5 horas, que já os intrigava há cerca de um ano. Ao buscar por isótopos de rádio, Hahn contou que ele e Strassmann descobriram três isômeros, e solicitou a interpretação de sua colaboradora de pesquisa para o fenômeno. Ela pediu mais detalhes, que foram dados em um reencontro secreto entre os dois, em Copenhague, em novembro de 1938. Para ela, havia sérios problemas físicos na interpretação toda do fenômeno de produção de transurânicos.

*Pois nesse caso, não eram apenas isômeros triplos, mas isômeros triplos que eram herdados; pior, a formação do rádio pelo urânio requeria um improbatilíssimo duplo decaimento alfa e, ainda pior, a indução de um decaimento alfa pela irradiação de nêutrons exigia nêutrons energéticos, mas esses isômeros de rádio na verdade se intensificavam quando produzidos por nêutrons térmicos. Eles eram o pesadelo de uma física, e Meitner solicitou que Hahn reexaminasse essas descobertas do rádio mais rigorosamente que antes (SIME, 1989, p. 374).*

Hahn e Strassmann cogitaram a possibilidade de as preparações estarem com proporções muito baixas de rádio, o que causava a dificuldade de enriquecer a amostra (HAHN, 1946). Desenvolveram então outro experimento, denominado “teste indicador”, em que utilizaram isótopos naturais fracos de rádio, que se comportavam de maneira similar àqueles produtos do bombardeamento do urânio. Eles misturaram esses isótopos puros ao produto artificial e fracionaram a mistura. Como resultado, observaram que a proporção da mistura com isótopos naturais do rádio era plenamente separada dos sais de bário, enquanto que a proporção constituída daquele elemento que acreditavam ser o rádio artificial continuava inseparável, resultado realmente chocante. Após a irradiação do urânio por nêutrons térmicos, um dos produtos sofria, com tempo conveniente, um decaimento  $\beta^-$ . Assim, Hahn e Strassmann decidiram identificar esse produto de decaimento. Inicialmente, conjecturaram ser aquele último produto o actínio, que logicamente decaía do rádio. Contudo, caso identificassem o lantânio, isso seria evidência da produção anterior do bário. Procederam novamente com o teste indicador, usando isótopos naturais do actínio e lantânio; conseguiram cristalizar apenas o actínio.

Em dezembro daquele mesmo ano, ele escreveu a Meitner duas vezes, assustado por reconhecer reiteradamente as propriedades do bário no rádio que estudava. “Hahn estava seguro da química, mas inseguro quanto a todo o resto” (SIME, 1989, p. 374). Para Meitner, em carta resposta, aquela produção de bário, por mais insólita que parecesse, não deixava de ser possível; a física, afinal, vira grandes mudanças nas décadas anteriores. Assim, Hahn e Strassmann submeteram, hesitantes, o artigo em que propunham a produção de bário com a irradiação do urânio por nêutrons térmicos. (HAHN; STRASSMANN, 1939a, 1964), com cópia de seus resultados a Meitner (FRISCH, 1967; SIME, 1989).

Frisch (1967) conta que, ao chegar a Gotemburgo, ao hotel onde se encontraria com sua tia, notou que ela estava perplexa, lendo a carta de Hahn, em que afirmava ter produzido bário irradiando o urânio com nêutrons. Em uma caminhada pela neve, começaram a desenvolver uma explicação para o fenômeno. Com o auxílio do modelo nuclear da gota líquida, desenvolvido por Bohr, pensaram que “tal gota poderia se alongar e dividir”. Frisch pôs-se a calcular a carga elétrica necessária para que a tensão superficial do núcleo fosse zero, chegando ao número atômico 100. Meitner calculou a energia que seria liberada com tal quebra. Após dois dias, Frisch voltou a Copenhague, onde trabalhava; eles terminaram de escrever o artigo por telefone (FRISCH, 1967), e logo o submeteram à revista *Nature* (MEITNER; FRISCH, 1939), além de escrever uma carta a Hahn e Strassmann (SIME, 1989).

Antes de receber o trabalho de Meitner e Frisch, Hahn e Strassmann sentiam-se inseguros, pois sabiam da produção do bário, mas pouco mais conseguiam compreender do ponto de vista químico (SIME, 1989). Passaram as primeiras semanas de janeiro de 1939 verificando a identidade daquele produto com o bário várias vezes, utilizando o experimento do ciclo de sais de bário, em que recristalizavam o bário ativo com o bário natural. Separaram um quarto dessa amostra para comparação futura; com os três quartos restantes, executaram precipitações em ciclo, com diversos sais de bário, iniciando e terminando o ciclo com o cloreto. Após o ciclo, fizeram a contagem das emissões das duas amostras.

*A atividade inicial e o aumento como resultado da formação ulterior de lan-tânio eram as mesmas para ambas as preparações, dentro dos limites do erro: a cristalização de tantos e tão diferentes sais não produzira nenhuma separação do bário ativo de seu portador. Só se poderia concluir que o produto ativo e seu portador eram quimicamente idênticos, ou seja, o bário* (HAHN, 1946, p. 59).

Mas era o trabalho de Meitner e Frisch que eliminava diversos problemas que a interpretação da produção de transurânicos causara por mais de quatro anos, e batizava o fenômeno de fissão nuclear<sup>5</sup>. Neste trabalho, explicavam que o urânio irradiado com nêutrons térmicos fissionava em bário e criptônio, que então decaía em rubídio, estrôncio, ítrio e zircônio. Além disso, descartavam a necessidade de isomerismos múltiplos, que sempre fizeram pouco sentido físico.

*De todo modo, não seria necessário assumir os isomerismos nucleares; os diferentes períodos radioativos pertencentes ao mesmo elemento químico podem ser atribuídos a diferentes isótopos desse elemento, pois variáveis proporções de nêutrons podem ser dadas às duas partes do núcleo do urânio (MEITNER; FRISCH, 1939, p. 240).*

Depois de receber os resultados de Meitner e Frisch, Hahn e Strassmann procuraram pelo criptônio nas amostras fissionadas e encontraram, publicando um artigo definitivo em fevereiro de 1939 na revista *Naturwissenschaften*, quase que simultaneamente à publicação de Meitner e Frisch na *Nature*. Muitas pesquisas passaram a ser feitas no mundo inteiro sobre o fenômeno. Um ano após a primeira comunicação de Hahn e Strassmann, cerca de uma centena de comunicações haviam sido feitas sobre o assunto. Durante os anos seguintes, grandes esforços foram dedicados à identificação dos diversos produtos das fissões nucleares.

#### **IV. Atribuição da descoberta da fissão**

É inegável que, olhando retrospectivamente, certas descobertas impulsionam o avanço científico, seja de modo acumulativo ou promovendo revisões nos cânones da ciência vigente. A análise histórica e filosófica desses episódios mostra que seus contextos são, invariavelmente, bastante complexos, e que pouco ou nada se diz quando a abordagem dos mesmos é superficial, privilegiando particularmente datas e autorias.

Por conta dessa complexidade a filosofia da ciência, predominantemente positivista, negligenciou por muito tempo o chamado contexto da descoberta, atendo-se apenas ao contexto da justificativa. Pelo fato de a filosofia não ser uma disciplina empírica, caberia à história, à psicologia e à sociologia, estas sim disciplinas fatuais, o estudo e a análise dos processos subjacentes a uma descoberta (HANSON, 1967).

---

<sup>5</sup> “Utilizei a palavra ‘fissão’, sugerida pelo biólogo americano William A. Arnold, a quem perguntei como se chama o fenômeno da divisão celular” (FRISCH, 1967, p. 48).

Hanson (1967) defende que o contexto da descoberta não seja mais excluído dos interesses da filosofia e, para tanto, desenvolve, com uma perspectiva histórica, diversas categorias de descobertas que podem auxiliar em uma melhor compreensão dessa área. Do mesmo modo, Kuhn (2009) também promove esse resgate filosófico, buscando mostrar com exemplos que descobertas, apesar de não serem facilmente localizáveis no tempo, têm uma estrutura histórica, que deve ser problematizada.

Para Kuhn (2009), há duas categorias de descobertas. Em um primeiro grupo, há aquelas descobertas que eram previstas teoricamente, ou seja, cientistas trabalhando dentro de uma determinada perspectiva de pesquisa, sabiam o que procurar quando a encontraram. Entre os exemplos históricos, o autor menciona o neutrino e as ondas de rádio. A segunda categoria, entretanto, é que mais o intriga, e aquela cujo contexto foi reiteradamente relegado pela filosofia, por supostamente ser complexo e ilógico – as descobertas que o corpo teórico da época não era capaz de prever, como os raios X, o oxigênio e o elétron.

Se o intuito, seja da comunidade ou da educação científica, for o de tentar localizar no espaço, no tempo, e atribuir a algum cientista certa descoberta, então, como afirma Kuhn (2009), apenas as descobertas do primeiro tipo são passíveis de definição precisa. No caso do segundo tipo, há que se avaliar o período histórico daquela descoberta, o surgimento da anomalia que a fez ocorrer, e definir certos critérios – que nem sempre serão suficientes para tal determinação. A utilização do critério experimental – quem detectou primeiro e quando – nem sempre está de acordo com o critério da compreensão – quem entendeu o fenômeno primeiro, e quando. Por esse motivo, Kuhn (2009, p. 205-206) argumenta que

*[...] qualquer tentativa para datar a descoberta ou para atribuí-la a um indivíduo tem de ser inevitavelmente arbitrária. Além disso, tem que ser arbitrária apenas porque descobrir uma nova espécie de fenômeno é necessariamente um processo complexo que envolve o reconhecimento de que algo existe e do que é. A observação e a conceptualização, o facto e a assimilação do facto à teoria, estão inseparavelmente ligados na descoberta da novidade científica. Inevitavelmente, esse processo estende-se pelo tempo e pode muitas vezes envolver um certo número de pessoas. Só para as descobertas da minha segunda categoria – aquelas cuja natureza é conhecida antecipadamente – é que descobrir algo e descobrir o que é esse algo ocorrem em conjunto num instante.*

O caso da fissão nuclear se enquadra, certamente, na categoria de descobertas não previstas pela teoria. Os químicos, antes da descoberta, trabalhavam com a premissa de que os transurânicos seriam elementos de transição homólogos a rênio, ósmio, irídio e platina (SIME, 1989). Havia também a convicção teórica oriunda da física de que era impossível partir um núcleo. De fato, como afirma o físico Luis Alvarez (1987), que trabalhava nos Estados Unidos com bombardeamentos de nêutrons, a possibilidade da quebra de um núcleo em duas partes com dimensões significativas era algo completamente impensável à época, quando se acreditava que partículas alfa eram os maiores corpos que dele se podia arrancar. Mesmo após o modelo da gota líquida, e com todas as evidências da produção do bário com a irradiação do urânio por nêutrons, Hahn manifestou sua insegurança e incredulidade em carta a Lise Meitner. Em resposta, ela enfatizou que na física já vira ocorrer grandes mudanças conceituais, e que naquele período entre o fim de 1938 e começo de 1939, mais uma estava acontecendo.

Até há alguns anos, a descoberta da fissão nuclear era atribuída a Otto Hahn, primariamente, que já na ausência de Lise Meitner detectou o bário entre os produtos da irradiação do urânio. Ele e Strassmann fizeram diversos tipos de separação, como Hahn bem expõe em sua Conferência Nobel. Com esse trabalho, conseguiram transformar uma constatação inacreditável em fato: as precipitações, feitas inúmeras vezes, eram o bário, e não o rádio. Assim, utilizando-se do critério experimental de Kuhn – quem detectou primeiro? –, não restam dúvidas de que Hahn e Strassmann, com os métodos químicos que utilizaram, descobriram o bário como produto da irradiação do urânio (um elemento muito mais pesado), por nêutrons.

Entretanto, o fenômeno da fissão não se encerra nessa detecção. Apesar de mostrar certo assombro, eles exprimem de passagem, bastante cautelosamente, e em tom apoloético, sua suspeita.

*O “grupo dos transurânicos” é quimicamente semelhante, mas não idêntico, a seus homólogos mais baixos, rênio, ósmio, irídio e platina. Ainda não foram feitos experimentos para determinar se são idênticos com seus homólogos ainda mais baixos, tecnécio, rutênio, rádio e paládio. Afinal de contas, nem se cogitava essa possibilidade anteriormente. A soma dos números de massa de bário + tecnécio,  $138+101$ , resulta em 239! Como químicos, nós realmente deveríamos substituir o esquema de decaimento acima e inserir os símbolos Ba, La e Ce no lugar de Ra, Ac e Th. Contudo, como “químicos nucleares”, trabalhando muito próximo ao campo da física, não po-*

*demos tomar, nós mesmos, tão drástico passo, que vai de encontro a todas as experiências anteriores em física nuclear. Poderia, talvez, ter ocorrido uma série de coincidências incomuns que nos tenham dado falsas indicações* (HAHN; STRASSMANN, 1964, p. 15).

Desse que é considerado o artigo emblemático da descoberta da fissão nuclear, o que se pode afirmar é que Hahn e Strassmann são enfáticos em dois aspectos: não identificaram transurânicos nos esquemas de decaimento e os métodos da química asseguravam que o bário era produzido. Portanto, iam contra uma premissa teórica da química bastante consolidada desde 1934. Entretanto, no que diz respeito à fissão, pareciam não se sentir especialistas o suficiente para sugerir mais taxativamente que a possível ruptura do núcleo (apontada ao mencionar a soma das massas de bário + tecnécio) era uma alternativa da qual se tornava cada vez mais difícil de fugir.

A fim de promover uma melhor e mais sóbria comunicação entre membros da comunidade científica, os artigos têm uma estrutura lógica e impessoal. No caso de Hahn e Strassmann, seu primeiro trabalho de 1939 não faz menção a suas trocas de cartas e ao encontro com Meitner, em Copenhague. A anomalia (de uma série delas que se revelaram, desde a ‘descoberta’ dos transurânicos, por Fermi), que levou os químicos a buscar a certeza em relação ao que achavam ser o rádio, foi apontada por Meitner, quando ela e Hahn se encontraram em Copenhague. Sime (1989, p. 374) enfatiza que todas as hipóteses necessárias para a produção do rádio “eram o pesadelo de um físico”. A anomalia que os levou à descoberta da fissão era de natureza física; a metodologia necessária para coletar as evidências era química.

A química revelou o bário, mas manteve Hahn inseguro em relação ao que aquilo significava, embora tivesse uma forte suspeita. Em sua carta de 19 de dezembro a Meitner, com a deferência de quem não tem opção senão a intromissão em uma especialidade que não é a sua, ele pergunta a sua colaboradora sobre a possibilidade da existência de um bário de massa muito grande, e pede uma sugestão à física. Ela responde, em carta recebida por Hahn em 23 de dezembro (in SIME, 1989, p. 374).

*Seus produtos de rádio são muito intrigantes. Uma reação com nêutrons térmicos que supostamente leva ao bário! [...] Neste momento, a ideia de uma quebra de grande escala parece bastante difícil para mim, mas na física nuclear já passamos por tantas surpresas que não se pode dizer incondicionalmente ‘Não é possível’.*

De novo, não se pode afirmar que a fissão nuclear tenha sido descoberta pela conjectura de Meitner. De qualquer modo, é ela própria que desenvolve, juntamente com seu sobrinho, Otto Frisch, uma interpretação teórica para a produção do bário, logo após escrever sua carta resposta a Hahn. Eles desenvolvem um modelo de fenômeno, utilizando a física disponível – modelo nuclear da gota líquida, tensão superficial, cálculo de deficiência de massa e emissão de energia (MEITNER; FRISCH, 1939). Sua interpretação prescindiu de elementos da química teórica.

Se for tomado, então, o critério kuhniano de quem compreendeu primeiro, deve-se logicamente atribuir a descoberta da fissão nuclear a Meitner, e não a Hahn, pois a explicação do fenômeno só começou a ocorrer quando sua interpretação física entrou em jogo, naquela carta escrita nas vésperas do natal de 1938. Nota-se, no entanto, que essa afirmação, por si só, não é completamente adequada – e não o foi à comunidade científica, que na década de 1940, escolheu o descobridor da fissão nuclear, com base no critério da detecção. Em 1944, Otto Hahn ganhou o Prêmio Nobel da Química, “por sua descoberta da fissão de núcleos pesados”<sup>6</sup>; Meitner não dividiu o prêmio, nem foi laureada na Física.

Crawford, Sime e Walker (1997, p. 32) mostram como foi o histórico de nomeações de Hahn, Meitner e Frisch<sup>7</sup> entre os anos de 1940 e 1946, nos comitês de física e química. Na química, por exemplo, os autores defendem que sua exclusão “pode muito bem ser resumida como uma mistura de inclinação disciplinar, obtusidade política, desconhecimento e pressa”. Já no caso da física, rivalidades entre grupos de físicos e interesses tecnológicos – além do fato de o próprio Hahn não a ter indicado, já como nobelista, em 1946 – foram decisivos para que a contribuição de Lise Meitner fosse neutralizada.

Com efeito, apesar de se poder definitivamente considerar Meitner como codescobridora da fissão nuclear, nota-se que a comunidade científica negligenciou o papel crucial da física austríaca no contexto da descoberta desse fenômeno. Segré (1989, p. 42), por exemplo, afirma que o artigo de Hahn e Strassmann expressa “o momento da descoberta da fissão nuclear”. O próprio Frisch (1967, p. 48) – outro codescobridor do fenômeno – humildemente afirma “apenas ter tido a sorte de estar com Lise Meitner quando ela recebeu o aviso adiantado da descoberta

---

<sup>6</sup> <[http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/chemistry/laureates/1944/](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1944/)>

<sup>7</sup> Os autores defendem ser compreensível a não indicação de Fritz Strassmann nos anos investigados, visto que o químico passou a ser membro da equipe apenas mais tarde e sempre desempenhou papel coadjuvante nas pesquisas.

ta de Hahn e Strassmann”. Mesmo historiadores e pesquisadores da história do fenômeno defenderam, por algum tempo, que a descoberta era de Hahn. Sparberg (1964, p. 8) aponta que “suas [de Hahn] contribuições foram oficialmente reconhecidas quando ele recebeu o Prêmio Nobel da Física em 1944 pela descoberta da fissão”, embora não se furte de lembrar que outros cientistas desempenharam função essencial para tal descoberta (e situa as contribuições de Meitner no mesmo patamar que as de Fermi e dos Joliot-Curie).

Discorrendo sobre os diversos modelos nucleares que se desenvolveram na década de 1930, e especificamente o da gota líquida, Paty (2009, p. 140) aponta a importância da relação desse modelo com a descoberta, “por Otto Hahn e Fritz Strassmann, da fissão nuclear, [isto é, da] cisão de um núcleo pesado (de fato, o de urânio) em núcleos mais leves com liberação de energia. O mecanismo da fissão foi elucidado por Lise Meitner e Otto Frisch”. Por certo, e ao contrário do que afirma Paty, Hahn e Strassmann não utilizaram o modelo de gota líquida para descobrir o bário nas reações (HAHN; STRASSMANN, 1939a; 1964). Não obstante, a concepção de que somente Hahn e Strassmann foram responsáveis pela descoberta da fissão encontra-se bastante disseminada entre historiadores, como Sparberg (1964; 1996), e autores de livros didáticos como, por exemplo, Eisberg e Resnick (1985).

Esses posicionamentos são, na realidade, um reflexo dos efeitos da láurea de Hahn. Ele ficou conhecido na Alemanha do pós-guerra como um símbolo de resistência antinazista, alguém que descobriu a ciência por trás da bomba atômica, mas não sucumbiu a construí-la; Meitner, por sua vez, foi relegada ao ostracismo. Nem mesmo no *Deutsches Museum*, onde havia uma exposição de longa duração sobre a fissão nuclear, seu nome foi lembrado (SIME, 2010). Na Suécia, foi impedida de continuar suas pesquisas experimentais por falta de espaço adequado, resultado de sua problemática relação com o físico Manne Siegbahn – que, como um dos membros mais influentes do Comitê Nobel, também assegurou que as contribuições de Meitner não fossem reconhecidas com o prêmio. (SIME, 1989; CRAWFORD; SIME; WALKER, 1997).

Somente nos últimos anos, foi resgatado o papel de Lise Meitner na história da fissão nuclear e, com ele a função da interdisciplinaridade entre a química e a física para a descoberta desse fenômeno. Para além da tentativa de datar e localizar a descoberta da fissão nuclear – algo inevitavelmente controverso, mas cuja discussão tem sido feita entre historiadores da ciência, como aponta Walker (2006) – a interdisciplinaridade na descoberta do fenômeno é de grande interesse para a educação científica. Ela revela, entre outras coisas, certos aspectos da ciência moderna – o uso de metodologias diversificadas, a competição entre equipes e a acele-

ração que impulsiona a ciência nos períodos de conflitos, especialmente internacionais.

Sime (2000) defende que as pesquisas com o bombardeamento de urânio foram de certa maneira retardadas, principalmente em razão das diferentes proposições metodológicas. De acordo com Leslie Cook, físico canadense que estudou com Hahn na Alemanha nos anos de 1937-38, impressiona a quantidade de estudos desenvolvidos por Hahn e Meitner, que incluíam premissas teóricas equivocadas, tanto da física quanto da química (SPARBERG, 1996). No entanto, com o passar do tempo e com o surgimento de dificuldades teóricas, foi justamente a interdisciplinaridade que propiciou uma compreensão de fenômeno, na entrada do ano de 1939 – apesar de, por anos, a comunidade científica, e o próprio Hahn, terem defendido ser a fissão e sua descoberta produtos somente da pesquisa química.

No contexto da descoberta da fissão, ocorrido no fim do ano de 1938, há diversas evidências de que a interdisciplinaridade guiou as investigações. Notadamente, o que a troca de cartas entre Meitner e Hahn revela é que os químicos, usando métodos próprios, observavam que o que parecia ser o rádio aproximava-se cada vez mais do bário. Mas esses métodos só foram bem sucedidos quando direcionados à investigação de uma anomalia de natureza física – o triplo isomerismo e a dupla emissão alfa do urânio – necessária para dele se produzir rádio. Ademais, a sugestão de uma “quebra em grande escala”, apesar de enfraquecida pela distância da equipe alemã e incapacidade de reprodução dos experimentos, era uma interpretação de natureza física – e mesmo ao ponderar os efeitos de tal possibilidade, Meitner o fez para a área da física.

A clara influência de Meitner é inequívoca nas afirmações cuidadosas do artigo de Hahn e Strassmann (1939a). Nesse trabalho, examinam detalhadamente os resultados de suas pesquisas e apontam contundentemente que os produtos da irradiação de urânio com nêutrons não se comportavam como seus homólogos inferiores – afirmações que podiam ser feitas com seus conhecimentos químicos. Entretanto, a quebra dos núcleos é sugerida implicitamente, e com tom cauteloso, quase apologético – afinal de contas, contrariavam conhecimentos bem estabelecidos de uma área que não era a área de atuação destes cientistas. Já em fevereiro de 1939, a posição Hahn em relação à descoberta muda claramente, como se pode observar em carta que ele envia a Meitner, afirmando que a descoberta fora feita sem qualquer uso da física; ele e Strassmann, afinal, não tinham condições de continuar tal investigação (SIME, 1989). Mas o que ocorreu após a comunicação da produção do bário naquela reação (HAHN; STRASSMANN, 1939a, 1964) é testemunho da impossibilidade de a química, sozinha, promover tal descoberta.

Neste sentido, é interessante enfatizar que, após a submissão do primeiro artigo, sobre a produção de bário no bombardeamento do urânio com nêutrons, Hahn e Strassmann passaram a buscar pelo tecnécio, por eles sugerido na comunicação – mas não o encontraram. Presos às metodologias químicas, ficaram sem alternativas, e passaram parte daquele mês de janeiro desenvolvendo novas maneiras de precipitar o bário – como no experimento dos ciclos de sais. Somente após receberem em primeira mão a interpretação física do fenômeno, enviada por Meitner logo após sua submissão à *Nature*, Hahn e Strassmann buscaram pelo criptônio, que Meitner e Frisch conjecturaram em seus estudos teóricos. Novamente, norteados por uma conjectura física, puderam utilizar métodos químicos nas investigações, resultando em seu segundo artigo sobre o assunto (HAHN; STRASSMANN, 1939b; 1989), publicado quase simultaneamente com o de Meitner e Frisch (1939). Tais informações, no entanto, só foram reveladas com o estudo das cartas trocadas entre os cientistas (SIME, 1989). Sem elas, apenas as datas de publicações de artigos (de Hahn e Strassmann, em 10 de fevereiro, e o de Meitner e Frisch, em 11 de fevereiro), somadas à menção superficial ao trabalho de Meitner, passariam a falsa impressão de que os alemães prescindiram de qualquer hipótese física, utilizando apenas a química para obter evidências definitivas das produções de elementos de números atômicos muito menores na reação.

Duas premissas equivocadas nortearam as investigações em irradiação de urânio com nêutrons por quatro anos. Uma delas, com origem na química, é a de que os transurânicos se comportavam como seus homólogos mais baixos – rênio, ósmio, etc. Outra, de natureza física, de que os núcleos estavam ligados muito fortemente, e não poderiam sofrer grandes cisões (entendia-se que a energia de ligação das partículas no núcleo era muito intensa, ao ponto de superar a repulsão coulombiana entre as partículas de carga positiva, o que impossibilitaria uma cisão com a simples penetração de um nêutron). É relevante observar que, inclusive ao justificar os motivos de não terem observado o novo fenômeno, o físico Segré (1989) sinaliza que a premissa química foi, de certo modo, a culpada pela dificuldade. Já o químico Hahn, em diversos momentos de sua vida, culpou o princípio físico (SIME, 1989).

É inegável que as convicções teóricas de cada campo de pesquisa acabaram retardando a descoberta da fissão nuclear, mas o seu resultado salienta a importância da interação entre estudiosos de diferentes áreas do conhecimento. Durante três décadas, físicos e químicos que trabalhavam com fenômenos nucleares utilizavam métodos da área da radioquímica, em que eletrômetros e análises espectrais eram muitíssimo importantes. Com as pesquisas em bombardeamento de urânios com nêutrons, a química e física foram imprescindíveis aliadas da radio-

química. O papel duplo jogado pela interdisciplinaridade pode ter provocado certos reveses nas investigações, mas foi o determinante para a compreensão daquele fenômeno (SIME, 1989).

## **V. Considerações finais: a questão da descoberta científica, a educação e outras possibilidades**

Neste trabalho, buscou-se discutir a história da descoberta da fissão nuclear de modo a problematizar a questão da descoberta científica. A história de como se compreendeu o fenômeno, que provocou mudanças conceituais tanto na química quanto na física é bastante rica para ilustrar, entre outras coisas, a dificuldade apontada por Kuhn (2009) de se localizar, datar e determinar a autoria de uma descoberta científica que provoca rupturas. No caso da fissão, a polêmica vai mais longe, e geralmente se centra na injustiça causada pela omissão de Meitner do Prêmio Nobel de Química de 1944. Por certo, não se pode atribuir a descoberta do fenômeno exclusivamente a Lise Meitner, mas certamente é tema muito controverso não se mencioná-la como codescobridora. Há, além disso, questões políticas do contexto mais amplo (não abordados neste trabalho) que, neste caso, exerceram grande influência sobre a percepção da comunidade científica acerca da história do fenômeno.

As descobertas científicas e seu valor para a compreensão do funcionamento da ciência tiveram distintos papéis nas teorias da ciência. Na filosofia da ciência iluminista, era ponto central; os passos necessários para chegar a descobertas atribuíam a elas uma estrutura lógica, justificando sua condição de conhecimento superior. Essa concepção de descoberta, feita após uma cuidadosa sequência de observação, hipótese, experimento e tratamento de dados, caiu em desuso com o positivismo lógico, e, pouco depois, com Popper (NICKLES, 2000). Nessa época, passou-se a dividir os contextos científicos em dois: o da descoberta e o da justificativa. Na década de 1960, no entanto, o contexto da descoberta foi resgatado por filósofos, como Hanson (1967) e Kuhn (2009), que entendiam que ele também deveria ser objeto da filosofia, e não matéria de interesse de historiadores, sociólogos e psicólogos.

A concepção algorítmica da ciência (PÉREZ *et al.*, 2001), que ainda subsiste no ensino na educação científica (particularmente nos discursos docentes), é aquela que acredita que a ciência é desenvolvida através de uma série de passos lógicos, que resultam em descobertas. Tem, portanto, certos paralelos com a compreensão iluminista de descoberta. Muitos trabalhos têm sido feitos para desmistificar essa concepção, apontando principalmente para a característica plural das

metodologias científicas. Para isso, a abordagem da história da descoberta da fissão nuclear, com suas distintas metodologias e seu caráter interdisciplinar, pode ser bastante útil.

A descoberta da fissão nuclear, como um estudo de caso, pode mostrar que há estrutura e racionalidade em uma descoberta. Diferentemente das concepções empiristas mais ingênuas, essa nova racionalidade envolve a subdeterminação de teorias pelos dados e valores epistêmicos e contextuais na prática científica. No caso da vindicação errônea de Fermi e seus colaboradores da ‘descoberta’ dos elementos transurânicos, por exemplo, as evidências que eles tinham levavam à conclusão da produção daqueles novos elementos. Fermi foi bastante cauteloso no artigo em que anunciou sua ‘descoberta’, intitulando-o “Possível produção de elementos de número atômico maior que 92” (FERMI, 1934). Ele explica em sua Conferência Nobel (FERMI, 1938) que seu grupo tentou identificar os elementos produzidos com a irradiação do urânio, mas que esses produtos não eram nem isótopos do próprio urânio, nem elementos de números atômicos tão baixos quanto 86. Essa evidência negativa somada aos resultados teóricos de outras irradiações, que produziam sempre elementos de número atômico mais alto, resultou em uma subdeterminação da teoria. Naquele instante, prevaleceu a convicção teórica – apesar de as evidências serem sabidamente insuficientes e de terem conhecimento da conjectura de Noddack, que apontava para outra direção.

A questão da subdeterminação, e como ela foi resolvida, cinco anos depois, mostra uma característica típica da prática científica, que envolve dinâmicas entre hipóteses e teorias que usualmente são geradas e resolvidas pela negociação de valores entre os membros da comunidade. Ou seja, entre outros aspectos, sua abordagem pode promover a compreensão da coletividade da ciência e sua importância para a objetividade do conhecimento científico – resgate que vem sendo promovido numa convergência entre as áreas de filosofia e sociologia da ciência nas duas últimas décadas. Neste particular, as contribuições de McMullin (1983) e Longino (1990) podem ser bastante esclarecedoras quanto às relações entre ciência e valores.

Mais um ponto pertinente que pode ser levantado com a abordagem histórica da fissão nuclear relaciona-se aos experimentos cruciais (LAKATOS, 1974). É interessante constatar que dois dos participantes ativos na descoberta, Hahn e Frisch, fizeram menção a experimentos cruciais ou determinantes. Em sua Conferência Nobel (HAHN, 1946, p. 59), Hahn afirma que, a partir dos resultados do experimento do ciclo de sais de bário “somente se poderia concluir que o produto ativo e o portador eram quimicamente idênticos, isto é, eram o bário”. Esse experimento determinante, segundo Hahn, foi desenvolvido após receberem a carta com

a antecipação da interpretação de Meitner e Frisch. Já Frisch (1967, p. 48) é ainda mais incisivo, dizendo ter tido que ser “empurrado a fazer o experimento crucial, em 13 de janeiro”, em que usou uma câmara de ionização, partindo das premissas do primeiro artigo escrito por ele e sua tia (Meitner). Esse artigo foi submetido à *Nature*, juntamente com outro que escreveu com Meitner, mas que foi publicado uma semana depois.

Apesar de apontarem esses experimentos como determinantes, foi a interpretação dos mesmos que gerou perplexidade na comunidade científica. Logo após chegar à Copenhague, ou seja, antes de terminar de escrever o primeiro artigo e de desenvolver o segundo, Frisch encontrou-se com Niels Bohr. Segundo ele (FRISCH, 1967, p. 47), não foi necessário sequer terminar de explicar a hipótese desenvolvida por eles durante o Natal. Bohr ficou impressionado por a comunidade não ter reconhecido o fenômeno antes. Embarcou para os Estados Unidos, para onde levou a notícia em primeira mão (STUEWER, 1985). Lá, houve mais perplexidade: com a chegada da notícia em Berkeley, Glenn Seaborg, que acompanhava o andamento das investigações com irradiações de nêutrons desde seu início, em 1934, sentiu-se “não só empolgado pela beleza do trabalho, mas desgostoso pela [sua] inabilidade em chegar, [ele] próprio, a essa interpretação, apesar de anos de reflexão sobre o tema” (SEABORG, 2007). Luis Alvarez, também em Berkeley, ficou sabendo, pelo jornal *San Francisco Chronicle*, enquanto estava em uma barbearia, que Niels Bohr, recém-chegado da Europa, trazia a notícia da cisão do urânio. Parou o barbeiro imediatamente e “correu para o Laboratório de Radiação para espalhar a notícia” (ALVAREZ, 1991, p. 72).

Os experimentos de Frisch, na física, assim como os de Hahn e Strassmann, na química, foram repetidos quase simultaneamente pela comunidade que, antes deles, já aceitara a nova hipótese. Assim, cabe a reflexão sobre experimentos cruciais e sua verdadeira relevância para a aceitação de uma hipótese ou teoria (PLEITEZ, 1998) – e, por conseguinte, a discussão sobre a adequação empírica e seu valor dentro da atividade científica. O caso dos experimentos cruciais da fissão nuclear tem semelhanças com o do sistema copernicano, que foi aceito muito antes que seu experimento definitivo, de 1848 (LAKATOS, 1978). Guardadas as proporções – especialmente temporais – a fissão nuclear foi aceita pela comunidade com o artigo de Meitner e Frisch (1939), comunicado nos Estados Unidos, sobretudo por Bohr. Os experimentos do ciclo e da identificação do criptônio, de Hahn e Strassmann, assim como o da câmara ionizadora de Frisch (1939) foram, assim como tantos outros, realizados quase ao mesmo tempo, feitos para corroborar uma hipótese já bem aceita.

Importa, ainda, salientar que justamente essa coletividade, que promove a pluralidade metodológica da ciência e que desconstrói sua imagem algorítmica, também permite desmistificar a visão individualista da ciência – produto, entre outras coisas, da abordagem anacrônica das descobertas científicas. Livros didáticos e meios de divulgação científica estão repletos de atribuições de descobertas bem determinadas, mas muito pouco aprofundadas. No caso da fissão nuclear, por anos, Hahn foi o aclamado descobridor da fissão nuclear, e Meitner, por pouco, não foi relegada ao esquecimento (SIME, 1989; 2010). Isso, no entanto, não foi produto da educação e da divulgação científica, mas da própria comunidade, que escolheu essa atribuição, conforme o contexto interno da ciência – envolvendo uma acirrada competição entre equipes de pesquisa de diferentes países –, que era, por sua vez, reflexo do contexto político da Europa das décadas de 1930 e 40 (DAHL, 2002). A relevância da história da fissão, neste sentido, é que o caráter coletivo de sua descoberta não se deveu apenas às pesquisas prévias de outros cientistas ou grupos de pesquisas; ela própria só ocorreu como resultado da interdisciplinaridade e das trocas de conhecimentos entre Hahn e Meitner. Esses intercâmbios de conhecimentos, tão notórios na vida profissional colaborativa dos cientistas, são um aspecto bastante importante da ciência contemporânea, desenvolvida em grandes grupos.

A interdisciplinaridade do episódio histórico aqui explorado é mais que um trabalho coletivo entre químicos e físicos, pois vai além da justaposição de suas diferenciadas perspectivas metodológicas e axiológicas. Cabe salientar que a divisão em disciplinas favoreceu a especialização e o desenvolvimento de diversas áreas científicas; entretanto, sendo os problemas os maiores determinantes da direção de evolução de uma determinada área ou linha de pesquisa, frequentemente são eles que induzem os cientistas a buscar, em outras áreas de conhecimento, respostas, métodos ou valores para solucioná-los. Logicamente, o fato de que a física nuclear da década de 1930 tenha tido a necessidade de uma abordagem interdisciplinar para se desenvolver não implica que a ciência possa prescindir da especialização promovida pelo progresso disciplinar; pelo contrário, é fundamental a especialização de disciplinas para que a interdisciplinaridade – ou seja, o intercâmbio de métodos, valores e objetos – possa ocorrer.

Do ponto de vista educacional, no entanto, as definições de interdisciplinaridade mostram-se um pouco mais complexas. Se uma perspectiva salvacionista do tema teve espaço, anteriormente, em pesquisas acadêmicas e em documentos oficiais, atualmente avaliam-se muito mais criticamente suas potencialidades. Alternativas metodológicas como as ilhas de racionalidade, a abordagem temática e aquelas pautadas nas relações Ciência, Tecnologia e Sociedade (CTS) pressupõem

a interdisciplinaridade educacional e a definem e abordam de acordo com suas premissas teóricas (RICARDO, 2005). O presente trabalho, na linha de história, filosofia e sociologia da ciência no ensino, apesar de estar mais voltado para a questão da interdisciplinaridade epistemológica, como modo de apresentar e abordar certos aspectos da natureza da ciência, pretende, em última instância, servir de base para uma compreensão interdisciplinar dos conteúdos de história, filosofia, física e química.

A física nuclear, desde suas origens na radioatividade, é emblemática em um aspecto inusitado, como em nenhum outro momento anterior na história da ciência: o protagonismo de cientistas mulheres no desenvolvimento científico. O legado de Madame Curie, juntamente a uma conjuntura externa de abertura dos espaços intelectuais às mulheres, fruto da primeira onda do movimento feminista, talvez tenha sido peça chave para que, na radioquímica especificamente, tantas contribuições tenham sido feitas por Lise Meitner, Irène Curie e Ida Noddack. Naturalmente, isso não ocorreu sem grandes empecilhos. Marie Curie, por exemplo, quase não foi nomeada ao Prêmio Nobel de Física de 1903, graças a uma carta redigida ao Comitê Nobel por quatro físicos franceses que, mesmo familiarizados com seu trabalho, optaram por indicar somente Pierre Curie e Henri Becquerel (QUINN, 2011; CORDEIRO, 2013). Sime (1996) também mostra as dificuldades sofridas por Lise Meitner que, mesmo sendo uma doutora bastante qualificada, passou anos investigando com Otto Hahn sem quaisquer rendimentos – e sem, ao menos, poder utilizar a entrada principal do laboratório ou circular por outras salas do prédio. Apesar dessas e de outras resistências tácitas típicas da cultura de seu tempo, no entanto, sua perseverança foi mais forte e ela tornou-se uma das maiores especialistas em radioquímica de seu tempo. A julgar pelas desigualdades de gênero prevalentes até os dias atuais na ciência (SCHIEBINGER, 2001), não seria exagero inferir que as histórias de Ida Noddack e Irène Joliot-Curie também tenham sido permeadas por obstáculos dessa sorte.

Estudos têm mostrado que abordagens mais contextualizadas historicamente no ensino de ciências tem a potencialidade de diminuir a evasão de mulheres e outras minorias sociais. Esses grupos raramente têm exemplos a se espelhar na ciência, fato que tem relação direta com a segurança dessas pessoas em se aventurar por carreiras científicas e tecnológicas (BUCK *et al.*, 2008; KAHVECI; SOUTHERLAND; GILMER, 2008; JOHNSON, 2007). Uma aula sobre fissão nuclear centrada em seus aspectos históricos pode, entre os outros aspectos já frisados, promover um debate acerca das contribuições científicas das mulheres, que por vezes são suprimidas dos livros didáticos, e das dificuldades superadas por essas cientistas. É essencial, no entanto, que não se caia na armadilha de, tratando

tais mulheres como geniais, pintá-las como exceções que confirmam a regra: a de que apenas mulheres muito especiais podem empreender a atividade científica.

Certas vivências se repetem no mundo científico; no início deste trabalho, apontou-se que, durante suas pesquisas sobre irradiações com nêutrons, Lise Meitner e Otto Hahn, em diversos aspectos, reviveram dificuldades similares às que vivenciaram quando investigaram as emanações e participaram da descoberta dos isótopos. Emilio Segré, membro da equipe italiana que ‘descobriu’ os transurânicos, já trabalhando nos Estados Unidos, em Berkeley, em maio de 1939, esteve próximo de descobrir, finalmente, o verdadeiro elemento 93; entretanto, a (falsa) premissa química de que esse elemento deveria ser semelhante ao seu homólogo mais baixo, o rênio, fez com que desconsiderasse a hipótese. Ele lembra que a natureza nem sempre se mostra fácil de ler, mas afirma: “acima de tudo, parece-me que a mente humana enxerga apenas aquilo que espera [enxergar]” (SEGRÉ, 1989, p. 43). Certamente, quando conhecida cuidadosamente, a história da fissão nuclear, assim como toda a história da ciência, pode revelar diversos aspectos não somente da atividade científica, mas também, como bem frisa Segré, do próprio ato de conhecer.

### **Referências**

- ALVAREZ, L. W. **Adventures of a physicist**. Nova York: Basic Books, 1987.
- BUCK, G. A.; CLARK, V. L. P.; LESLIE-PELECKY, D.; LU, Y.; CERDALIZARRAGA, P. Examining the cognitive processes used by adolescent girls and women scientists in identifying science role models: a feminist approach. **Science Education**, v. 92, p. 688, 2008.
- CORDEIRO, M. D. Questões de gênero na ciência e na educação científica: uma discussão centrada no Prêmio Nobel de Física de 1903. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISADORES EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS, IX, 2013, Águas de Lindoia. **Atas...**
- CORDEIRO, M. D.; PEDUZZI, L. O. Q. As Conferências Nobel de Marie e Pierre Curie: a gênese da radioatividade no ensino. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 27, n. 3, 2010.
- CRAWFORD, E.; SIME, R. L.; WALKER, M. A Nobel tale of postwar injustice. **Physics Today**, p. 26, set. 1997.

CURIE, M. (1911). Radium and the new concepts in chemistry. In: **Nobel Lectures, Chemistry 1901-1921**. Amsterdam: Elsevier, 1966.

DAHL, P. F. **From nuclear transmutation to nuclear fission, 1932-1939**. Bristol e Filadélfia: Institute of Physics Publishing, 2002.

EISBERG, R.; RESNICK, R. **Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei, and Particles**. 2. ed. Nova York: John Wiley and Sons, 1985.

FERMI, E. Possible production of elements of atomic number higher than 92. **Nature**, v. 133, p. 898, 1934.

FERMI, E. (1938). Artificial radioactivity produced by neutron bombardment. In: **Nobel Lectures, Physics 1922-1941**. Amsterdam: Elsevier, 1965.

FRISCH, O. R. Physical evidence for the division of heavy nuclei under neutron bombardment. **Nature**, v. 143, p. 276, 1939.

FRISCH, O. R. Discovery of fission: how it all began. **Physics Today**, nov. 1967.

HAHN, O. From the natural transmutations of uranium to its artificial fission (1946). In: **Nobel Lectures, Chemistry, 1942-1962**. Amsterdam: Elsevier Publishing Company, 1964.

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, jan. 1939a.

HAHN, O.; STRASSMANN, F. Nachweis der Entstehung activer Bariumisotope aus Uran und Thorium durch Neutronenbestrahlung; Nachweis weiterer aktiver Bruchstücke bei der Uranspaltung. **Die Naturwissenschaften**, v. 27, n. 6, p. 89, fev. 1939b.

HAHN, O.; STRASSMANN, F. (1939a). Concerning the existence of alkaline earth metals resulting from neutron irradiation of uranium. **American Journal of Physics**, v. 32, n. 1, p. 9, 1964.

HAHN, O.; STRASSMANN, F. (1939b). Proof of the formation of active isotopes of barium from uranium and thorium irradiated with neutrons; proof of the existence of more active fragments produced by uranium fission. **Journal of Chemical Education**, p. 363, 1989.

HANSON, N. R. An anatomy of Discovery. **The Journal of Philosophy**, v. 64, n. 11, p. 321, jun. 1967.

HOOK, E. B. Dissonância interdisciplinar e prematuridade: a sugestão de Ida Noddack de fissão nuclear. In: HOOK, E. B. (Org.). **Prematuridade na descoberta científica: sobre resistência e negligência**. São Paulo: Perspectiva, 2007.

JOHNSON, A. C. Unintended consequences: how science professors discourage women of color. **Science Education**, v. 91, p. 805, 2007.

KAHVECI, A.; SOUTHERLAND, S. A.; GILMER, P. J. From marginality to legitimate peripherality: understanding the essential functions of a women's program. **Science Education**, v. 92, p. 33, 2008.

KUHN, T. S. **The structure of scientific revolutions**. 3. ed. Chicago e Londres: University of Chicago Press, 1996.

KUHN, T. S. **A tensão essencial**. Lisboa: Edições 70, 2009.

LAKATOS, I. The role of crucial experiments in science. **Studies in History and Philosophy of Science**, v. 4, n. 4, 1974.

LAKATOS, I. Por que é que o programa de investigação de Copérnico suplantou o de Ptolomeu? In: \_\_\_\_\_. **História da ciência e suas reconstruções racionais e outros ensaios**. Lisboa: Edições 70, 1978.

LONGINO, H. **Science as a social knowledge**. Princeton: Princeton University Press, 1990.

MARQUES, A. **Energia Nuclear e Adjacências**. Rio de Janeiro: Ed. UERJ, 2009.

McMULLIN, E. Values in Science. In: **PSA: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association**. The University of Chicago Press, v. 2: Symposia and Invited Papers, p. 3, 1983.

MEITNER, L.; FRISCH, O. R. Desintegration of uranium by neutrons: a new type of nuclear reaction. **Nature**, v. 143, p. 239-240, fev. 1939.

NICKLES, T. Discovery. In: NEWTON-SMITH, W. H. (Ed.). **A companion to the philosophy of science**. Blackwell Publishers, 2000.

NODDACK, I. Über das Element 93. **Zeitschrift fur Angewandte Chemie**, v. 47, p. 653, set. 1934.

PATY, M. **A física do século XX**. Aparecida: Ideias & Letras, 2009.

PÉREZ, D. G.; MONTORO, I. F.; ALÍS, J. C.; CACHAPUZ, A.; PRAIA, J. Para uma imagem não deformada do trabalho científico. **Ciência & Educação**, v. 7, n. 2, p. 125, 2001.

PLEITEZ, V. Quando uma experiência é crucial? **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 21, n. 2, jun. 1999.

QUINN, S. **Marie Curie: a life** (kindle e-book). Plunkett Lake Press, 2011.

RICARDO, E. C. **Competências, interdisciplinaridade, contextualização**: dos Parâmetros Curriculares Nacionais a uma compreensão para o ensino de ciências. 2005. 257 f. Tese (Doutorado em Educação Científica e Tecnológica) – Programa de Pós-Graduação em Educação Científica e Tecnológica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

SCHIEBINGER, L. **O feminismo mudou a ciência?** Bauru, SP: EDUSC, 2001.

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.

SEGRÉ, E. The discovery of nuclear fission. **Physics today**, p. 38, jul. 1989.

SIME, R. L. Lise Meitner and the discovery of fission. **Journal of Chemical Education**, v. 66, n. 5, mai. 1989.

SIME, R. L. **Lise Meitner: a life in physics**. Berkeley, Los Angeles, Londres: University of California Press, 1996.

SIME, R. L. The search for transurium elements and the discovery of nuclear fission. **Physics in Perspective**, v. 2, p. 48, 2000.

SIME, R. L. An inconvenient history: the Nuclear Fission display at the Deutsches Museum. **Physics in Perspective**, v. 12, p. 190, 2010.

SODDY, F. The origins of the conceptions of isotopes (1922). In: **Nobel Lectures, Chemistry, 1901-1921**. Amsterdam: Elsevier Publishing Company, 1966.

SPARBERG, E. B. A study of the discovery of fission. **American Journal of Physics**, v. 32, p. 2, jan. 1964.

SPARBERG, E. B. Hindsight and the history of chemistry. **Journal of Chemical Education**, v. 73, n. 3, p. 199, mar. 1996.

STUEWER, R. H. Bringing the news of fission to America. **Physics Today**, out. 1985.