

A NUCLEO-SÍNTESE DOS METAIS TRANSURÂNICOS

Mário Tolentino e Romeu C. Rocha-Filho

Departamento de Química - Universidade Federal de São Carlos - Cx. P. 676 - 13560-970 - São Carlos - SP

Recebido em 20/10/94; aceito em 24/3/95

A chronology of the discovery of the transuranic metals is presented along with a discussion of the different processes that lead to the genesis of new elements within the stars. The evolution of particle accelerators, the recent IUPAC/IUPAP criteria for the discovery of new elements (as well as their application to elements of $Z > 100$) and IUPAC's official systematic nomenclature for elements of atomic number greater than 100 are discussed. Finally, historic and physical details about the transuranic elements are presented (up to the heaviest one heretofore officially recognized: $Z = 109$), as well as the recent IUPAC choice of names for elements 101 to 109.

Keywords: nucleosynthesis; transuranic metals; discovery of elements.

A COMPREENSÃO DA ESTRUTURA DO UNIVERSO FÍSICO

A razão, de que o homem é dotado, vem determinando, através dos tempos, a necessidade de se compreender a estrutura do universo físico dentro do qual ele vive e retira os materiais de que necessita. A idéia primordial de um componente básico do mundo físico dominou as cogitações dos filósofos gregos a partir de Thales de Mileto (640-548 a.C.). A princípio tal componente era único e assumia natureza variada conforme o pensamento do filósofo: água, ar, fogo, princípios indefinidos e outros tantos frutos do pensamento. Empédocles de Agrigento (490-430 a.C.)¹, entretanto, admitia que quatro seriam os componentes básicos. Aristóteles (384-322 a.C.) incorporou esta idéia no seu sistema filosófico², no qual a matéria era vislumbrada como contínua. Em seu tratado *Meteorologica*, postulou a existência de quatro componentes básicos — já então chamados *elementos*, do grego “stoichieia” — a saber: a terra, a água, o ar e o fogo, sendo que certas combinações das propriedades seco, úmido, frio e quente eram a eles associadas (vide Fig. 1); assim, por exemplo, a combinação das propriedades quente e seco estava associada ao fogo, enquanto que a de frio e úmido estava associada à água. Essa “matéria primeira” foi chamada de elemento, pela primeira vez, por Platão (427-347 a.C.)³, se bem que o conceito químico de elemento foi enunciado somente nos meados do século XVII por Robert Boyle (1627-1691)⁴. Ademais, até Boyle, predominou a concepção defendida por Aristóteles de que a matéria era contínua; foi só então que começou a surgir a teoria atômica, resgatando a “hipótese” atômica de Leucipo (elaborada por Demócrito), levantada há mais de 20 séculos⁵.

A partir do século XVIII, resultando, de certo modo, dos

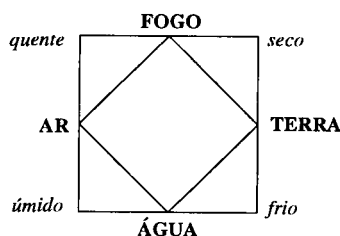


Figura 1. Componentes básicos do mundo físico e propriedades fundamentais a eles associadas (segundo Empédocles de Agrigento).

esforços meio místicos dos alquimistas, o número de elementos descobertos pelos químicos foi crescendo e o seu estudo sendo sistematizado, culminando com a grande síntese representada pela obra de Dmitri I. Mendeleiev (1834-1907) e Lothar Meyer (1830-1895). Nessa ocasião, o número de elementos químicos relacionados atingia a cerca de sessenta, conforme tabela⁶ publicada em março de 1869. Oitenta anos antes (1789), Antoine L. Lavoisier (1743-1794), no seu livro “Elementos de Química”, relacionava 33 elementos químicos⁷; entretanto, posteriormente 10 deles deixaram de ser considerados como tal, entre eles a luz e o calórico.

Por volta de 1934, antes da Segunda Guerra Mundial, o número de elementos químicos conhecidos já atingia a 88. Nessa ocasião, a tabela periódica assinalava até o urânio ($Z = 92$), mas ainda não tinham sido descobertos os elementos de números atômicos 43 (tecnécio), 61 (promécio), 85 (astato) e 87 (frâncio)⁸.

Este artigo tem como objetivo relatar a descoberta dos elementos transurânicos e as idéias e metodologias a ela subjacentes, bem como algumas das propriedades e aplicações desses elementos. Também são relatadas as posições da IUPAC/IUPAP quanto ao reconhecimento de uma tal descoberta, a nomenclatura sistemática recomendada para novos elementos ainda sem um nome oficialmente reconhecido e os nomes escolhidos em agosto de 1994 pela IUPAC para os elementos 101 a 109.

DESCOBERTAS QUE ABREM NOVOS CAMINHOS

Em 1896, Henry Becquerel (1852-1908) publicou várias notas nos *Comptes Rendus* da Academia Francesa de Ciências relatando a descoberta de uma radiação de natureza ainda desconhecida, emitida pelo urânio, seus minerais e seus sais⁹. Essa radiação, então chamada de *raios urânicos* ou *raios de Becquerel*, serviu de ponto de partida para que Marie S. Curie (1867-1934) e Pierre Curie (1859-1906) iniciassem uma série de pesquisas que levariam à criação da denominação radioatividade e à descoberta do polônio ($Z = 84$) e do rádio ($Z = 88$)¹⁰.

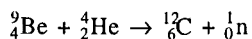
Estudos posteriores mostraram que estas radiações provinham do núcleo do átomo e que este fenômeno era acompanhado por transmutação do núcleo. Foi nessa linha de raciocínio que Ernest Rutherford (1871-1937) e Frederick Soddy (1877-1956) mostraram que a chamada “emanação” de alguns elementos radioativos era na realidade um novo elemento químico, mais tarde caracterizado como um dos gases raros (radônio, $Z = 86$). Em 1903, Rutherford e Soddy propuseram

uma linha de pesquisa que iria ser um rico filão de descoberta de novos elementos. Diziam eles¹¹: “se existirem elementos mais pesados que o urânio, provavelmente eles serão radioativos. A extrema sensibilidade da radioatividade como um meio de análise química tornaria possível o reconhecimento desses elementos, mesmo se presentes em quantidades infinitesimais”*. Posteriormente, no decorrer de seus estudos sobre a radioatividade, Soddy chegou a caracterizar de 40 a 50 espécies atômicas radioativas que derivavam de transformações de outras e que, curiosamente, não encontravam espaço na Tabela Periódica dos Elementos¹². Pelas suas propriedades, deveriam estar em lugares já ocupados por outros elementos, tendo nascido daí o conceito de isótopo (1913)⁵, restrito, na época, às substâncias radioativas e mais tarde estendido a outros elementos por Francis W. Aston (1877-1945).

O aprofundamento dos conhecimentos sobre a radioatividade havia mostrado que a transmutação dos elementos (sonho dos alquimistas) era possível. Os estudos de Rutherford e Soddy levaram ao estabelecimento das séries de decaimento radioativo, na época capítulo riquíssimo em temas para pesquisa científica, no campo do núcleo atômico. Em 1919, Rutherford conseguiu bombardear núcleos de nitrogênio com partículas alfa, constatando a formação de oxigênio e de prótons, isto é, núcleos de hidrogênio. Esta foi a primeira nucleosíntese provocada pelo homem. Mais tarde, este mesmo cientista e James Chadwick (1891-1974) mostraram que outros átomos leves podiam ter seus núcleos desintegrados por este tipo de bombardeio. Essas transmutações que ocorriam com os elementos do boro ao potássio, com exceção do carbono e do oxigênio, mostravam que seus núcleos podiam ser alterados quando atingidos por partículas alfa. Em todos os casos a reação nuclear liberava um próton¹³.

Em 1930, os cientistas alemães W. G. F. Bothe e H. Becker publicaram um trabalho em que relataram que o bombardeio do berílio —e em menor intensidade o do boro e o do lítio— por radiação alfa provinda do polônio dava origem a outro tipo de radiação, com grande poder de penetração, mesmo se comparada à radiação gama¹⁴. Em poucos meses, o casal Irène Curie-Joliot (1897-1956) e Frédéric Joliot (1900-1958) comunicou a repetição das experiências relatadas pelos cientistas alemães e revelou que o bombardeio de lâminas de parafina por essa radiação dava como resultado uma intensa emissão de prótons, retirados daquele material rico em átomos de hidrogênio¹⁵.

Chadwick, ao repetir o experimento do casal Joliot, propôs que os fenômenos observados tanto por Bothe/Becker como pelo casal Joliot-Curie só poderiam ser explicados se fosse admitida a existência de uma partícula não ionizadora e com a massa do próton como componente da radiação então chamada de *radiação de Bothe*. Em outros termos, quando as partículas alfa do polônio atingiam os núcleos de berílio, arrancavam dos mesmos certas partículas desprovidas de carga elétrica e com a massa do próton. A essas partículas Chadwick deu o nome de nêutrons e as considerou um componente normal dos núcleos atômicos. A geração de nêutrons adviria de uma reação nuclear do tipo:



A primeira sugestão de Chadwick sobre a existência do nêutron foi publicada na revista *Nature*¹⁶, em 19 de fevereiro de 1932 (por esta descoberta ele recebeu o Prêmio Nobel de Física em 1935). O termo “nêutron” fora introduzido em 1921 por W. D. Harkins, para se referir ao dublete nuclear formado pelo elétron e pelo próton, previsto por Rutherford em 1920¹⁷ (note-se, pelo exposto, que Rutherford, de certo modo, previu a existência do nêutron¹⁸).

* Previsão extremamente acertada: algumas décadas depois, a detecção de uns poucos átomos (menos de uma dezena) de um elemento sintético seria suficiente para provar a obtenção de um novo elemento, como será visto mais adiante.

Com a descoberta do nêutron, os cientistas dispunham de uma partícula ideal para bombardeios nucleares, já que não tendo carga poderia penetrar mais facilmente nos núcleos atômicos, vencendo a barreira de potencial (vide abaixo), não sendo repelida pelos prótons.

Em 1934, o casal Joliot-Curie desenvolveu a técnica de produção da radioatividade artificial, mediante o bombardeio de núcleos que normalmente não são radioativos. Eles bombardearam com partículas alfa uma fina lâmina de alumínio, tendo então observado a emissão de pósitrons e como resultado transformações nucleares. Esta atividade continuava mesmo depois de cessado o bombardeio, sendo que a emissão durava vários minutos e decaía com todas as características de um fenômeno radioativo. Após cuidadosos estudos, esses cientistas deduziram que os átomos de alumínio haviam se transformado em outros de fósforo e que estes eram radioativos. Pela primeira vez havia sido obtido um isótopo radioativo de um elemento químico normalmente não radioativo; estava descoberta a radioatividade artificial, o que deu ao casal Joliot-Curie o Prêmio Nobel de Química¹⁹ em 1935.

Convém assinalar que os pósitrons haviam sido descobertos em 1932 por Carl D. Anderson, pelo que recebeu o Prêmio Nobel de Física em 1936. A presença de pósitrons como resultado de decaimento radioativo foi imediatamente constatada por Chadwick, P. M. S. Blackett, o casal Joliot-Curie, Lise Meitner e outros em trabalhos²⁰ publicados em 1933.

A possibilidade de produção de radioisótopos abriu um amplo caminho para os estudos sobre a natureza e estrutura do núcleo atômico, ao mesmo tempo que permitiu a produção de fontes artificiais de radiação de grande atividade e que têm sido muito úteis à ciência, à tecnologia e à medicina.

A GÊNESE DOS ELEMENTOS QUÍMICOS

Iniciando um capítulo de seu livro “O Big Bang - Origem do Universo”, Joseph Silk escreve²¹: “Somos filhos das estrelas. Há dez bilhões de anos atrás, cada átomo atualmente em nossos corpos estava no centro de uma estrela”. As descobertas e pesquisas no campo da radioatividade natural e artificial proporcionaram farto material experimental e especulativo para que um dos grandes problemas da ciência moderna fosse discutido: a origem dos elementos químicos. Juntamente com a astronomia, a física e a química nuclear permitiram o estabelecimento de hipóteses que complementaram o grande campo de pesquisas sobre a origem do universo.

O aprimoramento dos instrumentos de pesquisa, notadamente os que dizem respeito às análises de rochas terrestres, lunares e meteoríticas, bem como a pesquisa espectroscópica da luz das estrelas, permitiu o estabelecimento de conhecimentos razoavelmente precisos sobre a composição química do universo e os estudos referentes à abundância dos elementos químicos. As peculiaridades observadas passaram a ser analisadas à luz dos conhecimentos cujas origens repousavam na estabilidade nuclear, resultado das pesquisas em radioatividade. Foram, então, levantadas hipóteses que estabeleceram alguns mecanismos básicos para a compreensão da nucleosíntese dos elementos, relacionando-a a transmutações nucleares que ocorrem em diferentes tipos de estrelas.

As modernas teorias cosmológicas atribuem a origem do universo à uma grande explosão inicial, que envolveu incalculável quantidade de energia e que deu origem à expansão do universo. Admite-se hoje que, nos primeiros milissegundos após a explosão da singularidade, ocorreu a formação de quarks e anti-quarks, a partir dos quais surgiram as demais partículas e anti-partículas comumente chamadas de elementares. Logo a seguir, ocorreu a nucleosíntese do deutério por captura de um nêutron por um próton. Processo semelhante deu origem ao trítio, sendo essa nucleosíntese de átomos de hidrogênio possível no momento em que a temperatura do sistema em expansão atingia

valores da ordem de 10^9 K. A fusão de dois núcleos de deutério ou a de um próton a um núcleo de trítio deu origem ao hélio. Hidrogênio e hélio, esses foram os elementos primordiais na criação do universo físico, e isto explica a abundância desses elementos na composição química desse sistema: hidrogênio (73%) e hélio (25%). Esse seria o material básico para a formação dos elementos químicos através de processos nucleares explicitados através de trabalhos de H. A. Bethe, de E. M. Burbidge, G. R. Burbidge, W. A. Fowler e F. Hoyle, A. G. W. Cameron, e de Alpher e Gamow^{22,23}. Um interessante artigo sobre a alquimia estelar e a origem dos elementos químicos foi publicado recentemente por Norman²⁴; essa questão também é abordada de modo bastante extenso por Mason²⁵.

Processos exotérmicos que ocorrem no interior das estrelas

Esses processos incluem a chamada "combustão" do hidrogênio, do hélio e do carbono, o processo denominado alfa e o processo "e", todos ocorrendo sucessivamente.

Quando as nuvens de hidrogênio e hélio formadas na fase inicial de constituição do universo começaram a contrair-se sob a ação da força gravitacional, ocorreu, como consequência, uma elevação de temperatura. Quando essa atingiu um valor de cerca de 10^7 K, teve início uma seqüência de reações de fusão nuclear em que átomos de hidrogênio geraram outros de deutério e de hélio, concomitante a uma forte emissão de pósitrons, neutrinos e radiação gama. A reação final foi a transformação de parte do hidrogênio em hélio, com liberação de energia e outras partículas. Este tipo de reação ocorre em algumas estrelas, como é o caso do Sol, no qual a cada segundo são consumidos 600 milhões de toneladas de hidrogênio, com produção de 595,5 milhões de toneladas de hélio. Dessa maneira, 4,5 milhões de toneladas de matéria são convertidos, por segundo, em energia²⁵, de acordo com a equação de Einstein ($E = mc^2$). Esse tipo de reação passa por processos intermediários, de que participam isótopos de carbono e nitrogênio, propostos em 1938 por Hans A. Bethe, ganhador do prêmio Nobel de Física em 1967. Esse processo nuclear foi também estabelecido, de forma independente, por Carl F. von Weizsäcker, astrônomo, cosmologista e físico alemão²⁶.

A chamada "combustão" do hélio leva à produção de dois átomos de berílio 8 e este, reagindo com outro átomo de hélio, leva à geração de carbono 12, com emissão de energia sob a forma de radiação gama. Outras reações que provavelmente ocorrem são as do hélio 4 com o carbono 12, dando oxigênio 16, que por sua vez reage nuclearmente com hélio 4, dando neônio 20, que, continuando a cadeia de reações nucleares, reage com hélio 4, dando magnésio 24. Em todas essas fusões nucleares há emissão de radiação gama, podendo em alguns casos haver geração, também, de átomos de sódio 23.

No processo denominado pelos astrofísicos de "processo alfa", partículas desse tipo liberadas em reações nucleares anteriores podem reagir com o oxigênio 16 e com o magnésio 24, dando origem à formação do silício 28, do enxofre 32, do argônio 36 e do cálcio 40. Este processo também pode gerar titânio 48 e escândio 44, este último como produto de transição para o cálcio 44.

Ainda dentro desta classe de processos exotérmicos podem ocorrer as chamadas transformações "e", também conhecidas como "processos de equilíbrio". Este tipo de reações nucleares ocorre em estrelas que estão prestes a explodir (supernovas), pois nelas, momentos antes do evento explosivo, ocorre um grande número de reações nucleares envolvendo radiação gama, partículas alfa, prótons e nêutrons, o que leva a um estado de equilíbrio entre núcleos, prótons e nêutrons livres. Este processo explica a formação dos elementos entre o titânio e o cobre, isto é, vanádio, cromo, manganês, ferro, cobalto, níquel e cobre.

Processos de nucleossíntese estelar dos tipos "s" e "r": Esses processos recebem essa denominação porque o agente das

transformações nucleares são nêutrons lentos ("s") ou rápidos ("r"). Nesses casos ocorre a captura de um nêutron que atinge um núcleo, gerando núclídeos* com números de massa compreendidos entre 63 e 209. A origem dos nêutrons geralmente é atribuída a reações nucleares em que o carbono 13 passa a oxigênio 16 e o neônio 21 passa a magnésio 24 por bombardeio de partículas alfa e liberação de nêutrons. Dadas as características do decaimento radioativo dos possíveis átomos resultantes das reações nucleares, esse processo seria responsável pela relativa abundância dos núclídeos com número de massa em torno de 90, 138 e 208. Entre eles estão os isótopos ítrio 89, zircônio 90, bário 138, cério 140, chumbo 208 e bismuto 209, existindo também a hipótese de que o tório 232 e o urânio 235 e 238 tenham sido formados por esse processo de captura de nêutrons. A partir desses elementos e por decaimento radioativo outros teriam sido formados, tais como: potássio, astato, radônio, frâncio, rádio, actínio e protactínio.

Processo de nucleossíntese estelar do tipo "p": Neste processo ocorre ou a captura de prótons pelos núcleos ou a expulsão de nêutrons decorrente de bombardeio por radiação gama. Cerca de 36 núclídeos podem ter sua origem explicada por esse processo, todos com número de massa par, contando-se entre eles o escândio 74 e o mercúrio 196, como extremos.

Processo de nucleossíntese estelar do tipo "x": Este processo procura explicar a formação de isótopos estáveis de lítio, berílio e boro, cuja abundância no universo é relativamente baixa. A hipótese estabelecida baseia-se na fragmentação de núcleos provocada pelo impacto de radiação cósmica do interior da galáxia. Os núcleos existentes na radiação cósmica chocar-se-iam com núcleos de hidrogênio e hélio intergaláctico, sofrendo fragmentação e dando núcleos mais leves. Também é admissível que núcleos de elementos químicos do grupo do ferro, existentes no espaço intergaláctico, sejam atingidos por núcleos de hidrogênio ou de hélio, dando nascimento a núclídeos de elementos mais leves^{25,27}.

NUCLEO-SÍNTESE DE ELEMENTOS PESADOS

Um dos objetivos deste trabalho é relatar as técnicas usadas para bombardear o núcleo atômico, conseguindo transmutações que levam à produção de elementos artificiais. Durante muito tempo, o elemento mais pesado foi o urânio, que apresenta os isótopos 234, 235, 236 e 238; este último é o mais abundante (99,275%) e, assim, é responsável pela maior parte da massa atômica relativa desse elemento (calculada como 238,0289).

Tão logo as reações nucleares foram caracterizadas, os pesquisadores da área levantaram a hipótese de que o bombardeio adequado de núcleos atômicos poderia dar origem a elementos químicos sintéticos, isto é, que não são encontrados na natureza. A partir de 1920, começaram a ser feitas cogitações a respeito dos elementos de números atômicos 43, 61 e 87, sendo inclusive sugeridos diversos nomes para eles. Entretanto, as suas identificações só ocorreram mais tarde, com a produção por transmutação nuclear²⁸.

Os problemas do bombardeio do núcleo atômico e as partículas projetéis

As pesquisas de Rutherford levaram à hipótese de um núcleo atômico extremamente pequeno, formado por um conjunto de partículas de carga elétrica positiva, às quais, mais tarde, foram juntar-se os nêutrons, descobertos por Chadwick. A coesão do núcleo, mantendo suas partículas unidas, é atribuída à existência de fortes forças de coesão que surgem quando as

* O termo núclídeo é mais geral que o termo isótopo, que estritamente falando refere-se a dois ou mais núclídeos de mesmo número atômico e diferentes números de massa.

partículas estão a uma distância, uma da outra, da ordem de 10^{-13} cm (1 fm). Acredita-se que elas sejam remanescentes de forças poderosas que atuam sobre os quarks²⁹. Essas fortes forças, junto com as de natureza coulombiana decorrentes da carga positiva do núcleo, determinam uma verdadeira barreira de potencial que dificulta a aproximação de partículas positivamente carregadas. À medida que esse tipo de partícula aproxima-se do núcleo, a sua energia cinética vai diminuindo, já que ela é freada pela repulsão coulombiana. Se a energia cinética remanescente não for suficiente para vencer a barreira de potencial, a partícula é repelida, como foi verificado por Rutherford em suas experiências de bombardeio de finas lâminas de metais por partículas alfa. Se, por outro lado, a energia for suficiente, a partícula vencerá a repulsão eletrostática, atingindo os limites do núcleo, quando então outras forças determinam a sua captura e decorrentes efeitos de alteração nuclear.

Se a partícula que se aproxima do núcleo atômico for desprovida de carga (caso dos nêutrons), não haverá qualquer ação da barreira de potencial e ela poderá penetrar nesse núcleo, passando a sofrer a ação das fortes forças coesivas que agem a muito curtas distâncias. Em alguns casos, tem sido conseguida a ultrapassagem da barreira de potencial por partículas com menor energia do que a prevista como necessária. Isto se deve a efeitos explicados pela mecânica ondulatória, considerando-se que a cada partícula em movimento pode ser associada uma onda, existindo a probabilidade dessa onda ser encontrada no outro lado da barreira de potencial: o chamado *efeito túnel*³⁰.

À medida que as partículas —projéteis— que devem atingir o núcleo apresentam maior massa, mais necessário se faz que sejam impulsionadas a altas velocidades (grandes energias cinéticas) para poderem vencer a barreira de potencial, atingindo o núcleo que deve ser transformado. O mesmo ocorre quando os núcleos —alvos— são de elementos de alta massa atômica. Esses alvos geralmente são constituídos por isótopos bem definidos, expostos à radiação bombardeante em camadas extremamente delgadas.

Por ocasião das primeiras experiências sobre transmutação artificial, as partículas projéteis eram núcleos de hélio —partículas alfa— oriundos de fontes naturais, tal como o polônio 209. Mais tarde foram usados os nêutrons, os dêuterons —núcleos de deutério— e os prótons. Para a produção de elementos artificiais, tornou-se necessário usar partículas —íons positivos— de massa maior, tais como núcleos de boro, carbono, nitrogênio, neônio, cromo, ferro, cobalto e outros. Quando o bombardeio se destinava a estudos sobre partículas elementares da matéria ou estruturas nucleares, eram usados elétrons, fótons de radiação X ou gama, e até mesmo anti-partículas, como os anti-prótons. É fato recente (primeiro semestre de 1994) o uso de colisões entre prótons e anti-prótons devidamente acelerados que deram origem à possível descoberta do sexto quark, que ainda não havia sido caracterizado³¹.

Aceleradores de partículas: os “canhões” para bombardeio do núcleo

Estabelecidas as condições energéticas que cercam o núcleo como uma verdadeira barreira e conhecidos os projéteis que devem ser lançados contra os núcleos para perturbar a sua estabilidade, resta resolver o problema de conseguir dotar as partículas projéteis de energia suficiente para a sua penetração nos núcleos.

Os dispositivos usados para energizar as partículas são chamados de *aceleradores*. Como o próprio nome o indica, são equipamentos que permitem, sob a ação de campos elétricos, comunicar altas velocidades às partículas, isto é, grande energia cinética, e determinar o seu percurso por aplicação adequada de campos magnéticos.

Quando foram realizados os primeiros trabalhos experimentais com partículas alfa, a energia delas era apenas aquela que

provinha do próprio processo de desintegração radioativa. No caso do polônio, a radiação alfa emitida tem uma energia de 4,976 MeV (note-se que o elétron-volt é a energia adquirida por um elétron quando acelerado por um campo elétrico de 1 volt; esta energia é de aproximadamente $1,60218 \times 10^{-19}$ J).

Segundo Robert A. Millikan³² (1868-1953), até 1930 a transmutação artificial provocada pelo bombardeio com partículas alfa só era possível utilizando-se como alvo átomos dos chamados elementos leves, isto é, do boro até o potássio (com exceção do carbono e do oxigênio). É verdade que, em 1931, no Laboratório de Física Norman Bridge, em Pasadena, Califórnia, haviam sido obtidas evidências de desintegração de átomos pesados por incidência em seus núcleos de fótons de radiação cósmica³³.

O primeiro equipamento produzido com o objetivo de acelerar partículas atômicas foi construído no Instituto de Tecnologia da Califórnia por C. C. Lauritsen e R. D. Bennett. Tratava-se de um gigantesco tubo de raios X, no qual elétrons ou íons positivos podiam ser acelerados por diferenças de potencial da ordem de 750 kV, valor este mais tarde elevado para 1,2 MV³³. A radiação X emitida por este equipamento era tão potente e de frequência tão alta que era comparável à emissão gama do elemento rádio. Esse equipamento, todavia, foi usado só para aplicações médicas. Estes mesmos pesquisadores, em 1933, construíram outro equipamento semelhante, que usaram para acelerar partículas alfa, obtendo feixes de alta energia, com os quais conseguiram realizar transmutações semelhantes àquelas feitas pelo casal Joliot-Curie³⁴.

A luta para construir aceleradores de partículas prosseguiu com os trabalhos de J. D. Cockroft e E. T. S. Walton, em Cambridge (Inglaterra). Eles construíram uma máquina que conseguia elevadas diferenças de potencial graças à adequada ligação de capacitores a fontes de alta tensão³⁵. O campo elétrico era aplicado em tubos nos quais era feito vácuo; numa das extremidades eram injetados os íons-projéteis e na outra era colocado o alvo contendo o nuclídeo que se desejava bombardear. Esses pesquisadores conseguiram partículas aceleradas a uma energia de 700 keV e com elas obtiveram transmutações do tipo lítio passando a berílio e este a hélio. Por esses estudos, compartilharam o Prêmio Nobel de Física de 1951.

Outro tipo de acelerador de partículas resultou do desenvolvimento, em 1931, no Instituto de Tecnologia de Massachusetts —MIT, nos Estados Unidos, de uma possante máquina eletrostática —fruto dos avanços tecnológicos, herdeira das antigas máquinas eletrostáticas que faziam o encanto dos laboratórios de física do passado. A idéia resultou de estudos de Robert J. Van de Graaff (1901-1967). O seu princípio baseava-se no transporte de cargas elétricas por uma correia devidamente movimentada; historiadores afirmam que este princípio já havia sido enunciado por Lord Kelvin (William T. Kelvin, 1824-1907)³⁶. O funcionamento deste acelerador consiste no fornecimento de cargas elétricas à superfície de uma correia de material adequado (seda, borracha, plástico etc.); essas cargas são levadas para o interior de uma esfera oca e polida, sendo aí coletadas e armazenadas até o limite imposto por condições de isolamento elétrico. Esses aceleradores tornaram-se populares e foram construídos nos mais variados tamanhos: desde pequenos, para uso em laboratórios didáticos, até gigantescas máquinas, como a construída no MIT, que chegava a atingir um potencial de 5 milhões de volts. Modificando-se as condições ambientais (câmaras pressurizadas, umidade do ar controlada, etc.), conseguia-se a criação de diferenças de potencial enormes, que serviam para criar intensos campos elétricos, viabilizando aceleradores de partículas com energias de até 9 MeV.

Ernest O. Lawrence (1901-1958), Prêmio Nobel de Física de 1939, desenvolveu um acelerador de partículas que foi o precursor dos modernos equipamentos que chegam a acelerar partículas até energias da ordem de gigaelétron-volts. Esse equipamento pioneiro foi chamado de *ciclotron*; nele, as partículas a

serem aceleradas eram injetadas no centro de dois eletrodos ocios, semi-circulares, aos quais era aplicado potencial elétrico alternado obtido por meio de osciladores de radio-freqüência. Esses eletrodos situavam-se entre os pólos de um eletroímã, cujo campo magnético determinava um percurso circular às partículas aceleradas por pulsos de potência cada vez que o campo elétrico era invertido. Toda vez que as partículas passavam pelo intervalo entre os eletrodos, eram submetidas a novo aumento de energia, ganhando aceleração. O conjunto de eletrodos era mantido num sistema sob vácuo. O percurso por elas seguido era espiralado e, quando completavam a órbita mais externa, elas emergiam sob a forma de um feixe colimado dirigido para o alvo contendo os átomos que deveriam ser atingidos.

O primeiro cíclotron construído cabia nas mãos do experimentador, mas as exigências de partículas maiores e com mais energia fez com que estas máquinas evoluíssem para dimensões cada vez maiores. Grande parte dos estudos pioneiros foi feita com o cíclotron de cerca de 1,5 m de diâmetro que existia no Laboratório Lawrence de Radiação, em Berkeley (Califórnia). Com esse equipamento foram atingidas velocidades de partículas próximas da luz, observando-se então as variações relativísticas de massa previstas pelas equações de Einstein. Os cíclotrons permitiram estudar melhor a natureza dos núcleos, produzir isótopos radioativos e provocar a nucleossíntese de elementos novos, transurânicos.

À medida que os estudos avançaram, fazia-se necessário obter partículas cada vez com maiores energias; assim, foram construídos os *sincrocíclotrons*, baseados na idéia central do cíclotron. Nas máquinas originais, ao serem atingidas velocidades próximas à da luz, a velocidade das partículas diminuía à medida que a massa relativística crescia. A modificação mais importante para resolver este problema foi o uso de tensões de radio-freqüência; a aceleração das partículas passou a ser feita de tal maneira que em vez de uma freqüência fixa, esta variava à medida que a velocidade das partículas diminuía, permitindo uma operação da máquina com pulsos de radio-freqüência que aceleravam os grupos de partículas de forma sincronizada. Com os sincrocíclotrons, conseguiu-se velocidades que correspondiam a energias de 720 MeV. A geração seguinte dessas máquinas trouxe como inovação a substituição de um único eletroímã por vários, que se colocavam no interior de um tubo de vidro dentro do qual era feito vácuo e se localizavam as partículas a serem aceleradas. Várias máquinas deste tipo foram construídas, atingindo-se energias da ordem de 50 GeV. Com o tamanho crescente, os aceleradores passaram a ocupar túneis cada vez mais longos. Em muitas das atuais máquinas, as partículas a serem injetadas no acelerador são previamente aceleradas com equipamentos do tipo Cockroft-Walton. O desenvolver dos estudos sobre as estruturas nucleares e as partículas elementares da matéria determinou a construção de aceleradores específicos para prótons e outros para elétrons, sendo estes últimos chamados de *betatrons*. Um dos mais recentes projetos de um acelerador gigante, denominado *super "colisor"-supercondutor* (SSC), tinha custo estimado em cerca de 11 bilhões de dólares e seu dispositivo acelerador ocuparia um túnel de percurso circular com 90 km de extensão. Tal equipamento seria construído na cidade de Waxahachie, no Estado do Texas (E.U.A.). Recentemente, entretanto, o projeto foi abandonado, porque o congresso americano cancelou as dotações orçamentárias a ele destinadas. No momento, cientistas da Universidade da Califórnia em Los Angeles estão procurando desenvolver um outro tipo de acelerador que funcione a base de feixes de laser.

Como os nêutrons são desprovidos de carga elétrica, não existem sistemas para a sua aceleração. No bombardeio por nêutrons ou são usadas as fontes clássicas de polônio-berílio ou são utilizados os intensos feixes de nêutrons gerados no interior de reatores nucleares e oriundos do processo de fissão do urânio 235.

Passa-se das hipóteses à realidade: os alquimistas do século XX

Descoberto em 1789 por M. H. Klaproth, em Berlim, e isolado na forma metálica somente em 1841 por E. M. Peligot, em Paris, o urânio manteve durante muitos anos a posição de elemento mais pesado, ocupando a última casa ($Z = 92$) da tabela periódica na série dos actínídeos.

Na metade da década de 30 o cenário estava montado para que esta situação mudasse: dispunha-se de partículas adequadas ao bombardeio dos núcleos; havia os aceleradores com capacidade para dirigir feixes de partículas com alta energia sobre os alvos desejados e todo um instrumental teórico já estava disponível.

Conforme já mencionado, se a tabela periódica encerrava-se com o elemento urânio, nem por isso todos os demais elementos estavam descobertos. Dos claros, um deles correspondia a um elemento de transição do 5º período, o de número atômico 43. Em 1937, núcleos de molibdênio foram bombardeados por dêuterons acelerados pelo cíclotron do Laboratório Lawrence, em Berkeley. O material bombardeado foi enviado a Palermo, na Itália, e analisado por C. Perrier e E. Segré, que demonstraram a presença nele de um novo elemento químico, correspondente àquela 43ª posição, que passou a ser denominado de *tecnécio*. Posteriormente, a presença do seu isótopo mais estável, ^{99}Tc (tempo de meia vida de 2×10^5 anos), foi detectada em estrelas^{23,24}. Atualmente a produção de tecnécio atinge a várias toneladas, sendo extraído do urânio "esgotado" dos reatores nucleares^{28,37}.

Dois outros elementos constituíram, durante algum tempo, vazios na tabela periódica, posteriormente preenchidos. Cronologicamente, o primeiro foi o *frâncio* ($Z = 87$), último metal do grupo dos alcalinos. Sua caracterização ocorreu em 1939, por M. Perey, em Paris, sendo encontrado na forma de diminutos traços em minérios de urânio. A sua presença nesses minérios resulta de um raro decaimento (1%) do actínio 227 por emissão alfa, na série radioativa que tem seu início no urânio 235. Posteriormente, técnicas nucleares permitiram a produção artificial do isótopo 223 do frâncio, por bombardeio de átomos de rádio com nêutrons²⁵.

Outra conquista das técnicas nucleares ocorreu com a caracterização do quinto elemento halógeno, o *astato* ($Z = 85$). Sua origem natural está nas séries de decaimento radioativo de várias procedências, mas a obtenção de quantidades mensuráveis ocorreu em 1940, nos laboratórios de Berkeley. Aí, D. A. Corson, K. R. Mackenzie e E. Segré obtiveram o astato 211 por bombardeio de núcleos de bismuto 211 com partículas alfa aceleradas por um cíclotron²⁸.

Um último vazio na tabela periódica correspondia ao elemento de número atômico 61, situado entre os chamados lantanídeos. Em 1945, ele foi descoberto, completando o grupo dos lantanídeos. J. A. Marinsky, L. E. Glendenin e C. D. Coryell, nos laboratórios de Oak Ridge, no Tennessee (E.U.A.), analisando os produtos da desintegração nuclear do urânio 235, caracterizaram a presença de um novo elemento químico, a que deram o nome *promécio*, acatando sugestão da esposa de Coryell²⁵.

As equipes de pesquisadores nucleares

O avanço das pesquisas nucleares levou a, e decorreu de, o surgimento de equipes que, nos principais centros de pesquisa, construíram aceleradores de partículas e aprimoraram técnicas de interação nuclear que levariam à obtenção (descoberta) dos elementos transurânicos. Os principais centros de pesquisa foram, sem dúvida, o Laboratório Lawrence, em Berkeley e em Livermore (E.U.A.), e o Laboratório Flerov de Reações Nucleares, do Instituto de Pesquisas Nucleares de Dubna (Rússia), aos quais, mais tarde, se juntou o Grupo de Pesquisas de Elementos Pesados do Gesellschaft für Schwerionenforschung, em

Darmstadt (Alemanha). Outros grupos desenvolveram trabalhos em Los Alamos, Oak Ridge e Chicago, nos E.U.A., no Estabelecimento de Pesquisas em Energia Atômica, na Inglaterra, e no Instituto Nobel, na Suécia.

No Laboratório Lawrence, destacam-se, sem dúvida, os nomes de G. T. Seaborg e A. Ghiorso; no Laboratório Flerov, os de Yu. Ts. Oganessian e I. Zvara, e, finalmente, no de Darmstadt, o de G. Münzenberg.

Crítérios para a oficialização de descobertas

Até o elemento férmio ($Z = 100$), parece não ter havido dúvidas entre os pesquisadores sobre as prioridades de produção dos elementos transurânicos. Entretanto, para os elementos transférmicos começaram a surgir dúvidas, o que levou a controvérsias também quanto ao nome a lhes ser atribuído, pois o(s) grupo(s) que “descobriu(iram)” o novo elemento, tradicionalmente, propõe(m) o nome a lhe ser dado. Conseqüentemente, em 1986, a IUPAC (União Internacional de Química Pura e Aplicada) e a IUPAP (União Internacional de Física Pura e Aplicada) acordaram constituir um grupo de trabalho sobre os elementos artificiais transférmicos (Grupo de Trabalho em Transférmicos —GTT). Este grupo publicou em 1991 os critérios que devem ser satisfeitos para que se reconheça a descoberta de um novo elemento³⁸.

Segundo o GTT, as dificuldades na definição de prioridade de descoberta de elementos de $Z \geq 101$ decorrem de uma mudança nos métodos experimentais necessários, os quais envolvem reações que são seguidas imediatamente por fissões; isto causa baixos rendimentos, que, combinados com meias-vidas curtas, dificultam as investigações experimentais. O GTT concluiu³⁸ não ser possível especificar critérios, ou combinações de critérios, que tenham que ser satisfeitos para que se consiga o reconhecimento da existência de um novo elemento e que atendam a todos os casos. Em geral, a identificação depende de uma combinação de propriedades que variarão caso a caso e que não podem ser exaustivamente codificadas num conjunto de critérios*. Assim, o GTT optou por listar critérios e propriedades usados no passado (perspectiva histórica!) e com possível utilidade no futuro; reconhece, porém, que a importância relativa de cada um deles variará caso a caso, dependendo das circunstâncias nas quais aparecem e do modo em que são combinados.

Por outro lado, o GTT reconhece que a situação em relação à descoberta de um novo elemento nem sempre é “preto no branco” de modo que inequivocamente se possa assegurar que tal ocorreu, com a necessária certeza, por um dado grupo, usando um certo método, numa dada data. Segundo o GTT³⁸, isto ocorre às vezes (situação popularmente conhecida como “descoberta”), mas, talvez mais seguidamente, a situação é de um acúmulo de informações ao longo do tempo, talvez por anos, talvez em dois ou mais laboratórios, que gradualmente faz que a comunidade científica se convença que a existência de um novo elemento foi estabelecida. De qualquer modo, mesmo essa convicção é sujeita a polêmica, pois diferentes indivíduos e/ou grupos podem se posicionar de modo distinto quanto ao estágio de acúmulo de evidências no qual se atinge a convicção; isto porque, por exemplo, não é homogênea a opinião da comunidade científica sobre a confiabilidade de inferências feitas a partir de certos tipos de evidências (mesmo quando a confiabilidade da evidência não é questionada). É opinião do GTT, considerando o exposto acima, que podem ocorrer casos em que seria injusto atribuir uma prioridade absoluta na “descoberta” de um elemento, sendo que, na realidade, o crédito deve ser apropriadamente distribuído.

* O GTT distingue entre propriedades e critérios³⁸. Propriedades são os atributos químicos e físicos objetivos de átomos e de núcleos ou de processos através dos quais eles e seus comportamentos são caracterizados. Critérios são condições que têm que ser atendidas por essas propriedades para serem aceitas como dignóstico em relação ao caráter (por exemplo, o valor de Z) das partículas em questão.

O principal critério estabelecido pelo GTT é: “a descoberta de um elemento químico é a demonstração experimental, sem sombra de dúvidas, da existência de um nuclídeo com um número atômico Z anteriormente não identificado, existindo por pelo menos 10^{-14} s”. Para isto, nos experimentos devem ser determinadas propriedades —físicas e/ou químicas— de caracterização (suficientes para categorizar o novo elemento), bem como propriedades de atribuição (suficientes para mostrar que as propriedades de categorização são mesmo aquelas de um elemento desconhecido). Algumas propriedades podem servir para ambos propósitos. Na maioria das vezes, propriedades de atribuição não permitem suficiente certeza para a atribuição de um valor inequívoco a Z , sendo necessário que isto seja feito por um grupo de especialistas “neutros” (físicos e químicos). Segundo o GTT, os elementos mais pesados que se pode esperar produzir através de interações entre nuclídeos disponíveis, estáveis ou de longa vida, têm números atômicos ao redor de 190; daí que, necessariamente, não se pode esperar que as propriedades de produção estabelecidas pelo GTT (vide abaixo) se apliquem a casos de Z maiores que esse.

As propriedades de produção de nuclídeos relevantes para a caracterização da descoberta de um novo elemento transférmico são, segundo o GTT [as letras na última coluna descrevem se elas são “propriedades de caracterização” C ou “propriedades de atribuição” A de número atômico Z e/ou número de massa A : A(Z) para Z ou A(A) para A ou A(A, Z) para ambos]:

- Energia das partículas bombardeantes	C
- Secção de choque	C
- Curva de rendimento	C, A(A, Z)
- Bombardeamentos cruzados	C, A(A, Z)
- Distribuição angular	A(Z)
- Seleção angular	A(Z)
- Separação de massa	A(A)
- Filtro de velocidade	A(Z)
- Seleção de tempo de voo	A(Z)
- Química	A(Z)

Por outro lado, segundo o GTT, são relevantes as seguintes propriedades relacionadas ao decaimento radioativo dos nuclídeos produzidos:

- Tipo de decaimento	C
- Razão de ramificação	C
- Meia vida	C
- Energia de partículas α	C
- Energia máxima de partículas β	C
- Energia de radiações γ	C
- Espectro de raios X (raias K ou L)	C, A(Z)
- Características de fissão	C
- Relação genética entre ancestral e n -ésima geração descendente (pode haver mais de uma)	C, A(A, Z)

Informações detalhadas sobre estas propriedades são fornecidas no relatório do GTT³⁸, o qual aplicou os critérios acima enumerados à descoberta dos elementos de números atômicos 101 a 112, estabelecendo, em cada caso, se havia ou não dados suficientes para configurar a descoberta de um novo elemento e qual(is) grupo(s) deve(m) ter prioridade sobre a descoberta³⁹. Em seu relatório, o GTT concluiu que não existem dados suficientes para se afirmar que os elementos 110, 111 e 112 foram produzidos; portanto, do ponto de vista da IUPAC e da IUPAP, 109 são os elementos químicos até hoje conhecidos.

Nomenclatura sistemática proposta pela IUPAC para elementos transférmicos

Em 1977, a IUPAC aprovou⁴⁰ uma nomenclatura sistemática para a designação de elementos com $Z > 100$. Todavia, deixou claro que a existência desta nomenclatura sistemática

não nega o direito aos "descobridores" de novos elementos de sugerir outros nomes à IUPAC (desde que suas descobertas tenham sido aceitas, sem sombra de dúvidas, pela comunidade científica), como já ocorreu com os elementos 101 a 103. Tanto quanto se pôde verificar, esta nomenclatura não está traduzida para o português; assim, aqui se apresenta a original publicada pela IUPAC.

No engendramento desta nomenclatura sistemática, foram seguidos os seguintes princípios:

- os nomes deveriam ser curtos, sistemáticos e relacionados de maneira óbvia aos números atômicos dos elementos;
- os nomes devem terminar sempre em "ium", quer se refiram ou não a metais;
- os símbolos serão constituídos por três letras (isto evita a duplicação de símbolos já em uso);
- os símbolos devem ser derivados diretamente do número atômico do elemento nomeado e, tanto quanto possível, serem visualmente relacionados aos nomes.

As regras de nomenclatura são:

- o nome é obtido diretamente a partir do número atômico do elemento, usando-se os seguintes prefixos numéricos (latinos ou gregos):

0 - nil	1 - un	2 - bi	3 - tri	4 - quad
5 - pent	6 - hex	7 - sept	8 - oct	9 - enn;
- o nome é obtido, juntando-se os prefixos na ordem dos dígitos que compõem o número atômico e terminando-o por "ium". O *n* final de *enn* é omitido quando ele ocorre antes de *nil* e o *i* final de *bi* e *tri* quando ocorre antes de *ium*.
- O símbolo do elemento é composto das letras iniciais dos prefixos numéricos que compõem o nome, sendo a primeira letra maiúscula (a necessidade de evitar ambiguidade, neste caso, é que exigiu o uso de prefixos latinos e gregos).

Exemplificando: o elemento de número atômico 104 é chamado de un(1)nil(0)quad(4)ium, ou seja, unnilquadium (Unq); o de número atômico 109 é unnilennium (Une), o de número atômico 190 seria unennilium (Uen), o de número atômico 201 seria binilunium (Bnu) e assim por diante.

DETALHES SOBRE OS ELEMENTOS TRANSURÂNICOS

Atualmente já foram sintetizados dezesseis elementos transurânicos (números atômicos 93 a 109), dez dos quais pertencem à série dos actínidos, completando-a.

Elementos actínidos transurânicos

As versões modernas da tabela periódica excluem do corpo principal as séries dos lantanídeos e actínidos. O posicionamento da série dos lantanídeos deve-se principalmente aos trabalhos de Niels Bohr, que mostrou que as semelhanças químicas correspondiam a uma sucessão horizontal de elementos e não a uma vertical, como ocorria ao longo de toda a tabela⁴¹.

Enrico Fermi (1901-1954; prêmio Nobel de Física em 1938) sugeriu⁴¹ que poder-se-ia atuar sobre o núcleo de urânio de forma a transmutá-lo para um elemento de número atômico 93 ou até mesmo 94. Supunha Fermi que, dada a posição do urânio (sexto grupo do sétimo período da tabela periódica), as propriedades do elemento 93 seriam homólogas às do rênio.

A descoberta do primeiro elemento transurânico resultou de pesquisas associadas à fissão do urânio. Em 1939, E. M. McMillan, trabalhando na Universidade da Califórnia, em Berkeley, descobriu um isótopo com meia-vida de dois dias que ele supôs ser um novo elemento. No ano seguinte, P. H. Abelson, da Instituição Carnegie (Washington, DC), juntou-se a ele e ambos puderam constatar que tal isótopo não tinha as características químicas do rênio e sim as do urânio. A esse novo

elemento foi dado o nome de netúnio, porque estava além do urânio tal como acontecia com os planetas de mesmos nomes⁴¹.

Logo após, foi caracterizado o elemento plutônio ($Z = 94$), cujas características químicas muito se assemelham às do urânio. Imediatamente foi levantada a suposição de que os elementos transurânicos se relacionariam da mesma forma como ocorria com os lantanídeos. Nesse caso o protótipo seria o urânio. A idéia básica estava errada, mas a hipótese foi fértil em consequências, pois logo (1944) verificou-se que seria mais correto colocar os elementos transurânicos em posição destacada do corpo da tabela periódica, como já se fazia para os lantanídeos. Talvez essa nova série devesse iniciar pelo tório, tendo o actínio como protótipo. A instituição da série dos actínidos foi divulgada em publicação feita por G. T. Seaborg na revista *Chemical and Engineering News*⁴².

A série dos actínidos caracteriza-se por átomos com estruturas eletrônicas de certa forma semelhantes às dos lantanídeos, já que a variação do número de elétrons ocorre em orbitais *f*. A Tabela 1 contém algumas informações sobre estes elementos (todos eles radioativos), inclusive o ano em que foram descobertos. As estruturas eletrônicas mostram que os elementos transurânicos (bem como os três anteriores e excluído o actínio) são todos de transição do tipo *5f*, como também ocorre com os lantanídeos (*4f*). Todos eles são metais de cor prateada, reagindo com o oxigênio, a água e os ácidos, e não o fazendo com os álcalis.

As estruturas eletrônicas dos lantanídeos e dos actínidos permitem prever que eles possuem propriedades químicas semelhantes. Os íons dos actínidos apresentam cores variadas. A determinação das propriedades físicas e químicas dos elementos sintetizados exige aprimoradas técnicas, dadas as pequenas quantidades obtidas de alguns deles e a condição de serem radioativos, exigindo proteção adequada na sua manipulação.

A Tabela 2 contém informações sobre as reações nucleares que levaram à produção desses elementos e algumas de suas propriedades radioativas.

Diversos foram os grupos, na maioria americanos (principalmente ligados à Universidade da Califórnia em Berkeley), que trabalharam na produção dos elementos actínidos transurânicos. Nos trabalhos pioneiros teve papel muito importante o ciclotron de aproximadamente 1,5 m de diâmetro, construído sob a orientação de Lawrence, cujo nome foi posteriormente dado aos laboratórios que geraram os elementos a serem vistos. Para cada elemento, esses grupos foram os seguintes:

- netúnio:** E. M. McMillan e P. Abelson (1940), no então Laboratório de Radiação Crocker, da Universidade da Califórnia em Berkeley.
- plutônio:** G. T. Seaborg, E. M. McMillan, J. W. Kennedy e A. Wahl (1940), nos laboratórios de Berkeley.
- amerício:** G. T. Seaborg, R. A. James, L. O. Morgan e A. Ghiorso (1944), no então chamado Laboratório de Metalurgia da Universidade de Chicago.
- cúrio:** G. T. Seaborg, R. A. James e A. Ghiorso (1944), nos laboratórios de Berkeley.
- berquélio:** S. G. Thompson, A. Ghiorso e G. T. Seaborg (1949), nos laboratórios de Berkeley.
- califórnio:** S. G. Thompson, K. Street, A. Ghiorso e G. T. Seaborg (1950), nos laboratórios de Berkeley.
- einsteinio:** G. R. Choppin, S. G. Thompson, A. Ghiorso e B. G. Harvey (1952), trabalhando com os resíduos da primeira explosão termonuclear (Oceano Pacífico), nos laboratórios de Argonne, em Chicago, de Los Alamos (Novo México) e de Berkeley.
- férmio:** a mesma equipe do einsteinio (1952), trabalhando com o mesmo material e nos mesmos locais.
- mendelévio:** segundo o GTT³⁹, A. Ghiorso, B. G. Harvey, G.

Tabela 1. Algumas características atômicas da série dos actínídeos*.

Nome	Símbolo	Número atômico	Número de massa	Peso atômico	Nº de isótopos	Estrutura eletrônica	Nº de oxidação
actínio	Ac	89	227	227,0278	3	[Rn]6d ¹ 7s ²	3
tório	Th	90	232	232,0381	6	[Rn]6d ² 7s ²	(3), 4
protactínio	Pa	91	231	231,0359	4	[Rn]5f ² 6d ¹ 7s ² ou 5f ¹ 6d ² 7s ²	(3), 4
urânio	U	92	-	238,0289	4	[Rn]5f ³ 6d ¹ 7s ²	3, 4
netúnio	Np	93	237	237,0482	1	[Rn]5f ⁴ 6d ¹ 7s ² ou 5f ³ 7s ²	3,4
plutônio	Pu	94	244	244,0642	3	[Rn]5f ⁶ 7s ²	3,4
amerício	Am	95	243	243,0614	2	[Rn]5f ⁷ 7s ²	(2), 3, 4
cúrio	Cm	96	247	247,0703	6	[Rn]5f ⁷ 6d ¹ 7s ²	3, 4
berquílio	Bk	97	247	247,0703	2	[Rn]5f ⁹ 7s ² ou 5f ⁸ 6d ¹ 7s ²	3, 4
califórnio	Cf	98	251	251,0796	3	[Rn]5f ¹⁰ 7s ²	(2), 3, 4
einsteinio	Es	99	252	252,083	4	[Rn]5f ¹¹ 7s ²	(2), 3
férmio	Fm	100	257	257,0951	4	[Rn]5f ¹² 7s ²	2, 3
mendelévio	Md	101	258	258,10	14	[Rn]5f ¹³ 7s ²	2, 3
nobélio	No	102	259	259,1009	12	[Rn]5f ¹⁴ 7s ²	2, 3
lawrêncio	Lr	103	262	262,11	10	[Rn]5f ¹⁴ 6d ¹ 7s ²	3

* Até o férmio, os dados procedem da ref. 43; a partir do mendelévio da ref. 50. Os pesos atômicos são aqueles listados na ref. 51.

R. Choppin, S. G. Thompson e G. T. Seaborg (1955) relataram indicações da descoberta deste elemento, nos laboratórios de Berkeley, mas sua descoberta com certeza deve ser atribuída a L. Phillips, R. Gatti, A. Chesne, L. Muga e S. G. Thompson (1958).

• *nobélio*: E. D. Donets, V. A. Shchegolev, V. A. Ermakov, B. A. Zager, M. B. Miller, V. L. Mikheev, S. M. Polikanov, A. M. Sukhov, G. N. Flerov e L. P. Chelnokov, no Instituto de Pesquisas Nucleares de Dubna, na Rússia (1966). Na pesquisa deste elemento, empenharam-se vários grupos de pesquisadores: de Berkeley, do Laboratório Nacional de Argonne, do Estabelecimento de Pesquisas em Energia Atômica (Inglaterra) e do Instituto Nobel de Estocolmo. Apesar disso, segundo o

GTT³⁹, a prioridade deve ser atribuída ao Grupo de Dubna.

• *lawrêncio*: A. Ghiorso, T. Sikkeland, A. E. Larsche e R. M. Latimer relataram a descoberta deste elemento em 1961, nos laboratórios de Berkeley. Entretanto, segundo o GTT³⁹, somente em 1971 sua descoberta foi efetivamente confirmada por K. Eskola, P. Eskola, M. Nurmi e A. Ghiorso, também nos laboratórios de Berkeley.

Aplicações dos elementos actínídeos transurânicos

Há muitos pode parecer que todo esse esforço de síntese dos elementos de números atômicos 93 a 103 fosse apenas um exercício de ciência pura. Mesmo que assim fosse, o trabalho dos pesquisadores envolvidos mereceria a admiração de todos, pois as técnicas de bombardeio nuclear e de ultramicroquímica, bem como os métodos de detecção de radioatividade desenvolvidos, justificariam plenamente os esforços dispendidos. Mas a tecnologia apodera-se logo dos conhecimentos adquiridos, dando-lhes uma aplicação. As circunstâncias que envolveram o período das descobertas citadas (Segunda Guerra Mundial e Guerra Fria) exigiam que os processos fossem desenvolvidos secretamente e muitos só viessem a público após longo tempo.

Talvez o mais importante desses elementos tenha sido o plutônio, hoje produzido na escala de toneladas como subproduto do combustível nuclear (urânio 235) usado nos reatores nucleares. A sua capacidade de sofrer fissão por bombardeio de nêutrons lentos fez com que o seu principal uso fosse, infelizmente, como explosivo nuclear em artefatos de guerra. É de triste lembrança a explosão nuclear que causou a destruição de Nagasaki, no Japão, em 1945, como consequência da detonação de uma bomba atômica à base de plutônio. Como os reatores nucleares produzem plutônio como produto da fissão do urânio 235, organizações internacionais procuram manter sob controle o "combustível" atômico, o que nem sempre é aceito. Haja visto o recente caso do governo de Pyongyang (Coreia do Norte), que, para evitar esta fiscalização, rompeu com a Agência Internacional de Energia Atômica. Um problema sério que

Tabela 2. Algumas informações sobre os elementos transurânicos^{37,39,50}.

Símbolo	Data da produção	Reação nuclear de origem	Isótopo mais estável	Características radioativas do isótopo mais estável	Radiação	Meia-vida
Np	1940	²³⁸ U + nêutrons	237	α, γ		2,14x10 ⁶ a
Pu	1940	²³⁸ U + dêutrons	244	α, γ*		8,2x10 ⁷ a
Am	1944	²³⁹ Pu + nêutrons	243	α, γ		7,37x10 ³ a
Cm	1944	²³⁹ Pu + ⁴ He	247	α, γ		1,56x10 ⁷ a
Bk	1949	²⁴¹ Am + ⁴ He	247	α, γ		1,4x10 ³ a
Cf	1950	²⁴² Cm + ⁴ He	251	α		890 a
Es	1952	²³⁹ Pu + nêutrons	252	α, γ		1,29 a
Fm	1952	²³⁹ Pu + nêutrons	257	α, γ		100,5 d
Md	1955	²⁵³ Es + ⁴ He	260	FE**		27,8 d
No	1966	²⁴³ Am + ¹⁵ N	255	α, n		3,1 min
Lr	1971	Cf + ^{10,11} B	262	CE***		216 min

* 99% essa emissão e 1% fissão espontânea; ** FE = fissão espontânea;

*** CE = captura de elétron.

surgiu após a quebra da tensão político-militar entre os países do leste e os do oeste (a *Guerra Fria*) é o destino a dar aos estoques de plutônio existentes e àqueles resultantes da desmontagem dos artefatos nucleares de guerra que estão sendo desativados —vide Quadro 1.

O calor desenvolvido durante a desintegração radioativa pode ser usado para a geração de energia elétrica por aquecimento da junção de pares de metais adequados. Tais fontes de eletricidade, sem partes móveis e de grande duração, são usadas em satélites e sondas espaciais. Os nuclídeos usados para esse fim são o plutônio 238 e o cúrio 242. O califórnio 252 ou 254 tem sido usado como fonte concentrada para a produção de nêutrons, já que estes nuclídeos decaem por fissão espontânea, liberando grande quantidade de nêutrons. Estas fontes têm sido usadas na análise química por ativação neutrônica e em pesquisas petrolíferas, permitindo, neste caso, o levantamento de perfis de poços em perfuração.

Finalmente, o amerício foi usado até recentemente para facilitar a ionização do ar quando colocado, em pequenas quantidades, nas pontas de pára-raios. Nuclídeos deste mesmo elemento e do cúrio são usados como traçadores em medicina.

Elementos transactinídeos

Um outro grupo de elementos transurânicos artificiais é aquele que vem sendo denominado de transactinídeos. Essa denominação advém do fato de seus números atômicos serem uma seqüência daqueles que correspondem aos actinídeos.

Quadro 1. Plutônio: Uma dor de cabeça por gerações^{52,53?}

O plutônio foi produzido pela primeira vez em 1940, pelo bombardeamento de núcleos de urânio 238 por átomos de deutério. Posteriormente, plutônio passou a ser produzido em grandes quantidades nos reatores nucleares através da captura de nêutrons pelo urânio usado como combustível. Um nêutron emitido por um átomo de urânio 235 é absorvido no núcleo de um de urânio 238, levando à formação de urânio 239, o qual se transforma em plutônio 239 através de dois decaimentos beta. Quanto mais tempo o combustível nuclear permanecer no reator, maior é a formação de isótopos mais pesados de plutônio, através da captura de nêutrons adicionais; assim, formam-se plutônio 240, 241 e 242.

Plutônio para uso militar (grau de armamento: 93,5% ²³⁹Pu, 6% ²⁴⁰Pu e 0,5% ²⁴¹Pu) é produzido através do reprocessamento de combustível nuclear (~99% ²³⁸U e ~1% ²³⁵U) exposto à irradiação de urânio 235 por alguns meses. Já nos reatores nucleares civis, o combustível nuclear (96-97% ²³⁸U e 3-4% ²³⁵U) é irradiado por mais tempo (1 a 3 anos), o que leva a um enriquecimento do plutônio nos isótopos mais pesados, gerando plutônio conhecido como de grau de reator: 58% ²³⁹Pu, 24% ²⁴⁰Pu, 11,5% ²⁴¹Pu, 5% ²⁴²Pu e 1,5% ²³⁸Pu. Atualmente sabe-se que mesmo o plutônio grau de reator pode ser usado para a fabricação de armamentos nucleares de baixa potência: uma bomba simples pode causar até um terço da destruição da bomba lançada sobre Hiroshima.

Com o fim da Guerra Fria, os Estados Unidos e a Rússia acordaram a desmontagem de grande parte de seus artefatos nucleares. Até o ano 2003, milhares de bombas serão desmontadas (cada país, todavia, continuará com cerca de 5000 bombas; este arsenal remanescente é muitas vezes o necessário para a completa destruição da vida em nosso planeta); isto levará à remoção de cerca de 150 toneladas de plutônio e mais de 900 toneladas de urânio enriquecido. Os estoques de plutônio, que eram de 1100 toneladas em 1992, deverão atingir 1650 toneladas já no ano 2000.

A segurança de todo este material radioativo é preocupante, especialmente após o colapso da União Soviética; especula-se que, no momento, os governos das diversas ex-repúblicas soviéticas,

Atualmente estão caracterizados os de números atômicos 104 a 109, num total de seis novos elementos químicos artificiais.

Na tabela periódica, a posição desses elementos é logo em seguida à do actínio, no corpo principal, e, portanto, iniciando-se o conjunto no grupo 4 do 7º período. Isso explica que eles estarão com os orbitais 7s e 5f totalmente preenchidos, iniciando-se no elemento 104 o preenchimento dos orbitais 6d.

A partir do fêrmio, os elementos sintetizados apresentam grande instabilidade, sendo todos radioativos e de meia-vida relativamente curta, variando entre microssegundos e alguns dias. A estabilidade é uma função do número de prótons e de nêutrons do núcleo considerado, sabendo-se que aqueles que possuem um certo “número mágico” de prótons ou de nêutrons (28, 50, 82, 126) são menos suscetíveis a colapso radioativo que os seus vizinhos de tabela; assim, o nuclídeo Pb (82 prótons e 126 nêutrons, ambos “números mágicos”) apresenta uma alta estabilidade. Prevê-se também que o mesmo poderia acontecer⁵⁴ com o nuclídeo ²⁹⁸114, que constituiria o centro de uma nova ilha de elementos estáveis, associada a um outro número mágico. Se essa região for atingida, haverá possibilidade de expandir-se o número de elementos do atual último período da classificação periódica.

A Tabela 3 apresenta alguns dados relativos às características atômicas dos elementos transactinídeos. As meias-vidas mostram a grande instabilidade dos átomos gerados na nucleossíntese e, conseqüentemente, a necessidade de criar-se novas técnicas de ultramicroquímica para chegar à caracterização dos nuclídeos sintetizados. As estruturas eletrônicas revelam que

inclusive a Rússia, não têm condições de efetivamente garantir o armazenamento seguro deste material. Há, por razões diversas e por diferentes canais, possibilidade de pequenas quantidades deste material passarem às mãos de terroristas ou de países que desejem fabricar armas nucleares. Tal possibilidade mostrou-se real já nos primeiros meses de 1994, quando a polícia alemã apreendeu quatro porções distintas de material nuclear; de acordo com autoridades alemãs, este material foi contrabandeado da Rússia ou de outras ex-repúblicas soviéticas. Num dos casos, foram apreendidos 300 g de óxido de plutônio —87% ²³⁹Pu, além de 210 g de óxido de urânio (300 g do óxido correspondem a entre um décimo e um vigésimo da quantidade necessária para a fabricação de uma bomba).

Os riscos que o plutônio oferece à saúde dependem da forma em que ele se encontra e do tipo de contato. O plutônio 239, meia vida de 24 mil anos, deve ser mantido estritamente fora da biosfera; por ser emissor de partículas alfa, recipientes que o contêm podem ser manuseados sem maiores conseqüências por trabalhadores portando aventais de chumbo (ele se torna mais perigoso, entretanto, com o passar do tempo, porque parte do plutônio 241 que o contamina se transforma em amerício 241, emissor de radiação gama). Plutônio presente dentro do corpo humano, por outro lado, é altamente tóxico, mas plutônio metálico dificilmente seria ingerido ou inalado. O mesmo não se pode dizer do seu óxido, uma substância pulverulenta na qual o plutônio lentamente se converte se exposto ao ar. O que fazer com os crescentes estoques de plutônio? Esta é uma questão não resolvida. Já se chegou a sugerir que fossem atirados no Sol com mísseis ou mesmo colocados em plataformas marinhas profundas. No momento, por exemplo, a Rússia tende a querer usá-los em reatores nucleares; já os Estados Unidos ainda não decidiram exatamente o que fazer (usá-los em reatores ou misturá-los a lixo nuclear altamente radioativo e vidro fundido, moldando o material resultante em grandes barras de vidro para disposição em sítios geológicos seguros?). O certo é que a humanidade terá que conviver com esta herança da era nuclear por muitas e muitas gerações. Esperemos que não ocorram acidentes durante a longa caminhada.

Tabela 3. Algumas informações sobre os elementos transactinídeos^{50,55}.

Símbolo	Número atômico	Isótopo mais estável	Estrutura eletrônica	Características radioativas do isótopo mais estável:	<i>Radiação</i>	<i>Meia-vida</i>
Unq	104	261	[Rn]7s ² 5f ⁴ 6d ²	α, FE?*		65 s
Unp	105	262	[Rn]7s ² 5f ⁴ 6d ³	CE**, α		34 s
Unh	106	266	[Rn]7s ² 5f ⁴ 6d ⁴	α		20-30 s
Uns	107	262	[Rn]7s ² 5f ⁴ 6d ⁵	α		0,1 s
Uno	108	265	[Rn]7s ² 5f ⁴ 6d ⁶	α		2 ms
Une	109	266	[Rn]7s ² 5f ⁴ 6d ⁷	α		3,4 μs

* FE = fissão espontânea; **CE = captura eletrônica.

esses elementos são de transição 6d e, portanto, homólogos dos elementos háfnio, tântalo, tungstênio, rênio, ósmio e irídio, segundo o grande princípio unificador que levou Mendeleiev a construir a sua tabela periódica.

É curioso notar-se que os símbolos que constam da Tabela 3 são os sistemáticos propostos pela Comissão de Nomenclatura de Química Inorgânica da IUPAC. Mas, em 31 de agosto de 1994, esta Comissão aprovou^{44,45,46} nomes para os elementos 101 a 109, que são:

- 101: Md - mendelévio (Dmitri I. Mendeleiev)
- 102: No - nobélio (Alfred Nobel)
- 103: Lr - lawrêncio (Ernest O. Lawrence)
- 104: Db - dúbnio (Dubna, Rússia)
- 105: J1 - joliotio (Frédéric Joliot)
- 106: Rf - rutherfordórdio (Ernest Rutherford)
- 107: Bh - bóhrio (Niels Bohr)
- 108: Hn - hâhnio (Otto Hahn)
- 109: Mt - meitnério (Lise Meitner)

Apesar dos nomes dos elementos 101 a 103 já serem amplamente usados, só agora a IUPAC escolheu oficialmente o nome desses elementos, optando por referendar aqueles já usados pela comunidade química internacional. Tão logo esses nomes escolhidos pela IUPAC foram divulgados, especialmente aqueles para os elementos 104 a 109, eles passaram a ser contestados pela Comissão de Nomenclatura da Sociedade Americana de Química^{47,48}, que gostaria que fossem mantidos os nomes por ela aprovados em novembro de 1993, para uso nos Estados Unidos⁵⁰:

- 104: Rf - rutherfordórdio (Ernest Rutherford)
- 105: Ha - hâhnio (Otto Hahn)
- 106: Sg - seabórgio (Glenn T. Seaborg)*
- 107: Ns - nielsbóhrio (Niels Bohr)
- 108: Hs - hássio (Hesse, estado alemão)#
- 109: Mt - meitnério (Lise Meitner)

Na realidade, os americanos gostariam muito de ver o nome seabórgio mantido^{44,47,48}; a Comissão da IUPAC, entretanto, optou por manter a tradição de não dar a elementos o nome de uma pessoa ainda viva. Só o futuro dirá se o protesto dos americanos levará a alguma modificação ou não na proposta aprovada pela Comissão da IUPAC; cabe destacar que essa proposta ainda necessita, estatutariamente, da aprovação do

* O nome do elemento 106, seabórgio, foi proposto em março de 1994, por pesquisadores americanos ligados aos laboratórios Lawrence, em Berkeley e Livermore⁵⁷. Se aceito, seria primeira vez que um cientista ainda vivo é epônimo de um elemento.

A cidade de Darmstadt é ex-capital do estado de Hesse, na Idade Média conhecido como "Hassia". Neste caso seguiu-se a antiga tradição de dar ao elemento o nome do local onde foi descoberto⁵⁶.

Conselho da IUPAC⁴⁴, cuja próxima assembléia geral deve ocorrer em agosto de 1995, em Guilford, Reino Unido⁴⁹.

A Tabela 4 fornece dados sobre a síntese, e outras características, dos elementos 104 a 109. As propriedades químicas desses elementos ainda estão sendo estudadas, havendo grande dificuldade em fazê-lo devido ao pequeno número de átomos obtidos e às meias-vidas muito curtas, que exigem equipamentos e técnicas especiais. Para se ter uma idéia das dificuldades nesse campo de pesquisa, é suficiente citar⁵⁰ uma experiência realizada por Kenneth Gregorich para determinar uma certa propriedade do nuclídeo 262 do "unnilpentium" (joliótio), de meia-vida de 34 s. O processo abrange sete etapas, cujas durações respectivas são de 7, 7, 8, 8, 5, 6 e 10 s, num total de 51 s, indo desde o momento em que átomos desse nuclídeo são depositados sobre uma placa de vidro até o início da contagem da radiação por ele emitida.

Dadas as estruturas eletrônicas citadas, podem ser deduzidas as propriedades químicas, que como já foi dito serão homólogas às dos elementos correspondentes do 6º período. Entretanto, ações relativísticas sobre os elétrons, que ocorrem em átomos com núcleo muito pesado, podem alterar tais propriedades. Daí a necessidade de um cuidadoso e difícil trabalho experimental para determiná-las.

A Tabela 5 contém uma listagem de todos os isótopos conhecidos dos elementos transférmicos, com suas respectivas meias-vidas e forma(s) mais comum(ns) de decaimento⁵⁰.

Finalmente, cabe mencionar que há na literatura científica diversos relatos de obtenção de elementos mais pesados que o 109. Por exemplo, o grupo de Dubna publicou trabalho em 1986 afirmando ter obtido o elemento 110 ("ununnilium" - Uun), através do bombardeio de alvos de tório ou de urânio por núcleos de cálcio 44 (no primeiro caso) ou de argônio 40 (no segundo caso); afirmativa semelhante foi feita pelo grupo de Darmstadt, em 1989. O mesmo grupo de Dubna afirmou, em 1986, ter obtido o elemento 111 ("unununium" - Uuu), bombardeando núcleos de bismuto 209 por núcleos de níquel 64. Em 1984, um grupo envolvendo pesquisadores de Harwell (Inglaterra), Jerusalém (Israel) e do CERN —Centro Europeu de Pesquisas Nucleares (Genebra, Suíça) anunciou ter, provavelmente, obtido o elemento 112 ("ununbium" - Uub), bombardeando, durante longo tempo, alvos de tungstênio, por prótons acelerados com energia de 24 GeV. O elemento a ser obtido seria homólogo do mercúrio, havendo a suposição de que ele poderia ser um metal gasoso. O mesmo resultado foi assinado como resultante do bombardeio de alvos de tungstênio 184 por núcleos de estrôncio 88. Entretanto, o GTT da IUPAC/IUPAC não chegou a qualquer conclusão positiva sobre a

Tabela 4. Reações de nucleossíntese e algumas características dos elementos transactinídeos³⁹.

Símbolo*	Número atômico	Número de isótopos	Ano da descoberta	reações nucleares de origem	Grupo de pesquisadores
Db	104	10	1969	²⁴² Pu + ²² Ne	Dubna e Berkeley
				²⁴⁶ Cm + ¹⁸ O	
				²⁴⁹ Cf + ¹⁵ N	
				²⁴⁹ Bk + ¹⁵ N	
J1	105	7	1970	²⁴³ Am + ²² Ne	Dubna e Berkeley
				²⁴⁹ Cf + ¹⁵ N	
Rf	106	6	1974	²⁴⁹ Cf + ¹⁸ O	Berkeley e Livermore
Bh	107	2	1981	²⁰⁹ Bi + ⁵⁴ Cr	Darmstadt
Hn	108	2	1984	²⁰⁸ Pb + ⁵⁸ Fe	Darmstadt (Dubna)
Mt	109	1	1984	²⁰⁹ Be + ⁵⁸ Fe	Darmstadt

*Símbolo referente a nomes atualmente recomendados pela IUPAC. (vide texto).

Tabela 5. Isótopos transférmicos conhecidos, dispostos de acordo com seus números atômicos e respectivos números de nêutrons. O número de massa de cada isótopo é fornecido no topo da sua "caixa"; abaixo estão a sua meia-vida e principal(is) modo(s) de decaimento: α = partícula alfa, CE = captura eletrônica, FE = fissão espontânea e TI = transição interna. [adaptada da ref. 50].

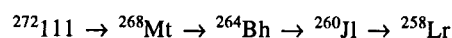
Nº atômico/ Nº nêutrons	101 Md	102 No	103 Lr	104 Db	105 Jl	106 Rf	107 Bh	108 Hn	109 Mt
146	247 3 s α								
147	248 7 s CE, α								
148	249 24 s α , CE	250 0,3 ms FE			255 1,4 s FE, α ?				
149	250 50 s CE, α	251 0,6 s α		253 1,5 s FE, α ?					
150	251 4 min CE, α	252 2,3 s α , FE	253 1,3 s α	254? 0,5 ms FE	255 1,5 s FE				
151	252 2 min CE, α	253 1,7 min α	254 13 s α	255 1,5 s FE, α ?					
152	253 ~6 min α	254 0,3 s** TI	255 22 s α , CE	256 7 ms α , FE	257 1,3 s α , FE				
153	254 30 min* CE	255 3,1 min α , CE	256 26 s α , CE	257 4,8 s α , FE	258 4,4 s CE, α	259 0,5 s α , FE			
154	255 27 min CE, α	256 2,9 s α , FE	257 0,65 s α , CE	258 13 ms FE, α ?		260 4 ms α , FE	261 12 ms α , FE?		
155	256 1,3 h CE, α	257 25 s α	258 3,9 s α	259 3,0 s α , FE	260 1,5 s α , FE	261 0,3 s α , FE?	262 8 ms** α		
156	257 5,5 h CE, α	258 1,2 ms FE	259 6,1 s α , FE	260 20 ms FE	261 1,8 s α , FE			264 0,08 ms α , FE?	
157	258 57 min* CE	259 58 min α , CE	260 3 min α , CE	261 65 s α , FE?	262 27 s EC, α	263 0,9 s α , FE		265 2 ms α	266 3,4 ms α
158	259 1,6 h FE	260 106 ms FE	261 39 min FE	262 47 ms FE	263 27 s FE, α				
159	260 27,8 d FE		262 216 min CE			265 2-30 s α			
160		262 5 ms FE				266 20-30 s α			

Também: * 10 min, CE; # 52 d, α ; ** 55 s, α ; ** 0,1 s, α .

descoberta de tais elementos, pois considera as experiências realizadas como evidência insuficiente para afirmar que ocorreram as respectivas sínteses³⁹.

Esses relatos de obtenção de elementos mais pesados que o meitnério continuam. Em novembro de 1994, um grupo de pesquisadores de Darmstadt anunciou a obtenção do elemento 110. Relatou-se⁵⁸ a obtenção de três átomos do isótopo 269, obtidos por bombardeio de um alvo de ²⁰⁸Pb por átomos de ⁶²Ni (um nêutron é emitido, após a fusão). No mês seguinte,

também foi relatada⁵⁹ a obtenção de três átomos do isótopo 272 do elemento 111, obtidos pelo bombardeio de um alvo rotatório de ²⁰⁹Bi por um feixe de alta energia de átomos de ⁶⁴Ni. Em ambos os casos, os átomos dos novos elementos foram identificados através dos seus padrões de emissão de partículas alfa; no caso do elemento 111 a cadeia de decaimento vai até o lawrêncio:



Juntamente com o anúncio da obtenção do elemento 111, também foi anunciada⁵⁹ a obtenção de um novo isótopo do elemento 110 (o de número de massa 272), e dos isótopos 264 do bóhrnio e 268 do meitnério (note-se que esses isótopos não constam na Tabela 5).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao encerrar este artigo, cabe lembrar que os conhecimentos iniciais da radioatividade pelo casal Curie foram, de certo modo, o começo do estudo do núcleo atômico. Posteriormente, aceita a existência do núcleo atômico, as hipóteses científicas procuraram entender o surgimento dos elementos químicos, os tijolos do universo, e a tecnologia possibilitou que se atingisse o grande sonho dos alquimistas operativos: a transmutação dos elementos. Na realidade, a capacidade do homem foi além, pois criou elementos químicos novos, alguns de vida tão fugaz que exigiram técnicas ultramicroquímicas extremamente sofisticadas para sua caracterização. De qualquer modo, essa é uma história não terminada, ainda em construção.

REFERÊNCIAS

1. Ramnoux, C.; *Les Présocratiques*; IN: *Histoire de La Philosophie, Encyclopedie de La Pleiade* (B. Parain, Ed.), Edition Gallimard; Paris (1969). pp. 439-442.
2. Aristóteles; *Meteorologica - Book IV, Chapter 1* (Trad. de E. W. Webster); In: *The Great Books of the Western World*; Enciclopaedia Britannica; Chicago (1952), vol. 8, pp. 482-483.
3. *The Dialogues of Plato: Timaeus* (Trad. de B. Jowett); IN: *The Great Books of the Western World*; Enciclopaedia Britannica; Chicago (1952), vol. 7, pp. 455-456.
4. Boyle, R.; *The Sceptical Chymist*; Londres (1661). *Apud*: Partington, J. R.; *A Short History of Chemistry*, Dover; Nova Iorque (1989). pp. 67-71.
5. Tolentino, M.; Rocha-Filho, R. C.; *Quim. Nova* (1994), **17**, 182.
6. Mendeleiev, D. I.; *J. Russ. Chem. Soc.* (1869), **i**, 60. *Apud*: Partington, J. R.; *A Short History of Chemistry*, Dover; Nova Iorque (1989). p. 348.
7. Lavoisier, A. L.; *Elements of Chemistry* (Trad. de R. Kerr); Dover; Nova Iorque (1965), pp. 175-176.
8. Seaborg, G. T.; *J. Chem. Educ.* (1989), **66**, 379.
9. Walton, H. F.; *J. Chem. Educ.* (1992), **69**, 10.
10. Curie, M. S.; "Recherches sur les substances radioactives"; Tese de Doutorado, Faculté des Sciences de Paris; Paris (1904).
11. Rutherford, E.; Soddy, F.; *Philosophical Magazine - Series 6* (1903), **5**, 576. *Apud*: Keas, M. N.; *Ernest Rutherford*; IN: *Nobel Laureates in Chemistry: 1901-1992* (L. K. James, Ed.), American Chemical Society; Washington (1993). p. 58.
12. Hiebert, R.; Hiebert, R.; *Atomic Pioneers. Book 2: from the mid-19th to the early 20th century*, United States Atomic Energy Commission; Oak Ridge (1974).
13. Millikan, R. A.; *Electrons (+ and -), Protons, Neutrons, Mesotrons and Cosmic Rays*, Chicago; University of Chicago (1946).
14. Bothe, W. G. F.; Becker, H.; *Zeit. fur Physik* (1930), **66**, 289. *Apud* ref. 13.
15. Curie-Joliot, I.; Joliot, F.; *Compt. Rend.* (1932), **144**, 273. *Apud* ref. 13.
16. Chadwick, J.; *Nature* (1932), **129**, 312.
17. Rutherford, E.; *Proc. Roy. Soc.* (1920), **97**, 374.
18. Peake; B. M.; *J. Chem. Educ.* (1989), **66**, 738.
19. Bensaude-Vincent, B.; *Frédéric Joliot; Irène Joliot-Curie*; IN: *Nobel Laureates in Chemistry: 1901-1992* (L. K. James, Ed.), American Chemical Society; Washington (1993). p. 217 e 223.
20. Ref. 13, p. 335.
21. Silk, J.; *A Origem do Universo* (Trad. de F. D. P. B. Vieira), Hamburg; Brasilia (1988).
22. Timble, V.; *Rev. Modern Physics* (1933), **55**(2).
23. Mason, S. F.; *Chemical Evolution: origin of the elements, molecules and living systems*; Clarendon; Oxford (1992).
24. Norman, E. B.; *J. Chem. Educ.* (1994), **71**(10), 813 [Esse número do *J. Chem. Educ.* contém diversos artigos relacionados à química nuclear].
25. Greenwood, N. N.; Earnshaw, A.; *Chemistry of the Elements*, Pergamon; Oxford (1984). p. 13.
26. Bethe, H. A.; *Phys. Rev.* (1939), **55**, 434. *Apud* ref. 27.
27. Penzias, A.; *Rev. Modern Physics* (1979), **51**, 3.
28. Perlman, I.; Seaborg, G. T.; *Os Elementos Sintéticos I*; IN: *A Nova Química (Scientific American)* (Trad. de Jorge Rego Freitas), São Paulo; Ibrasa (1960).
29. Close, F.; *A Cebola Cósmica* (Trad. de Paula Vitória), Edições 70; Lisboa (1983).
30. De Broglie, L.; *La Física Nueva y los Cuantos* (Trad. de J. Guixé), Losada; Buenos Aires (1947).
31. Philip, Y.; *Scientific American* (1994), **271**, 14-15.
32. Ref. 13, p. 361.
33. Ref. 13, p. 362.
34. Ref. 13, p. 363.
35. Cockroft, J. D.; Walton, E. T. S.; *Proc. Royal Soc. A* (1932), **137**, 229. *Apud*, ref. 13, p. 365.
36. Solomon, A. K.; *Why Smash Atoms?*, Penguin; Nova Iorque (1945).
37. Ref 25, pp. 1211-1217.
38. *Pure & Appl. Chem.* (1991), **63**, 879.
39. *Pure & Appl. Chem.* (1993), **65**, 1757.
40. Chatt, J.; *Pure & Appl. Chem.* (1979), **51**, 381.
41. Seaborg, G. T.; *J. Chem. Educ.* (1985), **62**, 6.
42. Seaborg, G. T.; *Chem. & Eng. News* (1945), **23**, 2190.
43. Emsley, J.; *The Elements*, Clarendon; Oxford (1991).
44. Freemantle, M.; Dagan, R.; *Chem. & Eng. News* (1994), **72**(41), 4.
45. *Pure & Appl. Chem.* (1994), **66**(12), Vol. 66, 2419.
46. *Chem. Int.* (1995), **17**(1), 3.
47. Dagan, R.; *Chem. & Eng. News* (1994), **72**(47), 8.
48. Dagan, R.; *Chem. & Eng. News* (1994), **72**(49), 25.
49. *Chem. Int.* (1995), **17**(1), 34.
50. Hoffman, D. C.; *Chem. & Eng. News* (1994), **72**(18), 24.
51. *Pure & Appl. Chem.* (1992), **64**, 1519.
52. Hileman, B.; *Chem. & Eng. News* (1994), **72**(24), 12.
53. Hileman, B.; *Chem. & Eng. News* (1994), **72**(34), 7.
54. Seaborg, G. T.; *Scientific American* (abril 1969). *Apud* Dickerson, R. E.; Gray, H. B.; Haight Jr., G. P.; *Chemical Principles*, Benjamin; Nova Iorque (1970). p. 510.
55. Seaborg, G. T.; *Os Elementos Transurânicos Sintetizados pelo Homem* (Trad. de F. W. Lima), Edgard Blücher/ Universidade de São Paulo; São Paulo (1969). p. 117.
56. *Pure & Appl. Chem.* (1993) **65**, 1815.
57. Ref. 50, p. 26.
58. Freemantle, M.; *Chem. & Eng. News* (1994), **72**(48), 5.
59. Freemantle, M.; *Chem. & Eng. News* (1995), **73**(48), 7.

Publicação financiada pela FAPESP