

Valores, Métodos e Evidências: Objetividade e Racionalidade na Descoberta da Fissão Nuclear

(Values, Methods and Evidences: Objectivity and Rationality in the Discovery of Nuclear Fission)

MARINÊS DOMINGUES CORDEIRO e LUIZ O. Q. PEDUZZI

Universidade Federal de Santa Catarina (marinesdc@outlook.com, luizpeduzzi@gmail.com)

Resumo. Em filosofia, diz-se que teorias são subdeterminadas pelas evidências, isto é, que não há um conjunto de evidências capaz de determinar uma escolha teórica. Essa questão fica clara no estudo de caso histórico da descoberta da fissão nuclear. Os caminhos tortuosos trilhados por físicos e químicos nucleares mostram as complexidades inerentes ao trabalho científico e os juízos de valor necessários para se guiar a prática científica e resolver anomalias teóricas, metodológicas e mesmo axiológicas. Com o auxílio das visões de ciência de Larry Laudan e Helen Longino, especialmente profícuas para esse episódio, este trabalho busca mostrar que, apesar disso, não se caiu em um abismo ilógico ou irracional nesse período. Uma abordagem educacional desse episódio, centrada nos problemas, na coletividade e na intersubjetividade, tem grande potencialidade para a educação científica.

Abstract. In philosophy, it is said that the theories are underdetermined by evidence, namely that there is no body of evidence able to determine a theory choice. This issue is made clear in the case study on the history of the discovery of nuclear fission. The tortuous paths taken by nuclear physicists and chemists show the complexities inherent to the scientific work and the value judgments necessary to guide scientific practice and to solve anomalies of theoretical, methodological and even axiological nature. Leaning on Larry Laudan and Helen Longino's science views, which are especially fruitful for this episode, this paper seeks to show that, despite this, nuclear science did not fall into an illogical or irrational abyss in that period. An educational approach to that episode, centered on the problematic nature of science, its collectivity and intersubjectivity, keeps great potential for science education.

Palavras-chave: fissão nuclear, racionalidade, objetividade, subdeterminação

Keyword: nuclear fission, rationality, objectivity, underdetermination

Introdução

Até a descoberta da radioatividade natural, em 1896, o urânio, conhecido desde 1789, era considerado um elemento de pouca importância, sendo peculiar apenas por ter número atômico 92, o maior até então conhecido. A partir do século XX, o urânio passou a protagonizar as investigações atômicas e, mais tarde, com o modelo atômico de Rutherford-Bohr e a transmutação artificial dos elementos, esteve envolvido em uma questão que cativava os pesquisadores das recém-inauguradas áreas da física nuclear e da radioquímica: seria possível produzir elementos de número atômico maior que o urânio? Para responder esta questão era necessário superar um obstáculo empírico da época: a restrita disponibilidade de projéteis, até então carregados – prótons e partículas alfa, sobretudo – que não superavam a barreira coulombiana dos grandes núcleos. Apenas na década de 1930 novas perspectivas de investigação se desnudaram. Usando o nêutron para irradiar núcleos de urânio, seria finalmente possível tentar produzir elementos transurânicos.

Curiosamente, o urânio é um elemento muito mais sofisticado do que se compreendia à época. Atualmente localizado na série dos actinídeos, sabe-se que ele possui elétrons na camada $5f$, apesar de ser quimicamente similar aos elementos de transição. Havia, na década de 1930, uma discussão acerca do grupo $5f$, dos actinídeos, após a organização, feita por Bohr, do grupo $4f$, dos lantanídeos. Os cientistas que investigavam os núcleos, no entanto, tratavam o urânio como elemento de transição, de acordo com sua posição vigente na tabela periódica, uma casa abaixo do tungstênio ($Z=74$) (SIME, 2000).

Em Roma, no ano de 1934, poucas semanas após a descoberta da radioatividade artificial por Irène e Frédéric Joliot-Curie, Enrico Fermi e sua equipe buscaram reproduzir esse fenômeno por meio do bombardeamento do urânio com nêutrons. Compreenderam os resultados como o decaimento beta do urânio – a emissão de elétrons produzia, segundo sua interpretação, o elemento de número atômico 93. Somente cinco anos mais tarde confirmou-se que o que fora produzido no laboratório romano não eram elementos transurânicos, mas elementos conhecidos muito mais leves que ele, em virtude da quebra dos núcleos.

Como o urânio, a fissão nuclear é um fenômeno insidioso. Seus produtos decaem em longas séries com emissões de elétrons. Deste modo, elementos produzidos por fissão nuclear podem se encontrar em diversas seções da tabela periódica. Como não esperavam ter provocado a cisão do núcleo, os cientistas à época – e não apenas a equipe de Fermi, como também Otto Hahn e Lise Meitner e os Joliot-Curie, autoridades em radioquímica – ‘conseguiram discernir’ o que achavam ser três séries de decaimento dos então supostos transurânicos, duas delas sendo bastante similares aos decaimentos dos próprios produtos da fissão nuclear que, de fato, estavam sendo produzidos.

Um conceito filosófico bastante importante desde as primeiras teses pós-positivistas é o de subdeterminação. No caso de teorias subdeterminadas pelos fatos, por exemplo, o conceito quer dizer que não há garantias lógicas de que um conjunto de dados empíricos seja capaz de determinar univocamente uma única teoria. Diante da subdeterminação, portanto, a interpretação do cientista é guiada pelas suas suposições e convicções teóricas. Relativamente ao bombardeamento de urânio com nêutrons, as teorias que guiavam os cientistas tinham naturezas distintas: a primeira, proveniente da química, dizia que o urânio e os possíveis elementos transurânicos se comportariam como seus homólogos (à época) na tabela periódica; a segunda, de natureza física, baseada no modelo nuclear de George Gamow e na experiência histórica, asseverava a

impossibilidade de uma grande quebra dos núcleos. Assim, em face aos dados e às teorias, os elementos transurânicos fizeram parte dos cânones da ciência nuclear por cinco anos.

Sime (2000, p. 49) qualifica a “equivocada busca pelos elementos transurânicos [como] uma boa ilustração da ‘ilogicidade do progresso na ciência’, quando o desconhecido não é uma mera extrapolação do conhecido”. É interessante, no entanto, que a subdeterminação dos fatos pela teoria – ou seja, o desconhecido não ser uma mera extrapolação do conhecido – seja efetivamente uma característica da ciência, defendida por diversos filósofos. Diferentemente do que compreende Sime (2000), no entanto, esse aspecto básico da atividade científica não é necessariamente sinal de falta de lógica ou, em outras palavras, de irracionalidade.

Este trabalho busca apresentar historicamente as investigações sobre os supostos transurânicos, desenvolvidas por Lise Meitner e Otto Hahn (e mais tarde por Fritz Strassmann), que os levaram à descoberta da fissão. Além disso, com o auxílio da tese filosófica de Laudan (1984), almeja-se mostrar que os caminhos tortuosos trilhados pela comunidade científica e, sobretudo, por esses dois cientistas, não são simbólicos da ilogicidade; pelo contrário, o permanente ajuste entre fatos, métodos e objetivos e valores, feitos por eles, são característica justamente da racionalidade da ciência.

Em termos de potencial educacional, este episódio da história da física moderna traz consigo uma rica variedade de aspectos da natureza da ciência, que têm tido grande espaço na literatura especializada em educação científica. Além disso, todas as reflexões deste artigo estão fundamentadas em uma linha mais atual da filosofia da ciência, protagonizada por valores e o papel desempenhado por eles na atividade científica. Esse pano de fundo filosófico não é apenas profícuo nas possibilidades de reinterpretação de conceitos como objetividade e racionalidade, mas também para um ensino de ciências que tenha o intuito de discutir a ciência tanto do ponto de vista conceitual como epistemológico.

Racionalidade, objetividade e valores

Desde o fim da hegemonia do positivismo lógico, teses dissonantes acerca da ciência e de seu progresso foram propostas por vários filósofos. Apesar das enormes diferenças, há quatro concepções que são comuns a variadas teses filosóficas: o objetivo geral da ciência é a construção do conhecimento teórico; teorias são subdeterminadas pelas evidências; as observações ocorrem relativamente a um corpo teórico, e as

escolhas na ciência são pautadas por juízos e negociações de valores. Essas concepções formaram uma base sólida para a construção de diversas teses, sempre em oposição às ideias positivistas (McMULLIN, 1983).

Entre os filósofos que se aprofundaram na análise da relação entre juízos teóricos e de valor, a tendência de diversificação filosófica foi também bastante intensa. Kuhn (2009), por exemplo, afirmava que os juízos de valor, especialmente em relação a certos valores esperados nas teorias científicas, eram feitos pelos cientistas, em suas escolhas teóricas, o que não acarretava necessariamente em irracionalidade. McMullin (1983), por sua vez, compreendia que a presença de certos valores nas teorias científicas era testemunho de que a ciência se aproxima da verdade – em outras palavras, ele interpretava a relação entre ciência e valores a partir de uma perspectiva realista crítica. Sendo um antirrealista, Laudan (1984) defendia justamente o contrário – não existem argumentos lógicos que garantam o caráter realista do conhecimento científico – o que não significa que a ciência seja irracional. Longino (1990), focando na coletividade e na intersubjetividade da ciência propõe, igualmente, que os juízos de valor não afetam a objetividade da ciência, desde que se salvguarde a ampla circulação do conhecimento e os espaços de crítica intersubjetiva.

Dois aspectos essenciais das teses de Laudan (1984) e Longino (1990) serão protagonistas neste trabalho: os conceitos de racionalidade e objetividade. No relato positivista da ciência, racionalidade seria a capacidade dos cientistas de seguirem certos procedimentos na investigação científica, além de se apoiarem em determinadas regras em momentos de escolhas teóricas. Objetividade, por sua vez, era uma característica do conhecimento e do método: o melhor conhecimento (e, para realistas, o mais verdadeiro) era aquele produzido pelo método racional (LONGINO, 1990). Eram duas concepções rígidas e intrinsecamente ligadas. O que estes dois filósofos propõem é uma revisão destes conceitos, perdendo a rigidez inalcançável do positivismo, mas mantendo sua íntima correlação.

Para Laudan (1984), a subdeterminação tem efeitos profundos e em diversos níveis da atividade científica, não apenas em evidências e teorias. Para ele, a escolha dos fatos é subdeterminada pelas regras metodológicas (que podem envolver métodos e procedimentos típicos da ciência ou de determinadas subdisciplinas), que, por sua vez, são subdeterminadas pelos valores e objetivos da ciência. Em virtude dessa característica inescapável, os cientistas veem-se reiteradamente na posição de buscar os melhores ajustes entre fatos, métodos e valores – compartilhados ou subjetivos – no

esforço constante para alcançar a teoria melhor suportada por evidências e métodos. Essa interrelação é o que Laudan (1984) batizou de sistema triádico de justificação – para ele, simbólico da racionalidade na ciência.

Em linhas gerais, Longino (1990) posiciona-se semelhantemente em relação à racionalidade. Como teorias são subdeterminadas pelas evidências, é impossível esperar que a garantia da racionalidade seja em referência a um conjunto de evidências empíricas. São as ponderações, feitas coletivamente, sobre relevância da evidência em relação às interpretações teóricas que podem ser um padrão de racionalidade – e para isso, é necessária a manutenção de espaços e circulação da crítica intersubjetiva. Nessa busca por uma prática científica aberta à crítica, potencializa-se a objetividade da ciência.

A relação entre ciência e valores é determinante para Longino (1990). Os valores cognitivos da ciência, aqueles que tradicionalmente são buscados pelos cientistas, como precisão, coerência, consistência, alcance, fertilidade, plausibilidade, em geral não são os únicos a fazer parte da escolha teórica ou de outras etapas da prática. Muitas vezes, valores tipicamente contextuais entram na prática científica. Cabe à comunidade, nos processos intersubjetivos de crítica, detectar e excluir as preferências subjetivas nocivas à ciência (aos objetivos da ciência naquele momento sócio-histórico), e manter aqueles valores que, apesar de não serem tradicionalmente considerados cognitivos, desempenham papel constitutivo na ciência.

Hahn e Meitner: interdisciplinaridade e modelo reticulado de justificação

Em uma série de artigos publicados entre 1934 e 1935, o grupo italiano liderado por Enrico Fermi descrevia como conseguiu expandir as fronteiras da tabela periódica unindo duas importantes descobertas da física nuclear: o nêutron e a radioatividade induzida. A exemplo de Irène e Frédéric Joliot-Curie, que investigaram, na Universidade de Paris, núcleos com o bombardeamento de partículas alfa, produzindo elementos artificialmente radioativos, os italianos buscaram provocar as emissões radioativas com o auxílio de nêutrons. Tendo em vista que o nêutron não sofre repulsão com a barreira coulombiana, puderam bombardear quase todos os elementos do sistema periódico, inclusive o urânio. Como esses experimentos produziam isótopos artificiais que decaíam com emissões de um elétron, gerando elementos de maior número atômico, entenderam ter produzido o elemento de $Z=93$, o primeiro elemento transurânico, a partir do bombardeamento do urânio.

Os artigos da equipe romana ganharam rápida notoriedade. Com a ascensão do nazismo ao poder na Alemanha, além de outros acontecimentos globais, os países europeus tornavam-se latentemente bélicos. Nesse contexto, conquistas científicas tinham significado político especial. A entrada do renomado Fermi na física nuclear e a consequente ‘descoberta’ dos transurânicos foi um marco de uma corrida científica que se iniciava impulsionada pelo clima do pré-Guerra (SIME, 2000), apesar das relações amistosas e pacíficas entre os cientistas dos países que já ensaiavam suas posturas inimigas.

Tão ou mais preponderante que as questões políticas eram as expectativas teóricas dos cientistas que buscavam compreender a limitação superior da tabela periódica. Nos anos 1920, clamou-se duas vezes a descoberta de tais elementos, que foram quase imediatamente refutadas (QUILL, 1938). Com a associação dos nêutrons e da radioatividade induzida, no entanto, sua produção era bastante plausível e, de fato, esperada. O recebimento da notícia da produção de transurânicos pelo grupo italiano, enfim, envolveu ampla aceitação pela comunidade – exceto por duas objeções: do químico Aristid von Grosse, que supunha que aqueles produtos da irradiação do urânio se assemelhavam ao protactínio, e da química analítica Ida Noddack, que questionava diversos pontos dos trabalhos dos italianos.

Em 1935, o foco das investigações deixa de ser em Roma, e passa a ser em Berlim, em virtude da colaboração de dois dos maiores especialistas em radioquímica, Hahn e Meitner. Parceiros de trabalho desde 1909, quando Lise se mudou de Viena para Berlim, ambos vinham executando suas pesquisas em áreas diferentes havia doze anos, embora não tivessem deixado de ser grandes amigos naquele ínterim. A possibilidade do protactínio fez com que voltassem a trabalhar juntos – e assim continuaram até 1939, com a efetiva descoberta da fissão nuclear, apesar da distância que lhes veio se interpor.

Como o próprio Hahn (1946) ressaltava, eles tinham os meios de investigar a possibilidade de produção do protactínio, caso ele fosse efetivamente um produto do bombardeamento de urânio com nêutrons, além do notável conhecimento sobre o elemento. Mesmo excluindo, além do protactínio, o urânio, o actínio e o tório, sentiram-se impelidos a continuar: do ponto de vista radioquímico, os produtos daquela reação eram singularmente envolventes.

Entre 1935 e 1937, Meitner e Hahn dedicaram-se à compreensão das séries de decaimento do urânio e dos comportamentos químicos dos produtos das séries. Como afirma Sime (2000), conseguiram discernir três decaimentos beta do urânio pela captura

de um nêutron, com suas respectivas meia-vidas. Meitner e Hahn consideraram que o urânio ocupava a posição imediatamente abaixo do tungstênio na tabela periódica, ou seja, consideraram-no um elemento de transição (fig. 1), apesar da discussão que ocorria na época sobre a existência de uma série de actínídeos. Com sucessivos decaimentos beta, portanto, seus produtos se posicionariam imediatamente abaixo do rênio, do ósmio, do irídio, etc. Essa extrapolação os levou a utilizar o prefixo sânscrito *eka* (“um”) proposto por Mendeleev para os elementos faltantes na tabela, em relação aos vizinhos conhecidos. A primeira série parecia produzir um isótopo de urânio de dez segundos, que decaía emitindo elétrons em eka-rênio (2,2 minutos), eka-ósmio (59 segundos), eka-irídio (66 horas), eka-platina (2,5 horas) e o que imaginavam ser um eka-ouro de meia-vida desconhecida. Uma segunda série de decaimento gerava um isótopo do urânio de meia-vida de 40 segundos, seguido do que eles supuseram ser eka-rênio (16 minutos), eka-ósmio (5,7 horas) e eka-irídio (66h). A terceira série que discerniram era produzida por um isótopo do urânio de 23 minutos, que decaía em um isótopo de eka-rênio de meia-vida indeterminada.

Era aparentemente um grande avanço na consolidação daquele conhecimento: as séries de decaimento foram distinguidas e, paulatinamente, conhecia-se o comportamento químico dos supostos elementos transurânicos. Contudo, a construção desse modelo, que tinha como bases fundamentais os fatos de que o isótopo de urânio produzido decaía em longas séries de emissões beta e de que esses produtos se assemelhavam, quimicamente, aos seus homólogos superiores (rênio, ósmio, irídio) começava a mostrar suas anomalias.

Em termos de valores, portanto, a construção dos esquemas de decaimento do urânio irradiado com nêutrons era adequada empiricamente. Havia, por um lado, a sólida corroboração empírica de que aqueles elementos eram emissores beta; por outro, esses produtos se comportavam similarmente aos demais elementos conhecidos. Mais um aspecto relevante desse conhecimento era o fato de ser consistente com o que se esperava da época: os novos transurânicos se comportavam como seus homólogos superiores da tabela, como previa a química tradicional.

0	I																II	
1	H																He	
2	1																2	
0	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII										
He	Li	Be	B	C	N	O	F	Ne										
2	3	4	5	6	7	8	9	10										
Ne	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar										
10	11	12	13	14	15	16	17	18										
0	Ia	IIa	IIIa	IVa	Va	VIa	VIIa	VIIIa	Ib	IIb	IIIb	IVb	Vb	VIb	VIIb	VIIIb		
Ar	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
Kr	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Ma	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	J	X
36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
X	Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	-	Em
54	55	56	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
Em	-	Ra	Ac	Th	Pa	U												
86	87	88	89	90	91	92												
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18

Ce	Pr	Nd		Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tu	Yb	Cp	Seltene
58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	Erdmetalle

Figura 1 – Tabela periódica das décadas de 1920 e começo de 1930. Nota-se que tório, protactínio eram classificados como metais de transição, e não como actinídeos, classificação atualmente aceita.

Fonte: Sime, 2000

Os aspectos do conhecimento científico que se convencionou chamar de valores (cognitivos ou constitutivos), como adequação empírica e consistência, por exemplo, são assim compreendidos por não serem perfeitamente objetivos, em virtude de serem produtos de juízos dos cientistas. Mais do que parcialmente subjetivos, eles também não têm significado absoluto. Conhecimentos são valorados ou avaliados sempre em referência a algum corpo teórico.

No caso das séries de decaimento dos supostos transurânicos, portanto, a consistência exibida pelos modelos elaborados era relativa a uma expectativa química até então não contrariada sobre o comportamento dos elementos como previsto pelo sistema periódico. É interessante, então, que por outro lado tenha sido justamente em

termos de consistência que se mostraram as anomalias da interpretação: o isomerismo nuclear (possivelmente)¹ triplo e propagado naquelas séries de decaimento.

Isomerismo (ou isomeria) era um fenômeno bastante recente naquela época e, portanto, pouco conhecido e compreendido. Significa que um mesmo isótopo, criado da mesma forma (bombardeamento com nêutrons), apresenta tempos de meia-vida diferentes. No caso das séries do urânio, esse isomerismo era ainda mais anômalo pois era propagado pelas séries, ou seja, gerava isótopos idênticos de eka-rênio, eka-ósmio, eka-irídio, etc, mas de meias-vidas diferentes².

Essa não era a única fonte de inconsistências dos modelos de decaimento discernidos pelo grupo. O urânio, até então, não se mostrava como um grande emissor beta e seus vizinhos na tabela também não decaíam com a emissão de elétron mais do que duas vezes sucessivas. Repentinamente, a absorção de um nêutron mudava todo esse panorama e provocava não apenas uma, mas possivelmente três longas séries de emissão de elétrons (FRISCH, 1967).

Assim, até 1937 o que se tinha era a consolidação dos elementos transurânicos de número atômico até 96 e o estudo de suas propriedades. Eles eram, afinal, empiricamente adequados ao que se esperava deles, relativamente ao pretense posicionamento do urânio na tabela periódica. Além disso, a experiência histórica da física, aliada ao modelo nuclear da gota líquida de Gamow, garantia até o momento que os núcleos eram estruturas tão rígidas e coesas que o máximo que se poderia deles arrancar eram partículas alfa (ALVAREZ, 1987). De fato, esses dois aspectos falavam muito mais alto do que as inconsistências representadas pela insólita isomeria múltipla e propagada na série e pelo enigmático decaimento beta do urânio irradiado.

As incertezas oriundas dessas anomalias provocaram questionamentos de Meitner em relação aos processos químicos utilizados. Neste ponto, as diferenças disciplinares da equipe, antes profícuas, demonstraram-se um empecilho. Ela, encarregada das interpretações físicas dos resultados das investigações, precisava confiar nas escolhas incumbidas a Hahn e Strassmann, que definiam os melhores métodos de precipitação dos elementos transurânicos. Meitner relata ter pedido

¹ Como o urânio usado nas experiências era uma mistura dos isótopos 238 e 235 (muito mais raro), a melhor das hipóteses previa que o terceiro decaimento, possivelmente oriundo do urânio-235, não fosse isomérico aos outros dois, mas não havia certeza quanto a isso (FRISCH, 1967).

² Como afirma Frisch (1967), havia duas hipóteses para explicar o fenômeno do isomerismo à época: a de que existiam certas estruturas rígidas no núcleo que resistiam ao decaimento e a atualmente aceita, de que ele se devia a alterações no momento angular (*spin*) do núcleo ou de algum dos seus componentes antes de conseguir decair para estabilizar-se.

reiteradamente para que os métodos utilizados fossem revistos. A convicção empírica de Hahn, aliada ao convencimento da comunidade de que se tratavam efetivamente de transurânicos certamente reduziram a inquietação da física austríaca (SIME, 2000).

Desde uma perspectiva atual, pode-se observar que, dentre as alternativas de questão de investigação do grupo de Berlim, eles seguiram duas que dificultaram grandemente seus caminhos. A primeira, em relação à investigação das duas séries de decaimento já apresentadas pelo grupo de Fermi, na sequência de artigos publicados entre 1934 e 1935. Caso tivessem focado na terceira série de decaimento (3) – que, de fato, gerava transurânicos – possivelmente identificariam as propriedades do elemento 93 e notariam sua diferença em relação à química de seus supostos isótopos produzidos pelas duas primeiras séries (1) e (2) (SIME, 2000). Além disso, ao assumir, sem maiores investigações, que na parte filtrada das separações haveria apenas elementos pesados irradiados, como o urânio, o tório e o protoactínio, eles perderam a oportunidade de constatar lá elementos de baixo número atômico (SPARBERG, 1964). Ambas as linhas de investigação preteridas os levariam, potencialmente, à hipótese da fissão nuclear. Esta, contudo, é uma constatação bastante anacrônica, que não considera umas das características mais importantes da atividade científica, que é um testemunho – ironicamente, neste caso – de sua racionalidade: a de que ela é balizada por referenciais teóricos ou empíricos amplamente aceitos pela comunidade de sua época, naquele contexto.

Politicamente, a equipe de Berlim encontrava-se em uma situação complicada na Alemanha de 1937. Strassmann, contrário ao regime nazista, sofria perseguições políticas, que o levaram a buscar trabalho como assistente, em 1933, justamente com Meitner, austríaca de origem judaica, e Hahn, um pacifista. Contudo, a parceria dos três logo teve de ser reorganizada, pois em 1938, em virtude da perseguição nazista, Meitner fugiu para a Suécia subitamente.

Na França nesse mesmo período, Irène Joliot-Curie buscava, com a irradiação do tório e do urânio com nêutrons, provocar uma série de decaimento até então desconhecida. Em colaboração com o iugoslavo Pavel Savitch, observou que um dos produtos dessa irradiação, com meia-vida de 3,5h, aparentava ser o tório. Hahn, revisando esses resultados, concluiu que essa identidade não se sustentava. Insistindo na investigação, Joliot-Curie e Savitch chegaram à conclusão que, de fato, aquele produto não se comportava como o tório, mas como o lantânio (FRISCH, 1967). Naturalmente, aquilo impressionava, pois o lantânio, de $Z=57$, era um elemento de médio número

atômico e o resultado foi encarado como uma anomalia. Suas convicções teóricas os impediram de defender aquela identidade, prevenindo uma possível descoberta da fissão (SPARBERG, 1964). Eles supuseram que aquele fosse um elemento transurânico cujo comportamento ainda precisava ser mais profundamente investigado (HAHN, 1946).

Aquele produto de meia-vida de 3,5h inquietava a todos, inclusive Meitner que já trabalhava na Suécia, mas que continuava fazendo parte da equipe através de frequentes correspondências com Hahn (SIME, 1989). É neste momento histórico que um ajuste mais dinâmico e interativo entre evidências, métodos e valores começava a se mostrar necessário, dadas as crescentes complicações que a interpretação dos transurânicos provocava. Após diversos experimentos de separação, os dois químicos notaram que aquela meia-vida de 3,5h precipitava-se com preparados de bário. Pelo fato de o bário e o rádio serem homólogos, ou seja, ocuparem a coluna dos alcalinos-terrosos no sistema periódico, a conclusão de que “isótopos de rádio tinham sido produzidos era a única possível, pois, de acordo com as propriedades químicas, apenas o rádio e o bário poderiam ser considerados. O bário era, segundo o ponto de vista físico da época, impossível, e, portanto, sobrava apenas o rádio” (HAHN, 1946, p. 57). Hahn (1946) relata como foram cuidadosos na escolha do melhor composto de bário, garantindo ser ele o agente da precipitação.

O que Hahn e Strassmann concluíram sobre a meia-vida de 3,5h era intrigante. A produção de rádio a partir daqueles bombardeamentos exigia um duplo decaimento alfa, o que já era atípico para o urânio, seguido de uma longa série de decaimentos beta $Ra \rightarrow Ac \rightarrow Th \rightarrow \dots$. Em carta, Hahn pediu a Meitner que tentasse compreender como isso poderia acontecer, sobretudo com o uso de nêutrons lentos (SIME, 1989), outra anomalia inaudita. Com o auxílio dos cálculos propiciados pelo modelo nuclear da gota líquida de Gamow, Meitner concluiu que “nêutrons lentos não poderiam causar sequer uma emissão alfa no urânio – quanto mais duas” (SIME, 2000, p. 59) necessárias para originar rádio a partir do urânio.

Diferentemente das investigações do ano anterior, em que eles buscavam caracterizar elementos supostamente transurânicos de natureza pouco conhecida e compreendida, desta vez eles trabalhavam em território familiar. Rádio, urânio e tório tinham sido objetos de trabalho, sobretudo de Meitner e Hahn, por quase três décadas (SIME, 2000). Neste sentido, as sólidas evidências os tinham convencidos: certamente aquele produto precipitava com o bário. Com base nessa certeza, o grupo teve de escolher que tipo de consistência esperavam daquele conhecimento: buscavam a

consistência com o fato de que não se poderia produzir elementos de número atômico mediano a partir da irradiação de elementos de número atômico alto ou almejavam a consistência com seus conhecimentos bem fundamentados a respeito do comportamento do urânio? Efetivamente, cada vez mais mostrava-se impossível esperar a produção de rádio naquelas condições; o modelo nuclear da gota líquida que restringia as possibilidades de identidade daquela meia-vida de 3,5h era o mesmo que dizia que a única possibilidade disponível – o rádio – não poderia ser produzido com aquele método.

Este é o momento da história que mostra que frente a determinados problemas, ante evidências e métodos sólidos, os próprios objetivos e expectativas dos cientistas devem ser ajustados. Meitner, Hahn e Strassmann começaram a aceitar a produção do bário como alternativa viável. Em um encontro entre Meitner e Hahn em novembro de 1938, em Copenhague, ela pediu que ele revisasse a interpretação da produção do rádio. Sime (1989) defende que essa explícita angústia de Meitner influenciou Hahn a atacar o problema por outras vertentes ao voltar a Berlim. A ela, restava apenas continuar as investigações por meio de cartas, interpretando os resultados enviados pelos colegas, em virtude da falta de estrutura de trabalho em Estocolmo.

Hahn e Strassmann passaram a executar cristalizações fracionadas; notando que aquele suposto isótopo de rádio só precipitava com compostos de bário, tentaram separar o rádio do bário. Mesmo em face a tantas complicações experimentais, começaram a notar a dificuldade inerente de levar a cabo tal separação; começavam a se abrir a novas possibilidades (HAHN, 1946).

Neste momento, o rádio começou a deixar de ser uma suposição sólida, apesar de ser a única sustentada pelos cânones da física nuclear e de parte da própria química, passando a se tornar uma grande incógnita, mesmo sendo suportado por evidências não conclusivas. Vários fatores podem ter influenciado essa mudança de valores por Hahn e Strassmann, mas certamente o fato de estarem muito familiarizados com rádio e bário, e a angústia de Meitner em relação a tantas incoerências físicas foram os mais determinantes. Passaram a buscar, então, outras explicações, como a de precipitar aqueles produtos com compostos de rádio, o que indica que começavam a relutar sobre aquela identidade – pois buscavam o pensamento divergente.

Realizaram precipitações com diversos compostos de rádio e notaram que conseguiam separar, sem qualquer problema, o rádio do produto desconhecido. Essa era uma evidência de que a mudança de objetivo era frutífera, mas, embora sólida, não era

determinante, pois ainda desafiava um conhecimento estabelecido e amplamente aceito. Em dezembro daquele ano, Hahn enviou uma carta a Meitner em que reiterou que seu isótopo de rádio se comportava como o bário e pediu uma posição da física – da qual reafirmou sentir muita falta nas investigações. Recebeu, na véspera do Natal, uma emblemática carta em que a física anunciava, ante as novas evidências, que não achava que uma grande quebra do núcleo fosse impossível (SIME, 1989).

Os dias que se seguiram foram da finalização do artigo que posteriormente reconhecera Hahn como o descobridor do fenômeno da fissão nuclear, embora tenha sido redigido também por Strassmann. Neste trabalho, ele busca mostrar como chegou às fortes evidências de que, com o bombardeamento de urânio com nêutrons, pode-se produzir bário. O título – *Sobre a existência de metais alcalino-terrosos resultantes da irradiação de urânio* – assim como os primeiros parágrafos do artigo, não sugere, contudo, a intenção dos berlinenses. Como seria esperado de um artigo que propõe algo completamente inusitado, eles primeiramente descrevem minuciosamente o problema simbolizado pelo elemento de 3,5h: que o rádio, única possibilidade para ciência da época, era um produto bastante excêntrico, pois exigia que o urânio tivesse sofrido dois decaimentos alfa em sequência a partir do recebimento de um nêutron lento. A mesma ciência, no entanto, não conseguia justificar esse acontecimento energeticamente. Por este motivo, eles explicam que fizeram um meticuloso trabalho, em três etapas de identificação dos seus precipitados, e não poupam os detalhes dos métodos usados e os resultados alcançados, com análises gráficas (HAHN; STRASSMANN, 1939a).

De fato, eles não poderiam tentar introduzir a ideia principal do artigo – a de que o alcalino-terroso produzido pela irradiação de urânio não era o rádio, mas o bário – sem uma detalhada narrativa de suas práticas científicas, em que evidências, teorias, métodos e valores foram repetitivamente ajustados para a melhor compreensão daquele fenômeno. Apresentavam, em primeira mão, um resultado espantoso, precisavam embasar fortemente suas conclusões, e assim o fizeram. Isso, logicamente, não os isentou de serem cautelosos, como revelam alguns dos trechos finais do trabalho:

Como químicos, nós realmente devemos revisar o esquema de decaimento dado acima e inserir os símbolos Ba, La, Ce no lugar de Ra, Ac, Th. Entretanto, como químicos nucleares trabalhando muito proximamente ao campo da física, ainda não conseguimos nos convencer a tomar tal drástico passo, que vai de encontro a toda a experiência prévia da física nuclear. Talvez tenha havido uma série de coincidências incomuns que nos tenha dado falsas indicações (HAHN, STRASSMANN, 1939a).

Eles continuaram os trabalhos de precipitação, ou seja, confirmando esse resultado até depois da publicação da interpretação do fenômeno, por Meitner e seu sobrinho Otto Frisch, no começo de fevereiro de 1939. Essa interpretação foi fruto do encontro natalino entre os dois físicos, ocorrido em Gotemburgo, na Suécia. Segundo Frisch (1967), Lise estava intrigada com uma carta de Hahn. “Eu estava cético em relação ao conteúdo – que o bário se formava a partir do urânio irradiado com nêutrons – mas ela se prendeu àquilo” (FRISCH, 1967, p. 47).

Cabe abrir parênteses para a evolução do modelo nuclear da gota líquida, paralelamente aos estudos dos ‘transurânicos’, que teve importância determinante para a interpretação conjunta de Meitner e Frisch acerca dos eventos de produção de bário pelo urânio irradiado. Até 1928, o núcleo do modelo de Rutherford não dava conta de explicar os mecanismos causais da emissão alfa. A mecânica quântica, ainda uma novidade entre os físicos, foi então usada pelo russo George Gamow para elucidar tais mecanismos. Sua interpretação do decaimento alfa como um efeito de tunelamento quântico acabou por tornar obsoleta a visão de núcleo que fazia parte do modelo atômico de Rutherford (STUEWER, 1997).

Gamow saiu da Alemanha, onde pesquisava, e foi trabalhar com Bohr, em Copenhague, onde, na continuação de sua aplicação da mecânica quântica para fenômenos nucleares, desenvolveu um modelo para o núcleo. Ainda em 1928, ele concebeu o núcleo como uma gota líquida, composta por partículas alfa. Ele continuou aperfeiçoando seu modelo em Cambridge, onde foi estudar com Rutherford entre 1928 e 1929. Lá, Rutherford apresentou o modelo de Gamow em primeira mão à Royal Society. Mais à frente, Werner Heisenberg e Carl von Weizsäcker também investigaram fenômenos nucleares a partir do modelo nuclear da gota líquida (STUEWER, 1997). Ainda nesse ínterim, a própria concepção da composição do núcleo mudou; com a descoberta do nêutron, houve um declínio da expectativa da existência de um elétron nuclear, que até então explicava a emissão beta. Depois dessa descoberta, com a proposição das forças nucleares de troca de Heisenberg-Majorana, a própria abordagem do núcleo de gota líquida também exigia mudanças (STUEWER, 1983).

Esse é o primeiro estágio histórico do modelo (STUEWER, 1997). Os três físicos que a ele mais se dedicaram – Gamow, Heisenberg e von Weizsäcker – o desenvolveram dentro de um paradigma estático de núcleo. Mas, simultaneamente ao desenvolvimento da mecânica quântica, a física nuclear, sobretudo desde 1934, vinha se ocupando de estados de excitação dos núcleos. É nesta perspectiva que Bohr, em 1936 e

1937, publicou uma série de trabalhos aplicando uma concepção nuclear de gota líquida para fenômenos dinâmicos de núcleos, um modelo oscilatório. Enquanto para o núcleo de Gamow, partículas alfa eram emitidas em pequenas quantidades em virtude do fenômeno de tunelamento, para Bohr, elas poderiam ser expelidas naturalmente, dependendo da energia do núcleo, como se a gota líquida estivesse evaporando. Ele tentava explicar certos fenômenos, como longas cadeias de emissões beta por elementos pesados, que o modelo de Gamow não elucidava. Em seus artigos, no entanto, ele não apresentou uma recapitulação dos estudos prévios sobre o tema, omitindo os físicos que já vinham se dedicando ao modelo. Para Stuewer (1997), esse foi o motivo principal da ampla negligência posterior à prioridade de Gamow a este relevante construto teórico da física nuclear. De todo modo, entre 1934 e 1938, a apropriação das diferentes abordagens do núcleo de gota líquida foi distinta entre os grupos de pesquisa. Em Berlim, o modelo nuclear vigente era o de Gamow; em Copenhague, onde Frisch trabalhava, a referência era o núcleo de Bohr. Por maiores que fossem as diferenças, nenhum dos dois modelos previa explicitamente a quebra do núcleo (ANDERSEN, 1996; STUEWER, 1997).

O encontro natalino entre Meitner e Frisch foi, portanto, fortuito no que diz respeito às distintas referências teóricas trazidas por eles. Aceitando as evidências propiciadas por Hahn e confiando nos métodos executados por ele e Strassmann, Meitner e Frisch empreendem uma mudança de objetivos: sendo empiricamente adequados os resultados vindos de Berlim, buscaram a consistência da produção de bário pelo urânio com outras teorias. Interessantemente, não foi necessário buscar um novo referencial, pois, dentro de uma nova percepção, o próprio modelo nuclear de gota líquida poderia amparar aqueles resultados. Na analogia com a gota líquida, Meitner e Frisch notaram que uma gota pode sofrer alongamento e se dividir, diminuindo sua tensão superficial. “[O] processo ocorreria sob bases puramente clássicas, sem a necessidade de se invocar o tunelamento, o que logicamente nunca funcionaria” (FRISCH, 1967, p. 47).

Frisch (1967) deixa claro, portanto, que o modelo nuclear utilizado foi o de Bohr – os parâmetros clássicos de sua interpretação descartam, de certo modo, o modelo de Gamow. Por que, então, o próprio Bohr não conseguiu notar anteriormente que seu modelo tinha a capacidade de explicar as anomalias entre os produtos de irradiação de urânio? Por que ele exclamou, ao saber das notícias da fissão em primeira mão por

Frisch no ano novo “Que tolos que fomos! Deveríamos ter visto isso antes” (FRISCH, 1967, p. 47)?

A resposta pode ser dada em termos de valores: para Bohr, que ao contrário de Meitner não estava imerso nas anomalias da pesquisa, seu modelo buscava desenvolver unicamente uma explicação para os estados de excitação do núcleo e as excêntricas longas cadeias de decaimento beta do urânio irradiado, que, apesar de incógnitas teóricas, estavam muito bem amparadas empiricamente (STUEWER, 1997). Para Meitner, além dessa explicação, era necessário também esclarecer a inusitada, mas também empiricamente adequada, produção do bário. O que era consistente para Bohr não o era suficientemente para Meitner.

Depois do natal, Frisch voltou para a Dinamarca e Meitner continuou na Suécia. Bohr, que soube em primeira mão da cisão nuclear e estava embarcando para os Estados Unidos, levou também a notícia (STUEWER, 1985). O artigo de Hahn e Strassmann foi publicado no mês de janeiro de 1939 (HAHN; STRASSMANN, 1939a), enquanto Meitner e Frisch terminaram de redigir o seu, por telefone. Publicaram em fevereiro, na revista *Nature*; Frisch tomou emprestado da biologia o termo fissão e batizaram o fenômeno de “fissão nuclear” (MEITNER; FRISCH, 1939; FRISCH, 1967). Nele, o encadeamento de anomalias se revela claramente e a construção da narrativa tem apenas um objetivo incisivo: explicar, sucinta e coerentemente, aquele fenômeno. Distintamente do artigo de Hahn e Strassmann, não há resquícios de cautela ou trechos apologéticos; Meitner e Frisch são categóricos em apresentar a fissão nuclear.

Com base, entretanto, nas ideias atuais sobre o comportamento de núcleos pesados, um retrato completamente diferente e essencialmente clássico desse novo processo de desintegração se sugere. Em virtude de seu intenso confinamento e fortes trocas de energia, espera-se que as partículas de um núcleo pesado se movam de um modo coletivo, semelhante ao movimento de uma gota líquida. Se for provocado um movimento suficientemente violento com a adição de energia, tal gota pode dividir-se em duas gotas menores. [...] Após a divisão, a alta razão entre nêutron/próton do urânio tenderá a se reajustar por meio de decaimentos beta para o valor menor típico de elementos mais leves. (MEITNER; FRISCH, 1939, p. 239-240).

Naquele mês de janeiro de 1939, Hahn e Strassmann, enquanto não recebiam a carta de Meitner antecipando as conclusões a que chegara com Frisch, continuaram desenvolvendo experimentos para garantir a identidade do bário. Também se puseram a buscar o tecnécio, que eles apontaram possível em seu primeiro artigo, mas sem sucesso. Somente após conhecer a proposta da fissão em primeira mão é que decidiram mudar os rumos de suas investigações para a identificação do criptônio (SIME, 1989),

sugerido por Meitner e Frisch (1939), que Hahn (1946) alega ter sido evidência química crucial para a fissão nuclear. Seu artigo foi publicado novamente na *Die Naturwissenschaften* (HAHN; STRASSMANN, 1939b) quase simultaneamente ao de Meitner e Frisch, na *Nature*. Frisch (1967) alega que a evidência empírica crucial para a física – a detecção dos grandes pulsos causados pelos fragmentos da fissão com a câmara de ionização – foi conseguida por ele em Copenhague, na mesma semana em que terminava de redigir o artigo com sua tia, e foi publicado uma semana depois, também na *Nature* (FRISCH, 1939).

Definir a descoberta da fissão em termos de suas supostas evidências cruciais pode ser significativo para Frisch (1967) ou Hahn (1946), mas não filosófica ou historicamente. A concepção de subdeterminação das teorias pelas evidências por si só se opõe à ideia de que um conjunto de evidências pode ser crucial para a escolha de uma teoria. Se os experimentos de detecção do criptônio foram importantes para químicos, assim como a detecção dos pulsos energéticos causados pelos fragmentos da fissão foram relevantes para os físicos, isso significa que a comunidade já se via inclinada a aceitá-los como consistentes e precisos ante um novo, coerente e fecundo quadro teórico. Não foram necessários muitos dias para que novos experimentos corroborativos fossem feitos também na França, por Joliot-Curie, e também nos Estados Unidos (FRISCH, 1967).

Considerando apenas as datas dos artigos, a conclusão de que foram Hahn e Strassmann os descobridores da fissão nuclear seria a mais lógica. Com o apoio das cartas trocadas entre Hahn e Meitner, no entanto, essa discussão, que já vem sendo feita entre historiadores e biógrafos (SIME, 1989; SIME, 2000; HOOK, 2007) toma novas dimensões. Tão importante quanto isso, as cartas revelam também nuances axiológicas da prática que somente os artigos não mostram na sua totalidade. Assim, mais do que a discussão bastante corrente sobre a importância da física austríaca no descobrimento do fenômeno, as cartas desvelam o aspecto que, para Laudan (1984), é emblemático da racionalidade da atividade científica: a relação reticulada entre teorias, métodos e valores na busca pelo conhecimento melhor suportado por evidências e métodos.

Com uma visão detalhada do episódio da fissão nuclear, é possível compreender a rede triádica de justificação (fig. 2). De fato, o que guiou Meitner, Hahn e Strassmann à sua nova compreensão foi um nivelamento das dimensões teórica, metodológica e axiológica. Para Laudan (1984), as teorias justificam os métodos, como a busca por separar o rádio dos produtos de bombardeamento de urânio com nêutrons, feita

exaustivamente por Hahn, simplesmente porque a teoria não permitia a produção de outro alcalino-terroso além dele naquela reação. Mas igualmente importante, o filósofo lembra que métodos compelem novas teorias, ou seja, conseguindo apenas isolar o bário, e não o rádio, aqueles métodos tão seguros desempenhados por Hahn e Strassmann levaram à aceitação de que o urânio produzia efetivamente o bário.

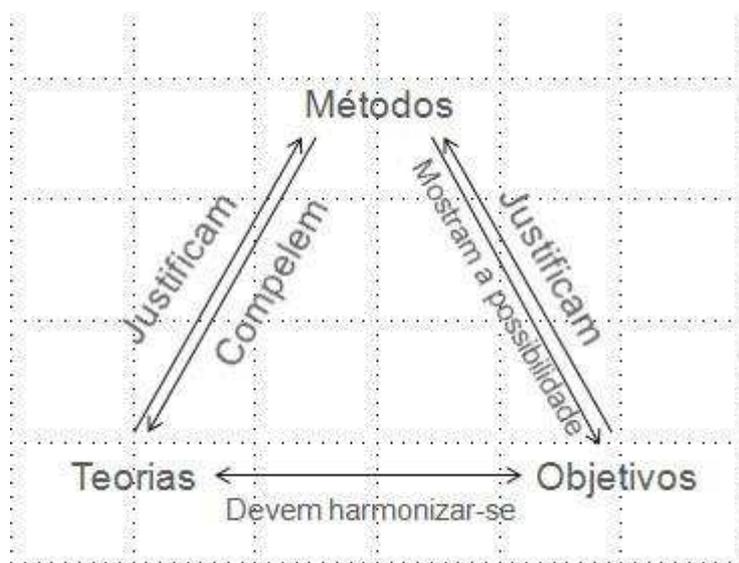


Fig. 2 – A rede triádica de justificação, do modelo reticulado de Laudan.

Fonte: Laudan (1984, p. 63)

A questão, naturalmente, não se encerrava por aí, pois o valor da consistência com o modelo nuclear da gota líquida de Gamow, um objetivo da física nuclear e da radioquímica que se sustentava desde a ‘descoberta’ dos transurânicos e que justificava a busca pelo rádio naqueles produtos, precisava ser revisto. Assim, a precisão daqueles novos métodos, que impeliam a aceitação da produção de bário, exigiram uma revisão axiológica da física nuclear e da radioquímica: a adequação empírica daquelas evidências passou a ser mais forte, para Meitner, Hahn e Strassmann, que a consistência com o modelo nuclear de gota líquida.

Enfim, Meitner e Frisch desenvolveram uma teoria, a da fissão nuclear, que também propôs uma adequação na concepção de núcleo, reorganizando os objetivos e valores cognitivos da ciência nuclear e expondo a dimensão axiológica daquele novo conhecimento: dentro dos novos quadros teóricos ele era, além de consistente com uma nova dimensão do modelo nuclear de gota líquida e preciso empiricamente, também mais simples, fecundo e capaz de explicar todas as anomalias que se interpunham à ciência nuclear nos últimos cinco anos. Em seu artigo de duas páginas, Meitner e Frisch

(1939) realizaram uma harmonização entre objetivos cognitivos e teorias da ciência nuclear.

Com sua rede triádica de justificação, Laudan (1984) buscou tecer uma explicação não apenas ao dissenso que normalmente se instaura na comunidade científica, mas também ao consenso que reiteradamente é restaurado – e, por conseguinte, do progresso na ciência. Os dissensos são frutos da subdeterminação de teorias por métodos e de métodos pelos valores da ciência; os consensos, por sua vez, são alcançados com a harmonização entre os polos do sistema triádico, que, relativamente aos objetivos cognitivos de uma disciplina ou subdisciplina, permitem a escolha dos melhores métodos, valores e teorias, apesar de sua natureza subdeterminada. Apesar disto, a subdeterminação, sendo um fenômeno de natureza lógica, prescinde de uma articulação com controvérsias científicas, assim como o próprio problema da indução, que tem natureza similar. Efetivamente, as pesquisas de Meitner, Hahn, Strassmann e Frisch não geraram uma controvérsia na ciência, mas, analisadas à luz do que Laudan (1984) propõe sobre o progresso da ciência, mostram que o caráter subdeterminado das diversas dimensões da prática científica foram onipresentes naquelas investigações.

O progresso da ciência ocorre, para Laudan (1984), quando determinadas teorias aproximam os cientistas de determinados objetivos cognitivos mais do que anteriormente, e isso acontece com a relação reticulada entre teorias, métodos e valores. Cabe ressaltar que, para o filósofo, o nível metodológico não se resume aos métodos de avaliação teórica, mas também aos procedimentos de acesso às evidências. O nível axiológico, por sua vez, também guarda peculiaridades; é composto pelos valores e objetivos da ciência, da prática e do conhecimento científico. Assim, aspectos como adequação empírica, consistência, fertilidade, por exemplo, são valores do conhecimento científico –isto e, fatores que se espera encontrar em uma teoria ou modelo. Laudan (1984), assim como Kuhn (1973), filósofo que inspirou sua crítica, entende que valores são ambíguos – seus significados são diferentes conforme as interpretações dos cientistas e precisam ser negociados.

A atribuição de ilogicidade da prática científica, feita por Stuewer e secundada por Sime (2000), não se sustenta quando se nota que os cientistas envolvidos se guiaram sempre pelos referenciais teóricos, metodológicos e axiológicos de suas ciências e, mais do que isso, propuseram-se a revisar e analisá-los criticamente quando eles não mais

resistiam. Essa relação reticulada, como bem afirma Laudan (1984), é o que uma boa teoria de racionalidade pode efetivamente demandar da ciência.

Além da racionalidade, cabe destacar determinados aspectos que contribuíram para a objetividade, no sentido advogado por Longino (1990), do conhecimento em produção pelo grupo de Berlim. Para a filósofa, a objetividade da ciência está intimamente relacionada com a coletividade – ou seja, com uma perspectiva da ciência como prática – e com a circulação de conhecimentos. A troca de ideias e a publicidade das hipóteses, na ciência, permite diversos tipos de críticas entre os pares, conceituais e sobre evidências. Entre as críticas conceituais, existem aquelas quanto à solidez conceitual de uma hipótese, quanto à sua consistência com os cânones da área e quanto à relevância da evidência em relação à hipótese que busca fundamentar. Logicamente, são necessários espaços e meios para essa circulação de conhecimentos, para a efetivação do que ela chama de intersubjetividade: padrões compartilhados por toda a comunidade, como linguagem e objetivos; periódicos, eventos, livros didáticos e premiações (para o reconhecimento da aceitação do conhecimento) e igualdade de autoridade intelectual.

O contexto histórico de Meitner, Hahn e Strassmann foi bastante peculiar em relação a esses requisitos. Paulatinamente, a troca de ideias entre grupos de diversos países, feitas por meio de cartas ou artigos científicos, foi tornando-se mais difícil. Além disso, com a ascensão do partido nazista ao poder na Alemanha, a perseguição aos judeus culminou na fuga de Meitner, separando o grupo. É interessante que Hahn e Meitner tenham criado métodos de manter a vigorosa intersubjetividade típica das décadas de trabalho conjunto, com a troca de cartas e até um encontro, em novembro de 1938, na Dinamarca.

Marca central da objetividade para Longino (1990), a intersubjetividade é mais efetiva conforme for mais heterogêneo o grupo nela envolvido. Nota-se que a formação interdisciplinar era fato entre grupos estudiosos da radioatividade, desde seu desenvolvimento, na primeira década do século 20. Na década de 1930, os principais grupos que investigavam o bombardeamento de urânio com nêutrons também tinham essa diversidade de formação. Na França, os físicos Irène e Frédéric Joliot-Curie trabalharam em colaboração com o físico-químico iugoslavo Pavle Savitch. No grupo italiano de físicos liderado por Fermi, Oscar D'Agostino destacava-se por ser químico.

Mas, como salienta Krafft (1983), nenhum grupo era tão heterogêneo quanto o de Berlim. Por formação, Meitner era física e Hahn, químico orgânico. Por força das

pesquisas em que se envolveram, passaram a se centrar em radioatividade, física nuclear e radioquímica, sendo dois dos pioneiros nessas então recentes ciências. Strassmann, que se juntou a eles mais tarde, era químico analítico. Essa variedade de pontos de vista sobre o mesmo objeto propiciou os meios para que os três pudessem buscar a melhor explicação para as anomalias que não paravam de se acumular. A natureza do fenômeno que investigavam não permitiria uma abordagem completa unilateral. Foram necessárias hipóteses e ajustes na física, assim como metodologias da química, para que se pudesse chegar à interpretação alcançada. O que permitiu essa reticulação foi precisamente a intersubjetividade por eles mantida apesar das dificuldades que a comunidade científica, em razão dos acontecimentos políticos, tinha de preservar. Além disso, entre eles era respeitada a igualdade de autoridade intelectual. Apesar de Strassmann ver Meitner como líder inquestionável da equipe (HOOK, 2007), nota-se na intensa troca de cartas entre ela e Hahn no fim de 1938 que essa liderança não silenciou as novas sugestões de Hahn. Pelo contrário, o apontamento de que não era possível separar os compostos de bário do produto da irradiação, face às incoerências físicas que tanto incomodavam Meitner, rendeu um incentivo na forma da lembrança, por parte da austríaca, de que grandes mudanças podiam sim ocorrer na física.

Meitner, Hahn e Strassmann se permitiram criticar hipóteses, questionar métodos, adequar seus valores na troca de suas ideias – uma troca de natureza horizontal, não hierárquica e, de modo mais importante, interdisciplinar. Esses fatores levaram a um resultado diferente do ocorrido cinco anos antes, em que físicos e químicos tinham todas as possibilidades – inclusive um contexto político menos hostil – de promover uma maior crítica intersubjetiva aos trabalhos do grupo italiano de Fermi. As objeções de Ida Noddack em relação à solidez química de várias das suposições dos romanos, assim como sua sugestão de uma cisão nuclear foram negligenciadas, parcialmente em virtude da inconsistência com os cânones da ciência nuclear da época, mas possivelmente também em razão de certos valores contextuais, como sua posição política nazista, seu gênero e sua reputação científica manchada. Apesar de ter os meios necessários para a circulação e apreciação de suas críticas, faltou à comunidade, por diversos motivos, a igualdade política que permitiria a intersubjetividade naquele momento crucial.

Meitner teve papel significativo para a fissão nuclear não apenas com a interpretação do fenômeno, em conjunto com seu sobrinho. Suas frequentes críticas conceituais também foram determinantes para Hahn e Strassmann. Entretanto, os

acontecimentos mundiais separaram Hahn e Meitner, um afastamento que se aprofundou após a descoberta da fissão nuclear. Anos mais tarde, ao receber prêmios pela descoberta, Hahn furtou-se de mencionar a importância da dinâmica mantida com Meitner para o descobrimento do fenômeno, apontando-o como objeto de investigação de relevância unicamente química. Esse divórcio promovido por Hahn entre física e química – e, por consequência, da longa parceria entre ele e sua colaboradora – associado ao contexto da Segunda Guerra, foi uma das razões para que Meitner não fosse amplamente reconhecida como co-descobridora da fissão (SIME, 1989). Além disso, por uma aparente questão de autoridade, o mesmo ocorreu para Strassmann, cuja relevante parte nas pesquisas químicas executadas foi bastante relegada pela comunidade, mesmo sendo coautor do artigo tido como emblemático da descoberta da fissão (KRAFFT, 1983). O conhecimento da fissão, no entanto, não foi negligenciado, intensificando a corrida bélica e motivando a láurea concedida a Hahn na área da química pelo Instituto Nobel, em 1944.

Considerações educacionais

Apesar das críticas e objeções sobre questões filosóficas e o ensino de ciências (ACEVEDO et al., 2005), é de certo modo consensual, na área, que a formação de professores não pode prescindir de discussões acerca da natureza da ciência e de sua história. Elas são formas de instrumentalizar o professor, promovem uma compreensão crítica da ciência e inclusive da organização dos livros didáticos, propiciando uma prática docente que complementa, em termos epistemológicos, os conceitos tratados em sala de aula (ALMEIDA; FARIAS, 2011; GIL-PÉREZ et al., 2001; MATTHEWS, 1994). Naturalmente, a dúvida acerca de que concepções incluir na formação de professores é legítima, visto que há um amplo espectro delas entre as filosofias pós-positivistas, muitas vezes mutuamente excludentes. Há, contudo, algumas noções cujo entendimento alcança alguma concordância na filosofia da ciência, como a ciência não ser socialmente neutra, a falácia do Método Científico empírico-indutivista, a busca por uma coerência global e que as investigações buscam também o pensamento divergente (GIL-PÉREZ et al., 2001). A história da fissão pode promover exemplos para todos esses aspectos.

Complementar aos aspectos lançados por Gil-Pérez et al. (2001), a ideia de que juízos de valor permeiam a atividade científica também atinge um alto grau de concordância entre os filósofos. Diferentemente do que se pode imaginar, isso não

significa incorrer em abrir mão da racionalidade e da objetividade, algo manifestamente indesejado entre educadores em ciências (PIETROCOLA, 1999; LABURÚ; SILVA, 2000), pois nas visões de Laudan e Longino, isso não se sustenta. Logicamente, para compreender os juízos de valor por esses estudiosos, é necessário revisitar esses conceitos filosóficos cujas compreensões, entre autores de ensino de ciências, ainda são predominantemente aquelas herdadas dos positivistas (e pouco reformuladas pelos primeiros pós-positivistas). Sobre os juízos de valor e seu papel para a racionalidade e a objetividade da ciência, buscou-se mostrar que a história da fissão também é pujante em exemplos.

O que procede tacitamente da aceitação do papel desempenhado pelos juízos de valor na ciência tem relação com certas concepções equivocadas da atividade bastante conhecidas na área de ciências, sobretudo com as ideias aproblemática, acumulativa e individualista da ciência. Apontadas por Gil-Pérez et al. (2001) em seu levantamento, essas ideias podem ser propagadas em sala de aula justamente em razão da transposição didática sofrida pelo conhecimento para que se adapte à estrutura tradicionalmente desejada para o livro didático. Os processos de didatização, que buscam organizar os conhecimentos segundo um encadeamento lógico mais compreensível aos alunos, são inerentemente supressores dos problemas e mudanças conceituais que ocorrem reiteradamente na ciência.

Problemas não são estrangeiros na ciência; pelo contrário, intercorrem regularmente, e em diversas de suas dimensões e níveis (LAUDAN, 2011). No episódio da fissão, o problema implícito das fronteiras da tabela periódica foi incentivador para as pesquisas de Fermi; mais tarde, os problemas causados pelas inconsistências e incoerências da interpretação dos transurânicos foram essenciais para que novos métodos, fatos e valores fossem invocados nas investigações. Os problemas estiveram intrinsecamente ligados ao progresso da ciência na descoberta da fissão, propiciando novos caminhos, exigindo novas perspectivas sobre fenômenos e evidências.

Esses problemas, que não são familiares apenas à história da fissão, mas uma constante na história da ciência, em geral são relegados nos livros em virtude dos processos de didatização, como as descontextualizações conceitual (chamada por Chevallard (1991) de dessincretização) e histórica. O encadeamento lógico dos conceitos presentes nos livros didáticos dificilmente se assemelha à sua evolução histórica; neste sentido, os problemas que fizeram parte de uma determinada pesquisa são sistematicamente suprimidos, difundindo uma ideia aproblemática da atividade

científica. Mas não somente eles: as mudanças conceituais de todos os portes que acontecem com alguma frequência nas ciências, também acabam sendo omitidas em virtude da reorganização dos conhecimentos. Mostrar as diversas dimensões da ciência que fizeram com que uma certa teoria fosse revolucionária exige uma abordagem fortemente contextualizada, uma discussão ampla de conceitos chave que, muitas vezes, foram inclusive abandonados no decorrer da ciência. Como essas questões estão fora dos objetivos da didatização tradicional da ciência, muitos livros propagam, pela omissão, uma ideia de que as teorias científicas são acumulativas, que não sofrem grandes mudanças.

Enquanto um novo fenômeno, a fissão nuclear foi produto de uma mudança não apenas teórica, mas também metodológica e axiológica. Com ela, um novo esquema conceitual foi traçado; alicerçado em um modelo nuclear diferente, esse novo esquema permitiu uma diferente visão do núcleo, dos fenômenos nucleares e dos elusivos elementos transurânicos (que, repentinamente e mais uma vez, viam-se sem apoio empírico ou consistência). Para Andersen (1996) essas são evidências de que, guardadas as proporções, a fissão nuclear tenha provocado uma revolução dentro dos cânones nucleares da década de 1930, ou uma mini-revolução, nos termos kuhnianos. Uma visão acumulativa da ciência, contudo, negligenciaria tais fatos históricos e epistemológicos.

Um outro efeito da transposição didática, sobretudo do processo de despersonalização do conhecimento, é a omissão do caráter coletivo da ciência. Entretanto, não raro ocorre uma espécie de repersonalização, em que se atribuem teorias, conceitos e enunciados a determinados cientistas, sem menções à comunidade da qual fizeram parte – e da contribuição desta comunidade para o conhecimento exposto no livro. Uma concepção individualista da ciência resulta desses processos, enfatizando o mito do cientista genial, homem e geralmente europeu.

Naturalmente, as contribuições de certos cientistas não devem ser menosprezadas, tampouco devem ser relegadas suas genialidades. Contudo, mesmo o mais genial pensador é fruto de um contexto científico, de um momento histórico e de um modo de pensar e ver o mundo. Além disso, mesmo em tempos de circulação de conhecimentos mais limitada, cientistas não estiveram livres da intersubjetividade e da crítica intersubjetiva, determinantes para a consolidação de teorias. Uma imagem individualista da ciência negligencia, portanto, não apenas a coletividade da ciência, mas o caráter cognitivo e lógico da atividade, como destaca Longino (1990).

Ademais, a disseminação de uma concepção elitista da ciência tem sido também fator para a invisibilidade da mulher no conhecimento científico escolar. Na conjuntura histórica (e prevalente até a atualidade) de desigualdade de gêneros, esse efeito passa inclusive despercebido, reiterando a já enraizada concepção de que a ciência é feita por homens brancos, com algumas exceções que reafirmam a regra. Porém, sempre houve participação feminina na ciência, com particularidades disciplinares. Naturalmente, com a abertura das universidades às mulheres, no século XX, essa participação vem aumentando, embora em ritmo mais lento do que o esperado e necessário (SCHIEBINGER, 2001).

Uma das grandes contribuições que a história da física nuclear pode dar à educação científica é a de mostrar um episódio da história da física e da química, em geral consideradas as mais masculinas das ciências, em que não apenas as mulheres fizeram parte, mas protagonizaram as pesquisas. Lise Meitner e Irène Joliot-Curie eram consideradas as líderes de seus grupos e eram internacionalmente reconhecidas (HOOK, 2007). Ida Noddack também era bastante reconhecida em sua área, apesar da reputação científica manchada pelo falso descobrimento do masúrio (hoje conhecido como tecnécio). Essa proeminência como líderes de pesquisa, no entanto, não é simbólica de uma ciência igualitária. Pelo contrário, todas elas – Marie Curie, Ida Noddack, Irène Joliot-Curie e Lise Meitner – tiveram que enfrentar uma parcela de obstáculos desconhecida por seus pares homens, desde o acesso à educação, passando pela remuneração de seus trabalhos até o reconhecimento de suas contribuições (McGRAYNE, 1994). É notável que o tipo de abordagem escolar descontextualizada e despersonalizada da ciência é um dos fatores que diminui o interesse de meninas e mulheres nessas disciplinas e nas carreiras científicas (BUCK et al., 2008; JOHNSON, 2007).

Alguns teóricos perguntaram-se sobre o que resultaria da descoberta da fissão, se tivesse ocorrido cinco anos antes, com a apreciação crítica da hipótese de Ida Noddack. Em termos sociais, Maddox (1999), por exemplo, vislumbra um passado ainda mais catastrófico. Já em relação a questões epistemológicas, Sime (2000) defende que ignorar a conjectura de Noddack teria sido a primeira de uma série de escolhas ilógicas feitas pelos radioquímicos e físicos nucleares. Com o auxílio da tese filosófica de Laudan (1984), no entanto, essa visão proposta por Sime (1990) não encontra fundamento: a dimensão lógica da ciência não erode em virtude da escolha (mais tarde compreendida como) equivocada do cientista, desde que ele se mantenha crítico em relação aos

problemas que surgirão nos níveis teórico, metodológico e axiológico de sua prática. Já em relação à especulação de natureza social de Maddox (1999), as concepções de Longino (1990) podem se mostrar particularmente interessantes. Analisando a dimensão axiológica daquele momento histórico, é possível notar que a competição, a corrida científica e a intolerância, enquanto fatores preponderantes, dificilmente levariam a um cenário de paz. “É uma especulação de arrepiar os cabelos imaginar como o curso da história recente teria mudado se a fissão nuclear tivesse sido descoberta dez anos antes” (MADDOX, 1999, p. 69). Aliadas às questões sobre natureza da ciência e seus efeitos na formação de professores, essas questões filosóficas, amparadas na relação entre ciência e valores, podem e devem também ter seu espaço na educação científica.

Referências

- ACEVEDO, J. A.; VÁZQUEZ, A.; PAIXÃO, M. F.; ACEVEDO, P.; OLIVA, J. M.; MANASSERO, M. A. Mitos da didática das ciências acerca dos motivos para incluir a natureza da ciência no ensino de ciências. *Ciência & Educação*, v.11, n.1, p. 1-15, 2005.
- ALMEIDA, A. V.; FARIAS, C. R. O. A natureza da ciência na formação de professores: reflexões a partir de um curso de licenciatura em ciências biológicas. *Investigações em Ensino de Ciências*, v.16, n.3, p. 473-488, 2011.
- ANDERSEN, H. Categorization, anomalies, and the discovery of nuclear fission. *Studies in the History and Philosophy of Modern Physics*, v.27, n.4, p. 463, 1996.
- ALVAREZ, L. W. *Adventures of a physicist*. Nova York: Basic Books, 1987.
- BUCK, G. A.; CLARK, V. L. P.; LESLIE-PELECKY, D.; LU, Y.; CERDA-LIZARRAGA, 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.
- CHEVALLARD, Y. *La Transposition Didactique: Du Savoir Savant au Savoir Enseigné*. Grenoble, La pensée Sauvage, 1991.
- FRISCH, O. R. Discovery of fission: how it all began. *Physics Today*, nov. 1967.
- GIL-PÉREZ, D.; 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.
- HAHN, O. From the natural transmutations of uranium to its artificial fission (1946). In: HAHN, O. *Nobel Lectures, Chemistry 1942-1962*. Amsterdam: Elsevier, 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, 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, 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.

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.

KRAFFT, F. Internal and external conditions for the Discovery of fission by the Berlin team. In: SHEA, W. R. (ed). *Otto Hahn and the rise of nuclear physics*. Dordrecht, Boston, Lancaster: 1983.

LABURÚ, C. E.; SILVA, M. R. Do relativismo no ensino de física ao objetivismo na física. *Investigações em Ensino de Ciências*, v.5, n.2, p. 121, 2000.

LAUDAN, L. *Science and values: the aims of science and their role in scientific debate*. Berkeley, Los Angeles: University of California Press, 1984a.

LAUDAN, L. *O progresso e seus problemas: rumo a uma teoria do crescimento científico*. São Paulo: Editora UNESP, 2011.

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

MATTHEWS, M. R. História, filosofia e ensino de ciências: a tendência atual de reaproximação. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, v. 12, n. 3, p. 164-214, 1995.

MCGRAYNE, S. B. *Mulheres que ganharam o Prêmio Nobel em ciências: suas vidas, suas lutas e notáveis descobertas*. São Paulo: Marco Zero, 1994.

MADDOX, J. *O que falta descobrir*. Rio de Janeiro: Campus Editora, 1999.

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

PIETROCOLA, M. Construção e realidade: o realismo científico de Mario Bunge e o ensino de ciências através de modelos. *Investigações em Ensino de Ciências*, v.4, n.3, p. 213, 1999.

QUILL, L. L. The transuranium elements. *Chemical Reviews*, v. 3, p. 87, 1938.

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

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

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

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

STUEWER, R. H. The nuclear electron hypotheses. In: SHEA, W. R. (org). *Otto Hahn and the rise of nuclear physics*. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 1983.

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

STUEWER, R. H. Gamow, alpha decay, and the liquid drop model. In: HARPER, E.; PARKE, W. C.; ANDERSON, D. (orgs). *George Gamow Symposium*. ASP Conference Series v. 129, 1997.

MARINÊS DOMINGUES CORDEIRO. É licenciada em física pela Universidade Federal de Santa Catarina. Mestre e doutoranda pelo Programa de Pós-Graduação em Educação Científica e Tecnológica, da mesma instituição, vem pesquisando sobre as relações entre ciência e valores na história da física nuclear e suas potencialidades para a educação científica.

LUIZ O. Q. PEDUZZI. É professor do departamento de física da UFSC e doutor pela mesma instituição. Credenciado ao Programa de Pós-Graduação em Educação Científica e Tecnológica, investiga as múltiplas possibilidades da história da ciência para a formação de professores e cientistas.

Recebido: 11 de agosto de 2015

Revisado: 02 de dezembro de 2015

Aceito: 21 de janeiro de 2016