

FUNDAÇÃO OSWALDO CRUZ  
ESCOLA POLITÉCNICA DE SAÚDE JOAQUIM VENÂNCIO  
LABORATÓRIO DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL EM TÉCNICAS LABORATORIAIS  
EM SAÚDE

Cecília Cruz de Almeida

ENTRE O INVISÍVEL E O DIVISÍVEL:  
Marie Curie e um novo olhar sobre a natureza da matéria

Rio de Janeiro

2011

Cecília Cruz de Almeida

ENTRE O INVISÍVEL E O DIVISÍVEL:

Marie Curie e um novo olhar sobre a natureza da matéria

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Escola Politécnica Joaquim Venâncio como  
requisito parcial para a aprovação no curso  
técnico em nível médio em saúde com  
habilitação em Análises Clínicas.

Orientadora: Tânia de Oliveira Camel

Rio de Janeiro

2011

Cecília Cruz de Almeida

ENTRE O INVISÍVEL E O DIVISÍVEL:

Marie Curie e um novo olhar sobre a natureza da matéria

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola Politécnica de Saúde Joaquim Venâncio como requisito parcial para aprovação no curso técnico de nível médio em saúde com habilitação em Análises Clínicas.

Aprovado em 16/12/2011

BANCA EXAMINADORA

---

(Dra. Tânia de Oliveira Camel – FIOCRUZ / EPSJV / LABFORM)

---

(Ms. Flávio Henrique Marcolino da Paixão – FIOCRUZ / EPSJV / LATEC)

---

(Dr. Jairo Dias de Freitas - FIOCRUZ / EPSJV / LABFORM)

*Dedico este trabalho ao meu irmão, Anderson.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus.

Agradeço a todas as pessoas, familiares e amigos, que contribuíram direta e indiretamente na elaboração e conclusão deste trabalho.

*L'essentiel est invisible pour les yeux.  
L'essentiel est invisible pour les yeux, répéta  
petit prince, afin de se souvenir.  
(Antoine de Saint-Exupéry)*

## RESUMO

No final do século XIX, a crescente descoberta das radiações despertou o interesse de diversos cientistas, entre eles Henri Becquerel (1852-1908) que detectou os raios urânicos em 1896 e no mesmo ano relatou sua descoberta à Academia das Ciências de Paris, referindo-se ao fenômeno como algo exclusivo dos compostos de urânio. Marie Curie (1867-1934), uma física polonesa, tomou esses raios como objeto de estudo para sua tese de doutorado na Sorbonne, França. A conceituação e generalização do fenômeno couberam a Marie Curie, sobretudo por intermédio da descoberta de novos elementos – polônio e rádio e da radioatividade do elemento tório. Além de Becquerel, que observou e relatou o fenômeno, outros cientistas também se envolveram com a construção desse conhecimento como Ernest Rutherford (1871-1937) que investigou a radiação emitida pelos materiais radioativos; Eugène Demarçay (1852-1904), com as análises espectrais dos produtos que Marie Curie obteve quando tentava provar a existência de novos elementos radioativos; André Debierne (1874-1949), que auxiliou no isolamento do rádio em estado metálico; Frederick Soddy (1877-1956) que junto com Rutherford propôs a teoria da transmutação dos elementos a partir dos fenômenos radioativos e Pierre Curie (1859-1906) que construiu os equipamentos utilizados nas pesquisas de sua esposa. O presente trabalho considera o conjunto de relações que permitiram a elaboração do conceito de radioatividade a partir dos trabalhos de Marie Curie: as necessidades tecnológicas de seu tempo, os pesquisadores e suas incertezas, as questões em torno do átomo e da composição da matéria e as respostas dadas pelos cientistas.

Palavras-Chave: Radioatividade. Elementos radioativos. Partículas subatômicas. Transmutação elementar.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Ilustração 1 - Radiações descobertas da segunda metade do século XIX até a primeira metade do século XX .....	12
Ilustração 2 - Bobina de indução e esquema .....	13
Ilustração 3 Tubo termoiônico e esquemas .....	13
Ilustração 4 - Eletrômetro de cristal piezelétrico utilizado nas pesquisas de Marie Curie .....	23
Ilustração 5 - Esquema da montagem experimental utilizada por Marie Curie para a medição da radioatividade .....	24
Ilustração 6 – Diagrama da tese de doutorado de Marie Curie .....	39

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	9
<b>2 SOBRE AS RADIAÇÕES DO SÉCULO XIX</b> .....	12
2.1 RADIAÇÕES .....	12
2.2 RAIOS X .....	14
2.3 RAIOS DE URÂNIO .....	17
2.4 DESINTERESSE PELOS RAIOS DE URÂNIO .....	20
2.5 MARIE CURIE .....	21
<b>3 SOBRE AS DESCOBERTAS DE MARIE CURIE</b> .....	24
3.1 INÍCIO DAS PESQUISAS .....	24
3.2 TENTATIVA DE ISOLAR O POLÔNIO .....	30
3.3 RÁDIO .....	33
3.4 DIVULGAÇÃO DA DESCOBERTA DO RÁDIO .....	33
<b>4 SOBRE A CONFIRMAÇÃO E EXPLICAÇÃO DA RADIOATIVIDADE</b> .....	37
4.1 FONTE DA ENERGIA .....	37
4.2 EMANAÇÃO DOS ELEMENTOS RADIOATIVOS .....	39
4.3 TRANSMUTAÇÃO DOS ELEMENTOS RADIOATIVOS .....	42
4.4 OS PRÊMIOS .....	45
<b>5 CONCLUSÃO</b> .....	49
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	53

## 1 INTRODUÇÃO

O presente ano foi proclamado Ano Internacional da Química em resultado da reunião da Assembléia Geral das Nações Unidas sob o tema “Química - a nossa vida, o nosso futuro”. Neste ano, em especial, existe um incentivo para lembrarmos a importância da Química para o bem-estar da humanidade e ressaltar o fato de ser uma ciência fundamental para a compreensão do mundo. Entre as comemorações previstas estão os 100º aniversários do Prêmio Nobel de Química em 1911 para Marie Curie e da elaboração do modelo atômico de Rutherford ligado intimamente com a pesquisa de Marie Curie (REZENDE, 2011, p.3).

Neste trabalho apresento as pesquisas iniciais acerca da radioatividade, um dos conhecimentos adquiridos em grande parte graças à pesquisa de químicos e físicos. “A radioatividade é, a um só tempo, um fenômeno atômico acompanhado de uma mudança química, em que são produzidas novas espécies de matéria” (RUTHERFORD; SODDY, 1892 apud BADASH, 2007, p. 2383) através da emissão de partículas subatômicas e de radiação, oriundas de núcleos atômicos instáveis (XAVIER; LIMA *et al.*, 2007, p.87).

Este fenômeno foi explorado de diversas formas e, atualmente, a sua aplicação tem se refletido em diferentes áreas do conhecimento. Em 1905, durante a conferência do prêmio Nobel, Pierre Curie antecipou as potencialidades dessa descoberta, discorrendo sobre os possíveis empregos da radioatividade na geologia, na meteorologia e na medicina e o sobre o perigo que representava os conhecimentos sobre o a radioatividade em “mãos erradas” (CURIE, 1905, p.78).

Essas previsões se concretizaram, contudo, a radioatividade também foi responsável pela obtenção de tecnologias mais eficientes na prevenção, diagnóstico e tratamentos na área da saúde. As ressalvas de Pierre foram justificadas, uma vez que o conhecimento da radioatividade foi utilizado para a fabricação de materiais bélicos e o seu uso de modo irresponsável originou acidentes nucleares que resultaram em mortes e desastres ambientais (XAVIER; LIMA *et al.*, 2007, p.85-88).

É importante ressaltar que antes de representar um instrumento útil para a sociedade e para a compreensão de diversos fenômenos, a radioatividade foi recebida com muita desconfiança pela comunidade científica. Para entender o fenômeno era preciso considerar, de forma definitiva, o átomo como uma partícula divisível embora a própria definição de átomo incluía a noção de indivisibilidade<sup>1</sup> e retomar o termo *transmutação*, que fora proposto pelos

<sup>1</sup> Apesar do elétron ter sido identificado por J.J. Thomson em 1897, na Inglaterra, em alguns países ainda não existia um consenso quanto à natureza atômica da matéria como, por exemplo, na França. Esse fato tornava o átomo divisível (MOREIRA, 1997, p.3).

alquimistas e que significa a transformação de um elemento em outro, o que aparentemente desfazia o conceito de elemento, por meio do qual toda uma ciência tinha se construído<sup>2</sup>.

Durante o período em que essas ideias antagônicas coexistiam, se destaca o empenho dos cientistas que se depararam com algo aparentemente anômalo, mas que se mostrou muito importante para o desenvolvimento da Química. A tabela periódica que parecia não dar conta dos novos conhecimentos foi capaz de incorporar os novos elementos descobertos, que tornavam evidente a transmutação elementar a partir da posição que ocupavam, levando a percepção do decaimento dos elementos radioativos<sup>3</sup>. O átomo deixava de ser a última partícula fundamental, abrindo caminho para novos campos de estudo: a física nuclear e de partículas (CHASSOT, 1995, p.155).

O meu contato com a Química, quando comparado a outras matérias se deu de forma tardia, no ensino médio, porém a identificação com essa disciplina foi imediata graças a sua presença no dia-a-dia. Aparentemente o conhecimento adquirido nesses três anos é limitado, devido à carga horária da disciplina e a extensão incalculável dos conteúdos na Química, mas a construção histórica desse conhecimento, apresentando os entraves de cada época e as incertezas dos cientistas, permite uma aproximação ainda maior dessa ciência com o aluno. A sua apresentação histórica desperta curiosidade sobre o que de novo ainda se pode deparar com essa ciência que está sempre prestes a “surpreender” os cientistas e revelar o “imprevisível”.

A escolha pela história da radioatividade foi motivada pela diversidade de elementos que a compõem. Existem intrigas e preconceitos, bem como discriminação de gênero e de origem social, sendo a primeira vez na história da ciência que uma mulher - Marie Curie - ganha posição de destaque. Apesar de ter sido encarada pela comunidade científica do final do século XIX como uma exceção e não ter garantido a aceitação definitiva das mulheres na ciência, Marie Curie se tornou uma referência feminina na ciência e criou um campo científico que se desenvolveu com a contribuição de diversas mulheres<sup>4</sup>. Além disso, algo que me chamou a atenção foram as dúvidas sobre conceitos que hoje são praticamente irrefutáveis e o “quebra-cabeça” que envolveu os principais cientistas da época.

Neste trabalho apresento o conjunto de relações que permitiram a elaboração do conceito de radioatividade a partir dos trabalhos de Marie Curie. Para isso, são apresentados

<sup>2</sup> Para elaborar a tabela periódica, Dimitri Mendeleev (1834-1907) considerou cada elemento imutável.

<sup>3</sup> Segundo a lei do deslocamento, “Quando uma partícula alfa for emitida, o novo átomo será deslocado duas casas à esquerda na Tabela Periódica. E quando for emitida uma partícula beta, o novo átomo estará deslocado uma casa à direita na Tabela Periódica” (XAVIER; LIMA *et al*, 2007, p.83).

<sup>4</sup> À Lise Meitner se atribui estudos sobre a fissão nuclear; Ida Noddack e Marguerite Perey contribuíram a descoberta do rênio e do frâncio, respectivamente (TENNENBAUM, 2000).

os pesquisadores e suas incertezas, e exploradas as discussões sobre a radioatividade a fim de demonstrar como ressoaram as divergências e o modo como as questões em torno do átomo e da composição da matéria foram recebidas e respondidas pelos cientistas.

Desse modo, são considerados os fatores que nortearam as pesquisas de Marie Curie, a partir da inserção de seu trabalho em relação aos de outros cientistas. Descrevo o processo de pesquisa experimental realizado por Marie, tendo em vista as necessidades tecnológicas de seu tempo e apresento as dificuldades enfrentadas por ela durante o processo de realização e divulgação de sua pesquisa, enfatizando a dimensão social da ciência. Neste processo ressalto a importância do isolamento dos elementos radioativos para a aceitação da radioatividade.

No decorrer do trabalho são feitos apontamentos sobre a importância da troca de conhecimento e da divulgação de pesquisas para a construção de um novo conceito científico e, ao final, destaco a limitação da concepção de “descoberta científica” quando aplicada às pesquisas acerca da radioatividade.

## **2 SOBRE AS RADIAÇÕES DO SÉCULO XIX**

### **2.1 RADIAÇÕES**

A transição do século XIX para o XX foi um período em que diversas radiações foram descobertas e que direta ou indiretamente permitiram a ampliação do conhecimento do mundo atômico (Ilustração 1). Com o aperfeiçoamento de um grande número de técnicas e de instrumentos, parecia que o mundo estava cercado por raios invisíveis à espera de quem os descobrisse e os esclarecesse (CHASSOT, 1995, p.145).

Ilustração 1- Radiações descobertas da segunda metade do século XIX até a primeira metade do século XX.

Entidade	Ano	Cientistas	Situação em 1915
Argônio	1895	Rayleigh e W. Ramsay	Aceito
Raios-X	1896	W. Röntgen	Aceito
Radioatividade	1896	H. Becquerel	Aceito
Elétron	1897	J.J. Thomson	Aceito
Luz negra	1896	G. LeBon	Rejeitado
Raios Canais	1898	W. Wien	Aceito
Étéreo	1898	C. Brush	Rejeitado
Raios N	1903	R. Blondlot	Rejeitado
Raios magnéticos	1908	A. Righi	Duvidoso
Raios Moser	1904	J. Blaas e P. CzermaK	Reinterpretado
Elétrons positivos	1908	J. Becquerel	Reinterpretado
Raios Cósmicos	1912	V. Hess	Incerto

Fonte: CAMEL, 2008 apud KRAGH, 1999, p.22.

Os raios catódicos marcam o início da série de descobertas que abriram caminho para a discussão da composição do mundo atômico. Para observar esses raios era necessária uma ampola de Crookes<sup>5</sup> que era formada por um tubo termiônico e uma bobina de indução<sup>6</sup>-

<sup>5</sup> William Crookes (1832-1919) foi um químico e físico inglês. Ele utilizou uma ampola para submeter um gás a baixa pressão e a uma alta tensão. Quando os elétrons saiam do cátodo, colidiam com moléculas do gás, ocorrendo a ionização do gás e liberação de luz que iluminava a parede da ampola do lado oposto ao cátodo.

<sup>6</sup> Consistem de duas espirais, as bobinas, de diferentes diâmetros, enroladas em uma barra de ferro cilíndrica. A corrente elétrica passa através da primeira bobina, que possui poucas espiras e é induzida para a segunda bobina,

Ilustração 2. O tubo termoiônico era capaz de evacuar os gases, criando um vácuo e a bobina de indução produzia grandes diferenças de potencial e longas centelhas que geravam correntes elétricas (SEGRÈ, 1997, p.4).

Ilustração 2 - Bobina de indução do século XIX e esquema

Fonte: FERRAZ NETTO, Luiz. **Construção de bobinas de Ruhmkorff**. Disponível em: <<http://www.landelldemoura.qsl.br/r1.htm>> Acesso em: 10 dez. 2011.

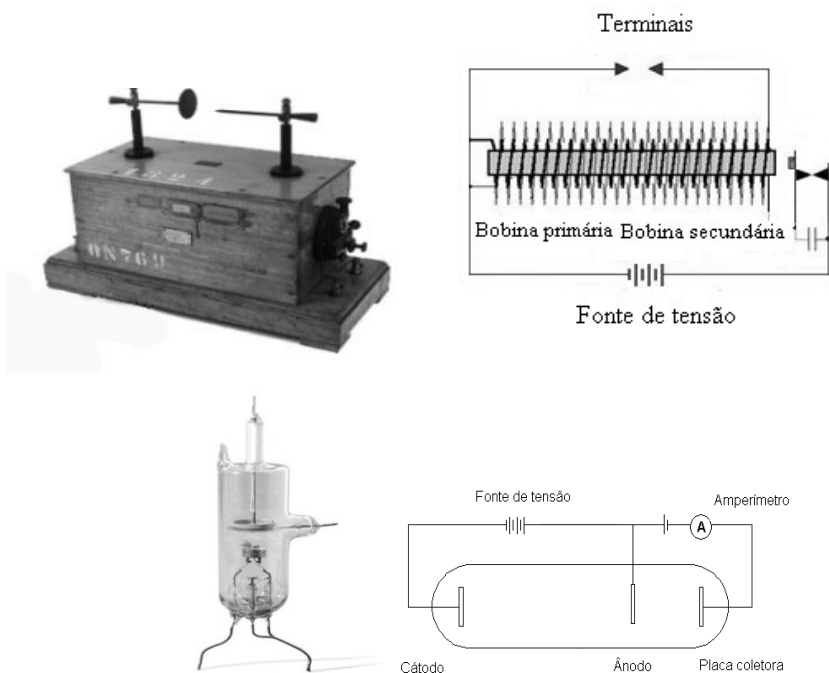


Ilustração 3 - Tubo termoiônico e esquema

Fonte: UNICAMP. **Laboratório de Física Moderna**. Disponível em: <<http://www.ifl.unicamp.br/~jmoreira/franckhertz.html>> Acesso em: 10 dez. 2011.

Embora, as descargas possam ser encontradas nas primeiras décadas do século com Faraday (1833), foi somente na década de cinquenta que começou a chamar a atenção. Isso se deveu ao experimento de Julius Plücker em 1858 e mais diretamente aos avanços tecnológicos na produção de vácuo. “Os progressos feitos nas pesquisas sobre o átomo coincidiram com os progressos feitos na tecnologia do vácuo” (SEGRÈ, 1987, p.5).

---

de menor diâmetro, produzindo a centelha. A diferença de potencial induzida é proporcional ao número de espirais da bobina secundária (SEGRÈ, 1987, p. 4-5).

Sabe-se hoje que os raios catódicos são uma torrente de elétrons, mas naquela época não se tinha qualquer conhecimento da própria existência dos elétrons<sup>7</sup>. O que se sabia, até 1897, a respeito dos raios catódicos era que saíam do catodo (carga negativa) da ampola de Crookes, atingiam a parede do tubo do lado oposto, tornando-a luminosa, e que tinham a propriedade de ser desviados por um ímã (SEGRÈ, 1987, p.12).

As ampolas de Crookes eram equipamentos imprescindíveis para qualquer laboratório da segunda metade do século XIX e os raios catódicos eram objeto de estudo dos cientistas na Europa. Contudo, esta radiação não causou um impacto tão significativo quanto os raios X, que eram produzidos com os mesmos equipamentos, mas que possuíam propriedades distintas dos raios catódicos.

## 2.2 RAIOS X

No dia 8 de novembro de 1895, Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923) trabalhava com uma ampola de Crookes coberta por uma cartolina preta em uma sala escura. Quando ligou a ampola percebeu que a certa distância uma folha de papel tratada com platinocianeto de bário brilhava. Röntgen investigou se existia uma radiação capaz de atravessar o papel opaco que cobria o tubo, atingindo a placa, que se encontrava a aproximadamente dois metros de distância (CHASSOT, 1995, p.149-150).

Menos de dois meses depois, no dia 28 de dezembro de 1895, Röntgen entregou seu primeiro ensaio sobre o assunto ao secretário da Sociedade Físico-Médica de Würzburg, intitulado “Sobre um novo tipo de raio” (*Über eine neue Art von Strahlen*). Nesse ensaio, ele já determinava várias propriedades da radiação descoberta, que devido ao desconhecimento da sua natureza, foi denominada raios X, em alusão a variável algébrica (RÖTGEN, 1895 apud MARTINS, 1998, p.379).

Nesse primeiro ensaio, Röntgen demonstrou que nenhuma radiação até então conhecida compartilhava das mesmas propriedades que os raios X. Enquanto os raios catódicos eram facilmente absorvidos pelo ar, a nova radiação era capaz de atravessar o papel opaco a luz, mesmo a grandes distâncias, como no caso da placa tratada com platinocianeto de bário. Outro fator essencial para a distinção dessas radiações era a propriedade dos raios catódicos

---

<sup>7</sup> Em 1897 Joseph John Thomson (1856-1940) confirmou a natureza corpuscular desses raios e formulou a hipótese de que eles eram constituintes de toda a matéria. Thomson identificou essas partículas como *corpúsculos* e continuou a fazê-lo por mais de vinte anos. O termo geral elétron se tornou de uso geral após 1910, nove anos após ser proposto por Stoney (MOREIRA, 1997, p.3).

de serem desviados por um ímã e refratados<sup>8</sup> o que não acontecia com os raios X (RÖTGEN, 1895 apud MARTINS, 1998, p.387-388).

A possibilidade de serem raios de luz, ultravioleta ou infravermelho também foi descartada. Apesar de excitar a luminosidade de um material luminescente<sup>9</sup> (platinocianeto de bário) e sensibilizar chapas fotográficas, eles não eram visíveis, sendo assim não se tratavam de raios de luz. A chance de ser radiação ultravioleta ou infravermelha também foi rejeitada devido ao seu alto poder de penetração (RÖTGEN, 1895 apud MARTINS, 1998, p.389).

Apesar de todas as peculiaridades que a nova radiação possuía, nenhuma delas chamou mais atenção do que a capacidade de produzir imagens em chapas fotográficas que correspondiam ao interior de objetos. Essa propriedade foi utilizada, posteriormente, para visualização de ossos humanos. Como Röntgen em 1896 indicou.

[...] Observei e algumas vezes também fotografei muitas imagens de sombras desse tipo, cuja produção tem um encanto particular; possuo, por exemplo, fotografias da sombra do perfil de uma porta que separa as salas nas quais, de um lado, foi colocado o aparelho de descarga e, do outro, a chapa fotográfica; da sombra dos ossos da mão; da sombra de um fio encoberto enrolado em uma bobina de madeira; de um conjunto de pesos dentro de uma caixa; de uma bússola cuja agulha magnética está completamente envolta por metal; de um pedaço de metal cuja falta de homogeneidade se torna observável pelos dos raios X [...] (RÖTGEN apud MARTINS, 1998, p. 388).

Esse assunto despertou um enorme interesse da comunidade científica, que não conseguia prever ou compreender esses acontecimentos com base nas teorias da época. Durante o ano de 1896, 49 livros ou folhetos e mais de 1000 artigos foram publicados sobre o assunto, entre eles vários que propunham a verdadeira natureza dos raios X (QUINN, 1997, p.151).

As principais hipóteses sobre esses raios indicavam tratar-se de: ondas eletromagnéticas transversais de pequeno comprimento, semelhantes à radiação ultravioleta; como pulsos não periódicos de radiação eletromagnética ou como partículas, formados por raios catódicos modificados, que seriam neutros. Röntgen inicialmente comparou o raio X à radiação ultravioleta por existirem várias semelhanças com a luz como a propagação retilínea, a ação fotográfica e a luminescência, posteriormente, sugeriu que os raios X seriam ondas longitudinais do éter<sup>10</sup> (POINCARÉ, 1897 apud MARTINS, 2004, p.502-503).

<sup>8</sup> Mais tarde, as experiências do físico alemão Máximo Von Laue (1879- 1960) com cristais mostraram que eles podiam ser refratados, mas que seu comprimento de onda era muito pequeno para ser refratado com prismas comuns (QUINN, 1997, p.486).

<sup>9</sup> Luminescência é a emissão de luz por parte de um corpo, originada por qualquer razão que não se deva a uma variação de temperatura deste, mas sim a outras causas como, por exemplo, reações químicas e exposição à radiação eletromagnética (RODITI, 2005).

<sup>10</sup> O éter seria o meio elástico através do qual a luz se propagaria. Ele não era admitido apenas no vácuo, mas universalmente, tanto no vácuo como permeando toda a matéria existente. Logo, o vácuo não seria um vazio absoluto, ele seria inteiramente preenchido por essa substância transparente, sem peso, que não causaria atrito

Henri Poincaré (1854-1912), renomado matemático francês, apresentou à Academia Francesa de Ciências, um relatório que explicava a produção dos raios X, poucas semanas após a descoberta de Röntgen ter sido divulgada. A hipótese elaborada por ele, e que se mostrou a mais influente do período, atribuía a formação da radiação aos corpos luminescentes (POINCARÉ, 1896 apud MARTINS, 2004, p.503).

É, portanto, o vidro que emite os raios Roentgen, e ele nos emite tornando-se fluorescente. Podemos nos perguntar se todos os corpos cuja fluorescência seja suficientemente intensa não emitiriam, além dos raios luminosos, os raios X de Roentgen, qualquer que seja a causa de sua fluorescência. (POINCARÉ apud MARTINS, 1990, p.29).

No dia 10 de fevereiro de 1896 Charles Henry apresentou o primeiro teste da conjectura de Poincaré. Primeiro foi avaliado se o sulfeto de zinco fosforescente<sup>11</sup> tinha a capacidade de aumentar o efeito dos raios X produzidos por um tubo de Crookes. Ele cobriu parcialmente um objeto metálico com uma camada de sulfeto de zinco, e relatou que obteve uma radiografia mais forte e nítida na parte coberta pela substância fosforescente. Depois, Henry testou novamente a emissão de raios X, só que a emissão seria estimulada apenas pela luz e não por raios catódicos. Segundo seu relatório era possível conseguir radiografias apenas cobrindo o objeto a ser radiografado com uma camada de sulfeto de zinco que teria a fosforescência excitada pela queima de uma tira de magnésio (HENRY, 1896 apud MARTINS, 2004, p.504).

Na semana seguinte, mais uma confirmação da conjectura de Poincaré foi apresentada à Academia das Ciências. O trabalho realizado por Gaston Henri Niewenglowski obteve resultados semelhantes aos de Charles Henry, só que utilizava outro material fosforescente, o sulfeto de cálcio. Conforme seu relatório essa substância quando exposta ao Sol, emitia radiações capazes de penetrar o papel preto totalmente opaco à luz comum e de sensibilizar uma chapa fotográfica. Com as observações descritas por esses dois pesquisadores era possível concluir que quaisquer materiais fosforescentes podiam emitir raios X quando excitados apenas pela luz (NIEWENGLOWSKI, 1896 apud MARTINS, 2004, p.504).

Com experimentos posteriores, verificou-se que os fenômenos observados por esses cientistas não tratavam-se de raios X. Sabe-se, atualmente, que a luz solar não fornece a quantidade de energia suficiente para excitar a emissão de raios X. Por esse motivo, a ampola aos corpos que viajassem através dele (MASSINI).

<sup>11</sup> Fluorescência é a capacidade de uma substância de emitir luz quando exposta a radiações do tipo ultravioleta (UV), raios catódicos ou raios X. As radiações absorvidas (invisíveis ao olho humano) transformam-se em luz visível, ou seja, com um comprimento de onda maior que o da radiação incidente. A diferença relativamente à fosforescência, é que, geralmente, a fluorescência dura apenas enquanto houver estímulo e na fosforescência a espécie química tem a capacidade de emitir luz, mesmo no escuro.

de Crookes seria necessária para induzir a emissão de raios X, uma vez que forneceria a energia requerida. Uma das explicações plausíveis para a observação de tais resultados é a expectativa teórica dos cientistas, que observaram fenômenos inexistentes (MARTINS, 1990, p.37).

### 2.3 RAIOS DE URÂNIO

Henri Becquerel (1852-1908) foi um dos cientistas presentes no primeiro discurso que Poincaré apresentou sobre os raios X. Becquerel pertencia à terceira geração de uma família de físicos renomados, que se destacaram na pesquisa de corpos luminescentes. Naturalmente se interessou pelo fenômeno e logo resolveu investigá-lo (MARTINS, 1990, p.32).

Inicialmente as substâncias fosforescentes que Becquerel testou não apresentaram a emissão de nada parecido com os raios X, resultado que não correspondia às experiências de outros cientistas. Então, substituiu os compostos fosforescentes comuns e de fácil obtenção, que eram utilizados e testou algo novo. Tratava-se de uma amostra de sais de urânio, substância branca, poeirenta, que preparara na época em que era assistente de seu pai (MARTINS, 1990, p.33).

Em seguida, no dia 24 de fevereiro de 1896, apresentou seu primeiro relatório “Sobre os raios emitidos por fosforescência” (*Sur les radiations émises par phosphorescence*) à Academia das Ciências de Paris onde descreveu detalhadamente sua experiência. Conclui que a nova substância utilizada, o sulfato duplo de urânio e potássio emitia raios que podiam penetrar o papel vedado à luz.

Com o sulfato duplo de urânio e potássio, de que possuo alguns cristais sob a forma de uma crosta transparente, fina, realizei a seguinte experiência: Envolve-se uma chapa fotográfica de Lumière em duas folhas de papel negro muito expesso (*sic*), de tal forma que a chapa não se escureça mesmo exposta ao Sol durante um dia. Coloca-se uma placa da substância fosforescente sobre o papel, do lado de fora, e o conjunto é exposto ao Sol durante várias horas. Quando se revela a chapa fotográfica, surge a silhueta da substância fosforescente, que aparece negra no negativo. Se for colocada uma moeda ou uma chapa metálica perfurada, entre a substância fosforescente e o papel, a imagem desses objetos poderá ser vista no negativo. As mesmas experiências podem ser repetidas colocando-se uma chapa fina de vidro entre a substância fosforescente e o papel; e isso exclui a possibilidade de qualquer ação química por vapores que pudessem sair da substância ao ser aquecida pelos raios do Sol. Pode-se concluir dessas experiências que a substância fosforescente em questão emite radiações que penetram um papel opaco à luz e reduzem sais de prata. (BECQUEREL, 1896 apud MARTINS, 1990, p. 31-32)

Becquerel acreditava que os compostos de urânio emitiam algo semelhante à radiação ultravioleta. As observações pareciam indicar que a emissão de radiação pelo urânio se tornava mais forte após expor os compostos ao Sol, o que parecia ser um tipo de

fosforescência. No entanto, segundo a Lei de Stokes<sup>12</sup> a radiação emitida tem um comprimento de onda maior do que a radiação absorvida. Esse caso seria uma violação dessa lei, pois os raios luminosos absorvidos tinham um comprimento de onda maior do que a radiação ultravioleta emitida (MARTINS, 2004, p.505).

Supondo que a luz solar era responsável pela fosforescência dos sais urânio e conseqüente penetração na chapa fotográfica, Becquerel partiu para um segundo ensaio. Ele preparou em seu laboratório o conjunto de sua experiência, colocando entre um papel negro e uma chapa fotográfica uma fina cruz de cobre. Esperava-se que o conjunto, quando exposto à luz do Sol, produzisse um modelo da cruz na chapa fotográfica. Becquerel não pode dar continuidade a sua experiência, pois como era inverno na França, o tempo não propiciou as condições necessárias à realização do experimento, sem a entrada de luz solar no seu laboratório (BECQUEREL, 1896 apud MARTINS, 2004, p.507).

Enquanto esperava as condições climáticas ideais, Becquerel guardou o conjunto (cruz e chapa) que havia preparado dentro de um armário escuro. Como o Sol persistia em não aparecer, retirou o conjunto do armário, no dia 1º de março de 1896. Ele observou algo inesperado, havia se formado a imagem branca da cruz de cobre, que contrastava com o fundo negro da chapa (BECQUEREL, 1896 apud MARTINS, 1990, p.35).

Já no dia seguinte, 2 de março, Becquerel apresentou o relatório “Sobre os raios invisíveis emitidos por corpos fosforescentes” (*Sur les radiations invisibles émises par les corps phosphorescents*) que significou, para muitos, a descoberta da radioatividade. Ele ressaltou o fato de que o material que preparara não foi submetido à radiação solar e mesmo assim ocorreram impressões fotográficas idênticas aos que foram. Ele deduziu, corretamente, que a causa do fenômeno se devia ao urânio presente em seu preparado e comparou essas radiações às produzidas por tubos de raio catódicos, os raios X. Outro fato que notara é que as radiações em questão possuíam poderes de penetração diferentes (BECQUEREL, 1896 apud MARTINS, 2004, p.506-507).

Becquerel partiu da hipótese, implícita e guiada pelos trabalhos de sua família, de que os corpos luminescentes emitiriam radiação enquanto estivessem luminosos. Esperava, portanto, um efeito muito fraco de seus sais de urânio, já que a fosforescência visível deles diminuía muito rapidamente no escuro. Por isso, o fato de ter observado a emissão de radiações no escuro com um efeito forte foi inesperado.

---

<sup>12</sup> George Stokes (1819-1893) foi o primeiro a estabelecer claramente que a fluorescência era um processo de emissão, e propôs o princípio que hoje conhecemos como Lei de Stokes, em 1852, que estabelece que o comprimento de onda de uma emissão fluorescente é sempre maior que o da excitação (CAMEL, 2008, p.15).

Insistirei particularmente sobre o seguinte fato, que me parece muito importante e estranho ao domínio dos fenômenos que se esperaria observar. Os mesmos flocos cristalinos, colocados junto às chapas fotográficas, nas mesmas condições, isolados pelos mesmos anteparos, mas sem receber excitação pela incidência de radiação e mantidos no escuro, ainda produzem as mesmas impressões fotográficas. Este foi o modo pelo qual fui levado a fazer essas observações: entre os experimentos precedentes, alguns foram preparados na quarta-feira, 26, e na quinta-feira, 27 de fevereiro; e como, nesses dias, o Sol apareceu apenas de modo intermitente, guardei os experimentos que havia preparado e coloquei as chapas com seus envoltórios na obscuridade da gaveta de um móvel, deixando os flocos de sal de urânio em seu lugar. Como o Sol não apareceu novamente nos dias seguintes, no dia 1 de março eu revelei as chapas fotográficas, esperando encontrar imagens muito fracas. Pelo contrário, as silhuetas apareceram com uma forte intensidade. Eu logo pensei que a ação devia ter continuado na obscuridade [...] (BECQUEREL apud MARTINS, 2004, p.507)

Ao final deste artigo, Becquerel informou que estava desenvolvendo experiências para contribuir com novos esclarecimentos do que classificou como um novo fenômeno. Posteriormente, Becquerel utilizou como base de sua explicação o conhecimento da época a respeito da fosforescência, um fenômeno já conhecido. A constatação final de Becquerel em seu primeiro ensaio não foi suficiente para perceber que precisaria ir além das teorias formuladas até ali para poder compreender o fenômeno (BECQUEREL, 1896 apud MARTINS, 1990, p.36).

A explicação de Becquerel se apoiava nos trabalhos realizados pelo seu pai, Edmond Becquerel, que havia pesquisado um fenômeno semelhante. De acordo com as pesquisas de seu pai, uma determinada substância fosforescente poderia emitir luz de diferentes cores, a duração da emissão poderia variar. Isso permitiria observar a mudança, com o tempo, da cor resultante de uma substância fosforescente colocada no escuro (MARTINS, 2004, p.507).

Apoiando-se nesse fato Becquerel explicou que a fosforescência visível de curta duração dos sais de urânio era acompanhada por outro tipo de fosforescência, a invisível. A fosforescência invisível, portanto, possuiria longa duração e emitiria radiação penetrante.

Uma hipótese que surge de modo natural à mente é a suposição de que essas radiações, cujo efeito possui uma forte analogia com as produzidas pelas radiações estudadas pelos senhores Lenard e Röntgen, poderiam ser radiações invisíveis emitidas por fosforescência com uma persistência infinitamente maior do que a persistência das radiações luminosas emitidas por esses corpos. No entanto, os experimentos relatados, embora não sejam contrários a essa hipótese, não nos permitem formulá-la. (BECQUEREL apud MARTINS, 2004, p.508)

Nos quatro ensaios seguintes, Becquerel aprofundou seus estudos com sais de urânio e verificou que, até mesmo, os compostos não fosforescentes produziam esses raios penetrantes. Os experimentos foram os mesmos já realizados com a radiação de Röntgen, para testar se eram iguais ou não. Enquanto explorava o fenômeno, ele esboçou algumas

inferências, entre elas a de que o fenômeno dependia exclusivamente do urânio, pois esta era a única substância capaz de produzir a nova radiação. A essa radiação semelhante aos raios X ele denominou raios de urânio (MARTINS, 1990, p.33).

Becquerel afirmou ter confirmado experimentalmente que a radiação do urânio era de natureza eletromagnética, semelhante à luz e que a emissão diminuía lentamente no escuro como uma fosforescência invisível de longa duração. Ele acreditava que de algum modo a energia estava armazenada no urânio e a melhor forma de expressar esse fenômeno foi comparando-o à fosforescência (MARTINS, 2003, p.32).

Os trabalhos de Becquerel não estabeleceram nem a natureza das radiações emitidas pelo urânio, nem a natureza subatômica do processo. Sua pesquisa, originada pela hipótese de Poincaré, era apenas uma das muitas da época que apresentavam resultados de difícil interpretação. Como consequência, não houve uma busca sistemática de outros elementos que emitissem a radiação do urânio ou uma tentativa de quantificação de dados sobre a radiação do urânio, houve só o suficiente para tratá-la como exclusiva dos compostos de urânio (MARTINS, 1990, p.38).

#### 2.4 DESINTERESSE PELOS RAIOS DE URÂNIO

As pesquisas sobre os raios de urânio não tiveram nem o impacto nem a fecundidade da descoberta dos raios X, o que fez com que poucos pesquisadores se dedicassem ao estudo dos “raios de Becquerel” ou “raios do urânio” até início de 1898. Além disso, os próprios compostos luminescentes do urânio e o urânio metálico eram de difícil obtenção (MARTINS, 1990, p.38).

Como o assunto parecia estar esgotado, os cientistas acabaram voltando à atenção para outros fenômenos anunciados na mesma época. O próprio Becquerel mostrou desinteresse pelo assunto, publicando apenas dois ensaios em 1897 e, em seguida, passando a se dedicar a um novo tema mais comentado na época, o efeito Zeeman<sup>13</sup> (GILLIESPIE, 1970 apud MARTINS, 2003, p.32).

Sobre os raios de urânio foram realizadas apenas algumas pesquisas, em que ocorreram descrições de emissão de radiações penetrantes por vaga-lumes, por bactérias luminescentes e, até em algumas substâncias comuns fracamente fosforescentes como papel, açúcar e giz. Estes acontecimentos podem ser parcialmente explicados pelo processo

---

<sup>13</sup>O holandês Pieter Zeeman (1865-1943) observou um leve alargamento das linhas espectrais e a sua multiplicação quando são submetidas a um campo magnético (CAMEL, 2008, p.6).

fotográfico, que sofre influências de fatores como, temperatura, umidade, pressão e substâncias químicas. Por isso, o surgimento de uma mancha em uma placa fotográfica poderia ocorrer tanto por influências de radiações penetrantes como por influência de outros fatores (MARTINS, 1990, p.38).

## 2.5 MARIE CURIE

Marie Curie nasceu em Vasórvia, Polônia no dia 7 de novembro de 1867. Em seu país não era permitido o ingresso de mulheres nas universidades, uma das imposições do império russo, uma das três nações que dominavam a Polônia. Diante desta e de outras limitações Marie se viu obrigada a sair de seu país para concluir seus estudos (WEILL, 2007, p. 551-552).

O destino escolhido por Marie foi Paris, França que se encontrava em pleno desenvolvimento. Nessa época, conhecida como *Belle époque*, Paris representava o centro da inovação em arte, estilo e tecnologia. Este período foi marcado por grandes transformações, mas também de resistência aos antigos valores e do auge do nacionalismo que deu início a uma onda de xenofobia (QUINN, 1997, p.350).

Marie migrou em 1891 e se graduou em física e matemática, em uma das mais renomadas e tradicionais universidades da França, a Sorbonne:

É impossível descrever ou expressar todo o bem que esses anos (de estudo) me trouxeram. Sem outra ocupação para fazer, me aprofundi de corpo e alma na ciência. Os novos conhecimentos me trouxeram muita alegria [...] Concentrava todas as minhas forças no estudo, que especialmente no começo me ocasionaram grandes dificuldades. Na verdade eu estava muito pouco preparada para ouvir as conferências de Física na Sorbonne, uma vez que, apesar de grandes esforços na Polônia, não me fora possível dominar os conhecimentos que meus colegas franceses desfrutavam. Repartia meu tempo entre o comparecimento às aulas e o trabalho no laboratório e na biblioteca. De noite eu estudava em casa até altas horas. Tudo o que eu via e aprendia de novo me encantava. Ante mim se abria um novo mundo, um mundo do conhecimento ao qual a entrada finalmente fora franqueada. (CURIE apud TENNENBAUM, 2000, p. 56)

Em abril de 1894, Marie conheceu o físico Pierre Curie com quem se casou em julho do ano seguinte. Pierre participou como orientador do primeiro trabalho experimental de Marie, intitulado “Sobre as propriedades dos aços temperados” (*Sur les propriétés magnétiques de aciers trempés*) e sua colaboração se estenderia a trabalhos posteriores (WEILL, 2007, p.553).

Em 1897, Marie Curie iniciou sua pesquisa para a tese de doutorado<sup>14</sup>, cujo tema era a estranha radiação emitida pelos compostos de urânio. Com 30 anos de idade, ela era nessa época uma pessoa com uma curta experiência de pesquisa de caráter científico (MARTINS, 2003, p.34).

Na época que fez a escolha para sua tese, ninguém dava atenção aos raios de urânio. Os raios X, e não os raios de urânio, fascinaram a todos com seus importantes efeitos e suas potenciais utilidades. Os raios X produziam fotografias da sombra dos ossos da mão, enquanto os raios do urânio eram fracos demais para tirar boas fotos de ossos. Os primeiros eram facilmente produzidos por qualquer pessoa que tivesse um tubo termiônico e uma bombina de indução; ao passo que o urânio era de difícil obtenção. Somado a isso, os raios de urânio partilhavam algumas características dos raios X e foram descobertos por causa deles, portanto era natural confundir indiscriminadamente os dois tipos de raios (QUINN, 1997, p.155).

Essa escolha possivelmente foi motivada por Jean Perrin (1870-1942) e George Sagnac (1869-1928), que eram amigos de Marie e seu marido Pierre (1859-1906). Ambos haviam pesquisado a condutividade do ar produzida pelos raios X, e Sagnac havia escrito a respeito da radiação do urânio. A praticidade também pode ser apontada como um dos motivos para a escolha de Marie Curie, uma vez que o estudo da condutividade do ar produzida pelos raios de urânio poderia ser feito com uma aparelhagem muito simples, desenvolvida por Pierre e seu irmão Jacques Curie, empregando um eletrômetro<sup>15</sup> e um cristal piezelétrico<sup>16</sup> (MARTINS, 2003, p.35). Nessa época, Marie também tinha acesso aos escritos de Lorde Kelvin (1824 - 1907) em alemão e inglês, que incluíam em sua maioria trabalhos sobre a ionização do ar e seus compostos<sup>17</sup> (QUINN, 1997, p.156).

Valia a pena [...] investigar a origem da energia, de resto bem pequena, que era emitida continuamente pelo urânio na forma de radiação. A pesquisa desse fenômeno nos parecia extraordinariamente interessante, ainda mais que esse problema era totalmente novo e ainda não tinha sido descrito em lugar nenhum. Decidi consagrar-me a esse tema. (CURIE apud TENNENBAUM, 2000, p. 64)

<sup>14</sup>“Pesquisas sobre substâncias radioativas” (*Recherches sur les substances radioactives*) (TENNEUBAUN, 2000, p.76.)

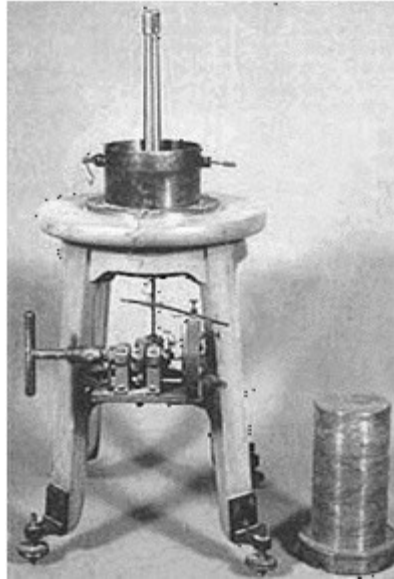
<sup>15</sup> Instrumento utilizado para medir cargas, tensões ou correntes elétricas, baseado na ação de campos elétricos sobre sistemas mecânicos (RODITI, 2005).

<sup>15</sup>É um cristal que, quando submetido a uma deformação mecânica, gera cargas elétricas entre suas faces. Da mesma forma, se esses materiais forem submetidos a uma tensão elétrica, eles sofrem uma deformação mecânica, ou seja, podem curvar-se, alongar-se ou mudar sua espessura (MARTINS, 2003, p.41).

<sup>16</sup>“Experimentos de fenômenos elétricos produzidos por raios de Röntgen, ultravioleta e urânio” (*Experiments on the electrical phenomena produced in gases by Röntgen rays, by ultraviolet light, and by uranium*) e (*On electric equilibrium between uranium and an insulated metal in its neighbourhood*) (MARTINS, 2003, p.40).

<sup>17</sup>

Ilustração 4 - Eletrômetro de cristal piezelétrico utilizado nas pesquisas de Marie Curie



Fonte: REZENTTI, 2009, p.7.

### **3 SOBRE AS DESCOBERTAS DE MARIE CURIE**

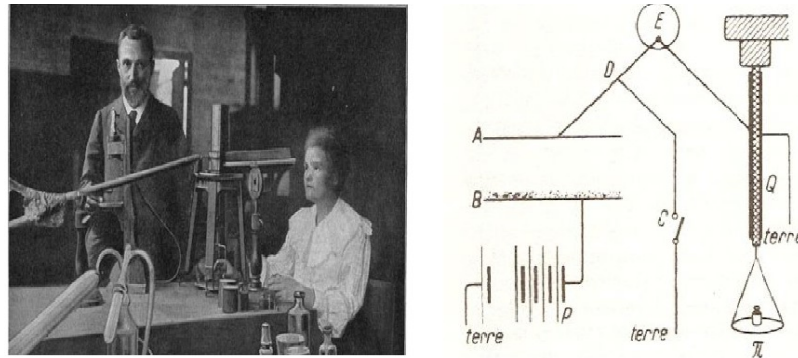
#### **3.1 INÍCIO DAS PESQUISAS**

Marie inicialmente necessitava de um laboratório, que conseguiu por intermédio de seu marido. O espaço se localizava na *École de Physique et Chimie Industrielle* (EPCI) onde Pierre lecionava e tinha grandes amizades, entre elas o diretor. Era um local empoeirado e estava longe de ser o ideal, os equipamentos disponíveis eram algumas mesas de trabalho e a aparelhagem inventada por Pierre e seu irmão Jacques Curie (1855-1941), uma câmara de ionização composta por um eletrômetro e um quartzo piezelétrico (FIGURA 3).

Os trabalhos de Marie Curie no laboratório, entre os anos de 1897 e 1900, estão descritos em três cadernos, que também eram divididos com seu marido. As anotações no primeiro caderno começam no dia 16 de dezembro de 1897(JOLIOT-CURIE, 1940 apud MARTINS, 2003, p.35).

Entre dezembro de 1897 e janeiro de 1898, durante a fase inicial do projeto, Pierre era uma figura presente durante as ações no laboratório, auxiliando na utilização dos aparelhos, rotina que Marie não estava ainda familiarizada. Já nas primeiras semanas, os Curie chegaram a um novo método de análise química, baseado numa medida bastante precisa da radiação, graças aos instrumentos sensíveis.

Ilustração 5 - Esquema da montagem experimental utilizada por Marie Curie para a medição da radioatividade.



Fonte: CURIE apud RENZETTI, 2009, p.6.

Como já era sabido que o urânio tinha a capacidade de ionizar o ar<sup>18</sup>, os Curie inventaram um método que quantificava a radiação emitida pelo urânio. Eles utilizaram para isso uma câmara de ionização. Dentro dessa câmara colocaram duas chapas circulares de metal que possuíam oito centímetros de diâmetro cada, dispostas uma acima da outra e separadas por três centímetros (QUINN, 1997, p.158).

A experiência consistia em carregar a chapa inferior (B) com uma bateria de alta voltagem (C). Essa chapa estaria recoberta com o material a ser analisado, e caso essa substância fosse um condutor, através do ar, a chapa superior ficaria carregada (A)<sup>19</sup> (TENNENBAUM, 2000, p. 65).

Após carregar a chapa, ficava-se atento a leitura do eletrômetro, segurando em uma mão um cronômetro e na outra um peso. Então, o peso era solto, de modo a provocar uma

<sup>18</sup> Capacidade de transformar o ar em bom condutor de eletricidade e descarregar o quartzo piezelétrico.

<sup>19</sup> A explicação atual para esse fato é que as substâncias radioativas emitem raios alfa, beta e gama, todos capazes de ionizar o ar. A ionização diminui a resistência do ar entre os dois pratos e, como resultado, redistribui a voltagem entre os dois (QUINN, 1997, p. 487).

tensão e gerar uma carga do quartzo piezométrico, que saturava a carga emitida pela substância alocada na câmara de ionização. Era possível medir a quantidade de tempo necessária para que não fosse mais possível transmitir carga através do ar e, baseado na duração dessa reação, comparar o poder de ionização da radiação emitida (QUINN, 1997, p.158).

Realizei experiências sobre a condutividade do ar sob influência da radiação do urânio descoberta por Becquerel, e pesquisei se há outros corpos, além dos compostos de urânio, que sejam capazes de tornar o ar um bom condutor de uma corrente elétrica. Para isso utilizei um condensador de placas; uma estava coberta por uma camada regular de urânio ou de uma outra substância reduzida a um pó fino. Entre as placas estabeleci uma diferença de potencial de 100 volts. O valor absoluto que fluía através do condensador foi medido por meio de um eletrômetro e um cristal de quartzo piezo-elétrico. (CURIE, 1898 apud TENNENBAUM, 2000, p.66).

Marie Curie pretendia, para a sua tese de doutorado, medir com a maior precisão possível um fenômeno já conhecido. No período em que realizava suas primeiras pesquisas, era muito difundida a crença de que os fundamentos da Física já estavam praticamente estabelecidos e os físicos assumiam que já se tinha conhecimento de grande parte dos fenômenos. Pode-se dizer que houve um recuo diante das grandes questões, e uma redução das reivindicações do conhecimento da verdade (CAMEL, 2008, p.1).

Como prevalecia uma modesta abordagem da ciência, a grande maioria dos físicos se dedicou a investigação de métodos de medidas elétricas, fenômenos térmicos, espectroscopia e descargas elétricas em gases. Frases como a de A.A. Michelson, que em 1898 afirmava “as verdades futuras das ciências físicas devem ser procuradas na sexta casa decimal” eram bem recebidas por grande parte dos cientistas, que voltavam à atenção para a descrição dos fenômenos (BADASH, 1972 apud SHULZ, 2007, p. 511) <sup>20</sup>.

---

<sup>20</sup> Segundo Peter Shulz, a Lorde Kelvin, “são atribuídas muitas frases e aforismos que, na maioria das vezes, apareceram descontextualizados ou nunca chegaram a ser pronunciadas”. Duas delas, por exemplo: “não existe nada de novo a ser descoberto em física agora” (final do século XIX); “tudo que resta é (fazer) medição mais e mais precisa” e “no céu azul da física clássica existem apenas duas nuvens a serem dirimidas...”. Para Schulz, tratavam-se de “citações muito difundidas que preconizariam o “fim da física”. [...]A fonte original é um artigo publicado em 1901, versão revisada de um discurso proferido no ano anterior. O título do artigo é: *Nuvens do século dezenove sobre a teoria dinâmica do calor e da luz*. O primeiro parágrafo deixa claro do que trata o artigo: A beleza e clareza da teoria dinâmica, que coloca calor e luz como modos de movimento, está presentemente obscurecida por duas nuvens. I. A primeira apareceu com a teoria ondulatória da luz, desenvolvida por Fresnel e o Dr. Thomas Young; envolvendo a questão de como pode a Terra mover-se através de um sólido elástico, como o é essencialmente o éter luminífero? II. A segunda é a doutrina de Maxwell-Boltzmann sobre a equipartição de energia. A discussão do problema do movimento da Terra no éter, origem da teoria da relatividade[...] ocupa apenas as 6 páginas seguintes ao parágrafo inicial. Essa discussão sobre a nuvem I termina com um comentário sobre o experimento de Michelson e Morley, que mostrou a ausência de movimento da Terra em relação ao éter. O problema colocado pela equipartição de energia não podia ser resolvido no âmbito da física clássica. A dificuldade era realmente enorme, pois a equipartição de energia era incompatível com os resultados experimentais para os calores específicos dos gases. Não muito tempo depois descobriu-se que só a física quântica poderia resolver esse problema e uma leitura cuidadosa do seu artigo leva à conclusão de que Lorde Kelvin reconheceu claramente as limitações da física clássica” (SCHULZ, 2007, p. 510).

O diferencial da pesquisa de Marie Curie foi o estabelecimento de um novo método de medição. O método fotográfico, utilizado por Becquerel nos seus principais estudos, não permitia medidas, uma vez que a intensidade das manchas fotográficas dependia do material fotográfico utilizado, da temperatura, da umidade e da pressão. Além disso, o processo de revelação não permitia a comparação adequada entre duas fotografias obtidas em épocas diferentes, se limitando a uma análise qualitativa. Logo os efeitos elétricos da radiação se mostraram mais úteis do que as fotografias, pois através da ionização do ar era possível comparar a intensidade das radiações produzidas por diferentes elementos químicos, tornando a análise quantitativa (MARTINS, 2003, p.35).

Esses são os motivos para acreditar, erroneamente, que as primeiras pesquisas dos Curie se limitavam a descrição. O trabalho de Marie Curie foi sistemático, exigindo grande engenhosidade técnica para superar as dificuldades observacionais, e racional, orientado por pressupostos teóricos. Portanto, era muito importante a percepção do comportamento das radiações a partir dos valores obtidos. Quando Marie mensurou o poder de ionização dos raios de urânio ela percebeu que nada os afetava, nem mesmo os problemas que não conseguia evitar em seu laboratório como a luminosidade e a temperatura.

A emissão da radiação do urânio é muito constante, ela não varia com o tempo nem com a luz ou a temperatura. Esse é o aspecto mais inquietante do fenômeno. Na produção de raios catódicos ou raios X a gente mesmo fornece energia para os tubos, que produz essas radiações; essa energia vem de baterias, que se precisa recarregar, isto é, de geradores, que só giram devido a um dispêndio de trabalho. Mas no caso da radiação do urânio não encontramos nenhuma alteração na substância que irradia a energia- uma energia que certamente é extremamente pequena, mas emitida ininterruptamente. O urânio não sofre nenhuma mudança de estado sensível, nenhuma transformação química visível; ele permanece, ao menos aparentemente, completamente inalterado. Justamente isto é o extraordinariamente interessante do fenômeno, ele contraria talvez a lei fundamental que a ciência até agora considerou válida em geral (CURIE, 1899 apud TENNENBAUM, 2000, p. 75).

No dia 10 de fevereiro de 1898, são testados treze elementos, entre eles o cobre e o ouro, e não é constatado nenhum tipo de emissão. Após esses experimentos com elementos simples a pesquisa foi direcionada à análise de metais pesados. No dia 17 de fevereiro de 1898, Marie testou uma amostra de pechblenda<sup>21</sup>, que é composta por óxido de urânio e várias outras substâncias em pequenas quantidades, entre elas o elemento tório. Este mineral era valorizado economicamente, pois a partir dele se obtinha o urânio utilizado na coloração de cerâmica (JOLIOT-CURIE, 1940 apud MARTINS, 2003, p.36).

A corrente produzida pela ionização do ar, que era provocada pela pechblenda, mostrou-se maior do que aquela provocada apenas pelo urânio puro. Segundo Becquerel, a

<sup>21</sup> Alguns autores utilizam o termo uraninita para se referir a esse minério.

radiação do urânio metálico era mais intensa do que aquela gerada por qualquer um de seus compostos. Ao repetir os testes com várias substâncias que continham urânio e com a pechblenda, verificou que todos os compostos eram menos ativos que o urânio puro, mas a pechblenda não (JOLIOT-CURIE, 1940 apud MARTINS, 2003, p. 36).

Nos dias posteriores, descartada a possibilidade de um erro experimental, Marie comparou a pechblenda com outras substâncias que provavelmente a compunham. Examinando, no dia 24 de fevereiro, um mineral de tório e nióbio, que não contém urânio, percebeu que ele emitia radiação ionizante. Testou, então, minerais que continham nióbio e notou que não mostravam atividade. Quando analisou um mineral que continha tório, a calcita, Marie Curie constatou que ele emitia radiações (MARTINS, 2003, p.37).

Minhas pesquisas mostraram que a radiação é uma propriedade do átomo de urânio, que depende da constituição física e da composição química do sal de urânio. Substâncias com urânio reunidas irradiam tanto mais fortemente quanto mais contêm essa substância simples. Então concluí ter sentido pesquisar se não haveria outras substâncias que possuem a mesma interessante propriedade do urânio. Logo depois, pude me convencer de que os corpos com tório comportam-se analogamente. Essa radiação é uma propriedade do átomo de tório. Imediatamente empreendi pesquisas intensas da radiação do urânio e do tório, quando me deparei com a nova descoberta interessante. Pesquisei uma grande quantidade de minerais. Apenas alguns deles se apresentavam como ativos, e exatamente aqueles que continham urânio ou tório (CURIE apud TENNENBAUM, 2000, p.66-67).

Uma abordagem que pretendia, aparentemente, ser descritiva ganha contornos surpreendentes a partir dos resultados obtidos. O tório, um elemento descoberto pelo químico sueco Jöns Jacob Berzelius (1779-1848) em 1828, mostrou-se mais ativo do que o urânio e a pechblenda. A partir desses resultados, Marie Curie percebeu que os raios urânicos, considerados por Becquerel uma anomalia, apontavam para um fenômeno mais geral que precisava de uma designação e uma explicação. Entretanto, alguns dias antes de publicar suas conclusões o cientista alemão Gerhard Carl Schmidt (1865-1949) apresentou uma comunicação, no dia 24 de março, afirmando que o tório, assim como o urânio, emitia os raios de Becquerel (MARTINS, 2003, p.34).

No dia 18 de março de 1898, Marie e Pierre iniciaram um segundo caderno de notas de laboratório. Pierre, que vinha acompanhando de perto a rotina da esposa no laboratório, abandonou o estudo que desenvolvia com cristais e se envolveu completamente com a pesquisa de Marie (WYART, 2007, p.561).

Percebe-se dos seus escritos que a pesquisa de Marie se alternava entre o estudo dos minerais e o das respectivas substâncias puras, comparando suas medições. A calcita<sup>22</sup> é um mineral que contém principalmente fosfato duplo de urânio e de cobre. A amostra examinada

<sup>22</sup> Alguns autores se referem ao minério como calcolita.

por Marie Curie tinha uma atividade muito superior à do urânio ou do tório puros. A associação do urânio com outros elementos poderia, pela combinação química, “alterar suas propriedades e aumentar a radiação” ou “existiria alguma impureza responsável pela anomalia, no mineral” (JOLIOT-CURIE, 1940 apud MARTINS, 2003, p.37).

Uma atividade desses minerais não seria extraordinária, se fosse proporcional às quantidades de urânio ou tório contidas. Não era esse entretanto o caso. Alguns desses minerais mostraram uma atividade três ou quatro vezes maior do que a dada pelos cálculos de urânio. Verifiquei cuidadosamente esse resultado notável e não pude mais ter dúvida de que estava correto. Essa anomalia nos espantou no mais alto grau, e como eu estava inteiramente convicta de que não se tratava de nenhum erro experimental, ela precisava ser explicada. Fiz então a hipótese de que os minerais do tório e do urânio continham uma quantidade diminuta de uma substância que deveria ser muito mais fortemente ativa do que o tório ou o urânio. Não podia se tratar de nenhum dos elementos até então conhecidos, pois todos já tinham sido pesquisados, deveria ser portanto um novo elemento químico. Era uma tarefa deveras atraente comprovar essa hipótese tão logo quanto possível. Muito interessado nessa tarefa, Pierre Curie- como nos pareceu- deixou de lado temporariamente seu trabalho com cristais e participou da busca da nova substância. (CURIE apud TENNENBAUM, 2000, p.67)

Os Curie assumiram a hipótese de que a calcita possuía um elemento desconhecido, responsável pelo grande poder de ionização desse minério, que emitia radiação mais forte do que a do urânio. Com a intenção de confirmar essa hipótese os Curie decidiram sintetizar a calcita no laboratório, pois era um minério fácil de reproduzir no laboratório e o da natureza apresentava uma forte corrente, assim como a pechblenda (QUINN, 1997, p.161).

Para confirmar a sua hipótese, deveria existir uma diferença entre a atividade da calcita sintetizada e a da calcita extraída diretamente da natureza. A calcita sintetizada não mostrava maior atividade do que o urânio, resultado que demonstrava que a calcita natural, assim como a pechblenda possuía em sua composição um elemento mais ativo do que o urânio (QUINN, 1997, p. 161).

Todos os minerais que se mostraram ativos contêm os elementos ativos. Dois minerais de urânio – a pechblenda (óxido de urânio) e a calcolita (fosfato de cobre e uranila) são muito mais ativos do que o próprio urânio. Esse fato é muito notável e leva a crer que esses minerais podem conter um elemento muito mais ativo do que o próprio urânio. Reproduzi a calcolita pelo processo de Debray com produtos puros; essa calcolita artificial não é mais ativa do que outros sais de urânio. (CURIE apud MARTINS, 2003, p. 39)

Na terça- feira, 12 de abril de 1898, o primeiro relatório de Marie sobre “Raios emitidos pelos compostos de urânio e de tório” (*Rayons émis par les composés de l’uranium et du thorium*) foi apresentado à Academia das Ciências. Como nem Marie e nem Pierre eram membros da Academia, solicitaram a Gabriel Lippmann (1845-1921), seu antigo professor, que apresentasse o trabalho (QUINN, 1997, p.161).

Além de não poder ser membro da Academia por ser mulher, Marie também enfrentou outros obstáculos para divulgar suas pesquisas. Como as mulheres eram colocadas em uma posição de inferioridade, a circulação de suas pesquisas se tornava mais difícil por não ter a mesma credibilidade que tinha a pesquisa realizada por cientistas do sexo masculino (PUGLIESE, 2007, p.357).

Pesquisei um grande número de metais, sais, óxidos e minerais. Todos compostos de urânio pesquisados são ativos e, em geral, tanto mais quanto maior for seu conteúdo de urânio. Os compostos de tório são muito ativos. O óxido de tório mais que o urânio metálico. É notável que os dois elementos mais ativos, urânio e tório sejam também os elementos que têm os maiores pesos atômicos [...]. Todos minerais ativos contêm elementos ativos. Dois minerais com urânio, quais sejam plechblenda e o calcolito, são muito mais ativos que o próprio urânio. Este fato muito notável leva à hipótese de que esses minerais contêm um outro elemento que possua uma atividade muito maior do que o urânio (CURIE, 1898 apud TENNENBAUM, 2000, p.66).

A sugestão de um novo elemento não foi muito bem aceita pelos membros da Academia. Muitos contra argumentaram, entre eles Becquerel, que o chumbo, o bismuto, o cobre, o arsênio e o antimônio possuíam as características apresentadas. Para eles, os compostos presentes nesses minérios se comportavam como outras substâncias e não tinham raias espectrais que pudessem ser notadas.

Marie foi responsável por lançar um novo olhar a um fenômeno tido como particular e desenvolver métodos específicos para quantificar a radiação do urânio. Diferentemente daqueles que pesquisavam sobre o assunto percebeu que se tratava de um fenômeno ainda desconhecido e geral. Além disso, ela introduziu no seu primeiro ensaio uma novidade para a física, quando descobriu novas substâncias a partir de suas propriedades radioativas e, mais importante, quando propôs que a atividade mensurada era uma propriedade atômica, uma vez que depende da presença de certos elementos e do teor do elemento no composto em questão (MARTINS, 2003, p.37).

### 3.2 TENTATIVA DE ISOLAR O POLÔNIO

Com o propósito de comprovar sua hipótese, a existência de um novo elemento, e convencer os cientistas foi necessário criar uma rigorosa rotina de química analítica com o objetivo de isolar o novo elemento. Só que essa tarefa não seria fácil, a idéia de um novo elemento foi recepcionada com desconfiança no meio científico, nessa época, predominantemente masculino (PUGLIESE, 2007, p.358).

Já na quinta-feira seguinte à leitura de seu relatório à Academia, 21 de abril de 1898, Marie retomou a sua rotina no laboratório, ansiosa para verificar a hipótese da propriedade

atômica. Esta urgência talvez tenha sido impulsionada pela notícia de que outra pessoa havia se antecipado à sua descoberta sobre a atividade do tório (QUINN, 1997, p.162).

Cem gramas de pechblenda foram pulverizados com o intuito de isolar o elemento misterioso muito ativo. Depois, trataram o minério com diversos reagentes e mediram a atividade dos produtos isolados em cada etapa reacional. A substância resultante desse processo que se mostrou mais ativa foi novamente submetida ao ataque químico. Duas semanas depois, os Curie acreditavam ter um produto suficientemente puro para ser submetido a uma análise espectroscópica<sup>23</sup>. Eles esperavam que seu novo elemento produzisse linhas espectrais características para que, dessa forma, pudessem confirmar sua descoberta (QUINN, 1997, p.162-163).

Apesar do trabalho árduo, a análise espectroscópica não revelou o que esperavam. Eles perceberam que não conseguiriam obter sucesso apenas com os métodos que conheciam. Para alcançar resultados mais expressivos precisavam de ajuda e, para isso, chamaram Gustave Bémont (1857-1937), membro do laboratório da EPCI (QUINN, 1997, p.163).

Em pouco tempo, o método de Bémont mostrou-se muito eficiente: o resultado foi um produto destilado em pequenas quantidades e fortemente ativo. Esse aquecimento, combinado ao tratamento químico resultou em um produto mais ativo que a pechblenda.

O caderno de notas indica que os Curie conseguiram, em meados de maio de 1898, produtos dezessete vezes mais ativos que o urânio, nesse momento, o padrão que utilizavam para comparação (JOLIOT-CURIE apud MARTINS, 2003). Em 25 de junho de 1898, Marie submeteu uma amostra a um tratamento químico com enxofre obtendo um sulfeto 150 vezes mais ativo do que o urânio. E então, após precipitação com amônia, surgiu um produto 300 vezes mais ativo, enquanto Pierre encontrou um produto 330 vezes mais ativo do que o urânio.

À medida que o minério era exposto a esses tratamentos químico e destilações, os resultados indicavam que existiam dois agentes muito ativos. Os Curie sugeriram que, na análise da pechblenda, um elemento desconhecido acompanhava o bismuto, enquanto um segundo acompanhava o bário. Eles concentraram seu trabalho primeiramente no elemento que acompanhava o bismuto.

Aquece-se o sulfeto no vácuo num tubo de ensaio até 700 graus. Os sulfetos ativos escorrem em forma de uma placa escura no fundo do tubo, cuja temperatura está entre 250 e 300 graus, ao passo que o bismuto-enxofre fica nas partes com temperatura mais alta. Com ajuda dessas diferentes operações obtém-se produtos

---

<sup>23</sup> A espectroscopia é o estudo do espectro produzido quando os elementos são aquecidos e a luz por eles emitida é refratada através de um prisma. Desde a segunda metade do século XIX oito elementos até então desconhecidos haviam sido identificados apenas pela espectroscopia, uma vez que cada elemento possui um espectro característico.

cada vez mais ativos. Finalmente chegamos a uma substância que possui uma atividade mais ou menos 400 vezes maior do que o urânio. Pesquisamos quais dos elementos até agora conhecidos são ativos (MARIE apud TENNENBAUM, 2000, p.71).

Mais uma vez recorreram à espectroscopia para confirmar suas descobertas, só que desta vez procuram um perito no assunto, Eugène Demarçay (1852-1904), a quem geralmente é creditada a descoberta do elemento európio. Novamente os resultados foram desapontadores: a substância muito ativa que acompanhava o bismuto não produziu quaisquer linhas espectrais claras. Em 1º de julho, voltaram a testar uma série de elementos conhecidos para se certificarem de que não haviam negligenciado nada.

Apesar de não obterem uma confirmação através da espectroscopia, várias evidências sugeriam que o bismuto ativo abrigava um novo elemento, sugestão essa que eles assumiram. No dia 13 de julho de 1898, pelas mãos de Pierre, chegou à primeira indicação de que eles haviam dado ao elemento um nome. Em meio aos símbolos do chumbo e do bismuto, havia no caderno de laboratório, a abreviatura Po, que se referia a *polonium*, nome que escolheram em homenagem ao país de Marie.

Nós a diluímos (pechblenda) em ácido e tratamos a solução obtida com óxido de enxofre. O urânio e o tório ficaram retidos na solução. Comprovamos os seguintes fatos: Os sulfetos precipitados continham uma substância muito ativa juntamente com chumbo, bismuto, cobre, arsênio e antimônio. Cada substância é independentemente insolúvel em amônio enxofre, por meio do qual é separável do arsênio e antimônio. Quando o sulfeto insolúvel em amônio- enxofre é dissolvido em ácido nítrico, é então possível uma separação incompleta da substância ativa do chumbo por meio de ácidos de enxofre. Se o sulfato de chumbo for eliminado através de ácidos de enxofre diluídos, pode-se separar uma grande parcela da substância ativa, a qual está misturada com o sulfato de chumbo. A substância ativa encontra-se então numa solução junto com o bismuto e o cobre; ela é totalmente precipitada pelo amoníaco e assim separada do cobre. Por fim a substância ativa permanece junto com o bismuto. Até agora não descobrimos nenhum método exato para separar a substância ativa do bismuto dissolvido [...]. Observamos (porém) que se obtém produtos muito ativos através da sublimação, quando se aquece a pechblenda. (MARIE, 1898 apud TENNENBAUM, 2000, p.70-71).

Cinco dias depois, 18 de julho de 1898, o artigo “Sobre uma nova substância radioativa contida na pechblenda” (*Sur une substance nouvelle radioactive, contenue dans la pechblende.*) foi apresentado aos acadêmicos através de Henri Becquerel. Nele os Curie admitiam que não conseguiram isolar a substância ativa, denominada de *polonium*, do bismuto. No mesmo artigo, argumentaram que apesar de não observarem nenhuma indicação espectroscópica do novo elemento no produto, a substância obtida era 400 vezes mais ativa do que o urânio, algo totalmente incomum se comparado aos elementos conhecidos. Usando uma propriedade pouco conhecida, Marie e Pierre atestavam a existência de um elemento químico ainda não conhecido. Nesse mesmo artigo foi introduzida outra palavra nova, radioatividade.

Certos minerais contendo urânio e tório (plechblenda, calcolita, uranita) são bastante ativos em relação à emissão de raios Becquerel. Num trabalho anterior um de nós (Marie-J.T.) demonstrou que sua atividade é até mesmo mais forte do que o urânio ou tório, e expressou a opinião de que esse efeito deve ser atribuído a uma outra substância, muito ativa, existente em pequenas quantidades nesses minerais[...] (CURIE, 1898 apud TENNENBAUM, 2000, p.70).

Creemos portanto que a substância que retiramos da pechblenda contém um metal ainda não identificado, vizinho ao bismuto por suas propriedades analíticas. Se a existência desse novo metal for confirmada, propomos dar-lhe o nome de polônio, nome do país de origem de um de nós. (CURIE, 1898 apud MARTINS, 1990, p.40-41)

Posteriormente, no artigo “Os raios de Becquerel e o polônio” (*Les rayons de Becquerel et le polonium*). Marie explica o porquê da necessidade de uma nova nomenclatura. Ela estava certa que se tratava de um fenômeno mais geral, ao contrário da exclusividade do urânio atribuída por Becquerel.

Os raios urânicos foram freqüentemente chamados raios de Becquerel. Pode-se generalizar esse nome, aplicando-o não apenas aos raios urânicos mas também aos raios tóricos e a todas as radiações semelhantes. Chamarei de radioativas as substâncias que emitem raios de Becquerel. O nome de hiperfosforescência, que foi proposto para o fenômeno, parece-me dar uma falsa idéia de sua natureza (CURIE, 1899 apud MARTINS, 1990, p.40).

O segundo caderno de notas de laboratório dos Curie termina por volta da ocasião em que foi publicada a comunicação sobre o polônio. Não existem evidências de que eles fizeram qualquer novo trabalho, durante os três meses seguintes, o que pode ser parcialmente justificado pela espera de uma nova remessa de pechblenda. Era habitual, durante o verão, que os professores universitários saíssem de Paris para as *grandes vacances* (férias). Aparentemente, os Curie não viram nenhum motivo para agirem excepcionalmente, no verão de 1898, apesar de saberem que estavam à beira de novas descobertas (QUINN, 1997, p.164).

### 3.3 DESCOBERTA DO RÁDIO

Em 11 de novembro de 1898 estavam de volta ao laboratório, na EPCI, prontos para a busca do segundo elemento radioativo. Uma série de tentativas e erros levou-os, no final de novembro, a um produto muito ativo, associado ao bário. Novamente com o apoio de Gustave Bémont, foram capazes de concentrar cada vez mais a amostra, fazendo com que a radioatividade do produto do bário, se elevasse 900 vezes mais do que a do urânio (QUINN, 1997, p.165).

Acreditando que o elemento misterioso estivesse presente em quantidade suficiente para produzir linhas espectrais, os Curie enviaram a amostra para Eugène Demarçay. Desta

vez, os resultados foram animadores. Demarçay havia encontrado uma linha espectral distinta, não podendo ser atribuída a nenhum elemento conhecido.

Por volta do dia 20 de dezembro de 1898, apenas seis semanas depois da volta deles ao laboratório, Pierre rabiscou um nome para o novo elemento, no meio de uma página: Rádio (QUINN, 1997, p.165).

Para confirmar inteiramente a existência do novo elemento, faltava apenas a tarefa de isolá-lo e determinar seu peso atômico, base para sua colocação na tabela periódica<sup>24</sup>. Durante várias semanas, compararam amostras de bário ativo (contendo rádio) com bário simples, esperando que o bário ativo fosse mais pesado. Todavia, não houve diferença significativa, o que os levou a supor que essa substância estava presente no bário em quantidades muito pequenas (QUINN, 1997, p.166).

### 3.4 DIVULGAÇÃO DA DESCOBERTA DO RÁDIO

O artigo de 26 de dezembro de 1898 foi o mais excitante desdobramento da pesquisa dos Curie, até então. Foi redigido pelos Curie juntamente com Gustav Bémont e intitulava-se “Sobre uma nova substância fortemente radioativa contida na pechblenda” (*Sur une nouvelle substance fortement radioactive, contenue dans la pechblende*). Agora, não contavam apenas com as suas próprias evidências, eles também possuíam a nota de Demarçay “Sobre o espectro de uma substância radioativa” (*Sur le spectre d’une substance radio-active*) anexada ao relatório que dava mais credibilidade ao trabalho dos Curie, em que afirmava que captara uma linha espectral que se intensificava, conforme a radioatividade aumentava (CURIE, 1898 apud QUINN, 1997, p.166).

O anúncio dessa descoberta provocou grandes mudanças na divisão do trabalho dos Curie. Até então, não havia uma determinação clara das diferenças de tarefas, a escrita cuidadosa de Marie e os rabiscos de Pierre se misturavam, nas páginas dos cadernos de notas do laboratório. Depois o trabalho se mostrou sistematizado, enquanto Marie se dedicava a isolar o rádio, Pierre ficou encarregado de tentar entender o fenômeno radioatividade (QUINN, 1997, p.167).

De acordo com alguns autores essa divisão fundamentou-se em aptidões intelectuais, em que Pierre representava o pensador abstrato enquanto Marie exercia tarefas mais concretas. Essa sugestão pressupõe o modelo da divisão do trabalho em masculino e feminino.

---

<sup>24</sup> Naquela época a tabela periódica era organizada com base no peso atômico, atualmente, porém ela é organizada com base no número atômico (QUINN, 1997, p.488).

Segundo Quinn, contudo, isso contrariava a lógica, caso se avalie as características de ambos. Marie era melhor em Matemática do que Pierre, que se interessava muito pela construção de instrumentos.

Percebe-se que essa segunda sugestão também pressupõe um modelo de divisão do trabalho, qual seja a divisão em manual e intelectual e também não se sustenta. Trata-se de uma análise simplista de um processo complexo, que não atende as exigências da construção do conhecimento científico. Consequentemente, a inversão dos papéis desempenhados por Marie e Pierre quando se compara os dois modelos não é suficiente para compreender suas atividades, pois essa perspectiva desconsidera o fato de ambas as atividades serem interdependentes.

Segundo Pugliese, essa divisão baseava-se, muito provavelmente, em predileções e não em aptidões, uma vez que Pierre era atraído pelos fascinantes problemas colocados pelos raios misteriosos emitidos por esses novos materiais. Já Marie pretendia, obstinadamente, conseguir sais de rádio puro, e determinar o peso atômico do rádio (PUGLIESE, 2007, p. 365).

Para dar continuidade a sua pesquisa, Marie precisava de mais espaço. Esse espaço tinha que abrigar tratamentos químicos de grande volume, pois o rádio estava presente na pechblenda em pequenas quantidades, o que demandava uma grande quantidade do mineral. Foi cedido ao casal um hangar na EPCI, que servira de sala de dessecação para estudantes de medicina.

A Escola de Física não nos podia oferecer nenhum espaço adequado. Na falta de uma solução melhor seu diretor nos ofereceu um barracão sem uso, que antigamente havia servido como sala de dissecação da Escola de Medicina. O teto de vidro não oferecia nenhuma proteção completa contra a chuva. No verão era quente e abafado; no inverno o aquecedor de brasas só decepcionava. Diretamente em frente dele era insuportavelmente quente, mas a alguns passos podia-se congelar. Das instalações que são necessárias para os químicos nem se podia falar. Possuíamos algumas velhas mesas de pinho bem como queimadores a gás e fornos metalúrgicos para minerais. Estava ainda a nossa disposição o pátio anexo, onde podiam ser feitas experiências químicas das quais saíam gases nocivos. Assim aparelhados enfrentamos o nosso trabalho. Nesse velho e alquebrado barracão passamos os melhores e mais felizes anos. Dedicávamos o dia inteiro ao trabalho. Frequentemente precisei preparar lá uma refeição para não interromper um experimento importante. (CURIE apud TENNENBAUM, 2000, p. 72)

Depois provavelmente por instigação de Marie, eles conseguiram persuadir Eduard Suess (1831 - 1914), um geólogo vianense, membro correspondente da Academia Francesa, a interferir a seu favor junto ao governo austríaco. Com a primeira de muitas doações do barão

Edmond de Rothschild <sup>25</sup> (1845 - 1934), eles obtiveram dez toneladas de resíduo de pechblenda, sobras de uma extração de urânio (QUINN, 1997, p.168).

Durante o desenvolvimento das pesquisas, ficou claro que o trabalho para isolar o rádio do bário seria mais fácil do que o de separar o polônio do bismuto. Nesse mesmo período de intensas atividades, não tardou para os Curie serem reconhecidos pelos colegas. O assunto havia cativado vários pesquisadores e logo os Curie foram requisitados (QUINN, 1997, p.171).

Becquerel retomou suas pesquisas sobre o assunto e outros pesquisadores começaram a trabalhar em contato com os Curie em torno de vários aspectos da radioatividade. Um exemplo disso é o trabalho elaborado por Pierre com o físico George Sagnac em ensaio sobre raios X e radioatividade (QUINN, 1997, p.171).

No entanto, a maior contribuição continuava a ser aquela existente entre Pierre e Marie. Em 1899 e 1900, Marie escreveu dois ensaios sobre o esforço para isolar o rádio e Pierre escreveu um ensaio sobre o efeito do campo magnético sobre as emissões do rádio (QUINN, 1997, p.171).

Como já foi dito, os Curie não eram membros da Academia, não sendo permitido a eles apresentarem seus trabalhos pessoalmente. Entretanto, em 1900, através do Congresso Internacional de Física em Paris puderam apresentar o trabalho pessoalmente, divulgando todas as suas pesquisas sobre a radioatividade a cientistas do mundo inteiro (QUINN, 1997, p.171).

Durante o ensaio mais longo dos Curie “As novas substâncias radioativas e os raios que elas emitem” (*Les nouvelles substances radioactives et le rayons qu'elles émettent*) foram apresentadas todas as pesquisas e descobertas reunidas àquela altura, reconhecendo também o trabalho simultâneo que estava sendo desenvolvido por pesquisadores da Inglaterra e da Alemanha (QUINN, 1997, p. 172).

Dentre os conhecimentos reunidos até ali estavam uma razoável quantidade de conhecimento sobre os raios de Becquerel. Eles sabiam que os raios variavam: alguns podiam ser desviados por um magneto e outros não, e havia alguns que penetravam barreiras espessas ao contrário de outros. Também se sabia que os elementos podiam “induzir” a radioatividade em outras substâncias, tornando radioativo o próprio laboratório dos Curie. O que mais

---

<sup>25</sup> Pertencia a uma família francesa de banqueiros Rothschild. Possuía interesses artísticos e filantrópicos, ajudando a fundar instituições científicas, como o *Institut Henri Poincaré*, o *Institut de Biologie physico-chimique*, o *Centre National de la Recherche Scientifique*, a *Casa Velásquez* em Madri, e o *French Institute* em Londres.

intrigava, contudo, era o fato de não se saber a fonte dessa estranha energia (QUINN, 1997, p.172).

Ao final do ensaio, os Curie acrescentaram questões, como: “Qual é a fonte da energia que vem dos raios de Becquerel? Será que a energia vem de dentro dos corpos radioativos ou de fora deles?”

Freqüentemente se indaga se a energia nos corpos radioativos é auto-produzida, ou se é capturada por esses corpos de alguma fonte externa. Nenhuma das duas hipóteses que se seguem desses dois pontos de vista foi até agora confirmada experimentalmente (CURIE apud TENNENBAUM, 2000, p. 77)

## **4 SOBRE A CONFIRMAÇÃO E EXPLICAÇÃO DA RADIOATIVIDADE**

### **4.1 FONTE DA ENERGIA**

Marie Curie relacionou a radioatividade a uma propriedade atômica, uma vez que as substâncias radioativas possuíam pesos atômicos elevados e que a radioatividade estava presente independente do estado físico ou químico dos materiais analisados. Entretanto, ligar o novo fenômeno à composição atômica era um grande problema a ser resolvido, principalmente por não haver um consenso no meio científico quanto à natureza da matéria.

A relação entre a composição atômica e a gigantesca energia liberada pelas substâncias radioativas foram os objetos da discussão inicial que buscava uma explicação para o fenômeno de origem desconhecida.

Os corpos espontaneamente radioativos, principalmente o rádio, são produtores de energia. A liberação de energia que os acompanha se mostra através da radiação de Becquerel, de efeitos químicos, emissões luminosas e uma produção contínua de calor [...]. Poder-se-ia supor que a energia radioativa foi em algum momento anterior armazenada e que é continuamente criada novamente [...] Poder-se-ia imaginar que a produção de energia de um corpo radioativo corresponde à transformação da propriedade dos átomos do próprio corpo radioativo, que estivessem tomados por um processo evolucionário; o fato de que o rádio libera calor de forma contínua fala a favor desta hipótese. Poder-se-ia supor que a transformação fosse acompanhada por uma perda de peso e uma emissão de partículas materiais que constituam a radiação. Muitas hipóteses poderiam ser introduzidas pró e contra os diversos pontos de vista, contudo as tentativas de confirmar essas hipóteses experimentalmente em geral deram resultados negativos. A energia radioativa do urânio e do rádio não parece até o momento ser criada e nem mostra uma alteração marcante com o tempo [...]. (CURIE, 1903 apud TENNENBAUM, 2000, p. 77-78)

Na busca por uma explicação, os Curie apresentaram inicialmente duas hipóteses. A primeira, mais defendida por Pierre, propunha que a radioatividade fosse uma exceção à lei da conservação da energia. A segunda hipótese, proposta por Marie já em seu primeiro ensaio sobre o assunto, é de que a energia provinha de outras radiações, que eram absorvidas pelas substâncias radioativas (CURIE, 1905, p.76-77).

A última conjectura logo foi refutada por dois professores alemães, que eram cientistas amadores no tempo vago. Julius Elster (1854-1920) e Hains Geitel (1855-1923) fizeram uma série de experiências ao ar livre e de acordo com o observado até então, caso o elemento radioativo absorvesse energia da atmosfera ao seu redor, ele perderia energia quando isolado (QUINN, 1997, p.178).

A experiência deles foi realizada sob as rochas nas montanhas Harz onde colocaram uma fonte radioativa a 300 metros da rocha, e esperaram quarenta e oito horas e depois realizaram mais uma experiência colocando uma fonte no fundo de um poço de mina de 851 metros de profundidade para avaliar se havia modificação na atividade dos minerais. Em nenhuma das ocasiões constataram diminuição de radioatividade, concluindo no artigo “Experimentos sobre os raios de Becquerel” (*Versuche an becquerelstrahlen*), publicado em 11 de novembro de 1898, que a hipótese da radioatividade ser excitada por outros raios era muito improvável (QUINN, 1997, p.178).

No mesmo ano, Elster e Geitel realizaram outra experiência que consistia na exposição de uma fonte radioativa a raios catódicos e à luz do Sol, e sugeriram que a energia dos corpos radioativos deveria estar emanando do próprio átomo. Caso adotassem essa idéia não seria necessário abandonar a lei de conservação da energia e, por conseguinte não se exigiria descobrir uma fonte de radiação misteriosa na atmosfera (QUINN, 1997, p.178-179).

Nessa pesquisa participaram para além das fronteiras francesas: os alemães, como Elster e Geitel, e os britânicos, como Frederick Soddy (1877-1956) e Ernest Rutherford (1871-1937). Este último foi o principal responsável pelos grandes saltos teóricos rumo a uma teoria que explicasse a radioatividade e que mais tarde seriam fundamentais para desvendar os segredos do mundo subatômico.

O casal Curie, que possuía grandes quantidades de material radioativo, contribuiu, sobretudo na identificação das propriedades dos novos elementos descobertos. Já Rutherford, se concentrou na busca de uma teoria da matéria que explicasse a radioatividade, chegando a uma explicação para o fenômeno (QUINN, 1997, p.180).

Rutherford, inicialmente identificou dois tipos de radiação<sup>26</sup>, que ele denominou de alfa e beta, que constituiriam a radioatividade. No artigo “Radiação do urânio e a condução elétrica produzida por ele” (*Uranium radiation and the electrical conduction produced by it*), Rutherford diferenciou “as radiações” através da observação de seu comportamento quando expostas à ação de um campo eletromagnético (QUINN, 1997, p.181).

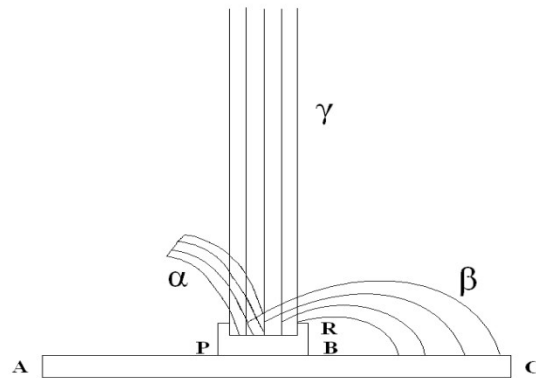
Os raios beta, semelhantes aos raios catódicos, comportavam-se como partículas de carga negativa, de massa 2000 vezes menor do que o átomo de hidrogênio. Como exposto anteriormente os raios catódicos são constituídos por elétrons. Os raios alfa, semelhantes aos raios canais de Eugen Goldstein<sup>27</sup> (1850-1930), comportavam-se como partículas 1000 vezes mais pesadas e carregadas positivamente. (CURIE, 1905, p.75).

Apenas em 1900, o físico e químico francês, Paul Villard (1860-1934) descobriu a radiação gama, que também era emitida por elementos radioativos, todavia esses raios, semelhantes aos raios X de Röntgen, não sofriam desvios quando submetidos a um campo elétrico (XAVIER; LIMA *et al*, p.83 ). Como se pode observar na figura 4.

Ilustração 6 - Diagrama da tese de doutorado de Marie Curie

<sup>26</sup> O primeiro artigo publicado em 1906 é o último que ele utiliza o termo *raios*, os artigos posteriores ele utiliza o termo *partículas* (RUTHERFORD, 1906 apud SANTOS, p.2).

<sup>27</sup> Em 1886, Goldstein noticiou que no tubo de raios catódicos com um catodo perfurado, um raio emergia do furo e viajava na direção oposta ao anodo, produzindo uma linha visível de luz no gás rarefeito dentro do tubo. Ele denominou essa radiação de raios canais (CAMEL, 2008, p.4).



Fonte: CURIE apud TENNENBAUM, 2000, p.81.

#### 4.2 EMANAÇÃO DOS ELEMENTOS RADIOATIVOS

Em março de 1897, quando Marie Curie media a atividade das substâncias em sua improvisada câmara de ionização, notou um leve aumento na atividade, durante a ionização provocada pelo tório. Para conferir abriu a câmara, renovou o ar e fez novas medições. No entanto, os resultados obtidos não foram muito claros e os testes não foram levados adiante.

Em 1899, o mesmo efeito também foi notado por um engenheiro elétrico chamado R.B. Owens que trabalhava com Rutherford na universidade McGill, no Canadá. Owens notou que a radiação do tório mudava em resposta a acontecimentos irrelevantes. Apenas isolando o tório em uma caixa de metal era possível alcançar medidas consistentes. Esse acontecimento intrigou Rutherford, que no verão de 1899, lançou-se ao estudo do comportamento incomum do tório.

Rutherford descobriu que era possível detectar uma substância gasosa emitida pelo tório, porém diferente dele, que denominou tório X. O tório X podia ser concentrado em uma solução de nitrato de tório com adição de amônia. Esse tratamento fazia com que, o tório se separasse da solução precipitando como hidróxido de tório, enquanto o tório X permanecia em solução (CAMEL, 2008).

Em janeiro de 1900, Rutherford publicou o ensaio “A radioatividade emitida pelos compostos de tório” (*A radioactive substance emitted from thorium compounds*) na *Philosophical Magazine and Journal of Science*. Nesse ensaio, ele afirmou que a radiação da emanção, o tório X, era de natureza mais penetrante do que a emitida pelo tório, o que indicava que a emanção do tório não apresentava as mesmas propriedades que o tório possuía (RUTHERFORD, 1900 apud QUINN, 1997, p.182).

Em maio de 1900, dois meses após Rutherford publicar “a radioatividade emitida pelos compostos de tório”, William Crookes descobriu uma emissão do urânio a qual denominou urânio X. E, em outubro de 1899, André Debierne (1874-1949), anunciara um novo elemento que nomeou de Actínio, sugerindo que poderia se tratar da emissão do tório que Rutherford havia observado. Nesse ponto ressalta-se que outros cientistas estavam contribuindo para a idéia da transmutação (WYART, 2000, p.562)

As novas investigações indicavam a instabilidade dos elementos radioativos. As emissões desses elementos correspondiam a substâncias simples no estado gasoso, que se originavam da transmutação. Em janeiro de 1902, juntamente com Frederick Soddy, Rutherford publicou um ensaio, concluindo que a emissão do tório era uma substância independente, diferente do seu elemento original, o tório. Inicialmente, ela foi identificada como o gás nobre radônio, mais tarde, mostrou-se que se tratava na verdade de um isótopo muito radioativo do rádio, o  $^{224}\text{Ra}$ . Já a emissão do rádio foi identificada como um isótopo do radônio, o  $\text{Rn}^{220}$ . Concluiu-se que o tório se transmutava em um isótopo do rádio, que por sua vez se transmutava em um isótopo do radônio<sup>28</sup> (CAMEL, 2008, p.19).

Os Curie publicaram em 6 novembro de 1899 o ensaio “Sobre a radioatividade induzida pelos raios de Becquerel” (*Sur la radioactivité provoquée par les rayons de Becquerel*) relatando também a sua observação de que as substâncias radioativas em estudo no laboratório deles comunicava sua radioatividade ao ambiente, e essa radioatividade induzida persistia durante um longo período de tempo. A explicação dos Curie para esse fenômeno seria uma transferência de energia, uma espécie de fosforescência provocada pelas substâncias originais (QUINN, 1997, p. 182).

Em 13 de janeiro de 1902, os Curie apresentaram o ensaio “Sobre os corpos radioativos” no qual se mostraram contra a teoria da transmutação. Segundo eles, apesar de algumas substâncias perderem temporariamente a energia, essa sempre era restaurada<sup>29</sup>. Na visão dos Curie, ainda havia duas hipóteses a serem consideradas: ou cada átomo radioativo possui sob a forma de energia potencial a energia que libera, ou o átomo radioativo é um mecanismo que a cada instante, atrai do exterior de si a energia que libera (CURIE, 1902 apud QUINN, 1997, p.184).

No relatório que Soddy e Rutherford enviaram em abril de 1902 para Londres “A causa e Natureza da Radioatividade” (*The Cause and Nature of Radioactivity*), concluem que

$^{28}\text{Th} \rightarrow \alpha + \text{Ra}^{224}$  (emissão do tório ou tório X)

$\text{Ra}^{224} \rightarrow \alpha + \text{Rn}^{220}$  (emissão do rádio ou rádio X)

<sup>29</sup> Isso ocorre porque “o tempo em que o tório X decai à metade do valor é igual ao tempo em que o tório dobra a sua atividade” (RUTHERFORD; SODDY apud BADASH, p. 2384).

“a radioatividade é ao mesmo tempo fenômeno atômico e efeito secundário de uma mudança química em que novos tipos de matéria são produzidos” (RUTHERFORD; SODDY, 1902 apud QUINN, 1997, p.185).

Consequentemente, as conclusões citadas conferiam à radioatividade a propriedade de ser uma manifestação de uma mudança química subatômica. Soddy e Rutherford notaram que tais mudanças subatômicas diferiam das mudanças químicas comuns e que não estavam entre aquelas que já se encontravam sob controle (QUINN, 1997, p.185).

Em novembro de 1902 e em fevereiro de 1903, Pierre publicou comentários nas *Comptes Rendus*<sup>30</sup> sobre a radioatividade induzida, ou radioatividade temporária observada na vizinhança dos elementos radioativos. Na verdade, aquilo que Pierre denominou de radioatividade induzida era um gás produzido pelo processo de transmutação, que Rutherford chamava de emanção ou rádio X (QUINN, 1997, p.185).

Pierre ainda conservava seu ceticismo quanto à teoria da transmutação, quando demonstrou que a radioatividade induzida, produzida pelo rádio, desaparecia de acordo com uma lei exponencial caracterizada por uma constante de tempo. Uma vez confirmado tal observação, era possível determinar a idade de uma substância medindo sua radioatividade. Ao estabelecer que a radioatividade induzida diminuía em uma quantidade determinada de tempo, Pierre Curie definiu um padrão para a medida absoluta do tempo com base na radioatividade. O desenvolvimento desse estudo deu origem à datação arqueológica e geológica do carbono (CURIE, 1903 apud WYART, 2007, p.562).

Em março de 1903, no artigo “Calor gerado espontaneamente pelos sais de rádio” (*Chaleur dégagée spontanément par les sels de radium*) com a colaboração de Albert Labord, Pierre mediu o calor espontaneamente emitido pelo rádio.

Recentemente (Pierre) Curie e Labord determinaram que nos sais de radioativos há uma produção de calor contínua e espontânea [...] Com ajuda de um calorímetro de tubo de Bunsen pode-se estimar as quantidades de calor produzidas pelo rádio. Coloca-se um tubo de ensaio com rádio no calorímetro e se observa um aquecimento contínuo, que pára quando o rádio é mais afastado. A medição de uma amostra de sal de rádio, obtida há muito tempo, mostra que a cada grama de rádio libera mais ou menos 80 calorias por hora. Uma produção de calor tão notável não pode ser explicada por nenhuma reação química já conhecida, ainda mais porque a condição do rádio parece inalterada por anos. Poder-se-ia supor que a produção de calor é causada por uma transformação do próprio átomo de rádio, uma transformação que decorre muito lentamente. Se isto for assim, pode-se chegar à conclusão de que as quantidades de energias ligadas com a formação e transformação dos átomos são notáveis e ultrapassam tudo que conhecíamos até agora. (CURIE apud TENNENBAUM, 2000, p. 76)

---

<sup>30</sup> *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences de Paris*

Em números comparativos, a queima de um grama de carvão libera cerca de 7.000 calorias de energia térmica. Este valor é muito superior as 80 calorias produzidas em uma hora por grama de rádio (de acordo com as primeiras medições dos Curie). Entretanto, deve-se considerar que o grama de carvão fica exaurido, já o grama de rádio continua a irradiar sem diminuição (TENNENBAUM, 2000, p.76).

O relatório de Pierre com Labord despertou uma nova curiosidade em torno da fonte de energia do rádio. Para alguns cientistas, essa descoberta reforçava o argumento de que a fonte de energia do rádio vinha de dentro do próprio átomo (QUINN, 1997, p.223).

#### 4.3 TRANSMUTAÇÃO E ISOLAMENTO DOS ELEMENTOS RADIOATIVOS

Os Curie relutaram em aceitar, mas em 1904 cederam a teoria da transmutação. Os britânicos, e não os franceses foram os primeiros a afirmar que a radioatividade era uma liberação de partículas subatômicas do interior do núcleo do átomo. Isto podia ser explicado pelo fato de que, os cientistas apresentam tendências a certas teorias, decorrentes da influência que recebiam durante a sua formação.

A falta de evidências empíricas não atendia às tradições “descritiva” e “empirista” das quais Pierre e Marie eram herdeiros. Apesar da abordagem cuidadosa com seus instrumentos sensíveis de medição, eles não conseguiram encontrar evidências de que o rádio perdesse peso ou energia no curso do tempo (QUINN, 1997, p.187).

Essa teoria também ameaçava os elementos recém descobertos e em grande parte ainda não comprovados. Diante dos desdobramentos dos fatos com o tório perdendo sua radioatividade para o tório X e o urânio perdendo para o urânio X, possivelmente acharam que o trabalho para provar a existência dos novos elementos poderia ser desfeito ou prejudicado. Caso a teoria da transmutação fosse verdadeira, ela poderia negar a inviolabilidade do átomo e ameaçaria a os novos elementos que Marie e Pierre haviam descoberto (QUINN, 1997, p.187).

Em 1899, Marie se dispõe a isolar o rádio, algo extremamente necessário para provar a existência desse elemento. Antes de cumprir essa difícil tarefa, Marie fez dois relatórios sobre o progresso do trabalho, em novembro de 1899 e em agosto de 1900. Então, em julho de 1902 ela anunciou que obtivera sucesso no isolamento de um decigrama de rádio. Nesse ensaio Marie Curie anunciou o peso atômico do rádio como 225<sup>31</sup> e o inseriu na tabela periódica após o bário, na coluna de metais alcalinos terrosos.

<sup>31</sup> Este valor é bem aproximado do reconhecido atualmente, 226 (AFONSO, 2010, p.58).

No começo é claro que eu não tinha a ilusão de descobrir grandes quantidades de uma nova substância, pois esses minerais já tinham sido bastante pesquisados. Me parecia porém que eles poderiam conter por volta de um por cento da substância desconhecida. Quanto mais nosso trabalho prosseguia, mais claro se tornava que a nova substância ativa só poderia existir em quantidades muito diminutas. Disso vinha a conclusão de que sua atividade deveria ser muito forte. É muito questionável se nós teríamos mantido nossa opinião se o conteúdo real dos minerais (da matéria procurada) fosse conhecido. Só pode-se dizer que o progresso de nosso trabalho nos mantinham numa excitação inaudita, embora surgissem sempre grandes dificuldades [...]. *No começo não conhecíamos nenhuma das propriedades físicas e químicas da substância desconhecida. Sabíamos somente que ela irradiava, e por meio dessa radiação é que ela tinha de ser procurada.* (CURIE apud TENNENBAUM, 2000, p.69)

A tarefa de extrair o rádio por processos químicos comuns foi muito difícil, o que a levou, a outras técnicas de extração que tinham por base fundamental a radioatividade como uma propriedade atômica da matéria, análoga à análise espectral.

Algumas vezes eu tinha que passar um dia inteiro misturando uma massa fervente, com uma pesada vareta de ferro, quase do meu tamanho. No fim do dia, eu estava morta de cansaço. Outros dias, ao contrário, o trabalho seria a mais minuciosa e delicada cristalização fracional (*sic*), no esforço para concentrar o rádio. Eu ficava, então, aborrecida com a flutuante poeira de ferro e carvão, das quais não podia proteger meus preciosos produtos [...] a sensação de desânimo que vinha, algumas vezes, depois de um esforço malsucedido, não durava muito e era substituída por uma renovada atividade (CURIE apud QUINN, 1997, p. 187).

Para o polônio, essa dificuldade mostrou-se ainda maior, estando ele em proporção cinco mil vezes menor do que a proporção de rádio na pechblenda, e tendo meia-vida de apenas 140 dias, muito menor do que a do rádio, que é de dois mil anos. O polônio se concretizou como elemento com a extração de uma pequena quantidade, 50 vezes mais ativo que a mesma quantidade de rádio puro, e com linhas espectrais características, que desapareciam conforme seu tempo de atividade (TENNENBAUM, 2000, p.72).

Além de ter significado para Marie uma imensa realização pessoal, o isolamento do rádio também se mostrou muito importante em sua vida profissional, pois era a primeira evidência material da radioatividade. No início, o isolamento do rádio foi decisivo para dar credibilidade a esse campo de conhecimento. A importância do isolamento do rádio foi reconhecida, e no mesmo ano Marie foi laureada com a medalha Berthelot da Academia das Ciências e, pela terceira vez, com o prêmio Gegner (WEILL, 2007, p.554).

Quando Marie Curie purificou o rádio, se apoiando somente na propriedade da radioatividade, a transmutação foi confirmada.

Nossas pesquisas químicas foram sempre orientadas para a identificação da atividade de irradiação dos produtos resultantes de cada operação de separação. Cada produto foi colocado sobre uma placa de um condensador, medindo-se a maior condutividade do ar com o auxílio de um eletrômetro e cristal de quartzo piezo-elétrico [...]. Assim se obtém não só uma idéia, mas um número, que dá informação sobre a concentração da substância ativa no produto em exame. A pechblenda por

nós analisada era mais ou menos duas vezes e meia mais ativa do que o urânio em nosso instrumento condensador [...]. Procuramos compostos de quase todos elementos; graças à ajuda amigável de diversos químicos pudemos pesquisar amostras das substâncias mais raras. O urânio e tório são os únicos elementos que mostram claramente uma atividade [...]. Permitimo-nos uma observação: caso a existência de um novo elemento venha a ser comprovada, então essa descoberta terá sido possível só com base no novo método de pesquisa que estabelecemos através da radiação de Becquerel. (CURIE apud TENNENBAUM, 2000, p.70)

O urânio e o tório já eram elementos estabelecidos na tabela periódica com peso atômico e linha espectral definida, já o rádio ainda era um elemento muito questionado e alguns cientistas ainda argumentavam que se tratava de bário ativo.

A fonte de energia envolvida nos processos radioativos formava matéria estável a partir de matéria instável. A teoria proposta por Rutherford presumia a formação de partículas alfa<sup>32</sup> e radônio, um elemento químico bem definido, a partir da transmutação do rádio, outro elemento químico bem definido. Próximo ao período em que Marie conseguiu isolar o rádio, Rutherford descobriu que os elementos radioativos se encontravam em um fluxo perpétuo, atravessando uma complicada e inicialmente confusa cadeia de transmutações (CORDEIRO; PEDUZZI, 2009, p.6).

A teoria da transmutação apoiava-se na certeza de que o rádio é um elemento químico, e não uma molécula constituída de hélio associado a outro elemento, fato que justifica a importância do isolamento do rádio.

[...] Nessa época eu tratava da purificação do rádio, enquanto meu marido pesquisava as propriedades físicas da radiação das novas substâncias descobertas. Só depois de gastar toda uma tonelada de pedaços de pechblenda consegui atingir o resultado final. Hoje já é bem conhecido que mesmo os minerais mais ricos não contêm mais do que alguns decigramas de rádio por tonelada. Finalmente chegou o momento em que a substância em questão mostrava todas as propriedades de um corpo quimicamente puro. Esse corpo, o rádio, produz um espectro próprio. Pude também determinar seu peso atômico que é bem maior do que o do bário. Consegui isto em 1902. Eu tinha então um decigrama de cloreto de rádio bem puro. Precisei de quatro anos para demonstrar de acordo com as exigências da química que o rádio é verdadeiramente uma nova substância. Se eu tivesse os meios adequados a disposição, então seguramente um ano bastaria. O resultado, que custou tanto esforço, levou ao estabelecimento da nova teoria sobre a radioatividade.

#### 4.4 OS PRÊMIOS

Marie e Pierre começaram a sofrer com problemas de saúde que, provavelmente, eram devidos à intensa exposição a elementos radioativos. Eles insistiram em continuar trabalhando, mas a situação chegou a tal ponto que precisaram parar a pesquisa e tratar da saúde se ausentando por algum período do laboratório. Pouco tempo depois de terem

<sup>32</sup> As partículas alfa correspondem a íons positivos de hélio (RUTHERFORD, 1903 apud BADASH, 2007, p.2385).

retomado o trabalho eles receberam o prêmio Humprey Davy em 5 de novembro de 1903. Marie não pode comparecer a premiação em Londres, pois ainda estava se recuperando (WEILL, 2007, p.554).

Em meados de novembro de 1903, chegou uma carta da Academia das Ciências da Suécia informando que eles haviam ganhado o Prêmio Nobel de Física pela descoberta da radioatividade, juntamente com Becquerel. Em 1911, Marie repetiria o feito, só que dessa vez em Química, pelo isolamento do rádio e do polônio (WEILL, 2007, p.555).

O período compreendido entre o primeiro e o segundo prêmio de Marie oscilou em momentos bons e ruins. Nesse período os Curie ganharam mais apoio e também uma indesejável fama na imprensa francesa, que praticamente desconhecia seus trabalhos. Para a parte conservadora, Marie era apenas uma simples auxiliar que incentivava o trabalho de Pierre, já para as feministas o contrário acontecia (QUINN, 1997, p. 211).

Em 21 de dezembro de 1903, o *New York Herald* publicou: “A Sr. Curie é uma dedicada companheira de trabalho, nas pesquisas do seu marido e associou o seu nome as descobertas dele”<sup>33</sup>. No *Vanity Fair*, em 26 de dezembro, dizia que “M. Pierre Curie foi ajudado, com competência por sua esposa”<sup>34</sup> e na publicação *Truth* do dia 17 de dezembro de 1903 acrescentaram que Marie era essencial para a pesquisa de seu marido, pois “ele logo descobriu que não podia passar sem ela [...] Ela atiçava nele o fogo sagrado sempre que o via extinguir-se”<sup>35</sup>.

Já a publicação feminista *Le radical*, por ocasião da descoberta do rádio, expressava uma opinião completamente oposta.

[...] Desafiando o dogma de que a mulher é inferior, prestou-se uma homenagem pública a Madame Curie, com concessão de uma soma surpreendente. Então a norma do matrimônio é de que o marido tem o gozo, o benefício e a plena posse de tudo que pertence à sua esposa, Monsieur Curie foi associado a Madame Curie, na partilha das cem mil coroas do Prêmio Nobel, com Monsieur Becquerel (LE RADICAL, 1905 apud QUINN, 1997, p.211-212).

Madame Curie tornou-se a primeira mulher a receber essa condecoração, que no terceiro ano desde a criação do prêmio, ainda não possuía a relevância que tem atualmente. Contudo, a partir do Nobel, Marie passou a ser reconhecida como cientista e cidadã internacional, recebendo vários outros prêmios e agremiações (PUGLIESE, 2007, p.368).

Inicialmente Marie fora indicada para receber o prêmio Nobel por um patologista membro influente da Academia chamado Charles Bouchard (1837-1915). Posteriormente, ela

<sup>33</sup> NEW YORK HERALD, 1903 apud QUINN, 1997, p.211

<sup>34</sup> VANITY FAIR, 1903 apud QUINN, 1997, p.211

<sup>35</sup> TRUTH, 1903 apud QUINN, 1997, p.211

foi simplesmente excluída e apenas Becquerel e Pierre receberiam o prêmio. Há de se estranhar que nessa segunda indicação participaram Gabriel Lippman, que apresentou o primeiro trabalho de Marie sobre o assunto e Henri Poincaré que participava ativamente das apresentações na Academia das Ciências (QUINN, 1997, p.205-206).

O nome de Marie só foi indicado ao prêmio após Pierre enviar uma carta a Academia das Ciências explicando que a pesquisa era inicialmente de sua esposa. Entretanto, mesmo durante o discurso de entrega do prêmio, feito por um representante da Academia das Ciências sueca, a cientista foi tratada como assistente dos outros dois pesquisadores (QUINN, 1997, p.207).

A mais importante recompensa do prêmio- um laboratório com boa estrutura, salários e empregos que permitissem aos Curie levar adiante sua pesquisa- não veio de forma rápida nem fácil. A Marie coube o papel de auxiliar de pesquisa, por uma sociedade sexista e os aspectos de celebridade recaíram mais fortemente sobre Pierre<sup>36</sup> (QUINN, 1997, p.219).

Toda a atenção indesejável que a notoriedade atraiu para eles após o prêmio Nobel influenciou negativamente a produção de Pierre. Todavia, não foi apenas isso que lhe tirou a energia. As mãos de Pierre estavam tão lesadas pela exposição ao rádio que, durante algum tempo ele teve dificuldade até para se vestir. Cada vez mais era incomodado por fortes dores, nas pernas e nas costas, que o impediam de trabalhar (CURIE, 1905 apud QUINN, 1997, p.225).

O trabalho de Pierre nos anos posteriores ao Prêmio Nobel, recuou para questões menores. Entre 1904 e 1906, ele publicou mais dois ensaios<sup>37</sup>, um deles sobre o tempo constante do decaimento radioativo e o outro que discutia a descoberta de Soddy e Ramsay sobre o hélio (partículas alfa) como produto da desintegração do rádio. Enquanto isso a pesquisa de Rutherford, Soddy e Ramsay sobre a radioatividade eram potenciais explicações para questões fundamentais (QUINN, 1997, p.225).

Pierre já se encontrava “curvado como um idoso” e sua visão afetada quando, no dia 16 de abril de 1906, foi atropelado por uma carroça do exército francês enquanto atravessava a rua Dauphine, um dos cruzamentos mais movimentados de Paris, na época. Pierre morreu no momento do atropelamento (QUINN, 1997, p.225).

Pierre deixou, entre as várias realizações para a ciência, um pronunciamento durante a cerimônia do prêmio Nobel, em 1905. Ele demonstrou sua consciência quanto à aplicação do

---

<sup>36</sup> Pierre era uma pessoa introvertida, que não gostava de atenção voltada para ele, nem de obrigações e bajulações acadêmicas (QUINN, 1997, p.225).

<sup>37</sup> “Muitos dos escritos de Pierre Curie foram coletados nas *Oeuvres de Pierre Curie* (Paris, 1908)” (WYART, 2007).

conhecimento científico na sociedade, alertando sobre as potencialidades boas e ruins da radioatividade, em um momento que o campo começava a se desenvolver. Tudo isto trinta e nove anos antes do lançamento das bombas atômicas sobre as cidades de Hiroshima e Nagasaki, no Japão. Em seu discurso, reforçou que o cientista é responsável, perante a sociedade, pelas suas descobertas.

Pode-se ainda conceber que o rádio, em mãos criminosas, poderia tornar-se muito perigoso e, aqui, podemos indagar se é vantajoso para a humanidade conhecer os segredos da natureza, se ela está madura o bastante para usá-los, ou se esse conhecimento será prejudicial. As descobertas de Nobel são exemplo; poderosos explosivos permitiram aos homens realizar trabalhos admiráveis. E também são um terrível meio de destruição, nas mãos dos grandes criminosos que levam os povos a guerra. Estou entre aqueles que pensam, como Nobel, que a humanidade explorará mais bem do que mal das novas descobertas (CURIE, 1905, p.78).

Marie Curie continuou a lecionar na Sobornne, e em 1911 assim como Pierre o fizera, após o prêmio Nobel, se candidatou a uma cátedra na Academia das Ciências. Apesar de já ser uma cientista renomada e ter o apoio de Lipmann, sua tentativa de conseguir a cátedra foi frustrada. A Academia das Ciências de Paris a rejeitou como membro, após uma votação ganha por Eduard Branly (1844 - 1940) com diferença de apenas um voto (WEILL, 2007, p.555).

Depois da morte do seu marido, Marie teve um relacionamento com o físico Paul Langevin (1872-1946), que era casado. Este fato resultou em um escândalo jornalístico com referências xenófobas, devido à sua origem polaca. Logo, a grande cientista, uma polonesa que a França adotara, dava lugar a estrangeira, pivô de uma separação. A reação ao caso de Marie Curie refletia a atmosfera social e política da França, período marcado pelo crescente conservadorismo e xenofobia (QUINN, 1997, p. 341).

Embora essa mulher não seja da nossa raça, embora seja uma funcionária pública [...], e mesmo tendo desejado, seja como for, beneficiar-se das prerrogativas dos homens- estávamos inteiramente e naturalmente dispostos a lhe oferecer também as imunidades do seu sexo. E a ofereceríamos indefinidamente, se um interesse da mesma ordem, mas muito mais sagrado não estivesse em jogo [...] Não existe uma mulher apenas, neste caso, mas duas, e a segunda é infinitamente mais digna do que a primeira. Mas, se a primeira teme por sua reputação, que arriscou espantosamente, a segunda, a mulher irrepreensível, a mãe de família cujo lar está sendo destruído, pode temer, se ficarmos em silêncio [...] (L’ACTION FRANÇAISE, 1911 apud 341-342, QUINN, 1997)

Em meio a todos esses acontecimentos Marie recebeu a notícia de que havia ganhado o Prêmio Nobel, desta vez em Química. Ela o havia ganhado “pelos seus serviços para o avanço da Química com o descobrimento dos elementos rádio e polônio”. A maior parte do dinheiro do prêmio foi diretamente para a pesquisa de amigos (WEILL, 2007, p.555-556).

Em 29 de maio de 1929, Marie fez sua última viagem para fora da França. O aniversário de 25 anos do descobrimento do rádio foi comemorado na Sobornne entre cirurgias. Entre 1923 e 1930 ela se submeteu a quatro cirurgias. Seus dedos, em 1932, também apresentavam lesões, consequência do manuseio do rádio (WEILL, 2007, p.557).

O estado de saúde de Marie Curie piorava, o que a obrigou a se internar em uma casa de saúde em Paris em 6 de junho de 1934 com a suspeita de tuberculose. Em 29 de junho, foi levada para Sancellemoz, um sanatório nas montanhas da Savóia, onde foi diagnosticada anemia perniciosa. Marie Curie faleceu no dia 4 de julho de 1934 e no dia 6 de julho, no cemitério de Sceaux, seu corpo se juntou ao de Pierre (WEILL, 2007, p.557).

Marie Curie não patenteou o processo de isolamento do rádio, permitindo a investigação das propriedades deste elemento por toda a comunidade científica. Foi a primeira pessoa a receber duas vezes o Prêmio Nobel, sendo a única a recebê-lo em áreas científicas distintas (WEILL, 2007, p. 553).

O seu livro “Radioatividade” (*Radioactivité*), escrito ao longo de vários anos, publicado a título póstumo, é considerado um dos documentos fundadores dos estudos relacionados à radioatividade. O 96º elemento da tabela periódica, Cúrio (Cm), foi assim denominado em homenagem ao casal Curie pela equipe de cientistas formada por Glenn Seaborg (1912-1999), Ralph James (1924-1992) e Albert Ghiorso (1915-2010).

## 5 CONCLUSÃO

Os trabalhos iniciais em radioatividade consistiam em trabalhos experimentais e as questões que surgiram na virada do século podem ser resumidas por “Quais substâncias são radioativas? Como elas serão encaixadas no sistema periódico dos elementos? Qual a natureza dos raios emitidos?”. Essas questões eram dirigidas não só aos Físicos, mas também aos Químicos. Quer para os químicos ou físicos, a abordagem foi inicialmente fenomenológica e exploratória concentrando-se em recolher e classificar dados.

Becquerel também continuou a pesquisar o fenômeno por muito tempo, tendo contato com o casal Curie e conhecimento do trabalho desenvolvido por eles. Becquerel, os Curie e Rutherford leram os resultados dos trabalhos de cada um e eventualmente trocavam idéias

sobre esses trabalhos. É possível perceber em seus escritos que um conhecia os resultados obtidos pelos outros.

As pesquisas de Marie Curie se somaram a outras da mesma época que contribuíram para o conhecimento da estrutura atômica da matéria. Marie Curie explorou os raios de urânio sob diferentes perspectivas que lhe permitiram diferenciá-los de outros, praticamente indistinguíveis, como os raios X e a luminescência. Uma maior percepção do fenômeno da radioatividade foi um feito muito significativo no período em que a ciência se deparou com fenômenos que se confrontavam com o arcabouço teórico da época.

A primeira novidade que Marie estabeleceu para os estudos desses raios foi o método quantitativo e a busca sistemática de outras substâncias, que também emitissem esses raios. Com o equipamento inventado por seu marido, Pierre Curie, era possível quantificar a radiação emitida por cada substância. No entanto, caso Marie se restringisse à busca por resultados quantitativos, ela não conseguiria desenvolver a sua pesquisa. Era necessário ir além para compreender o fenômeno.

Ao tentar compreendê-lo, ela comparou os resultados obtidos pelo método elétrico para as diferentes substâncias e seus respectivos minerais. Percebeu, então, que um dos minerais apresentava atividade anômala. Esse fato a intrigou e a fez mudar o rumo de sua pesquisa, se detendo ao resultado inesperado.

Consciente de que não era possível entender o fenômeno com o conhecimento acumulado até então pela ciência, Marie elaborou uma nova hipótese. Nesse ponto, se destaca outro diferencial da pesquisa de Marie Curie em relação a outros pesquisadores do mesmo fenômeno quando ela sugere uma explicação de natureza atômica para o processo: depende da presença de certos elementos e não de propriedades moleculares e a intensidade da radiação é proporcional ao teor do elemento nos compostos estudados.

Seus pressupostos foram muito úteis à descoberta e confirmação dos novos elementos. Nas pesquisas de Marie Curie, cada experimento dependia de uma hipótese a priori. As investigações seguintes eram definidas ao mesmo tempo em que seus pressupostos se confirmavam.

Outros elementos que compuseram as pesquisas de Marie Curie devem ser considerados: os recursos que teve à sua disposição, as limitações que precisou ultrapassar e o contexto histórico-social que influenciaram de formas e em graus diferentes o desenvolvimento do seu trabalho. Isso permite desconstruir uma imagem, muito difundida, de uma ciência neutra, em que o cientista se desvincula inteiramente dos valores recebidos pela sociedade, na busca por um trabalho completamente objetivo.

No caso de Marie Curie, ela precisou migrar para a França, onde existia um ambiente favorável ao desenvolvimento de trabalhos científicos. Ela precisou de um espaço para realizar suas pesquisas e de equipamentos, ambos obtidos por intermédio de seu marido. Os primeiros elementos testados em sua pesquisa foram doados por químicos, amigos de Marie Curie, e as grandes quantidades do minério pechblenda foram conseguidas através das doações do barão Edmond de Rothschild.

Por outro lado, já na França, Marie Curie teve que enfrentar outros problemas, resultado da conjuntura político-social européia. Os seus primeiros trabalhos foram recebidos com muita desconfiança, devido à discriminação de gênero e de origem social, além de xenofobia. Essas atitudes refletem os valores que o meio científico absorve da sociedade e que influenciam negativamente no desenvolvimento da Ciência.

Desse modo, é preciso considerar o avanço científico dentro de seu contexto histórico-social, condicionado a diferentes fatores que transcendem a individualidade do cientista. Existem vários entraves na pesquisa que devem ser superados ou amenizados, cabendo, muitas vezes, ao cientista procurar situações que se adéquem à demanda do seu trabalho.

Para compreender o desenvolvimento da ciência, é preciso considerá-la uma atividade construída com a contribuição de diversas pessoas. Além de Henri Becquerel, que observou e relatou o fenômeno, outros cientistas também se envolveram com a construção desse conhecimento: como Eugène Demarçay com as análises espectrais dos produtos obtidos por Marie Curie; André Debierne, que auxiliou no isolamento de sais de rádio; Soddy, que, junto com Rutherford, propôs a teoria da transmutação dos elementos a partir dos fenômenos radioativos e Pierre Curie, que construiu os equipamentos utilizados nas pesquisas de sua esposa.

A participação de tantos cientistas para a formulação de um conceito suscita uma discussão polêmica: a validade da expressão “descoberta científica”. Embora seja concedida a primazia da descoberta a Becquerel, isso não representou um consenso quanto ao descobridor da radioatividade. Três cientistas foram elevados à categoria de ícone na história da radioatividade, cada um desempenhando claramente diferentes papéis que podem ser considerados igualmente importantes: Henri Becquerel, Marie Curie e Rutherford.

Entre as realizações de Marie Curie estão suas pesquisas sobre a radioatividade e a divulgação das potencialidades de seu uso para a Medicina. Ela inaugurou o pavilhão de radioatividade em Vasórvia e durante a Primeira Guerra Mundial propôs o uso da radiografia móvel para o tratamento de soldados feridos, auxiliando o exército (WEILL, 2007, p.556)

Além de divulgar o assunto na França visitou outros países como, os Estados Unidos, em maio de 1921, para arrecadar fundos para a pesquisa e o Brasil, em agosto de 1926, para conhecer as águas radioativas de Lindóia, que ganhavam fama. Ela ainda fundou o Instituto do Rádio, em Paris, dedicado às pesquisas sobre a radioatividade no tratamento do câncer e tornou-se membro associado livre da Academia de Medicina em 1922, onde divulgou o emprego da energia nuclear no tratamento de doenças (WEIL, 2007, p.556).

Os futuros estudos acerca do fenômeno tiveram grande impacto na Química e na Física, alterando a concepção de diversos conceitos anteriores. O elemento químico poderia ser instável e o átomo divisível. E, a partir dessa aparente contradição, foi possível compreender as propriedades dos isótopos dos elementos radioativos como, por exemplo, a meia-vida que os identifica, de modo análogo à análise espectroscópica.

No curso das suas pesquisas sobre a radioatividade, Rutherford se deparou com um resultado inusitado de acordo com o modelo atômico vigente. A partir da quantificação da interação das partículas alfa com a matéria, Rutherford deduziu um modelo atômico nuclear e a relação entre o tamanho do átomo e tamanho no núcleo em 1911. Posteriormente, em 1919, no artigo “Um efeito anômalo no nitrogênio”, ele anunciou a possibilidade da desintegração nuclear de átomos leves e a obtenção da partícula subatômica próton a partir do bombardeamento do nitrogênio por partículas alfa (SÈGRE, 1987, p.113).

As pesquisas de Marie Curie ilustram diversos fatores, que atribuíram caracteres particulares e pioneiros ao seu trabalho. Suas pesquisas também apresentaram aspectos generalizantes que evidenciam o caminho percorrido pelos cientistas, com “vários erros e alguns acertos”, que são intrínsecos ao processo de construção de um novo conhecimento.

## REFERÊNCIAS

AFONSO, Júlio Carlos. **Rádio**. rev. Química Nova na Escola, v.32, n.1, p.58-59, fev. 2010  
Disponível em: <[http://qnesc.s bq.org.br/online/qnesc32\\_1/12-EQ-4909.pdf](http://qnesc.s bq.org.br/online/qnesc32_1/12-EQ-4909.pdf)>. Acesso em: 12 de março de 2011

BADASH, L. In: Rutherford. **Dicionário de Biografias Científicas**. Rio de Janeiro: Contraponto, v. III, 2007, p. 2382-2393.

BECQUEREL, Henri. **On radioactivity, a new property of matter**. Nobel Lecture, p.52-70, dez.1903.

Disponível em: <[http://nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/1903/becquerel-lecture.pdf](http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1903/becquerel-lecture.pdf)>. Acesso em: 10 de dezembro de 2010

CAMEL, Tânia de Oliveira. **De Thomson a Rutherford, investigando a estrutura da matéria**. Trabalho apresentado na 31ª reunião da SBQ, 2008.

CHASSOT, Attico. **A ciência através dos tempos**. São Paulo: Moderna, 1994, p145-160.cap.10.

\_\_\_\_\_. **Raios X e a Radioatividade**. rev. Química Nova na Escola, v.2, n.2, p.19-22, nov. 1995. Disponível em: <<http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc02/historia.>>. Acesso em: 12 de março de 2011

CORDEIRO, Marinês Domingues; PEDUZZI, Luiz . **A radioatividade através das conferências Nobel de Marie e Pierre Curie**. VII Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências, nov. 2009. Disponível em: <<http://www.sbpcnet.org.br/livro/60ra/textos/CO-CarlosAlbertoSantos.pdf>>. Acesso em 21 março 2011

CURIE, Marie. **Radium and the New Concepts in Chemistry**. Nobel Lecture, dez. 1911. Disponível em: <[http://nobelprize.org/nobel\\_prizes/chemistry/laureates/1911/marie-curie-lecture.html](http://nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1911/marie-curie-lecture.html)>. Acesso em: 10 de dezembro de 2010

CURRIE, Pierre. **Radioactive substances, especially radium**. Nobel Lecture, p. 73-78, jun. 1905. Disponível em: <[http://nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/1903/pierre-curie-lecture.pdf](http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1903/pierre-curie-lecture.pdf) >. Acesso em: 10 dezembro de 2010

FERRAZ NETTO, Luiz. **Construção de bobinas de Ruhmkorff**. Disponível em: <<http://www.landelldemoura.qsl.br/r1.htm>> Acesso em: 10 dez. 2011.

MARTINS, Roberto de Andrade. **As primeiras investigações de Marie Curie sobre elementos radioativos**, rev. da SBHC, v.1, n.1, p.29-41, jan./jun. 2003. Disponível em: <[http://www.sbhc.org.br/pdfs/revistas\\_antteriores/2003/1/artigos\\_3.pdf](http://www.sbhc.org.br/pdfs/revistas_antteriores/2003/1/artigos_3.pdf)>. Acesso em: 21 março 2011

\_\_\_\_\_. **A Descoberta dos Raios X: O Primeiro Comunicado de Röntgen** rev. Brasileira de Ensino de Física, v. 20, n. 4, p. 373-390, dez. 1998

\_\_\_\_\_. **Hipótese e interpretação experimental: A conjectura de Poincaré e a descoberta da hiperfosforescência por Becquerel e Thompson**. rev. Ciência & Educação, v.10, n.3, p.501-516, 2004. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/ciedu/v10n3/13.pdf>>. Acesso em: 12 de março de 2011

\_\_\_\_\_. **Como Becquerel não descobriu a radioatividade**. Caderno Catarinense de Ensino de Física, n. 7, p. 27-45, jun.1990. Disponível em: <<http://ifi.unicamp.br/~ghtc/>>. Acesso em: 5 novembro 2010

MASINI, André Carlos Salzano. **A história do éter**. Disponível em: <[http://www.casadacultura.org/andre\\_masini/ensaios/historia\\_do\\_eter.html](http://www.casadacultura.org/andre_masini/ensaios/historia_do_eter.html)> Acesso em: 2 de novembro de 2011

MOREIRA, Ildeu de Castro. **Os cem anos da descoberta do elétron**, Trabalho apresentado na Sociedade Nacional de História da Ciência,1997

PUGLIESE, Gabriel. **Um sobrevôo no "Caso Marie Curie": um experimento de antropologia, gênero e ciência.** rev. de Antropologia, vol.50, n.1, p. 347-385. 2007 Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/ra/v50n1/a09v50n1.pdf>>. Acesso em 21 março 2011

QUINN, Susan. **Marie Curie: Uma vida.** Tradução de Sonia Coutinho1ed. São Paulo: Scipione, 1997.526p.

REZENDE, Claudia. **Ano internacional da química.** rev. Química Nova na Escola, v.34 , n.1, p.3-4. 2011. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-40422011000100001&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-40422011000100001&script=sci_arttext)>. Aceso em 2 novembro 2011

RENZETTI, Roberto. **Dall'atomo al núcleo.** p.1-44., jan.2009 Disponível em:< <http://www.fisicamente.net/A/index-1781.htm>>. Acesso em: 12 março 2011

RODITI, Itzhak. **Dicionário Houaiss de física.** Rio de Janeiro: Objetiva, 2005. 248 p.

SANTOS, Carlos Alberto. **Do Espalhamento de Partículas Alfa à Energia Nuclear: Caminhos Percorridos por Rutherford.** Disponível em: <<http://www.foco.fae.ufmg.br/pdfs/1708.pdf>>. Acesso em: 21 março 2011

SEGRÈ, Emilio. **Dos raios X aos Quarks: físicos modernos e suas descobertas,** Tradução de Wamberto Hudson Ferreira. Brasília: UnB, 1987. 345p.

SCHULZ, Peter. **Seção especial: centenário da morte de William Thomson (1824-1907) duas nuvens ainda fazem sombra na reputação de Lorde Kelvin.** rev. Brasileira de Ensino de Física. v.29, n.4, 2007. Disponível em:< <http://dx.doi.org/10.1590/s1806-11172007000400006> >. Acesso em 24 novembro 2011

TENNENBAUM, Jonathan. **Energia Nuclear: uma tecnologia feminina.** Tradução Gildo Magalhães.1ed.Rio de Janeiro: MS1a, 2000.365p.

UNICAMP. **Laboratório de Física Moderna.** Disponível em: <<http://www.ifi.unicamp.br/~jmoreira/franckhertz.html> > Acesso em: 10 dez. 2011.

XAVIER, Allan Moreira; LIMA André Gomes de; VIGNA, Camila Rosa Moraes, VERBI, Fabíola Manhas; GONÇALVES, Gisele. **Marcos da história da radioatividade e tendências atuais.** Química Nova, v. 30, n. 1, p.83-91, 2007. Disponível em:< <http://www.scielo.br/pdf/qn/v30n1/18.pdf>>. Acesso em: 2 julho 2011.

WEILL, Adrienne R. In: Marie Curie. **Dicionário de Biografias Científicas.** Rio de Janeiro: Contraponto, v.1, 2007.p. 551-557.

WYART, J. In: Pierre Curie. **Dicionário de Biografias Científicas.** Rio de Janeiro: Contraponto, v. 1, 2007. p. 557-563.