
AS CONFERÊNCIAS NOBEL DE MARIE E PIERRE CURIE: A GÊNESE DA RADIOATIVIDADE NO ENSINO⁺*

Marinês Domingues Cordeiro

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

Luiz O. Q. Peduzzi

Departamento de Física – UFSC

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

Florianópolis – SC

Resumo

Neste artigo, discute-se a possibilidade da utilização didática das Conferências Nobel em sala de aula. Essas conferências têm essência pedagógica, são redigidas pelo próprio cientista em linguagem acessível ao público geral e estão disponíveis na página do Prêmio Nobel. Examinam-se implicações educacionais de cunhos motivacional, histórico-epistemológico e conceitual vinculadas às conferências de Pierre e Marie Curie, sobre a radioatividade. Em termos motivacionais, faz-se o uso do glamour exercido pelas conferências, confrontando-as com fatos biográficos da vida do casal e suas histórias de superação. No sentido histórico-epistemológico, exploram-se os diálogos das conferências com as categorias de visões deformadas do trabalho científico mapeadas por Gil-Pérez et al (2001) e as características da coerência global e da investigação do pensamento divergente, dois dos pontos de intersecção entre as epistemologias pós-positivistas, que também foram estudados pelos autores. Tra-

⁺ Marie and Pierre Curie's Nobel Lectures: the genesis of radioactivity in class

* Recebido: abril de 2010.
Aceito: setembro de 2010.

balha-se, também, com a noção de descoberta científica e sua legitimação, numa associação das conferências com Badash (1965) e Martins (1990, 1997, 2005). No âmbito conceitual, trata-se da conservação da energia e das teorias atômicas associando as conferências a trabalhos de Kragh (1997, 2000) e Martins (2003).

Palavras-chave: *História e Filosofia da Ciência; Prêmio Nobel; radioatividade.*

Abstract

In the present article, the possibility of the educational use of the Nobel Lectures is discussed. These lectures are essentially pedagogical, written by the scientists themselves in fairly comprehensible language and are available at the Nobel Prize homepage. Their educational effects of motivational, epistemological and conceptual natures are the object of this research, in the specific examples of Pierre and Marie Curie's lectures on radioactivity. As motivation, we use the glamour those lectures have confronting them with the biography of the couple's life and their surpassed history. The lectures are associated historically and epistemologically to the categories of distorted perspectives about the nature of science and the scientific knowledge mapped by Gil-Pérez et al (2001), and two of the common points between the post positivist epistemologies – global coherence and investigation on the divergent thought – also studied by the authors. The notion of a scientific discovery and its legitimacy is worked on the very example of radioactivity, in an association of the lectures to Badash (1965) and Martins (1990, 1997, 2005). Conceptually, the researches on the development of radioactivity and atomic models by Kragh (1994, 2001) and Martins (2003) are chosen to be treated.

Keywords: *History and Philosophy of Science; Nobel Prize; radioactivity.*

I. Introdução

É fato conhecido que o Prêmio Nobel foi instituído por Alfred Nobel, grande químico sueco do século XIX, em seu testamento. Milionário por sua des-

coberta da dinamite, Alfred vinha de uma família de grandes cientistas que ganharam e perderam fortunas em vida por suas patentes, especialmente de explosivos.

Ao falecer, seu irmão Ludwig foi confundido pelos jornalistas com Alfred. Assim, Alfred teve a estranha experiência de ler seu próprio obituário, que alardeava a morte de um ganancioso cientista que fizera fortunas com uma invenção que promoveu a guerra e a morte de centenas de pessoas. Alguns biógrafos justificam a natureza do testamento de Alfred Nobel por esse episódio. Acredita-se que, ao deparar-se com o que pensavam de sua vida e seu trabalho, Alfred tomou uma atitude, reproduzida em testamento, para que esse tipo de obituário não pudesse ser escrito novamente (FELDMAN, 2000).

O famoso testamento de 1895 não foi, no entanto, o primeiro testamento de Alfred Nobel. Antes dele, dois outros testamentos, de 1889 e 1893, também instituíam que de sua fortuna se originasse uma premiação, embora não tão bem definida quanto o de 1895 (KAUFFMANN, 2001). Pouco se sabe das motivações de Nobel para uma atitude tão pouco usual na época, mas se pode tecer algumas considerações baseadas em sua biografia e em seu próprio testamento. Era um cientista que vira sua vida e obra utilizadas para bem e mal, amante de literatura e filosofia, avesso à vida social. Feldman (2000) acredita, inclusive, que instituir um prêmio em testamento garantiu que não tivesse sua vida invadida.

Em seu testamento, Alfred Nobel definiu que o que restava de sua fortuna – após destinar parte dela a familiares e outros – deveria “*constituir um fundo cujos rendimentos devem ser distribuídos anualmente na forma de prêmios àqueles que, no ano anterior, conferiram o maior benefício à humanidade*”¹ nas áreas de Física, Química, Medicina ou Fisiologia, Literatura e Paz (o Prêmio Nobel de Economia foi instituído apenas em 1969, numa iniciativa do Sveriges Riksbank). Em 1901, o prêmio passou a ser entregue e não seria exagero considerá-lo o prêmio mais significativo da atualidade. Seus ganhadores desfrutaram de celebridade, respeito e, de certa forma, imortalidade. É inegável o magnetismo exercido pelo Prêmio Nobel, fascínio este que se acentua entre especialistas e estudantes, não apenas das áreas de premiação.

Para muitos, o Prêmio Nobel parece algo inatingível. Desse modo, é fácil lhe conferir um apelo mítico, o mesmo que, em geral, se atribui aos cientistas que o ganharam, elevando-os ao *status* de super-heróis numa realidade muito distante da realidade do homem comum. Mas, apesar disso, o Prêmio Nobel possui um *gla-*

¹ Este trecho do testamento de Alfred Nobel encontra-se disponível na página do Prêmio Nobel: <www.nobelprize.org>. Paginação eletrônica.

mour que encanta e atrai a todos, dos leigos aos cientistas, e essa atração pode servir como elemento motivador tanto para alunos do Ensino Médio quanto dos cursos universitários das áreas que ele premia. Um exemplo claro desse efeito do prêmio é o fato de as revistas Física na Escola e Química Nova na Escola, das Sociedades Brasileiras de Física e de Química, respectivamente, abordarem trabalhos dos detentores do prêmio (KNOBEL; MACEDO, 2007; MIZRAHI, 2005; BAGNATO, 2005, ROCHA-FILHO, 1995); outro exemplo, neste caso do potencial educacional desse prêmio, é a iniciativa do Ministério da Educação de Israel em financiar parcialmente um projeto de ensino de Física Moderna baseado no Prêmio Nobel chamado *Journey to the Past: Bringing the Nobel Prize to the Physics Class* (ESHACH, 2008).

Em termos de uma maior aproximação do Prêmio Nobel de Física (e de Química) com o ensino, há vários aspectos a serem considerados.

Um deles é a relativa “atualidade” dos trabalhos que foram laureados. Em 1901, Wilhelm Conrad Röntgen recebeu o prêmio de Física pela sua descoberta dos raios-X. Desde então não cessaram os prêmios por investigações realizadas nas chamadas áreas da Física Moderna e Contemporânea. É importante observar que nas pesquisas em ensino de Física é bastante antiga a reivindicação da atualização curricular, com a inserção de tópicos de Física Moderna e Contemporânea nesse currículo (TERRAZAN, 1992).

Ostermann (2000) destaca os temas de Física Moderna e Contemporânea apontados pela comunidade de professores de Física, de pesquisadores em ensino de Física e de pesquisadores em Física como importantes para a formação do estudante do Ensino Médio. Dentre os tópicos mencionados, muitos deles foram objetos do Prêmio Nobel, como o efeito fotoelétrico, a radiação de corpo negro, a mecânica quântica, a radioatividade, as partículas elementares e os raios cósmicos.

Bem trabalhado em sala de aula, o contexto da atribuição do Prêmio Nobel a um cientista pode contribuir para desmistificar a própria ideia do gênio solitário, em sua torre de marfim, alheio a tudo e a todos. Essa é uma das sete categorias de imagens deformadas da ciência que Gil-Pérez *et al* (2001) mapearam e que serão tratadas mais adiante. A propagação de uma imagem mais real do cientista, como pessoa que erra, relaciona-se e surpreende-se, através da conferência tem o potencial de enfraquecer a ideia de que o tipo de ciência feita pelo cientista que ganha o Prêmio Nobel é inalcançável (ESHACH, 2008).

Eshach (2008) ainda destaca a importância de se explorar a ciência como uma atividade humana, realizada dentro de um contexto histórico e social. Matthews (1995) aponta para a necessidade de se formarem alunos e cientistas que saibam não apenas o conteúdo curricular, mas também como a ciência cresce e se

desenvolve, ou seja, aspectos relativos à natureza da ciência, sua filosofia e sua sociologia.

Por último, mas não menos importante, ao ganhar o Prêmio Nobel, o laureado deve, compulsoriamente, dar uma conferência sobre o trabalho premiado, como disposto no parágrafo 9º do Estatuto Nobel. Como essas conferências são abertas ao público, têm estruturas mais acessíveis, essencialmente pedagógicas. Essas conferências estão na íntegra disponíveis na página do Prêmio Nobel – as mais atuais com vídeos, apresentações de *slides* e textos, as mais antigas somente em textos.

Assim, tendo em mente os motivos e possíveis benefícios de se usar o Prêmio Nobel como mediador do ensino de ciências, apresenta-se, neste trabalho, uma discussão didática de duas Conferências Nobel, examinando implicações educacionais de cunho motivacional, histórico-epistemológico e científico. Por certo, há, na literatura especializada, um número suficiente de trabalhos que sustentam a relevância de uma formação histórica e contextualizada, não apenas de estudantes de Ensino Médio, mas também dos futuros cientistas e professores (WOODALL, 1967; MATTHEWS, 1995; ERDURAN *et al.*, 2007). Não obstante, há ainda uma distância muito grande entre a produção acadêmica e o ensino – mesmo no âmbito universitário. Então, se efetivamente há a necessidade de uma formação mais contextualizada do aluno do Ensino Médio, há de se contextualizar também a formação do professor que atuará nesse nível de ensino.

O objetivo deste artigo é o de discutir a produção de algo concreto, passível de ser levado à sala de aula, possivelmente em uma disciplina de História da Física ou similar: a utilização e a análise de recortes das Conferências Nobel de Pierre e Marie Curie.

II. Por que as conferências Nobel do casal Curie?

Não há cientista mais biografado para crianças em língua inglesa que Madame Curie, como indica Owens (2009). Ele afirma que, em uma pesquisa feita por biografias infanto-juvenis no índice WorldCat de bibliotecas, 121 resultados retornaram para Marie Curie. Em segundo lugar, está Albert Einstein, com 96 livros e, em terceiro, Charles Darwin, com 71 títulos. O autor faz ainda uma comparação entre Einstein e Madame Curie e revela que, interessantemente, ambos desaprovaram suas experiências educacionais. “*Os biógrafos infantis apropriaram-se dessas figuras estrangeiras e, de certa forma, rebeldes, e os transformaram em ícones educacionais americanos institucionalizados*” (OWENS, 2009, paginação eletrô-

nica). Apesar desse forte apelo educacional atribuído à figura de Marie Curie, em uma pesquisa pelos periódicos nacionais e internacionais da área de ensino de ciências, constata-se que, nos níveis médio e superior de instrução, o interesse na radioatividade por si só cai fortemente – enquanto o interesse em Albert Einstein, na Teoria da Relatividade e no efeito fotoelétrico parece se manter ou, mesmo, aumentar. *Como explicar tal falta de atenção da área de ensino de ciências para um tópico tão importante e polêmico?*

Espera-se que, sendo a radioatividade um tema de fronteira entre a Química e a Física, a já mencionada rara produção acadêmica sobre ela seja dividida igualmente entre essas duas áreas. No entanto, esse não é o reflexo mais fiel da realidade: o pouco produzido encontra-se principalmente na Química; um indício claro desse fato pode ser observado em uma pesquisa pelo banco de teses e dissertações da Capes² com *radioatividade* como palavra chave. Assim, em ensino de ciências, há apenas três dissertações: Silva (2007), Anele (2007) e Koepsel (2003) – que tratam o enfoque CTS e/ou o ensino de Química. Já na área de história da ciência, há somente uma dissertação (SILVA, 2004). Se esses fatos por si só provocam estranhamento, a importância que essa área tem para a Física agrava ainda mais esse sentimento: é à radioatividade que se atribui o início do período da Física Moderna e é a partir dela que se trilha o caminho em direção às Físicas Nuclear e de Partículas.

Ostermann e Moreira (2000), em uma pesquisa sobre os temas de Física Moderna e Contemporânea apresentados na literatura como divulgação científica ou como bibliografia de consulta para professores e alunos, citam alguns trabalhos sobre radioatividade; entretanto, esse não é o tema de Física Moderna e Contemporânea mais tratado na área de ensino de ciências – que, segundo os autores, são a relatividade, as partículas elementares e a mecânica quântica. No estudo que fazem, os autores mencionam apenas seis trabalhos sobre radioatividade, que se dividem em três grupos: artigos sobre suas implicações, como acidentes radioativos e construção de armas e usinas; livros didáticos que inserem Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio, e artigos que investigam acerca do entendimento de radioatividade pelos alunos e sua relação íntima com os conceitos veiculados pelos meios de comunicação. A pergunta feita anteriormente assume, então, uma nova nuance: *por que a falta de interesse acadêmico no tema, especialmente na área do ensino de Física?*

² Disponível em: <www.capes.org.br>.

Além de todos os motivos expostos, há ainda um elemento característico da gênese e do desenvolvimento da radioatividade que não se repete em qualquer outra área científica: a própria família Curie. Uma interessante informação disposta na página do Prêmio Nobel é acerca da família mais laureada: Pierre e Marie Curie dividiram com Henri Becquerel o Prêmio Nobel de Física de 1903, “*em reconhecimento ao serviço extraordinário que prestaram por sua pesquisa em conjunto sobre os fenômenos de radiação descobertos por Henri Becquerel*”; Marie voltou a receber o prêmio em 1911, dessa vez em Química “*em reconhecimento aos seus serviços pelo avanço da Química, pela descoberta dos elementos rádio e polônio, pelo isolamento do rádio e pelo estudo da natureza e dos compostos desse notável elemento*”. A filha mais velha do casal, Irène Joliot-Curie, recebeu, juntamente com o seu marido, Frédéric Joliot-Curie, o Prêmio de Química de 1935 “*em reconhecimento às suas sínteses de novos elementos radioativos*”. Uma família intimamente ligada ao Prêmio Nobel – fenômeno jamais repetido com tal intensidade – pelos estudos da radioatividade (nesse caso, exclui-se Henri Richardson Labouisse Jr., marido de Ève Curie, filha mais nova do casal, que recebeu o Prêmio Nobel da Paz em nome da UNICEF, de que era diretor executivo). As Conferências Nobel juntam, então, dois potenciais fatores motivacionais para as aulas de ciências: os notórios carismas dos Curies e do Prêmio Nobel.

Por ser escrita e apresentada pelo próprio cientista, a Conferência Nobel tem uma natureza bastante peculiar. É capaz de mostrar, por exemplo, os sentimentos e a reação do autor frente a uma nova descoberta, dificilmente encontrados em outros textos sobre o tema ganhador do prêmio.

E, de maneira ainda mais formidável, uma Conferência Nobel é rica em características científicas daquele momento em que se deu a descoberta, e dela pode-se traduzir com alguma aproximação a intensidade da influência que essas características exerceram sobre aquele cientista. É usual que, em uma Conferência Nobel, o autor situe seu trabalho em relação aos de outros cientistas, fale das necessidades tecnológicas de seu tempo, de seus objetivos, de suas intenções – e todos esses fatores combinados servem para contextualizar cientificamente a sua descoberta. É, enfim, um valioso e acessível documento histórico. De fato, há de se enfatizar a dimensão social da ciência, que cada cientista tem o respaldo do trabalho de outros – seja para seguir suas hipóteses, seja para contrariá-las –, que dificilmente os trabalhos são prontamente aceitos pela comunidade científica e que mesmo os cientistas mais famosos cometem erros (WHITAKER, 1979).

Whitaker (1979) enfatiza ainda que se deve ter cuidado com duas características das Conferências Nobel: primeiramente, por essa fonte ser limitada aos cientistas mais bem-sucedidos – podendo-se cair na armadilha do endeusamento –

e, em segundo lugar, que o conferencista pode superestimar ou menosprezar seu trabalho. Para que se possa manter distância desses problemas, o presente trabalho propõe o uso das conferências, mas fazendo-as dialogar sistematicamente com outras produções científicas – nas áreas de educação e história da ciência – e as biografias de Madame Curie escritas por Ève Curie (1962), filha do casal, Naomi Pasachoff (1996), do American Institute of Physics e Sharon McGrayne (1995).

III. A tradução das Conferências Nobel de Marie e Pierre Curie

As Conferências Nobel de Pierre e Marie Curie foram apresentadas em momentos diferentes; apesar de ambos terem recebido o Prêmio da Física de 1903, apenas Pierre apresentou uma conferência, e mesmo assim, só pode fazê-lo em 1905. Isso ocorreu porque eles não puderam se deslocar à Suécia em dezembro de 1903. Em carta de agradecimento pela premiação, Pierre desculpa-se pela ausência em 10 de dezembro, data das festividades do Prêmio Nobel, dizendo não ser possível ausentar-se dos cursos que conduziam em Paris. Além disso, Marie não se recuperara de uma doença, o que tornava inviável sua ida à Suécia, um país de inverno rigoroso, em um mês de dezembro. Assim, apenas em junho de 1905 essa viagem tornou-se realidade para o casal, e só então Pierre apresentou sua conferência, em nome dele e de Marie (CURIE, 1962).

As conferências, que se encontram na página eletrônica do Prêmio Nobel, são a seguir traduzidas para o português.

Conferência Nobel de Pierre Curie: Substâncias radioativas, especialmente o rádio 6 de junho de 1905³

Permitam-me, primeiramente, dizer-lhes que estou muito feliz em falar hoje para a Academia de Ciências, que conferiu à Madame Curie e a mim a grande honra de nos laurear com um Prêmio Nobel. Precisamos nos desculpar por não termos podido vir a Estocolmo antes, por razões bastante fora de nosso controle.

Tenho de falar-lhes hoje das propriedades das substâncias radioativas e, em particular, das propriedades do rádio. Não conseguirei mencionar apenas as nossas próprias investigações. No começo de nossos estudos sobre o assunto, em 1898, éramos, juntamente a Becquerel, os únicos interessados nessa questão; desde então, mais trabalhos foram feitos e, atualmente, não é

³ Traduzida por Marinês Domingues Cordeiro.

mais possível falar de radioatividade sem mencionar os resultados das investigações de um grande número de físicos como Rutherford, Debierne, Elster e Geitel, Giesel, Kauffmann, Crookes, Ramsay e Soddy, para citar apenas alguns daqueles que fizeram importantes progressos no conhecimento das propriedades radioativas.

Darei apenas um panorama da descoberta do rádio e um pequeno resumo de suas propriedades, e então falarei das consequências do novo conhecimento que a radioatividade nos provê nos vários ramos das ciências.

Becquerel descobriu, em 1896, as propriedades especiais de radiação do urânio e de seus compostos. O urânio emite raios muito fracos, que impressionam chapas fotográficas. Esses raios passam por papéis pretos e metais; eles tornam o ar um condutor elétrico. A radiação não varia com o tempo e a causa de sua produção é desconhecida.

Madame Curie na França e Schmidt na Alemanha mostraram que o tório e seus compostos possuem as mesmas propriedades. Madame Curie também tornou evidente, em 1898, que, de todas as substâncias preparadas ou usadas no laboratório, apenas aquelas que continham urânio e tório eram capazes de emitir uma quantidade substancial de raios de Becquerel. Nós chamamos tais substâncias de radioativas.

A radioatividade, daí por diante, apresentava-se como uma propriedade atômica do urânio e do tório, sendo uma substância mais radioativa conforme fosse mais rica em urânio ou tório.

Madame Curie estudou os minerais contendo urânio e tório e, de acordo com todos os pontos de vista já citados, todos eles eram radioativos. Mas, ao fazer as medidas, ela notou que alguns deles eram mais radioativos do que deveriam ser, de acordo com seus conteúdos de urânio e tório. Madame Curie assumiu que essas substâncias continham elementos químicos radioativos que eram até então desconhecidos. Nós, Madame Curie e eu, tentamos encontrar essas novas substâncias hipotéticas no minério de urânio, a pechblenda. Fazendo a análise química desse mineral e tomando a radioatividade em cada parte do tratamento, encontramos primeiramente uma substância química altamente radioativa, com propriedades químicas parecidas com as do bismuto, que denominamos polônio, e então (com a colaboração de Bémont), uma segunda substância altamente radioativa, próxima ao bário, que chamamos de rádio. Finalmente, Debierne separou uma substância radioativa que pertence ao grupo dos metais-terrosos raros, o actínio.

Apenas traços dessas substâncias existem na pechblenda, mas eles têm uma enorme radioatividade, de magnitude de 2 milhões de vezes maior que a do urânio. Após tratar uma enorme quantidade de material, nós conseguimos obter sal de bário radífero, o suficiente para dele extrair rádio na forma de sal puro, por um método de fracionamento. O rádio é o mais alto homólogo do bário na série dos metais alcalinos terrosos. Sua massa atômica, determinada por Madame Curie, é 225. O rádio é caracterizado por um espectro distinto, que foi descoberto e estudado por Demarçay e então por Crookes, Runge e Precht, Exner e Haschek. A reação espectral do rádio é muito sensível, mas muito menos sensível que a radioatividade por revelar a

presença de traços de rádio.

Os efeitos gerais das radiações do rádio são intensos e variados.

Vários experimentos: Descarga de um eletroscópio. – Os raios passam por muitos centímetros de chumbo. – Uma faísca induzida pela presença de rádio. – Excitação da fosforescência de platino-cianeto de bário, vilmite e kunzita. – Coloração de vidro pelos raios. – Termoluminescência do flúor e ultramarina após a ação da radiação do rádio nessas substâncias. – Radiografias obtidas com rádio.

Uma substância radioativa como o rádio constitui uma fonte contínua de energia. Essa energia se manifesta pela emissão de radiação. Eu também mostrei, em colaboração com Laborde, que o rádio emite calor continuamente a aproximadamente 100 calorias por grama de rádio, por hora. Rutherford e Soddy, Runge e Precht e Knut Angström também mediram a emissão de calor pelo rádio; como essa emissão parece manter-se constante após vários anos, a energia total emitida pelo rádio, dessa maneira, é bastante considerável.

O trabalho de um grande número de físicos (Meyer e Schweidler, Giesel, Becquerel, P. Curie, Madame Curie, Rutherford, Villard, etc.) mostrou que as substâncias radioativas podem emitir raios de três variedades diferentes, designados por Rutherford como raios α , β e γ . Eles diferem entre si pela ação de campos elétricos e magnéticos, que modificam as trajetórias dos raios α e β .

Os raios β , similares aos raios catódicos, comportam-se como projéteis negativamente carregados de massa 2000 vezes menor que a do átomo de hidrogênio (elétron). Eu e Madame Curie constatamos que os raios β carregam consigo eletricidade negativa. Os raios α , similares aos raios canais de Goldstein, são projéteis mil vezes mais pesados e possuem eletricidade positiva. Os raios γ são similares aos raios de Röntgen.

Várias substâncias radioativas, tais como rádio, actínio e tório, também agem de outra maneira além de sua radiação direta; o ar que as circunda se torna radioativo e Rutherford assume que cada uma dessas substâncias emite um gás radioativo instável que ele chama de emanação e que se espalha no ar ao redor da substância radioativa.

A atividade dos gases que se tornam radioativos, dessa maneira, desaparece espontaneamente, de acordo com uma lei exponencial, com uma constante de tempo característica de cada substância ativa. Pode-se, então, dizer que a emanação do rádio diminui à metade a cada quatro dias, a do tório a cada 55 segundos e a do actínio a cada 3 segundos.

Substâncias sólidas colocadas na presença do ar ativo que circunda substâncias radioativas também se tornam temporariamente radioativas. Esse é o fenômeno da indução radioativa, que Madame Curie e eu descobrimos. As radioatividades induzidas, assim como as emanações, são igualmente instáveis e desaparecem espontaneamente segundo leis exponenciais características de cada uma delas.

Experimentos: Um tubo de vidro cheio de emanação de rádio trazido de Paris. – Des-

carga de um eletroscópio pelos raios da radioatividade induzida. – Fosforescência do sulfeto de zinco sob a ação da emanção.

Finalmente, segundo Ramsay e Soddy, no rádio se assenta uma contínua e espontânea produção de hélio.

A radioatividade de urânio, tório, rádio e actínio parece ser invariável por um período de vários anos; por outro lado, a radioatividade do polônio diminui à metade, de acordo com uma lei exponencial, em 140 dias, e com os anos ele desaparece quase completamente.

Esses são os fatos mais importantes que se estabeleceram pelos esforços de um grande número de físicos. Diversos fenômenos já foram extensivamente estudados por eles.

As conseqüências desses fatos fazem-se sentir em diversas áreas da ciência.

A importância desses fenômenos para a Física é evidente. O rádio constitui uma nova ferramenta de pesquisa nos laboratórios, uma fonte de novas radiações. O estudo dos raios β já é frutífero. Descobriu-se que esse estudo confirma a teoria de J.J. Thomson e Heaviside sobre a massa das partículas em movimento, carregadas eletricamente; de acordo com essa teoria, parte da massa resulta de reações eletromagnéticas do éter do vácuo. Os experimentos de Kauffmann com raios β do rádio levaram à assunção de que certas partículas têm velocidade próxima à da luz e que toda a massa da partícula é de natureza eletromagnética. Se também for feita a hipótese de que substâncias materiais são constituídas por um aglomerado de partículas eletrizadas, nota-se que os princípios fundamentais da mecânica deverão ser profundamente modificados.

A conseqüência para a Química de nosso conhecimento das propriedades das substâncias radioativas é talvez ainda mais importante. E isso nos leva a falar sobre a fonte de energia que mantém os fenômenos radioativos.

*No começo de nossas investigações, Madame Curie e eu consideramos que o fenômeno podia ser explicado por duas hipóteses distintas e bastante gerais, que foram descritas por Madame Curie em 1899 e 1900 (*Revue Générale des Sciences*, 10 de janeiro 1899 e *Revue Scientifique*, 21 de julho de 1900).*

1. Na primeira hipótese, supõe-se que as substâncias radioativas tomem emprestada de uma radiação externa a energia que elas emitem, e suas radiações seriam uma radiação secundária. Não é absurdo supor que o espaço seja constantemente atravessado por radiações muito penetrantes que certas substâncias seriam capazes de capturar. Segundo trabalhos recentes de Rutherford, Cooke e McLennan, essa hipótese parece ser útil na explicação de parte da radiação extremamente fraca que emana da maioria das substâncias.

2. Na segunda hipótese, pode-se supor que as substâncias radioativas tirem de si mesmas a energia que emitem. As substâncias radioativas estariam então em curso de evolução e se transformariam lenta e progressivamente, apesar da aparente invariabilidade de estado de algumas delas. A quantidade de calor emitido pelo rádio em vários anos é enorme se comparada ao calor emitido em qualquer reação química com a mesma quantidade de matéria. No entanto,

esse calor emitido representaria apenas a energia envolvida numa transformação de uma quantidade de rádio tão pequena que não poderia ser notada, mesmo após anos. Isso nos leva à suposição de que a transformação tem muito mais alcance que as transformações químicas ordinárias, que a existência do átomo está em risco e que estamos frente a uma transformação dos elementos.

A segunda hipótese tem se mostrado muito mais fértil para explicar as propriedades das substâncias radioativas propriamente ditas. Em particular, ela dá uma explicação imediata ao desaparecimento do polônio e à produção de hélio pelo rádio. Essa teoria da transformação dos elementos foi desenvolvida e formulada com grande audácia por Rutherford e Soddy, que propuseram haver uma desagregação contínua e irreversível dos átomos dos elementos radioativos. Na teoria de Rutherford, os produtos da desagregação seriam, por um lado, os raios projetáveis e, por outro lado, as emanações e a radioatividade induzida. As últimas seriam substâncias radioativas gasosas ou sólidas frequentemente com uma rápida evolução e tendo massas atômicas menores que a do elemento original, do qual se derivaram. Visto dessa maneira, a vida do rádio seria necessariamente limitada quando fosse separado de outras substâncias. Na natureza, o rádio é sempre encontrado associado ao urânio e pode-se assumir que seja produzido por ele.

Portanto, essa é uma forte teoria da transmutação dos elementos, apesar de não ser como os alquimistas a entendiam. A matéria inorgânica necessariamente evoluiria através das eras de acordo com leis imutáveis.

Por uma consequência inesperada, os fenômenos radioativos podem ser importantes na Geologia. Descobriu-se, por exemplo, que o rádio sempre acompanha o urânio em minerais. Descobriu-se até mesmo que a razão de rádio para urânio é constante em todos os minerais (Boltwood). Isso confirma a ideia da criação de rádio pelo urânio. Essa teoria pode ser estendida também para tentar explicar outras associações de elementos que ocorrem tão frequentemente em minerais. Pode-se imaginar que certos elementos foram formados na superfície da Terra ou que eles se originam de outros elementos num tempo que pode ser da ordem de magnitude de eras geológicas. Esse é um novo ponto de vista que os geólogos terão de considerar.

Elster e Geitel mostraram que a emanação do rádio está extensamente distribuída na Natureza, e que a radioatividade provavelmente tem uma função importante na meteorologia, com a ionização do ar provocando a condensação de vapor d'água.

Finalmente, nas ciências biológicas, os raios de rádio e suas emanações produzem efeitos interessantes, que estão sendo presentemente estudados. Os raios de rádio vêm sendo usados nos tratamentos de certas doenças (lúpus, câncer, doenças nervosas). Em certos casos, sua ação pode ser perigosa. Se uma caixa de madeira ou papelão contendo uma pequena ampola de vidro com alguns centigramas de sal de rádio for deixada no bolso por poucas horas, não se sentirá absolutamente nada. Mas quinze dias depois, uma vermelhidão aparecerá na epiderme e, então, um machucado, que será muito difícil de curar. Uma ação ainda mais prolongada pode levar à

paralisia e à morte. O rádio deve ser transportado numa grossa caixa de chumbo.

Pode-se inclusive considerar que o rádio pode tornar-se muito perigoso em mãos criminosas e, aqui, levanta-se a questão quanto à capacidade da humanidade de se beneficiar do conhecimento dos segredos da natureza, se está pronta para lucrar com isso e se essa sabedoria não será prejudicial. O exemplo das descobertas de Nobel é característico, pois explosivos poderosos capacitaram o homem a fazer trabalhos maravilhosos. Eles também são terríveis meios de destruição em mãos de grandes criminosos, levando povos a guerras. Sou um daqueles que acreditam, como Nobel, que a humanidade aproveitará as novas descobertas mais para bem do que para mal.

Marie, que não se apresentou formalmente em 1905, teve a oportunidade de falar de suas pesquisas ao ser laureada, pela segunda vez, com um Prêmio Nobel, desta vez em Química. De acordo com Pasachoff (1996), o Prêmio de Física de 1903 não mencionou as descobertas do polônio e do rádio, porque membros do comitê de Química defendiam a possibilidade de os Curie futuramente ganharem o prêmio da área. E assim aconteceu, quando Marie recebeu esse prêmio em 1911 – o prêmio não menciona o nome de Pierre, morto em 1906, pois, como consta no estatuto, não se institui prêmios póstumos.

Seis anos passaram-se entre as duas apresentações, e a compreensão de alguns fenômenos associados à radioatividade já era algo mais sólida. A teoria da transmutação dos elementos, proposta por Rutherford e Soddy, já estava consolidada; Rutherford ganhara, inclusive, o Prêmio Nobel de Química de 1908, “*por suas investigações sobre a desintegração dos elementos e a química das substâncias radioativas*”. Frederick Soddy também ganharia o Prêmio de Química, mais à frente, em 1921, “*por suas contribuições ao nosso conhecimento da química das substâncias radioativas e suas investigações sobre a origem e a natureza dos isótopos*”.

Nesse ínterim entre os dois prêmios, Pierre Curie faleceu (abril de 1906), Marie Curie tornou-se professora na Universidade de Paris (1908) e, segundo Mc-Grayne (1995, p.38), “*enfrentou uma crise científica*”. Em agosto de 1906, Lorde Kelvin, eminente físico na época, anunciou que o rádio não era um elemento, mas um composto de hélio e chumbo. Tal afirmação levou Marie, que ainda não conseguira isolar o rádio metálico, a focar todos os seus esforços para fazê-lo, como ela enfatiza fortemente em sua Conferência Nobel, cuja tradução é apresentada a seguir.

**Conferência Nobel de Marie Curie:
Rádio e os novos da Química
11 de dezembro de 1911⁴**

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

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

Longe do fim, o desenvolvimento da nova ciência tem seguido em frente constantemente. E agora, apenas 15 anos após a descoberta de Becquerel, estamos frente a frente com um mundo inteiro de novos fenômenos pertencentes a um campo que, apesar de sua próxima ligação com os campos da Física e da Química, é particularmente bem definido. Nesse campo, a importância do rádio do ponto de vista das teorias gerais foi decisivo. A história da descoberta e do isolamento dessa substância forneceu provas de minha hipótese de que a radioatividade é uma propriedade atômica da matéria e pode prover meios de busca por novos elementos. Essa hipótese nos trouxe às teorias atuais da radioatividade, segundo as quais podemos prever com certeza a existência de cerca de 30 novos elementos que não poderíamos usualmente isolar ou caracterizar por métodos químicos. Também assumimos que esses elementos passam por transforma-

⁴ Traduzida por Marinês Domingues Cordeiro.

ções atômicas e a prova mais direta em favor dessa teoria é dada pelo fato experimental, que é a formação do elemento quimicamente definido hélio pelo elemento quimicamente definido rádio.

Vendo o assunto desse ângulo, pode-se dizer que a tarefa de isolar o rádio é a pedra fundamental do edifício da ciência da radioatividade. Mais ainda, o rádio permanece sendo a mais útil e poderosa ferramenta nos laboratórios de radioatividade. Acredito que é por essas considerações que a Academia Sueca de Ciências me dá a grande honra de me laurear com o Prêmio Nobel de Química deste ano.

É, portanto, minha tarefa apresentar-lhes o rádio em particular como um novo elemento e deixar de lado a descrição de vários fenômenos radioativos que já foram descritos nas Conferências Nobel de H. Becquerel, P. Curie e E. Rutherford.

Antes de dar início ao conteúdo desta conferência, eu gostaria de lembrar que as descobertas do rádio e do polônio foram feitas por Pierre Curie em colaboração comigo. Também se deve a Pierre Curie a pesquisa básica no campo da radioatividade, que foi feita tanto por ele sozinho, quanto em colaboração com seus pupilos.

O trabalho químico necessário para isolar o rádio no estado de puro sal e de caracterizá-lo como um novo elemento foi feito por mim especialmente, mas está intimamente ligado ao nosso trabalho em comum. Por isso, sinto que interpreto corretamente a intenção da Academia de Ciências ao assumir que o prêmio de tal distinção a mim é motivado por nosso trabalho em comum e, então, presta homenagem à memória de Pierre Curie.

Deixem-me lembrá-los, inicialmente, que uma das mais importantes propriedades dos elementos radioativos é a ionização do ar em suas vizinhanças (Becquerel). Quando um composto de urânio é colocado numa placa metálica A, oposta a outra placa B e a diferença de potencial é mantida entre as placas A e B, uma corrente elétrica passa entre essas placas; essa corrente pode ser mensurada com precisão sob condições pertinentes e servirá para medir a atividade das substâncias. A condutividade passada para o ar pode ser atribuída à ionização produzida pelos raios emitidos pelos compostos de urânio.

Em 1897, usando esse método de medida, eu comecei um estudo da radiação dos compostos de urânio e logo estendi esse estudo a outras substâncias, com o objetivo de descobrir se a radiação desse tipo ocorre em outros elementos. Encontrei, dessa maneira, que, dos outros elementos conhecidos, apenas os compostos de tório comportam-se como os compostos de urânio.

Fui golpeada pelo fato de que a atividade do urânio e do tório parecia ser uma propriedade atômica desses elementos. Compostos químicos e misturas contendo urânio e tório são ativas em proporção direta à quantidade desses metais neles presentes. A atividade não era destruída por mudanças de estado físico ou transformações químicas.

Medi a atividade de um número de minerais; todos os que pareciam radioativos sempre continham urânio ou tório. Mas um fato inesperado foi notado: certos minerais (pechblenda, calcolita, autunita) tinham atividades maiores que as esperadas, baseando-se nos conteúdos de urânio e tório. Assim, certas pechblendas que continham 75% de óxido de urânio eram cerca de

quatro vezes mais radioativas que este óxido. A calcolita (fosfato de cobre e urânio cristalizado) é cerca de duas vezes mais radioativa que o urânio. Isso conflitava com a ideia de que nenhum mineral deveria ser mais radioativo do que o urânio metálico. Para explicar esses fatos, preparei calcolita sintética a partir de produtos puros e obtive cristais cujas atividades eram completamente consistentes com seus conteúdos de urânio; essa atividade era de cerca da metade da do urânio.

Então, pensei que a grande atividade do mineral natural poderia ser determinada pela presença de uma pequena quantidade de um material altamente radioativo, diferente do urânio, do tório e dos elementos conhecidos até então. Também me ocorreu o fato de que, se assim fosse, eu poderia extrair tais substâncias do mineral por métodos de análise química ordinários. Pierre Curie e eu logo começamos essa pesquisa, esperando que a proporção do novo elemento alcançasse alguma porcentagem considerável. Na realidade, a proporção do elemento hipotético era muito menor e levou vários anos para mostrarmos sem erros que a pechblenda contém ao menos um material altamente radioativo, que é um novo elemento no sentido que a Química define.

Fomos então levados a criar um novo método de busca por novos elementos, um método que se baseia na consideração de que a radioatividade é uma propriedade atômica da matéria. Cada separação química era seguida pela medida da atividade dos produtos obtidos, sendo, dessa maneira, possível determinar como a substância ativa se comportava do ponto de vista químico. Esse método tornou-se aplicação geral, e, num certo sentido, é similar à análise espectral. Por causa da vasta variedade de radiações emitidas, o método pôde ser aperfeiçoado e estendido, tornando possível não apenas a descoberta de materiais radioativos, mas também a distinção um do outro, com precisão.

Constatamos também que, ao usar o método descrito, era possível concentrar a atividade por métodos químicos. Descobrimos que a pechblenda contém ao menos dois materiais radioativos, um dos quais, acompanhando o bismuto, recebeu o nome de polônio enquanto o outro, par do bário, foi chamado de rádio.

Outros elementos radioativos foram descobertos desde então: actínio (Debierne), radiotório e mesotório (Hahn), iônio (Boltwood), etc.

Estávamos convencidos de que os materiais que descobríamos eram novos elementos químicos. Essa convicção baseava-se somente na natureza atômica da radioatividade. Mas, no início, do ponto de vista químico, era como se nossas substâncias fossem puro bismuto e puro bário. Era vital mostrar que a propriedade radioativa estava ligada a traços de elementos que não eram nem o bismuto, nem o bário. Para fazê-lo, os elementos hipotéticos deveriam ser isolados. No caso do rádio, o isolamento foi completamente bem sucedido, mas demandou vários anos de grandes esforços. O rádio na forma de puro sal é uma substância cuja manufatura é atualmente industrializada; nenhuma outra substância radioativa permitiu a obtenção de resultado tão positivo.

Os minerais radíferos são alvo de muitos estudos, pois a presença do rádio lhes confere um grande valor. Eles são identificáveis seja pelo método eletromagnético ou muito simplesmente pela impressão que produzem em chapas fotográficas. O melhor mineral de rádio é a pechblenda de St. Joachimsthal (Áustria), que por muito tempo foi processada para a obtenção de sais de urânio. Após a extração deste último, o mineral deixa um resíduo que contém rádio e polônio. Nós normalmente usamos esse resíduo como nossa matéria-prima.

O primeiro tratamento consiste na extração do bário radífero e do bismuto que contém o polônio. Esse tratamento, que foi feito pela primeira vez em laboratório com vários quilos de matéria-prima (cerca de 20 kg), teve de ser realizado numa fábrica, devido à necessidade de processamento de milhares de quilogramas. Na verdade, nós aprendemos gradativamente com a experiência que o rádio está na matéria-prima na proporção de alguns poucos decigramas por tonelada. Cerca de 10 a 20 kg de puro sulfato de bário contendo rádio são extraídos de uma tonelada de resíduo. A atividade desses sulfatos é, mesmo assim, de 30 a 60 vezes maior que a do urânio. Esses sulfatos são purificados e convertidos em cloretos. Na mistura de cloretos de bário e rádio, o rádio está presente apenas na proporção de cerca de três partes por cem mil. Na indústria do rádio na França, um mineral muito menos rico é usado mais frequentemente e a proporção indicada é ainda muito menor. Para separar o rádio do bário, utilizei o método de cristalização fracionada do cloreto (o brometo também pode ser usado). O sal de rádio, menos solúvel que o sal de bário, concentra-se em cristais. A fracionamento é uma operação longa e metódica, que elimina gradualmente o bário. Para obter um sal muito puro, tive de repetir a cristalização milhares de vezes. O progresso da fracionamento é monitorado pelas medidas de atividade.

Uma primeira prova de que o elemento rádio existia foi fornecida pela análise espectral. O espectro de um cloreto enriquecido por cristalização exibiu uma nova linha que Demarcay atribuiu ao novo elemento. Conforme a atividade tornava-se mais concentrada, a nova linha aumentava em intensidade e outras linhas apareciam enquanto o espectro do bário tornava-se cada vez menos visível.

Determinei repetidamente a massa atômica média do metal no sal submetido à análise espectral. O método utilizado consistia em determinar o conteúdo de cloro na forma de cloreto de prata numa quantidade conhecida do cloreto anidro. Notei que esse método oferece resultados muito bons, mesmo para quantidades tão pequenas de substâncias (0,1 a 0,5g), havendo uma balança muito rápida para evitar a absorção de água pelo sal alcalino-terroso durante as pesagens. A massa atômica aumenta com o enriquecimento do rádio, como indicado pelo espectro. As massas atômicas sucessivamente obtidas foram: 138; 146; 174; 225; 226,45. Esse último valor foi determinado em 1907 com 0,4g de sal de rádio muito puro. Os resultados de um número de determinações são 226,62; 226,31; 226,42. Estes foram confirmados por experimentos mais recentes.

A preparação de puros sais de rádio e a determinação da massa atômica do rádio provou positivamente que o rádio é um novo elemento e possibilitou que uma posição definitiva lhe

fosse dada. O rádio é o mais alto homólogo do bário na família dos metais alcalinos terrosos; entrou na tabela de Mendeleev na coluna correspondente, na linha que contém o urânio e o tório. O espectro do rádio é conhecido precisamente. Esses resultados tão exatos para o rádio convenceram os químicos e justificaram o estabelecimento da nova ciência dos elementos radioativos.

Quimicamente, o rádio pouco difere do bário; os sais desses dois elementos são isomórficos, enquanto os de rádio são menos solúveis que os de bário. É bastante interessante observar que a forte radioatividade do rádio não envolve anomalias químicas e que as propriedades químicas são realmente correspondentes à posição no Sistema Periódico indicada por sua massa atômica. A radioatividade do rádio em sais sólidos é cerca de cinco milhões de vezes maior que a do mesmo peso de urânio. Devido a essa atividade, seus sais são espontaneamente luminosos. Gostaria também de lembrar que o rádio libera energia continuamente, medida como calor, em torno de 118 calorias por grama de rádio, por hora.

O rádio foi isolado no estado metálico (M. Curie e A. Debierne, 1910). O método usado consiste na destilação em hidrogênio muito puro do amálgama do rádio formado pela eletrólise de uma solução clorada usando um cátodo de mercúrio. Apenas um decigrama de sal foi tratado e conseqüentemente houve dificuldades consideráveis. O metal obtido derrete a 700°C, e acima de tal temperatura começa a volatilizar. É muito instável no ar e decompõe a água vigorosamente.

As propriedades radioativas do metal são exatamente aquelas que podem ser previstas, assumindo-se que a radioatividade dos sais é uma propriedade atômica do rádio, cujo estado de combinação não afeta. Era de real importância corroborar esse ponto conforme dúvidas eram levantadas por aqueles que ainda não aceitavam a hipótese atômica da radioatividade.

Apesar de o rádio ter sido obtido até agora em quantidades muito reduzidas, é lícito afirmar, concluindo, que é um elemento químico perfeitamente definido e já bem estudado.

Infelizmente, o mesmo não se estende ao polônio, para o qual esforços consideráveis já foram despendidos. O grande obstáculo nesse caso é o fato de que a proporção de polônio no mineral é cerca de cinco mil vezes menor que a de rádio.

Antes que evidências teóricas estivessem disponíveis para se prever essa proporção, conduzi várias operações extremamente laboriosas para concentrar polônio e, dessa maneira, consegui produtos com atividades muito altas sem, no entanto, chegar a resultados definitivos, como no caso do rádio. A dificuldade aumenta com o fato de que o polônio desintegra-se espontaneamente, desaparecendo pela metade num período de 140 dias. Agora sabemos que o rádio também não tem uma vida infinita, mas a taxa de desaparecimento é muito menor (ele diminui pela metade em 2000 anos). Com nossas possibilidades, mal podemos esperar determinar a massa atômica do polônio, pois a teoria prevê que um mineral rico pode conter apenas alguns poucos centésimos de miligrama por tonelada, mas podemos esperar observar seu espectro. A operação

de concentração de polônio, como mostrarei mais tarde, é, ainda assim, um problema de grande interesse teórico.

Recentemente, em colaboração com Debierne, comecei a tratar várias toneladas de resíduos de mineral de urânio com o objetivo de preparar polônio. Inicialmente conduzido numa fábrica, e depois no laboratório, esse tratamento finalmente trouxe uns poucos miligramas de uma substância cerca de 50 vezes mais ativa que o mesmo peso de puro rádio. No espectro da substância, algumas novas linhas podiam ser observadas que pareciam atribuíveis ao polônio e das quais a mais importante tem o comprimento de onda de 4170,5Å. De acordo com a hipótese atômica da radioatividade, o espectro do polônio deveria desaparecer ao mesmo tempo em que sua atividade, e esse fato pode ser confirmado experimentalmente.

Eu considerei até agora o rádio e o polônio apenas como substâncias químicas. Mostrei como a hipótese fundamental, que diz que a radioatividade é uma propriedade atômica da substância, nos levou à descoberta de novos elementos químicos. A partir de agora, descreverei como o escopo dessa hipótese aumentou consideravelmente com as considerações e os fatos experimentais que resultaram no estabelecimento da teoria atômica das transformações radioativas.

O ponto inicial dessa teoria deve ser procurado nas considerações sobre a fonte da energia envolvida nos fenômenos radioativos. Essa energia se manifesta como uma emissão de raios que produzem fenômenos térmicos, elétricos e óticos. Como a emissão ocorre espontaneamente, sem qualquer causa de excitação, várias hipóteses foram admitidas para explicar a liberação de energia. Uma das hipóteses lançadas no começo de nossa pesquisa, por mim e Pierre Curie, consistia em assumir que a radiação fosse uma emissão de matéria acompanhada de uma perda na massa da substância ativa e que a energia fosse retirada da própria substância, cuja evolução ainda não estaria completa e que passa por uma transformação atômica. Essa hipótese, que primeiramente poderia apenas ser enunciada juntamente com outras teorias igualmente válidas, teve importância dominante e finalmente se assentou em nossas mentes graças ao corpo de evidências experimentais que a substanciavam. Essas evidências tratam-se essencialmente do seguinte: existe uma série de fenômenos radioativos na qual a radioatividade parece estar fortemente atrelada à matéria em quantidade imponderável; a radiação não é permanente, desaparecendo mais ou menos rapidamente com o tempo. O polônio, as emanações radioativas e os depósitos de radioatividade induzida são exemplos.

Ficou estabelecido ainda que, em certos casos, a radioatividade observada aumenta com o tempo. Isso acontece com o rádio recém-preparado, com a emanação recém-introduzida no aparato de medição, com o tório privado de tório-X, etc.

Um estudo cuidadoso desses fenômenos mostrou que uma explicação geral bastante satisfatória pode ser dada ao assumir que, cada vez que se observa uma diminuição da radioatividade, há uma destruição de matéria radioativa e que, cada vez que se observa um aumento da atividade, há uma produção de matéria radioativa. As radiações que desaparecem e aparecem

são, além disso, de uma natureza muito variada e admite-se que cada tipo de raio determinado pode servir para caracterizar uma substância que seja sua fonte e aparece e desaparece com ele.

Como a radioatividade é ainda uma propriedade essencialmente atômica, a produção ou a destruição de um tipo distinto de radioatividade corresponde a uma destruição ou produção de átomos de uma substância radioativa.

Finalmente, supondo-se que a energia radioativa seja um fenômeno que deriva de transformação atômica, pode-se deduzir que toda substância radioativa passa por uma transformação, mesmo nos parecendo invariável. A transformação, nesse caso, é apenas lenta demais, sendo esse o caso do rádio ou do urânio.

A teoria que acabei de resumir é o trabalho de Rutherford e Soddy, que eles chamaram de teoria da desintegração atômica. Aplicando essa teoria, pode-se concluir que uma substância radioativa primária como o rádio passa por uma série de transmutações atômicas pelas quais o átomo de rádio dá origem a uma série de átomos de massas cada vez menores, já que um estado estável não pode ser atingido enquanto o átomo formado for radioativo. A estabilidade só pode ser alcançada por matéria inativa.

Desse ponto de vista, um dos triunfos mais brilhantes da teoria é a predição de que o gás hélio, sempre presente em minerais radioativos, pode representar um dos produtos finais da evolução do rádio e que é na forma de raios α que os átomos de hélio, que são formados quando os átomos de rádio se desintegram, são descarregados. Agora, a produção de hélio pelo rádio foi provada pelos experimentos de Ramsay e Soddy, e não se pode mais contestar que o elemento químico perfeitamente definido rádio permite a formação de outro elemento químico bem definido – o hélio. Mais ainda, as investigações feitas por Rutherford e seus estudantes provaram que as partículas α emitidas pelo rádio com uma carga elétrica podem também ser encontradas na forma de gás hélio no lugar de onde foram retiradas.

Devo frisar aqui que a arrojada interpretação da relação existente entre rádio e hélio se apoia inteiramente na certeza de que o rádio tem todas as características de um elemento químico, como têm todos os outros elementos conhecidos, e que não pode haver dúvidas quanto à possibilidade de ser uma combinação molecular do hélio com outro elemento. Isso mostra o quão fundamental nessas circunstâncias tem sido o trabalho feito para provar a individualidade química do rádio e isso também pode ser visto na maneira como a hipótese da natureza atômica da radioatividade e a teoria das transformações radioativas nos levaram a descobertas experimentais de um primeiro exemplo claramente estabelecido de transmutação atômica. Esse é um fato de significância que não escapa a ninguém e que, incontestavelmente, marca uma época no ponto de vista da Química.

Trabalhos consideráveis, guiados pela teoria das transformações radioativas, levaram a aproximadamente 30 novos elementos radioativos, classificados em quatro séries, de acordo com a substância primária: estas são as séries de urânio, rádio, tório e actínio. As séries de urânio e rádio, na realidade, podem ser combinadas, pois parece estar provado que o rádio é um

derivado do urânio. Na série de rádio, o último corpo radioativo conhecido é o polônio, cuja produção pelo rádio é atualmente fato provado. É possível que a série de actínio esteja ligada à de rádio.

Mostramos que o gás hélio é um dos produtos da desintegração do rádio. Os átomos de hélio soltam-se dos átomos de rádio e seus derivados durante a transformação. Supõe-se que, após a partida de quatro átomos de hélio, o átomo de rádio produz um átomo de polônio; a partida de um quinto átomo de hélio determina a formação de um corpo inativo, cuja massa atômica acredita-se ser igual a 206 (20 unidades abaixo da do rádio). Segundo Rutherford, esse último elemento é nada mais nada menos que o chumbo, e essa suposição tem sido alvo de verificação experimental em meu laboratório. A produção de hélio a partir de polônio foi provada diretamente por Debierne.

A quantidade relativamente grande de polônio preparado por Curie e Debierne permitiu que um importante estudo fosse feito. Ele consistiu na contagem de grandes números de partículas- α emitidas pelo polônio e na coleta e na medição do volume correspondente de hélio. Como cada partícula é um átomo de hélio, o número de átomos de hélio é então encontrado ocupando certo volume e tendo certa massa. Assim, conseguimos deduzir, em linhas gerais, o número de moléculas em uma molécula-grama. Esse número, conhecido como constante de Avogadro, é de grande importância. Experimentos conduzidos com polônio levaram a um primeiro valor dessa constante, que está de acordo com os valores obtidos por outros métodos. A enumeração de partículas α é feita por um método eletromagnético devido a Rutherford; esse método foi aperfeiçoado com um aparato de gravação fotográfica.

Investigações recentes mostraram que o potássio e o rubídio emitem uma radiação bastante fraca, similar à radiação beta do urânio e do rádio. Ainda não sabemos se devemos considerar radioativas essas substâncias, ou seja, que estejam em processo de transformação.

Para concluir, gostaria de enfatizar a natureza da nova química de substâncias radioativas. Toneladas de material têm de ser tratadas para que se extraia rádio do mineral. As quantidades de rádio disponíveis num laboratório são da ordem de um miligrama ou de um grama no máximo, valendo essa substância 400.000 francos por grama. Frequentemente, materiais foram manuseados e a presença de rádio neles não pode ser detectada pela balança ou mesmo pelo espectroscópio. E mesmo assim, temos métodos de medição tão perfeitos e sensíveis que conseguimos conhecer com bastante precisão as pequenas quantidades de rádio que estamos usando. A análise radioativa por métodos eletrométricos nos permite calcular com erro de 1% um milésimo de um miligrama de rádio e detectar a presença de 10^{-10} gramas de rádio diluídos em alguns poucos gramas de material. Esse método é o único que poderia nos levar à descoberta do rádio, haja vista a diluição dessa substância no minério. A sensibilidade dos métodos é ainda mais forte no caso da emanção do rádio, que pode ser detectada quando a quantidade presente chega, por exemplo, a apenas 10^{-10} mm³. Como a atividade específica de uma substância, no caso de radiações análogas, está aproximadamente na proporção inversa da vida média, resulta que,

se a vida média for muito curta, a reação radioativa pode ter sensibilidade sem precedentes. Também estamos acostumados, atualmente, a lidar em laboratório com substâncias cujas presenças apenas nos são mostradas por suas propriedades radioativas, mas que, mesmo assim, podemos determinar, dissolver, reprecipitar de suas soluções e depositar eletroliticamente. Isso significa que nós temos aqui um tipo completamente distinto de química, para a qual a ferramenta mais utilizada é o eletrômetro e não a balança, e que podemos chamar de química do imponderável.

IV. Implicações educacionais

Ao utilizar essas duas Conferências Nobel e fazê-las dialogar com outras produções acadêmicas, nota-se a presença de algumas categorias de implicações educacionais. Essas implicações seriam de cunhos motivacional, histórico-epistemológico e conceitual.

Em se tratando das implicações motivacionais, pode-se mencionar alguns obstáculos bastante significativos que o casal teve que transpor. O primeiro deles, que Pierre e Marie Curie não mencionam em suas conferências, seriam as condições de trabalho a que se submeteram durante os longos quatro anos na tentativa de isolar os novos elementos. É impressionante que eles pudessem desenvolver métodos de detectar o rádio com erros tão pequenos trabalhando em um hangar de teto esburacado e chão de terra, em que a umidade era a maior inimiga, presente diariamente (CURIE, 1962). A obstinação desse casal fez com que eles passassem por cima de toda sorte de obstáculos para que pudessem ter evidência experimental de sua hipótese. Este é um exemplo de superação e tenacidade para o aluno, que também encontra em seus estudos os mais diversos obstáculos.

O segundo deles diz respeito especialmente ao gênero. É importante frisar o que Marie Curie enfrentou não apenas durante sua busca pelos novos elementos, mas por toda a sua vida: as dificuldades que a ela impunham por ser mulher. Por esse motivo, ela não pode continuar seus estudos em nível superior em sua terra natal, a Polônia, especialmente após a invasão russa – apesar de ter o apoio incondicional de seu pai. Marie mudou-se para a França, para estudar na Sorbonne, onde uma de suas irmãs cursava Medicina. Morou com sua irmã por um tempo, mas por necessitar de mais tranquilidade e silêncio, decidiu morar sozinha num apartamento que com seus poucos ganhos poderia manter (CURIE, 1962).

Por ser, além de mulher, uma estrangeira, Madame Curie teve seus obstáculos potencializados. Vivia com pouquíssimo dinheiro – mesmo depois de casar com Pierre, até conseguir um cargo na Universidade de Paris – e comia muito mal.

Alimentava-se com sopas, pães e frutas no pequeno quarto em que vivia, que sustentava com o dinheiro que arrecadara em seus tempos de governanta na Polônia e com bolsas que conseguia. Mulheres francesas não frequentavam universidades no fim do século XIX, o que a distinguiu ainda mais dos franceses – serviço que seus atributos físicos eslavos já faziam (CURIE, 1962; MCGRAYNE, 1995).

No caso do próprio Prêmio Nobel, segundo Pasachoff (1996) e McGrayne (1995), a nomeação estendia-se apenas a Pierre, mesmo que grande parte das comunicações científicas tenha sido assinada por ela e por ambos. Foi necessária a intervenção do membro do comitê Magnus Goesta Mittag-Leffler, que, ao escrever a Pierre sobre a situação, recebeu a resposta de que Marie também deveria ser considerada, pois o trabalho sobre matéria radioativa era do casal – e então, numa manobra burocrática, os membros do Comitê Nobel de Física conseguiram nomeá-la em parceria com Pierre. Apesar de já consagrada mundialmente como cientista, Marie Curie só assumiu uma cadeira na Sorbonne em substituição a Pierre, após sua morte.

Há ainda outro obstáculo que o casal contornou enquanto pode: as doenças e os ferimentos causados pelo excesso de exposição à radioatividade. Foi apenas na década de 1920 que se começou a pesquisar os perigos da exposição à radiação emitida pelos compostos radioativos, quando se notou o aumento na incidência de câncer entre as mulheres que usavam rádio na maquiagem e as altas taxas de morte por anemia e leucemia entre os cientistas e bolsistas que trabalhavam com pesquisa em radioatividade. Hoje, entende-se que nenhuma pessoa esteve tão exposta à radioatividade quanto Marie Curie, e provavelmente seria este o destino de Pierre não houvesse ele morrido trágica e precocemente num acidente de trânsito. A exposição à radiação provocou no cientista feridas profundas nas mãos e nas pernas (pela proximidade do bolso, onde ele levava as amostras de rádio), às quais ele, inclusive, se refere em sua Conferência Nobel. O casal vivia em permanente estado de cansaço. Ao fim de sua vida, Marie, praticamente cega pela catarata, sofreu também de leucemia, que provocou sua morte em 1934.

De fato, não foram poucos os obstáculos que se impuseram na trajetória do casal Curie – preconceitos, doenças, falta de reconhecimento e, talvez o maior de todos, a separação com a morte de Pierre. Mesmo assim, biógrafos do casal, como Ève Curie (1962), Pasachoff (1996) e McGrayne (1995) insistem que nenhum deles fez apagar a chama científica – reconhecidamente muito forte – que existia dentro deles. Quando perguntados se patenteariam suas descobertas, o que enriqueceria o casal e permitiria a construção de um laboratório adequado às pesquisas, alegaram que isso iria contra o espírito científico. Mais adiante em sua vida, Madame Curie lutaria por uma ciência francesa mais forte e aberta a estrangeiros e

mulheres, com certo êxito. A história de vida do casal é repleta de fatos que, como esses, corroboram a constatação dos biógrafos.

No que se refere às implicações educacionais de cunho histórico-epistemológico, este trabalho desenvolve-as em dois momentos distintos. No primeiro deles, dispõe-se a fazer uma associação das conferências com Gil-Pérez *et al* (2001), argumentando que elas podem ser utilizadas para lidar com as visões deformadas da ciência mapeadas pelos autores.

Numa leitura cuidadosa da Conferência Nobel de Marie Curie, logo se encontra a passagem que diz respeito aos resultados da primeira técnica que desenvolveu para a verificação da atividade de todos os elementos. Ela afirma ter sido “golpeada” pelos indícios de que as atividades de urânio e tório pareciam ser uma propriedade atômica desses elementos. Assim, de posse dessa primeira conjectura, ela passa a medir sistematicamente a atividade de vários outros minerais, e se depara com o inesperado: alguns minerais tinham atividades muito maiores que suas proporções de urânio e tório previam. Ao invés de descartar a hipótese da natureza atômica da radiação, ela prepara esses minerais artificialmente e observa que suas radioatividades são perfeitamente consistentes com seus conteúdos de urânio e tório. Surge, então, uma nova hipótese: a da existência de um elemento químico até então desconhecido, em quantidade ínfima e de altíssima atividade.

Ela e Pierre decidem empreender a busca por esse elemento hipotético através de técnicas químicas ordinárias, o que se mostrou uma tarefa muitíssimo árdua, pois esse elemento parecia estar em proporções ainda menores do que eles esperavam. Por esse motivo, o casal desenvolve uma nova técnica de pesquisa, cuja base teórica é a natureza atômica da radioatividade. E essa técnica os levou primeiramente ao polônio e depois ao rádio.

O que se pode notar na narração de Marie Curie é que a ciência que estava sendo construída por eles nada tinha de atórica, a concepção de uso mais corrente na bibliografia, segundo Gil-Pérez *et al* (2001). Esse fato também transparece na Conferência Nobel de Pierre Curie, quando ele menciona a assunção de novos elementos radioativos e, a partir dessa hipótese, a procura por eles. A importância de uma hipótese apriorística e a perseverança nela ficam ainda mais claras ao considerar que eles trabalharam por mais de quatro anos nas técnicas de concentração do rádio e do polônio. Nesse caso, foram duas as hipóteses que nortearam os trabalhos do casal: a radioatividade ser de fato uma propriedade atômica da matéria e a existência de elementos químicos radioativos em quantidades imponderáveis.

Essa mesma narração ainda contraria outra imagem deformada da ciência: a visão algorítmica, exata e infalível, ou seja, a existência de um método científico. Observa-se que cada novo experimento dependia de uma nova suposição, que não

havia um guia de passos a se seguir até que se encontrasse o rádio. Foi necessário que se substituíssem métodos e técnicas para que se chegasse aos resultados desejados.

Outra visão deformada da ciência que cai por terra com a análise das conferências é a imagem aproblemática e a-histórica da ciência. A palavra que Marie Curie usa em sua conferência, ao falar da descoberta da radiação como sendo uma propriedade atômica da matéria, é “golpeada” (*struck*, em inglês), ou seja, ela encontrou algo que jamais esperava. A própria estrutura de sua conferência deixa claro que houve um processo de construção dessa ciência, em que os problemas, longe de serem encarados como empecilho, colaboraram para seu desenvolvimento.

Ainda sobre as concepções levantadas por Gil-Pérez *et al* (2001), a visão acumulativa e de crescimento linear da ciência tem um contra-exemplo bastante forte na conferência de Marie Curie. Ela fala da dificuldade de provar a existência dos elementos radioativos; a comunidade científica, especialmente os químicos, exigia que o rádio e o polônio estivessem isolados, pois do ponto de vista químico aceito na época, esses elementos poderiam ser considerados o bário e o bismuto, respectivamente. Após a consagração do rádio como elemento químico, de espectro e massa atômica bem definidos, e, conseqüentemente, da radioatividade como nova ciência, a comunidade passou a aceitar outros 30 novos elementos químicos que não poderiam ser e nem foram isolados. Pode-se observar uma mudança de postura da comunidade química bastante relevante.

Há outra categoria destacada por Gil-Pérez *et al* (2001), a visão que trata a ciência como elitista e individualista. Diz respeito à imagem normalmente propagada de um cientista especialmente dotado, o que passaria ao aluno a ideia de algo inalcançável “*com claras discriminações de natureza social e sexual*” (p. 133). Observa-se nas conferências que os Curie situam sistematicamente seus trabalhos dentre os outros. Fica claro que o casal teve acesso aos trabalhos de vários cientistas, como Becquerel, cujo trabalho deu o primeiro passo para as investigações, Demarçay, com as análises espectrais, Debierne, que descobriu o actínio e ajudou Marie Curie a isolar o rádio em estado metálico, e Rutherford e Soddy, que propuseram a teoria da transmutação dos elementos a partir dos fenômenos radioativos e das hipóteses para a questão energética propostas pelo casal. Nesse aspecto, a conferência de Pierre Curie é ainda mais rica que a de sua esposa. Já no começo de sua aula, ele fala que não conseguiria relatar a radioatividade a partir das investigações realizadas somente pelo casal, e que, apesar de no começo apenas eles e Becquerel se interessarem pelo novo fenômeno, poucos anos depois, muitos cientistas trabalhavam em todas as múltiplas possibilidades que a radioatividade oferecia.

Os aspectos sociais são usualmente dissociados da ciência, como observaram Gil-Pérez *et al* (2001). Para essa imagem deformada da ciência, encontramos um contra-exemplo fortíssimo na última parte da Conferência de Pierre Curie. Ele discorre sobre a importância da radioatividade na Geologia, na Meteorologia e na Medicina, apontando inclusive para o perigo que constitui os conhecimentos sobre o rádio e a radioatividade em mãos erradas. Aponta-se aqui que as descobertas de Pierre e Marie Curie não foram de modo algum motivadas por necessidades sociais e tecnológicas; entretanto, ambos demonstraram grande interesse nas capacidades tecnológicas e medicinais do rádio. Pierre mostra seu interesse explicitamente em sua Conferência; Marie, como se sabe, foi ativista na 1ª Grande Guerra e defendeu a utilização do rádio e dos raios X para fins medicinais.

Por fim, há a concepção exclusivamente analítica da ciência, ou seja, a necessidade de compartimentação dos estudos, ignorando que haja por trás de pesquisas pontuais diversos esforços para teorias unificadoras. Os autores constatarem a baixíssima frequência dessa visão nos trabalhos acadêmicos, apesar da importância epistemológica que ela assume. E ela também pode ser desmistificada com as Conferências Nobel do casal, especialmente de Pierre, quando ele enfatiza o significado que os novos fenômenos teriam para a Química e a Física como se conhecia à época. Continuar estudando os fenômenos radioativos e negar que os princípios por trás deles estremeciam a ciência como um todo seria ter dela uma visão analítica; mas Pierre demonstra preocupação exatamente no sentido oposto.

Esse trecho da aula de Pierre Curie encaixa-se também na desmistificação da já citada visão acumulativa de crescimento linear, pois aponta claramente para a revolução científica que acontecia desde a descoberta dos raios X e da radioatividade. Como é bem frisado por Gil-Pérez *et al* (2001), esse tipo de superposição de visões é bastante natural e frequente.

Gil-Pérez *et al* (2001) não se restringem a mapear as imagens deformadas do trabalho científico. Em uma segunda etapa de sua pesquisa, procuram embasamento nos pontos de convergência entre diversas epistemologias pós-positivistas para definir com certa segurança algumas das características que se pode, de fato, atribuir ao trabalho científico. São elas: a recusa de um Método Científico, porém havendo lugar para uma pluralidade de métodos científicos; a recusa da origem sensorial do conhecimento científico; o destaque do papel atribuído pela investigação ao pensamento divergente; a busca pela coerência global, e a compreensão do caráter social do desenvolvimento científico. No discurso de Pierre Curie, novamente pode-se encontrar exemplos claros de posturas em favor do pensamento divergente e da busca pela coerência global.

Hipóteses ganham um *status* diferenciado nas epistemologias pós-positivistas, onde entra, então, o destaque à investigação do pensamento divergente. Assim, as hipóteses devem ser “*postas à prova da forma mais rigorosa possível*” (GIL-PÉREZ *et al*, 2001, p. 136), porém sem um método normativo engessado.

Essa característica encontra reflexos bem delineados na Conferência de Pierre Curie, quando ele expõe que, após a hipótese de que a radioatividade seria uma característica atômica do urânio e do tório, sua esposa pesquisou tantos minerais que os continham quanto pôde, reafirmando e solidificando sua hipótese.

Mais adiante, ao dissertar sobre a fonte contínua de energia que era o rádio, fala que quantificou, juntamente com Laborde, o calor emitido por um grama de rádio, hipótese que foi submetida a testes por diversos outros cientistas, que chegaram à mesma conclusão e números aproximados. Na Conferência de Marie Curie, enquanto descreve as belezas da produção de matéria estável por matéria instável, ela destaca a possibilidade de se calcular a constante de Avogadro a partir das partículas α emitidas pelo polônio e comparar a grandeza encontrada a outras obtidas através de outros métodos. Esses são dois exemplos da busca pela coerência global, característica do trabalho científico em que se submete certas hipóteses a provas de outros experimentos consolidados, verificando se existe uma coerência global dentro da ciência.

Há algumas considerações histórico-epistemológicas relativas ao momento do descobrimento da radioatividade que podem ser feitas tendo como ponto de partida uma interessante colocação de Pierre Curie, logo ao início de sua conferência: em 1898, apenas Becquerel, além do casal, parecia ocupar-se dos estudos dos raios de urânio. Quatro artigos de historiadores da ciência – Badash (1965) e Martins (1990, 1997, 2005) – são postos aqui a dialogar com as duas conferências, além das comunicações de Henri Becquerel à Academia Francesa de Ciências em 1896.

A descoberta da radioatividade tem íntimas relações com a descoberta dos raios X, por Röntgen, ao final de 1895. Henri Poincaré, que recebera do próprio Röntgen uma chapa impressionada pela radiação, apresenta-a numa comunicação frente à Academia Francesa de Ciências já no início do ano seguinte. Nessa comunicação, ele levanta a possibilidade de, pelos raios X se originarem no ponto fluorescente do tubo de Crookes, outros materiais luminescentes também emitirem a nova radiação. Essa sugestão pôs diversos físicos franceses à procura de radiações geradas dessa maneira – dentre eles, Henri Becquerel, que já tinha um histórico de pesquisas com materiais luminescentes, muitos deles compostos de urânio (MAR-

TINS, 1997). Já em fevereiro de 1896, ele apresenta os primeiros resultados de suas pesquisas. Em março, passa a falar especificamente dos compostos de urânio.

Interessantemente, a descoberta da radiação de urânio não despertou tanto fascínio naquele momento histórico-científico quanto desperta hoje em dia. A competição com uma descoberta como a radiação X, que tinha a capacidade de impressionar chapas fotográficas a ponto de se obterem os negativos de ossos humanos, não era fácil. Os fenômenos que surgiam eram muito mais do que se esperava da ciência do fim do século XIX – quando se chegou a admitir a possibilidade de, após a estruturação da física clássica, a física trabalhar apenas no sentido do aperfeiçoamento do que era conhecido. Além disso, outras radiações – imaginárias ou reais – surgiam frequentemente, fruto das dificuldades técnicas, das interpretações ambíguas de fenômenos ou das crenças pessoais dos cientistas envolvidos. A própria radioatividade quase passou despercebida nesse novo mundo de radiações, como se verá a seguir.

Badash (1965) faz uma compilação de diversos trabalhos de cientistas pelo mundo que, após o lançamento da hipótese de Poincaré, puseram-se a trabalhar nos compostos luminescentes e chegaram a observar a radiação do urânio, mas não interpretaram corretamente o fenômeno. É o caso de Silvanus Thompson, que, segundo o autor, deparou-se com a radioatividade antes mesmo de Becquerel, mas ao associá-la a algum tipo de luminescência (mesmo tendo resultados para compostos não luminescentes), enxergou o fenômeno de maneira errônea e abandonou a pesquisa com sais de urânio, voltando a trabalhar com raios X.

Mesmo Henri Becquerel parece não ter interpretado sua grande descoberta como algo extraordinário que é. Sobre a radiação dos corpos luminescentes, dos sais de urânio e do urânio metálico fez sete comunicações em 1896, duas em 1897 e nenhuma em 1898 – ano em que o casal Curie joga luz na verdadeira raiz do fenômeno. Suas interpretações estavam inicialmente presas àquela conjectura de Henri Poincaré, como esclarecem os títulos de suas três primeiras comunicações: “*Sobre as radiações emitidas por fosforescências*”, de 24 de fevereiro de 1896 (BECQUEREL, 1896a), “*Sobre as radiações invisíveis emitidas pelos corpos fosforescentes*”, de 2 de março de 1896 (BECQUEREL, 1896b) e “*Sobre algumas novas propriedades das radiações invisíveis emitidas por diversos corpos fosforescentes*”, de 9 de março de 1896 (BECQUEREL, 1896c). Mesmo localizando suas pesquisas nos sais de urânio, nos trabalhos seguintes, e mesmo observando que o urânio metálico, que não é luminescente, também emitia essa radiação, Becquerel não concluiu ser essa radiação uma propriedade do urânio. Pelo contrário, manteve-se firme na hipótese da luminescência – sugerindo ser o urânio o primeiro caso

de um material de fosforescência invisível (MARTINS, 1990). Ele encerra sua comunicação de 18 de maio de 1896 com a seguinte constatação:

Ao continuar o estudo desses novos fenômenos, penso ser de grande importância apontar para a emissão produzida pelo urânio que acredito ser o primeiro exemplo de um metal que apresenta um fenômeno da ordem de uma fosforescência invisível (BECQUEREL, 1896d, p. 1088).

Nessa comunicação, ele faz um apanhado dos resultados de suas pesquisas com sais de urânio até então. Assim, logo no começo, comenta sobre a constatação de que os compostos de urânio emitem radiação apesar de não expostos à luz. Essa constatação poderia se constituir no ponto de virada nos estudos da radiação de urânio, mas não o foi para Becquerel. Logo após descrever a independência do fenômeno da luz, ele afirma que a exposição ao sol ou à luz aumentou ligeiramente a intensidade da radiação emitida pelos sais de urânio, o que se sabe atualmente não ser verdadeiro. E mais à frente, ele reitera ter mostrado *“igualmente que essas radiações se refletem e se refratam, como a luz”* (BECQUEREL, 1896d, p. 1086).

Analisando essa sequência de fatos exposta pelo próprio cientista, enxerga-se claramente o ponto das pesquisas em que a radiação do urânio se mostrava mais fortemente singular: o fato de irradiar mesmo de corpos não luminescentes. No entanto, essa clareza não existia na época. O histórico de Henri Becquerel nos estudos de compostos luminescentes, o fato de ele estar pesquisando por radiações análogas aos raios X e a hipótese lançada por Poincaré interferiram em suas interpretações dos fenômenos que à sua frente se desenrolavam e o fizeram acreditar ter encontrado nada além de radiações eletromagnéticas ordinárias. Sua inclinação à luminescência, entretanto, levanta certas dúvidas quanto à atribuição da descoberta da radioatividade.

Como já foi mencionado, Silvanus Thompson, na Inglaterra, também se deparou com a radiação dos compostos de urânio. Porém, sua interpretação errônea do fenômeno e seu maior interesse nos raios X impediram-no de verdadeiramente descobrir a radioatividade (BADASH, 1965). Os mesmos argumentos são utilizados por Martins (1990), ao mostrar a impossibilidade de se atribuir a Henri Becquerel a descoberta da radioatividade. Para o autor, os relatos do próprio cientista em suas comunicações apontam para o fato de ele não reconhecer a essência e a distinção do fenômeno com que trabalhava. Ele localizou uma radiação nos compostos de urânio, é verdade. Mas, mesmo tendo notado os efeitos elétricos dessa radiação e sua independência da excitação ótica, manteve-se firme na hipótese da luminescência.

Além disso, a radioatividade não se encerra no urânio, mas as pesquisas de Becquerel, sim. Quando Marie Curie – simultânea e independentemente de Schmidt, na Alemanha – notou que também o tório tinha a propriedade de emitir radiações como as do urânio, constatou que o nome *radiação de urânio*, até então utilizada, não era fiel ao fenômeno. Como menciona em sua Conferência Nobel, cunhou, primeiramente, o adjetivo radioativo para os elementos que apresentassem tais propriedades, e depois o termo radioatividade, elucidando a presença de um novo fenômeno, distinto dos raios X, com suas próprias potencialidades.

As dificuldades interpretativas não param em Becquerel e em Thompson. Badash (1965) afirma que a grande sacada de Marie e Pierre Curie no estudo das radiações do urânio e, depois, do tório teria sido a investigação através de métodos elétricos, em detrimento do método fotográfico, o que proporcionara uma pesquisa muito mais quantitativa do que se fazia, e diminuiria a quantidade de erros – muitas vezes, chapas fotográficas eram impressionadas em consequência de reações químicas, e não de emissão de radiações. Porém, no mesmo artigo, o autor cita a pesquisa de eminentes físicos como Lord Kelvin, John Carruthers Beattie e Maryan Smoluchowski de Smolan, que também fizeram experimentos de natureza elétrica com o urânio metálico e não chegaram a nenhuma conclusão efetiva. Ou seja, foi preciso muito mais do que apenas o método elétrico para que os Curies chegassem às hipóteses e conclusões a que chegaram.

Posteriormente, as pesquisas sobre as radiações do urânio mostraram-se muito frutíferas, revolucionando a ciência do início do século XX. Mas foi apenas nas mãos de dois cientistas que, à época, não se encontravam no epicentro da ciência francesa que o fenômeno ganhou a interpretação correta. O número de comunicações de Henri Becquerel sobre as radiações de urânio falam por si mesmos: como já mencionado, em 1898, Becquerel não apresentou nenhuma comunicação sobre os estudos com urânio à Academia Francesa de Ciências. Nesse mesmo ano, o casal Curie anunciou haver encontrado uma nova substância radioativa na pechblenda, ressuscitando o assunto.

Deve-se observar, no entanto, que apesar das evidências, Becquerel foi e é considerado o descobridor da radioatividade, dividindo inclusive o Prêmio Nobel de 1903 com o casal Curie, “*em reconhecimento aos serviços extraordinários por ele prestados com a descoberta da radioatividade espontânea*”. O próprio Pierre Curie, em sua Conferência, menciona que “*No começo de nossos estudos sobre o assunto, em 1898, nós éramos, juntamente com Becquerel, os únicos interessados nessa questão*” (CURIE; 1967). Com esse exemplo, pode-se argumentar que uma parte do que caracteriza uma descoberta científica parece estar intimamente atrelada às relações sociais exercidas naquele contexto histórico-científico.

Os episódios descritos aqui, aliados à polêmica que Martins (1990) levanta e aos argumentos de Badash (1965), têm grande potencial educacional histórico-epistemológico. A pertinente discussão quanto ao que caracteriza e, principalmente, legitima uma descoberta científica é latente na formação tanto do cientista quanto do professor de ciências. O espaço de uma disciplina de História da Ciência deve destinar certa atenção aos diversos fatores para a consolidação de uma descoberta, não apenas do ponto de vista científico, mas também do ponto de vista social. A utilização das Conferências aqui traduzidas em articulação com os artigos mencionados pode proporcionar o ‘pontapé inicial’ dessa discussão, por oferecer uma passagem da história da ciência que ilustra e fornece grandes argumentos.

A legitimidade de uma descoberta científica pode ter o reconhecimento de um Prêmio Nobel, mas esse assunto pode gerar polêmicas, como a levantada por Martins (2005), sobre os dois Nobel atribuídos a Madame Curie. Segundo o autor, do ponto de vista de um historiador da ciência que, de fato, leve em conta a ciência, o prêmio dedicado ao casal Curie de 1903 foi merecido, ao contrário do Prêmio da Química destinado a Marie Curie em 1911. Ele argumenta que todos os trabalhos relevantes de Marie Curie foram feitos anteriormente à sua premiação de 1903, tendo o prêmio de 1911 mais valor social do que científico.

É verdade que Marie Curie, pouco antes de ser laureada em Química, passara por sérias crises pessoais, que envolveram um escândalo com Paul Langevin – físico francês de muito prestígio, amigo do casal, que era casado –, ataques xenofóbicos e problemas de saúde. Como já era figura conhecida e de muito carisma internacionalmente, defende-se que a comunidade científica tenha premiado a cientista naquele momento específico na tentativa de desviar as atenções de sua vida pessoal (REID, 1979, *apud* MARTINS, 2005).

Essa posição quanto aos valores sociais e científicos dos prêmios de Marie Curie parece aceitável à primeira vista, mas toma contornos bastante radicais quando se analisa o contexto mais amplo. De fato, o Prêmio Nobel de Física de 1903, atribuído a Pierre e Marie Curie, não menciona as descobertas do rádio e do polônio – como se pode constatar no portal do Prêmio Nobel. Essa ausência dos elementos no título do prêmio pode ser considerada muito estranha, pois como Pierre já sugeria – por vezes, enfatizava – em 1905, o rádio, especialmente, era o pilar da ciência da radioatividade. Não obstante, como destacam as biografias de Madame Curie, McGrayne (1995) e Pasachoff (1996), essa ausência se justifica, pois o grupo de químicos da Academia Sueca de Ciências defendeu a possibilidade de o casal ser laureado na área, em outro momento, por tais descobertas.

Realmente, a descoberta dos novos elementos, em particular do rádio, teve importância vital dentro da Química, como já foi discutido anteriormente nas im-

plicações epistemológicas, pois provocou uma mudança clara de postura da comunidade química da época. Como Madame Curie disserta em sua aula, o estabelecimento do rádio como elemento químico de massa atômica, espectro e posição bem definidos na tabela periódica consolidou a radioatividade e permitiu que outros trinta elementos radioativos – que não tinham massa atômica e espectro definidos – fossem reconhecidos, a grande maioria após a premiação de 1903. Não bastasse essa (enorme) contribuição de Marie Curie para a Química especialmente, há outra ainda, também bastante singular: em 1910 (e, portanto, no hiato entre 1903 e 1911), ela obtém, com a colaboração de Andre Debierne, o rádio em estado metálico, extinguindo de uma vez por todas as dúvidas que pairavam sobre a existência desse elemento.

Aqueles que ainda atribuem ao segundo prêmio à Marie Curie muito mais valor social do que científico podem contra-argumentar que, apesar de os dividendos da descoberta do rádio terem chegado entre 1903 e 1911 (com a consagração da radioatividade), o rádio foi descoberto efetivamente antes de 1903. Sabe-se também que, no testamento de Nobel, ele pede que seja premiada a contribuição mais importante para a humanidade *no ano anterior*. Todavia, a história da premiação é repleta de exemplos de laureados que haviam publicado suas contribuições muito anteriormente ao ano em que receberam o prêmio. Röntgen recebeu o prêmio em 1901 por sua descoberta de 1895; Henri Becquerel e o casal Curie, o receberam em 1903, por suas descobertas de 1896 e 1898, respectivamente. Max Plack foi premiado em 1918, mas a descoberta da quantização de energia foi feita em 1900. Albert Einstein explicou o efeito fotoelétrico em 1905, mas foi laureado apenas em 1921.

Voltando à radioatividade, é inegável que a pressão da comunidade científica para a premiação de Marie Curie, especificamente no ano de 1911, tenha sido parcialmente motivada pela crise pessoal que a cientista vinha vivendo. Contudo, seria apropriado tomar uma posição como esta sem que parte significativa do crédito da premiação fosse dada às importantes contribuições científicas que Madame Curie deu à Química? Por certo, essa discussão também tem seu lugar assegurado numa aula sobre a radioatividade.

Dentre as várias implicações educacionais de cunho conceitual, optou-se neste artigo por tratar de uma em especial: a questão da origem da energia que fomenta os fenômenos radioativos. Na Conferência Nobel de Pierre Curie, é bastante clara a passagem em que ele trata das hipóteses lançadas a esse problema: uma delas sendo a suposição de que a matéria radioativa tome essa energia de uma radiação externa; a outra, supondo que a matéria radioativa tire de si mesma essa energia.

De fato, é relatada por Ève Curie (1962) a agitação que as buscas pela explicação da radioatividade causaram entre os cientistas franceses:

Discutem-se os últimos “boatos” circulantes: indiscrições sobre os raios “alfa”, “beta” e “gama” do radium... Perrin, Debierne e Urbain tagarelam com ardor. Andam à cola da energia emitida pelo radium, e para explicá-la têm que por de lado o princípio da conservação da matéria e o princípio da conservação de energia – duas bases! Quando Pierre lembra da hipótese das transmutações radioativas, Urbain rompe em berros. Não quer ouvir nada e defende com violência a outra ideia! E em que ponto está o trabalho de Sagnac? E que notícias há das experiências de Marie sobre o peso atômico do radium? (CURIE, 1962, p. 200)⁵

Assim, nota-se nesse pequeno grupo de cientistas ao menos um que não concebia a segunda hipótese lançada por Pierre em sua conferência, baseado nos trabalhos de Sagnac, que, ao observar os metais atingidos pelos raios X, constatou também a emissão de raios secundários, que eram mais fortemente absorvidos que os raios X incidentes. Numa placa metálica fina, notou que esses raios secundários se propagavam para os dois lados, e embora o metal tivesse absorvido pouquíssima radiação, os seus raios secundários eram capazes de impressionar fortemente as chapas fotográficas. Esses raios secundários eram mais fortes conforme fosse maior o peso atômico da substância irradiada. Assim, Marie foi levada a conjecturar a possibilidade da existência no espaço de radiações difíceis de detectar, como os raios X, que, ao serem absorvidas pelo urânio, elemento químico de maior peso até então, fariam com que ele emitisse uma radiação secundária (MARTINS, 2003).

Na conferência de Pierre sua inclinação à hipótese da transmutação dos elementos de Rutherford e Soddy fica bastante clara. Apesar desse posicionamento, Martins (2003) defende que foi a hipótese da emissão secundária que guiou os primeiros experimentos de Marie, pois restringir o fenômeno apenas aos elementos mais pesados daria suporte à hipótese da radioatividade ser uma propriedade atômica da matéria. Contudo, mais tarde o casal encontra nessa hipótese uma barreira para a compreensão da natureza dos fenômenos radioativos.

Marie e Pierre mantiveram uma posição reticente quanto à origem da energia dos processos radioativos em suas comunicações de 1900, 1902 e 1903. William Crookes, por exemplo, propunha em 1898 que essa energia era retirada do ar ao redor, violando a lei de entropia. Já em 1900, ele mudou sua posição para a

⁵ A tradução dessa obra foi feita por Monteiro Lobato.

hipótese materialística, mencionando inclusive a possibilidade de haver corpos menores que o átomo, referenciado no modelo de Thomson. Mendeleev, que considerava alquimia as novíssimas descobertas do elétron e da radioatividade, continuava a propor uma hipótese similar à primeira de Crookes. Em 1923, Perrin ainda defendia a hipótese de que a radioatividade não seria um fenômeno espontâneo, mas acionado por alguma radiação de origem terrestre ou cósmica (KRAGH, 1997).

O momento de efervescência científica do fim do século XIX e começo do século XX só fez aumentar a nebulosidade sobre a verdadeira natureza dos fenômenos radioativos. A descoberta contemporânea do elétron e dos raios X, somada ao posicionamento rígido dos grandes químicos, fez com que a primeira década do século fosse marcada fortemente pela criação, divulgação e defesa de diversos modelos atômicos que dessem conta desses novos fenômenos – a grande maioria sendo meramente especulativos.

Kragh (1997) divide o estudo da radioatividade em três períodos: de 1898 a 1903, a fase exploratória, quando se buscava entender especialmente se o fenômeno era de natureza atômica ou causado por fatores externos; o segundo período vai de 1903 a 1913, quando a primeira conjectura já era aceita e então se passou a procurar por explicações sobre a natureza da radioatividade. A partir de 1913, as investigações das causas da radioatividade ganham novos contornos, com o estabelecimento do modelo atômico de Bohr-Rutherford. O período intermediário, descrito pelo autor, mostra que não foi simples a aceitação de qualquer uma das hipóteses expostas por Pierre Curie ou outras. O autor explica “(...) *havia interesse considerável em explicar a radioatividade em termos de modelos atômicos no período de 1903 a 1913*” (p. 331). A incipiência dos modelos atômicos fazia com que a compreensão da radioatividade também o fosse; a forte necessidade de compreensão da natureza da radioatividade através de modelos atômicos fez com que muitos químicos se sentissem invadidos pela Física.

Interessantemente, o mesmo autor (KRAGH, 2000) divide a história da evolução da noção de elemento químico também em três períodos. O primeiro deles começa exatamente com a descoberta da radioatividade, em 1896. Esse primeiro período, para o autor, significa, para a noção de elemento químico, um período de fortes confusões, que dura até 1913. A pedra fundamental para o fim da confusão, novamente, é o modelo atômico de Bohr-Rutherford. As principais causas dessa discórdia residiam justamente nas crenças pessoais dos cientistas, muitos deles obtusos em relação à matéria imutável, ao átomo indivisível e ao éter (KRAGH, 2000). Como se pode notar, esse primeiro período da história da noção de

elemento químico é o mesmo período que o autor atribui às duas primeiras fases dos estudos da radioatividade.

Apesar do nome – *A Causa e a Natureza da Radioatividade* (RUTHERFORD; SODDY, 1902) – e de fornecer uma ótima descrição para os decaimentos radioativos, a teoria de Rutherford e Soddy não era capaz de explicar a causa da radioatividade. Mesmo assim, essa parecia ser uma preocupação generalizada entre os físicos e físico-químicos da época, inclusive de Rutherford, que, em 1907, afirma que as teorias atômicas daquele momento não eram capazes de responder a questão causal do fenômeno. O período de preocupação com a causalidade parece ter atingido seu ápice, mas, por cerca de uma década, nenhum progresso fora feito na explicação da natureza da radioatividade. Kragh (2000) menciona um pronunciamento de Marie Curie, em 1910:

Sua conclusão limitada de que, de alguma maneira, a radioatividade seria o resultado da desordem intra-atômica demonstrava que não acontecera nenhum progresso de fato na explicação da radioatividade durante uma década (KRAGH, idem, p. 353).

O interesse geral no assunto parece ter decaído quando os grandes cientistas da época continuaram produzindo conhecimento sobre a radioatividade, apesar de não conhecerem ao certo sua natureza. Pode-se também inferir que explicações estatísticas passavam cada vez mais a entrar no cotidiano dos cientistas daquele momento. Na segunda década do século XX, apenas cientistas periféricos ainda se dedicavam à procura da natureza da radioatividade, enquanto os cientistas mais renomados continuavam suas pesquisas, que não foram afetadas pelo desconhecimento das causas do fenômeno. Por esse motivo, Kragh (idem) defende que a radioatividade tenha se transformado de *problema sem solução* em *não-problema solucionado*. Esse não é o primeiro episódio da história da ciência em que o desenvolvimento das pesquisas num conceito tenha prosseguido apesar de não se conhecer ao certo sua natureza. A mecânica newtoniana é o mais antigo e conhecido dos exemplos que podemos dar de abandono das causas; essa característica também é típica da eletricidade e da espectroscopia (PEDUZZI, 2008).

V. Considerações finais

Mesmo que o presente trabalho seja primariamente direcionado a estudantes e professores de física, num esforço de contextualização da formação de futuros professores e físicos, é importante apontar que, pela radioatividade representar uma intersecção entre Física e Química, muitas das discussões aqui propostas se enqua-

dram também na sala de aula de Química. Como já foi mencionado, esforços para o ensino de radioatividade parecem mais concentrados entre os educadores em Química; a perspectiva da maioria dos trabalhos, porém, não é histórica, filosófica e sociológica.

A inserção dos aspectos históricos, filosóficos e sociológicos já é, de certa maneira, consagrada na comunidade de educadores em Física; na comunidade dos educadores em Química, Matos *et al* (1991) listam as diversas justificativas para esse tipo de inserção. Não causa qualquer estranhamento o fato de que essas justificativas sejam similares às justificativas que os educadores em Física frequentemente citam, sobre as quais se discorreu na introdução do trabalho. Mas, além delas, os autores chamam a atenção para um problema típico da formação em Química, que pode ser resolvido com o auxílio da formação histórica e filosófica do professor.

Elas vão permitir ao professor a aprendizagem de determinados conceitos e teorias que, embora abandonados pelo ensino da Química no terceiro grau, em prol de outros, mais atuais e abrangentes, ainda são ensinados no segundo grau, numa formulação muito aproximada daquela em que foram originalmente concebidas no passado. (MATOS et al, 1991, p. 296)

Kragh (2000) mostra claramente como o limite entre as duas ciências no início do século XX, especialmente pela descoberta do elétron e da radioatividade, parecia cada vez mais nebuloso. Não é objetivo deste trabalho querer suscitar uma discussão sobre os domínios de cada ciência, mas é inegável que o átomo e, portanto, a radioatividade, representam intersecções fortes das duas áreas. A Academia Sueca de Ciências também não pareceu se importar com títulos quando laureou reconhecidos físicos, como Marie Curie e Ernest Rutherford, com o Prêmio Nobel de Química. E a teoria da desintegração atômica, tão relevante e estudada na Física, é de autoria de Rutherford e de Frederick Soddy, químico. O importante naquele momento era o conteúdo revolucionário dos estudos desses cientistas para cada área; da mesma maneira, crendo um professor de Química ser a história da radioatividade essencial em suas aulas, ele tem neste trabalho de Física alguma colaboração e instrumentação para tal inserção.

A eminência do Ano Mundial da Química, em 2011, em comemoração ao centenário do Prêmio Nobel de Química atribuído a Madame Curie, traz à tona não apenas a relevância do tema da radioatividade, mas também a figura da mulher na ciência. É correto afirmar que Madame Curie foi uma das primeiras pessoas a ganhar um Prêmio Nobel em áreas científicas. Porém, uma mulher foi novamente

laureada apenas em 1935 – 32 anos após o primeiro prêmio de Marie e, ironicamente talvez, a filha mais velha do casal Curie, Irène Joliot-Curie.

Na literatura, várias mulheres figuram como exemplos de injustiças do Prêmio Nobel. McGrayne (1995), por exemplo, dedica seu livro a dois nomes de extrema importância para a Medicina, Hilde Proescholdt Mangold e Frieda Robscheit-Robbins, que não receberam o devido reconhecimento por seus trabalhos; Chassot (1997) menciona que dos cem nomes mais importantes e influentes da história da humanidade, numa pesquisa elaborada por Michael Hart, apenas dois são de mulheres. E as três mulheres que trouxeram as maiores contribuições para a Física do século passado – Marie Curie, Lise Meitner e Maria Goeppert Mayer, segundo ele – sequer são citadas. Dessas três, uma delas não recebeu o Prêmio Nobel que merecia: Lise Meitner, na descoberta da fissão nuclear. Apenas seu colega Otto Hahn foi laureado pela pesquisa inicial nessa área de estudo.

Os motivos da escassez feminina nas ciências têm sido largamente tratados; no entanto, o produto essencial de tantas pesquisas sobre o assunto deve ser a inclusão. Essa discussão pode extrapolar a questão do gênero e adentrar outras tantas minorias, que certamente guardam seus grandes talentos e que a ciência moderna, no entanto, se dá ao luxo de ignorar. Por esse motivo, é de grande importância remeter-se a Whitaker (1979), pois a utilização exclusiva das Conferências Nobel acaba restringindo o estudo apenas aos trabalhos mais reconhecidos. Adiciona-se aqui que a decisão do que é ou não bem-sucedido cabe a um comitê, que apesar de levar em conta a opinião dos grandes cientistas por todo o mundo, tem a palavra final na decisão do merecedor do prêmio.

Deve-se fazer uma ressalva importante: este trabalho pretende gerar subsídios relevantes para as discussões do professor com seus alunos, que possam ser levados à sala de aula da maneira que o professor preferir ou se sentir confortável. Entretanto, é essencial esclarecer que, especialmente ao tratar das categorias de imagens deformadas do trabalho científico, o professor deve explorá-las, frisá-las e esclarecer onde elas aparecem no exemplo histórico.

A presente discussão, é claro, não tem a intenção de esgotar as possibilidades de abordagem didática das duas conferências. Por exemplo, no âmbito epistemológico, e particularmente no caso da conferência de Marie Curie, caberia discutir o uso recorrente do termo *provar*, trazendo Popper (1982) à discussão.

Enfim, para finalizar, este trabalho teve por objetivo propor uma abordagem sobre certos aspectos históricos da radioatividade. Conforme já foi citado, muito pouco foi produzido sobre o assunto para propósitos educacionais, apesar da importância extraordinária que ele teve para o desenvolvimento de outras áreas da Física. A gênese da radioatividade esteve intimamente ligada à descoberta dos

raios X; a procura pela compreensão de sua natureza esteve fortemente ligada com o desenvolvimento de modelos atômicos; a radioatividade deu origem à Física e à Química Nucleares; as pesquisas em radioatividade chegaram ao conceito de isótopos e culminaram com a descoberta do núcleo, do nêutron e da radioatividade artificial. A mecânica quântica acabou emprestando sua natureza estatística para as explicações das causas da radioatividade, permitindo que os cientistas parassem de se preocupar em explicá-las e direcionassem seus esforços em pesquisas frutíferas com materiais radioativos (BADASH, 1979). A energia emitida em um decaimento radioativo faz uso da equivalência massa-energia, do corpo conceitual da relatividade restrita. Ou seja, de alguma maneira, a radioatividade faz conexão com várias frentes do que conhecemos como Física Moderna.

Além dos trabalhos desenvolvidos pelo casal Curie, o professor interessado em levar a radioatividade para a sala de aula tem nos trabalhos de Rutherford, Soddy e outros, uma ‘sequência natural’, com a teoria da desintegração, as emissões alfa, beta e gama, a descoberta dos isótopos, do núcleo atômico, etc. Esse mesmo professor poderá encontrar novos subsídios para uma possível instrumentalização desse assunto em outro artigo escrito pelos presentes autores (CORDEIRO; PEDUZZI, 2010).

Referências

ANELE, A. C. **O enfoque CTS em sala de aula: uma abordagem diferenciada utilizando a Unidade de Aprendizagem na Educação Química**. 2007. 109p. Dissertação (Mestrado em Educação em Ciências e Matemática) - Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

BADASH, L. Radioactivity before the Curies. **American Journal of Physics**, v. 33, n. 2, p. 128-135, fev. 1965.

BADASH, L. The suicidal success of radiochemistry. **The British Journal for the History of Science**, v. 12, n. 3, p. 245-256, nov. 1979.

BAGNATO, V. S. Prêmio Nobel de Física 2005: Theodor W. Hänsch, John L. Hall e a espectroscopia de precisão. **Física na Escola**, São Paulo, v. 6, n. 2, p. 36-38, out. 2005.

BECQUEREL, H. Sur les radiations émises par phosphorescence. **Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences de Paris**, Paris, v. 122, t. 1, p. 420-421. 1896a.

BECQUEREL, H. Sur les radiations invisibles émises par les corps phosphorescents. **Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences de Paris**, Paris, v. 122, t. 1, p. 501-503, 1896b.

BECQUEREL, H. Sur quelques propriétés nouvelles des radiations invisibles émises par divers corps phosphorescents. **Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences de Paris**, Paris, v. 122, t. 1, p. 559-564, 1896c.

BECQUEREL, H. Émission de radiations nouvelles par l'uranium métallique. **Comptes Rendus Hebdomadaires de l'Académie des Sciences de Paris**. Paris, v. 122, t. 1, p. 1086-1088, 1896d.

CHASSOT, A. Nomes que fizeram a Química (e quase nunca lembrados). **Química Nova na Escola**, n.5, mai. 1997.

CORDEIRO, M. D.; PEDUZZI, L. O. Q. Aspectos da natureza da ciência e do trabalho científico no período inicial de desenvolvimento da radioatividade. **Artigo submetido a publicação**, 2010.

CURIE, E. **Madame Curie**. Tradução: Monteiro Lobato. 11. ed. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 1962.

CURIE, P. Radioactive Substances, especially Radium. In: **Nobel Lectures, Physics 1901-1921**. Amsterdam: Elsevier, 1967.

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

ERDURAN, S. et al. Developing epistemologically empowered teachers: examining the role of philosophy of chemistry in teacher education. **Science and Education**, Holanda, v. 16, n. 9 – 10, p. 975-989, out. 2007.

ESHACH, H. The Nobel Prize in Physics Class: Science, History and Glamour. **Science and Education**, Holanda. Publicada online, ago. 2008. Disponível em:

<<http://www.springerlink.com> > Acesso em: 17 mai. 2009.

FELDMAN, B. **The Nobel Prize**. 1. ed. Nova York: Arcade Publishing, 2000.

GIL-PÉREZ, D. et al. Para uma imagem não deformada do trabalho científico. **Ciência e Educação**, São Paulo, v.7, n.2, p. 125-154, 2001.

KAUFFMANN, G. B. The Nobel Centennial 1901-2011. **Chemical Educator**, v. 6, n. 6, p. 370 – 384, 2001.

KNOBEL, M.; MACEDO, W. A. A. O Prêmio Nobel da Física de 2007, gravação magnética e spintrônica. **Física na Escola**, São Paulo, v. 8, n. 2, p. 33-35, out. 2007.

KOEPSSEL, R. **CTS no Ensino Médio: aproximando a escola da sociedade**. 2003. 101p. Dissertação (Mestrado em Educação). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

KRAGH, H. The origin of radioactivity: from solvable problem to unsolvable non-problem. **Archive for History of Exact Sciences**, Berlin/Heidelberg, v. 50, n. 3-4, set. 1997.

KRAGH, H. Conceptual changes in chemistry: the notion of a chemical element ca. 1900 – 1925. **Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics**, v. 31, n. 4, dez. 2000.

MARTINS, R. A. Como Becquerel não descobriu a radioatividade. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 7 (numero especial), p. 27-45, 1990.

MARTINS, R. A. Becquerel and the Choice of Uranium Compounds. **Archives for History of Exact Sciences**, Berlin/Heidelberg, v. 51, n. 1, p. 67-81, mar. 1997.

MARTINS, R. A. As primeiras investigações de Marie Curie sobre os elementos radioativos. **Revista da SBHC**, n. 1, p. 29-41, 2003.

MARTINS, R. A. Ciências versus historiografia: os diferentes níveis discursivos nas obras sobre história da ciência. In: ALFONSO-GOLDFARB, A. M; BELTRAN, M. H. R. (Eds.). **Escrevendo a História da Ciência: tendências, propostas e discussões historiográficas**. São Paulo: EDUC / Livraria da Física / FAPESP, 2005. p. 115-145.

MATOS, J. A. M. G. et al. Ensino de disciplinas de história da Química em cursos de graduação. **Química Nova**, v. 14, n. 4, p. 295-299, 1991.

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

MCGRAYNE, S. B. **Mulheres que ganharam o Prêmio Nobel em Ciências: suas vidas, lutas e notáveis descobertas**. Tradução: Maiza F. Rocha e Renata Brant de Carvalho. São Paulo: Marco Zero, 1995.

MIZRAHI, S. S. Prêmio Nobel de Física de 2005: Roy J. Glauber, o fundador da óptica quântica teórica. **Física na Escola**, São Paulo, v. 6, n. 2, p. 36-38, out. 2005.

OSTERMANN, F. **Tópicos de Física Contemporânea e escolas de nível médio e na formação de professores de Física**. 2000. Tese (Doutorado em Física). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

OSTERMANN, F., MOREIRA, M.A Uma revisão bibliográfica sobre a área de pesquisa “Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio”. **Investigações em Ensino de Ciências**. Porto Alegre, v. 5, n. 1, p. 23-48, jan. 2000.

OWENS, T. Going to school with Madame Curie and Mr. Einstein: gender roles in children’s science biographies. **Cultural Studies of Science Education**, Holanda. Publicado online, fev. 2009. Disponível em: <www.springerlink.com>. Acesso em: 17 mai. 2009.

PASACHOFF, N. **Marie Curie and the science of radioactivity**. Oxford University Press, 1996. Disponível em: <<http://www.aip.org/history/curie/contents.htm>>. Acesso em: 17 mai. 2009.

PEDUZZI, L. O. Q. **Do átomo grego ao átomo de Bohr**. Publicação interna. Departamento de Física, Universidade Federal de Santa Catarina, 2008. 202 p.

POPPER, K. R. **Conjecturas e refutações**. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 1982.

REID, R. **Marie Curie Derrière la Légende**. Tradução: M-F Palomera. Paris: Éditions du SUEILS, 1979.

ROCHA-FILHO, R. C. Camada de ozônio dá Nobel. **Química Nova na Escola**, n. 2, nov. 1995.

RUTHERFORD, E.; SODDY, F. The cause and nature of radioactivity. **Philosophical Magazine**, v. 4, p. 370-396, 1902.

SILVA, A. P. **Alguns aspectos do percurso de Marie Curie (1867-1934) em seus estudos sobre as radiações**. 2004. 112p. Dissertação (Mestrado em História da Ciência) Pontifícia Universidade Católica, São Paulo.

SILVA, G. J. **Epistemologia em uso: imagem da ciência em livros didáticos de Química**. 2007. 289p. Dissertação (Mestrado em Educação). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

TERRAZAN, E. A. A inserção da Física Moderna e Contemporânea no ensino de Física na escola de 2º grau. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 9, n. 3, p. 209-214, dez. 1992.

WHITAKER, M. A. B. History and quasi-history in physics education – part 2. **Physics Education**, v. 14, n. 4, p. 239-242, mai. 1979.

WOODALL, A. J. Science History: the place of the history of science in science teaching. **Physics Education**, v. 2, n. 6, nov. 1967.