

DECAIMENTOS RADIOATIVOS EXÓTICOS
ORIGENS E ESTADO ATUAL

Odilon A.P. Tavares

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas-CBPF/MCTI
Rio de Janeiro-RJ

Rio de Janeiro-RJ, março de 2012

SUMÁRIO

Prólogo.....	2
1. Radiações e radioatividade.....	3
2. Núcleo atômico	4
3. Estabilidade nuclear e o efeito túnel	5
4. Prótons, nêutrons e o núcleo atômico.....	7
5. Fissão nuclear espontânea: outro modo de decaimento radioativo.....	8
6. Novo modo de decaimento: emissão espontânea de íons pesados	10
7. Descoberta da radioatividade exótica.....	14
8. Decaimentos exóticos hoje.....	14
Agradecimento.....	16
Referências citadas:	16

DECAIMENTOS RADIOATIVOS EXÓTICOS

ORIGENS E ESTADO ATUAL

Odilon A.P. Tavares

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas–CBPF/MCTI
Rio de Janeiro–RJ

Prólogo

Sutil é a Natureza. Foi preciso esperar por 107 anos desde a sua descoberta para se perceber, no final do século XIX, que o urânio e seus sais emitiam radiações. Mais 44 anos se passaram para se descobrir que o mesmo urânio partia-se espontaneamente em dois fragmentos de tamanhos comparáveis. E mais 47 anos foram necessários para se notar que esses fragmentos podiam ser bem diferentes. Este último é o caso do assim chamado decaimento radioativo exótico, ou radioatividade exótica. Neste artigo o autor relata a saga dos cientistas na busca pelo entendimento de mais um dos mistérios com que a nossa mãe Natureza vem nos desafiando. O leitor interessado ficará sabendo o que é, as origens e o que se sabe atualmente sobre as desintegrações radioativas exóticas.

1. Radiações e radioatividade

Urânio, por analogia a Urano –nome dado ao sétimo planeta do Sistema Solar, descoberto em 1781 pelo astrônomo inglês *sir* William Herschel (1738-1822)–, é um dos noventa elementos químicos que podem ser encontrados na natureza. Em 1789 o urânio foi descrito e caracterizado pela primeira vez pelo químico alemão Martin Klaproth (1743-1817), que o encontrou na pitchblenda, um minério cinza escuro abundante nas minas de Joachimsthal na Boêmia (hoje República Tcheca). Os sais de urânio se mostravam com uma coloração amarelada bastante viva, às vezes amarelo-esverdeada, e por isso eram muito usados durante o século XIX para dar coloração amarelo-brilhante aos objetos do artesanato e da indústria de vidro da época. Além da cor, os sais de urânio exibiam também certa fosforescência que os tornavam valiosos e atraentes. Durante pouco mais de um século uma variedade de compostos de urânio passou pelas mãos de muitos químicos e artesãos sem que eles tivessem notado (e se notaram não registraram) algo que diferenciasse o urânio dos demais elementos conhecidos. A diferença foi finalmente percebida pelo físico francês Antoine Henri Becquerel (1852-1908) quem, em 1896, investigando a fosforescência de compostos de urânio, anunciou em Paris sua descoberta de que os sais de urânio emitiam misteriosamente radiações invisíveis, de forma espontânea e persistente, sendo elas capazes de escurecer chapas fotográficas e de atravessar corpos opacos à luz [1]. Tais radiações eram encontradas também no tório (outro elemento químico, descoberto em 1828 pelo químico sueco Jöns Jacob Berzelius (1779-1848)) e seus sais [2].

A natureza, origem e propriedades dessas radiações foram sendo compreendidas paulatinamente durante as três décadas que sucederam sua descoberta. O físico neozelandês *sir* Ernest Rutherford (1871-1937) conseguiu, em 1898, identificar em seu laboratório em Cambridge (Inglaterra) dois tipos diferentes de radiações emitidas pelo urânio, ambas de natureza corpuscular, a que deu o nome de raios alfa (os facilmente absorvidos pelos materiais) e beta (aqueles de maior poder de penetração) [3] Neste mesmo ano, em Paris, a física e química polonesa Marie Sklodowska Curie (1867-1934) criou as designações ‘radioatividade’, ‘radioativo’, ‘radioquímica’, ‘radioelemento’, para se referir a tudo o que dissesse respeito às radiações. Estas foram usadas na identificação de três novos elementos radioativos: polônio e rádio, por Marie Curie e seu marido, o

físico francês Pierre Curie (1859-1906) [4,5], e o gás nobre radônio por Rutherford, em 1899, então em Montreal (Canadá) [6]

Em 1900, Becquerel identificou os raios beta de Rutherford como sendo elétrons [7], isto é, corpúsculos de carga elétrica negativa de que são constituídos os átomos de todos os elementos, como havia concluído três anos antes o físico inglês *sir* Joseph J. Thomson (1856-1940) [8].

Pouco mais de dez anos foram necessários para que fosse compreendida a natureza dos raios alfa. Em 1903, Rutherford e o químico inglês Frederick Soddy (1877-1956) concluíram que as partículas alfa emitidas do rádio e do radônio eram dotadas de carga elétrica positiva [9]. Juntos, no ano anterior, descobriram a transmutação dos elementos, isto é, um elemento se transforma (ou se desintegra, ou decai) em outro em decorrência da emissão espontânea de raios alfa ou beta [10]. E era observado também que gás hélio estava sendo emitido dos sais de rádio [11], o que os fez suspeitar de que as partículas alfa pudessem ser átomos de hélio que perderam seus dois elétrons. De fato, em 1908, Rutherford e o físico alemão Hans Geiger (1882-1945) conseguiram fazer pela primeira vez a medida da carga elétrica das partículas alfa do rádio, encontrando um valor igual a duas vezes a carga do elétron [12]. Como conheciam a razão carga/massa, puderam avaliar a massa da partícula alfa em aproximadamente quatro vezes a massa do átomo de hidrogênio, o elemento de menor massa conhecido. Finalmente, em 1909, Rutherford e o químico inglês Thomas Royds (1884-1955) confirmaram em definitivo a natureza das partículas alfa como sendo átomos do gás hélio duplamente ionizado [13], isto é, íons de carga elétrica dupla e positiva.

2. Núcleo atômico

Raios alfa emitidos de fontes radioativas de rádio, polônio e radônio foram intensamente utilizados a partir de 1909 por Rutherford, Geiger e o físico inglês-neozelandês *sir* Ernest Marsden (1889-1970) na investigação da deflexão de partículas alfa quando estas incidiam sobre folhas metálicas finíssimas (ouro, prata, platina, cobre, estanho) [14]. Durante os experimentos, eles notavam que algumas poucas partículas alfa estavam sendo lançadas para trás, indicando retroespalhamento [15]. A explicação para esses eventos raros, intrigantes,

surpreendentes e enigmáticos conduziu Rutherford à descoberta, em 1911, do núcleo atômico, isto é, a região central ultraminúscula do átomo, de dimensão por ele estimada em um trilionésimo de centímetro, contendo a carga elétrica positiva e praticamente (99,97%) toda a massa do átomo [16].

3. Estabilidade nuclear e o efeito túnel

Foi somente em meados da década de 1920, com o advento da Mecânica Quântica, ou Mecânica de Ondas, teoria física não determinista, e a famosa e fundamental equação de onda introduzida em 1926 pelo físico austríaco Erwin Schrödinger (1887-1961) [17], que a radioatividade alfa pode ser satisfatoriamente explicada. O feito deveu-se ao físico ucraniano-norteamericano George Gamow (1904-1968) [18] e, independentemente, ao físico inglês Ronald Gurney (1898-1953) juntamente com o físico norteamericano Edward Condon (1902-1974) [19], que, em 1928, propuseram o mecanismo quântico conhecido por “efeito túnel” [Figura 1]. Em essência, embora a emissão alfa seja possível energeticamente para

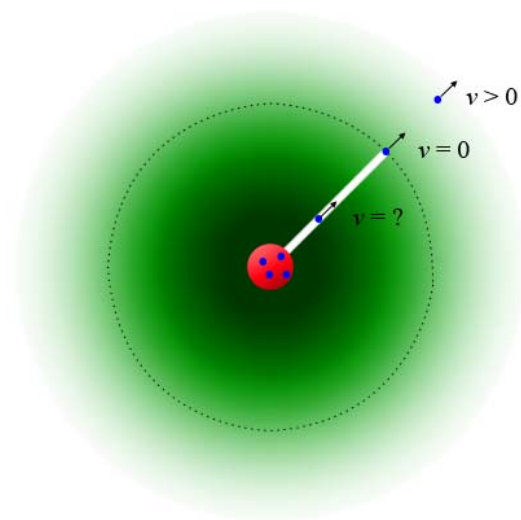


Fig.1 – Partículas alfa (em azul) tentam escapar do núcleo atômico (vermelho), mas encontram à sua frente uma barreira eletrostática (verde) que as impede de deixar o núcleo. Há, entretanto, uma probabilidade (muito pequena, mas não nula) de uma partícula transpor a barreira por tunelamento, livrando-se do núcleo a partir do “fim do túnel” (onde a velocidade é nula), afastando-se com velocidades cada vez maiores.

núcleos grandes (e portanto pesados), como o urânio, o tório, o rádio e outros, ocorre que a partícula alfa permanece confinada no interior do núcleo, a menos que ela vença por tunelamento quântico a barreira eletrostática criada ao redor do núcleo pelas cargas elétricas positivas do núcleo residual e da partícula alfa a ser expulsa. Fazendo uma analogia com os prisioneiros de um presídio, podemos pensar numa prisão na qual os condenados, confinados em suas celas, se veem

impossibilitados de escapar. Embora ainda tenham energia para se movimentar e agir, eles não possuem energia suficiente para romper as paredes da cela ou arrombar as portas da prisão. Entretanto, alguns tentam cavar um túnel em busca da liberdade e, efetivamente, alguns poucos conseguem escapar pelo túnel perfurado.

No caso dos núcleos atômicos, para se ter uma ideia, a teoria quântica da desintegração alfa estima em $\sim 4 \times 10^{-39}$ a probabilidade de tunelamento na emissão alfa dos núcleos de urânio da espécie mais abundante deste elemento, os de massa 238 unidades. Por outro lado, as tentativas de atravessar a barreira eletrostática por tunelamento são estimadas em $\sim 10^{21}$ por segundo e por núcleo. Por conseguinte, a chance de uma partícula alfa escapar do núcleo por segundo é de $4 \times 10^{-39} \times 10^{21}$ que é igual a 4×10^{-18} . Como, por exemplo, em 20 miligramas de urânio metálico (quantidade equivalente a um cubo de um milímetro de lado) estão contidos cerca

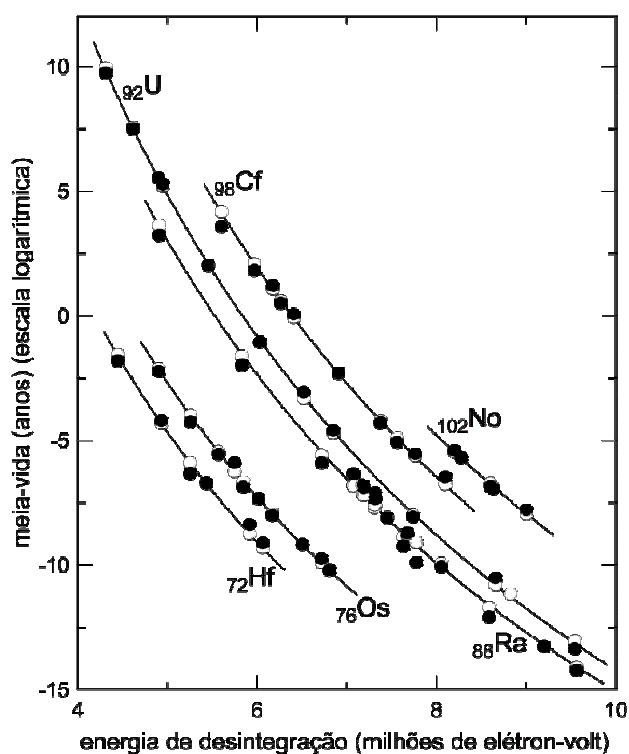


Fig.2 – Meias-vidas obtidas em laboratório (círculos cheios) comparadas aos valores calculados usando o modelo quântico de tunelamento (círculos vazios). Mostram-se seqüências de espécies nucleares de um mesmo elemento (háfênio, ósmio, rádio, urânio, califórnio e nobélio). Nota-se em cada seqüência uma diminuição da meia-vida com o aumento da energia, significando maior facilidade de escape por tunelamento quântico (adaptado da Ref. [21]).

de 5×10^{19} núcleos de urânio, segue-se que o número de desintegrações alfa nesta amostra se calcula como $\sim 4 \times 10^{-18} \times 5 \times 10^{19}$, ou seja, 200 por segundo. A teoria de Gamow, Condon e Gurney foi um dos primeiros triunfos da Mecânica Quântica,

conseguindo explicar quantitativamente a emissão de partículas alfa pelos núcleos atômicos, ditos, por isso mesmo, alfaradioativos [20].

A meia-vida de um radioelemento é a grandeza que o identifica quanto à sua velocidade de desintegração, e representa o tempo necessário para que a quantidade de átomos presentes inicialmente numa certa amostra se reduza à metade. Quanto menor a meia-vida, maior a velocidade de desintegração. Por exemplo, rádio, de 226 unidades de massa, possui meia-vida de 1600 anos. Este desintegra-se por emissão alfa à taxa de 37 milhões de emissões alfa por miligrama e por segundo, transformando-se no radônio de massa 222. Por sua vez, o radônio-222 possui meia-vida de tão somente 3 dias e 20 horas. Platina, metal nobre muito usado em circuitos elétricos, em objetos de adorno e em próteses, possui em sua composição natural a espécie nuclear de massa 190, com meia-vida de ~400 bilhões de anos, de modo que a platina natural exhibe uma atividade alfa da ordem de 90 emissões alfa por grama e por hora. Atualmente, a concordância entre as meias-vidas obtidas experimentalmente e aquelas estimadas mediante o mecanismo quântico de tunelamento é quase que totalmente perfeita [Figura 2].

4. Prótons, nêutrons e o núcleo atômico

Durante as décadas de 1910, 1920 e 1930 partículas alfa foram bastante utilizadas como projéteis para bombardear diferentes materiais alvo com o objetivo de se investigar a natureza e constituição do núcleo atômico. A primeira dessas “reações nucleares” foi conseguida por Rutherford em 1919 quando bombardeou nitrogênio com raios alfa do rádio-C (uma espécie nuclear radioativa descendente do rádio) [22]. Com um equipamento simples, porém engenhoso e sensível a partículas eletricamente carregadas, ele pode concluir que partículas de carga elétrica e massa unitária estavam sendo ejetadas dos núcleos de nitrogênio pelo impacto das partículas alfa. Estes eventos representavam a descoberta por Rutherford da primeira partícula constituinte do núcleo atômico, a que deu o nome de próton [23].

No início dos anos 1930 uma radiação misteriosa e altamente penetrante era sempre observada toda vez que os experimentalistas bombardeavam berílio (elemento de número atômico 4 e de massa 9) com partículas alfa energéticas de

fontes radioativas [24,25]. O mistério persistiu por dois anos, porém foi finalmente desvendado em fevereiro de 1932 pelo físico inglês James Chadwick (1891-1974) quem, fazendo a radiação penetrante colidir com prótons de materiais hidrogenados e com núcleos de nitrogênio, pôde concluir tratar-se de uma nova partícula elementar, de massa igual à do próton, porém desprovida de carga elétrica [26]. A ela deu-se o nome de nêutron, o próton neutro, isto é, sem carga elétrica (como havia previsto Rutherford 12 anos antes). Imediatamente o jovem físico italiano Ettore Majorana (1906-1938) percebeu que os núcleos atômicos deveriam ser constituídos apenas de prótons e nêutrons [27], hipótese que se mostrou absolutamente correta. Desde então, a partir de meados de 1932, ficou conhecida definitivamente a estrutura básica dos átomos como sendo constituídos de um núcleo central com Z prótons e N nêutrons, ao redor do qual se distribuem Z elétrons, garantindo deste modo a neutralidade dos átomos. A quantidade Z representa o número atômico, isto é, a posição do elemento na Tabela Periódica dos Elementos, e indica também a quantidade de carga elétrica elementar do núcleo. A soma $Z+N$ é o número de partículas no núcleo (os núcleons), e representa-se pela letra A ($Z+N=A$), que é o chamado número de massa. Z e A (ou N) definem uma espécie nuclear. Núcleos de mesmo Z e A 's (ou N 's) diferentes são ditos isótopos (radioisótopos, se radioativos). Assim ${}^{235}_{92}\text{U}$ ($Z=92$, $A=235$) e ${}^{238}_{92}\text{U}$ ($Z=92$, $A=238$) são isótopos do urânio. Em particular, o núcleo ${}^4_2\text{He}$ é justamente a partícula alfa, onde He é o símbolo para o gás hélio.

5. Fissão nuclear espontânea: outro modo de decaimento radioativo

No decorrer dos anos 1930, nêutrons, por não possuírem carga elétrica, passaram a ser preferidos como projéteis em reações nucleares [28]. Em Roma, o físico italiano Enrico Fermi (1901-1954) e sua equipe procuravam obter elementos acima do último conhecido na natureza, o urânio, bombardeando-o com nêutrons de baixa energia [29]. A equipe de Fermi não foi bem sucedida em seus experimentos, mas os químicos alemães Otto Hahn (1879-1968) e Fritz Strassmann (1902-1980) em Berlim, valendo-se do mesmo expediente, conseguiram mostrar em dezembro de 1938 as evidências químicas de que núcleos de urânio toda vez que eram bombardeados com nêutrons lentos partiam-se em fragmentos de massas comparáveis, produzindo isótopos de xenônio ($Z=54$), bário ($Z=56$), lantânio

($Z=57$), criptônio ($Z=36$), estrôncio ($Z=38$) e ítrio ($Z=39$) [30]. Esta foi a descoberta de um fenômeno inteiramente novo, a fissão nuclear, assim batizado pela física austríaca Lise Meitner (1878-1968) em janeiro de 1939 [31]. Um ano depois, dois físicos russos, Georgii Flerov (1913-1990) e Konstantin Petrzhak (1907-1998), mostraram em Moscou pela primeira vez que o fenômeno ocorria também de forma espontânea no isótopo ^{238}U , isto é, sem a necessidade de fazer incidir nêutrons no urânio [32]. Ou seja, tratava-se de um novo modo de desintegração nuclear natural, a fissão espontânea. O fenômeno mostrou-se bastante raro no ^{238}U , acontecendo, hoje se sabe, na proporção de uma desintegração por fissão para cada dois milhões de emissões alfa. Cinquenta e cinco anos depois, portanto só em 1995, confirmou-se experimentalmente também a fissão espontânea no tório natural (100% do isótopo ^{232}Th), desta vez na proporção de uma fissão para cada oito bilhões de emissões alfa [33].

A baixíssima taxa de desintegração por fissão espontânea observada no ^{238}U , com meia-vida tão alta quanto $\sim 10^{16}$ anos, estimulou vários grupos experimentais a investigar mais cuidadosamente o fenômeno. Até 1980 somavam-se cerca de quarenta medidas de meia-vida obtidas com as mais diferentes técnicas experimentais [34]. Os resultados, entretanto, diferiam por até pouco mais de um fator dois [Figura 3]. Esta observação levou, já no início dos anos 1970, um grupo de físicos nucleares do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas-CBPF no Rio de Janeiro, do qual o autor fazia parte, a redeterminar a meia-vida do modo de desintegração por fissão espontânea do ^{238}U . Uma das técnicas utilizadas pelo grupo foi a ionografia com uso de emulsão fotográfica para registro de traços de origem nuclear. Segundo esta técnica, os fragmentos de fissão (íons de massa entre 80 e 160 unidades de massa e com mais de 30 unidades de carga elétrica positiva) produziam trajetórias em chapas de emulsão fotográfica que eram

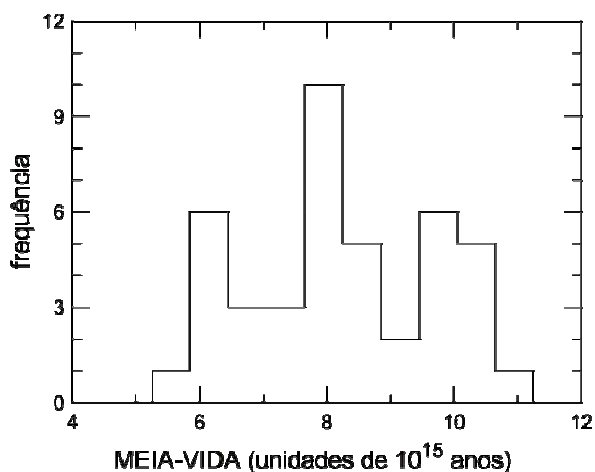


Fig.3 - Como se distribuem as medidas de meia-vida por fissão espontânea no ^{238}U feitas até 1980. Três grupos de resultados se destacam: em torno a 6, 8 e 10 unidades de 10^{15} anos (adaptado da Ref. [34]).

confeccionadas especialmente com esta finalidade. Adicionavam-se à sua composição original (basicamente grãos de brometo de prata dispersos em meio gelatinoso) quantidades conhecidas de urânio o qual resultava uniformemente distribuído no volume das películas. Após longo tempo de exposição, as trajetórias dos fragmentos de fissão se convertiam em traços visíveis ao microscópio ótico (ampliação de 250 a 1200 vezes) depois das chapas terem passado por um processo especial de revelação química. Este não permitia tornar visíveis, ao mesmo tempo, as trajetórias dos milhões de partículas alfa decorrentes da radioatividade alfa do urânio [35].

6. Novo modo de decaimento: emissão espontânea de íons pesados

A análise cuidadosa dos traços registrados nas chapas expostas por diferentes tempos foi conduzida durante os anos de 1974 e 1975, a qual evidenciou traços de menor comprimento (~ 9 milésimos de milímetro em média) quando comparado ao comprimento médio de ~ 23 milésimos de milímetro atribuído aos traços de fragmentos da fissão ordinária do ^{238}U [Figura 4]. Embora as condições

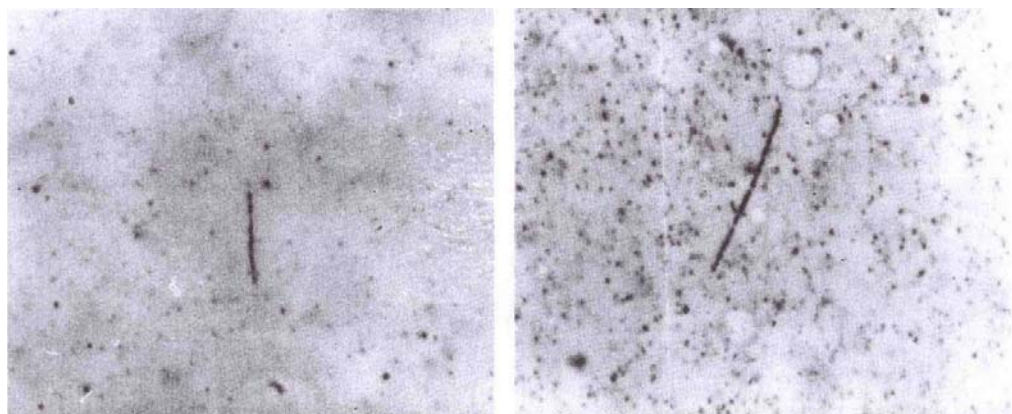


Fig.4 – Traços raros de trajetórias de fragmentos nucleares registrados em chapas de emulsão fotográfica que continham urânio e utilizadas no estudo da fissão espontânea do ^{238}U . À esquerda, mostra-se um traço cuja origem é atribuída a um provável novo modo de desintegração nuclear; à direita, um traço de fissão espontânea ordinária para comparação (reproduzido da [36]).

experimentais na época não tivessem permitido identificar a carga, a massa e a energia dos íons associados aos traços de menor comprimento, a origem desses eventos foi atribuída pelo grupo de pesquisadores do CBPF (Hervásio de Carvalho

(1916-1999), Jáder Martins, Odilon Tavares e Iraci de Souza) a um possível e provável novo modo de desintegração nuclear, qual seja, a emissão de fragmentos de massa entre 20 e 70 unidades de massa, isto é, núcleos na região de massas que se estende do neônio ao níquel [37-40].

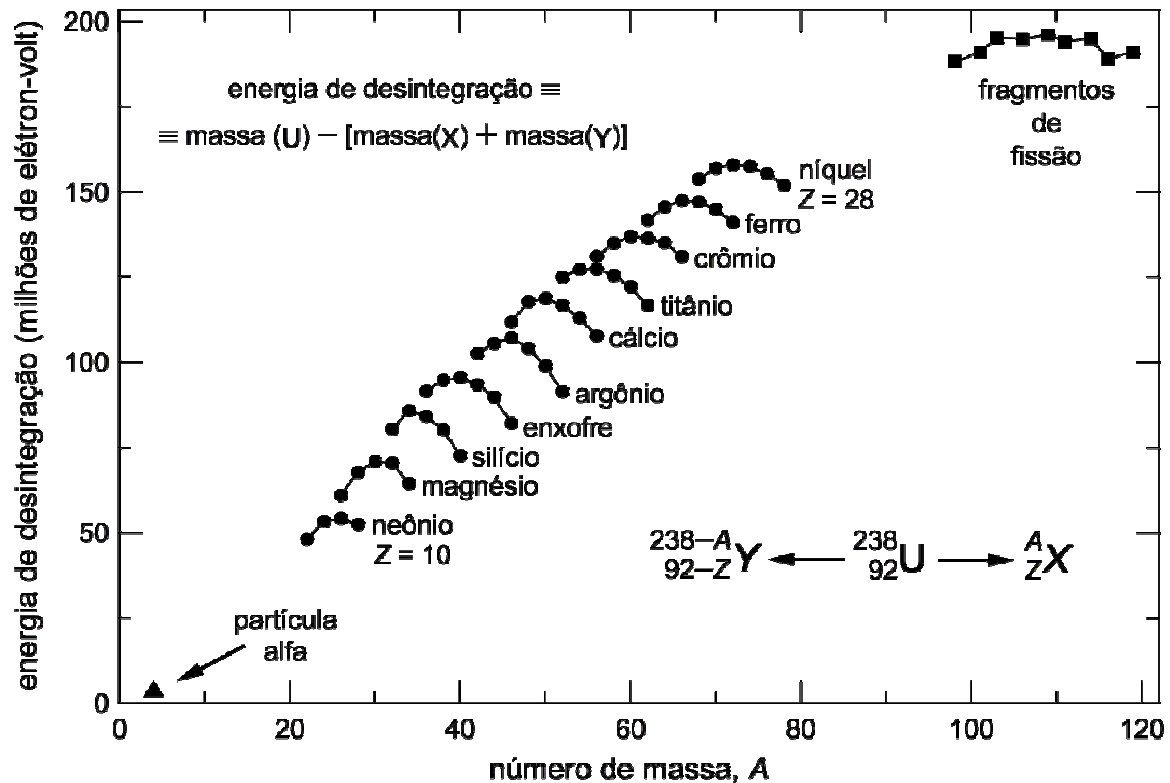


Fig.5 - Alguns possíveis modos de bipartição espontânea do ${}^{238}\text{U}$. O fragmento menor (X) é representado por pontos definidos pelo par Z (elemento) e A (número de massa): círculos indicam clusters das seqüências isotópicas de Z par, indo do neônio ao níquel. A partícula alfa (\blacktriangle) e fragmentos de fissão (\blacksquare) estão também mostrados. É clara a tendência geral de um aumento da energia de desintegração à medida que os fragmentos da bipartição vão se tornando comparáveis.

Verificou-se que esta provável nova forma de radioatividade natural era perfeitamente possível, pois o balanço de massa-energia para os diferentes modos de partição nuclear era sempre positivo, uma vez que a massa do núcleo original (suposto ${}^{238}\text{U}$) é maior do que a soma das massas dos núcleos eventualmente produzidos na desintegração. Esta diferença de massas (conhecida como valor-Q) é equivalente à energia total de desintegração [Figura 5]. Esta, por sua vez, se

converte em energia de movimento (energia cinética) dos íons produzidos (daí os traços de menor comprimento serem interpretados como trajetórias desses íons na emulsão fotográfica). Além disso, e o mais importante, cálculos bastante aproximados feitos na época pelo grupo do CBPF com base no efeito quântico de tunelamento, similar ao que ordinariamente se utilizava para explicar a emissão alfa, indicaram, dentro dos limites de grandes incertezas que o método impõe, serem prováveis alguns poucos modos de emissão de fragmentos de massas compreendidas entre 20 e 70. Por exemplo, cálcio-48 poderia ser produzido com meia-vida de $\sim 10^{16}$ anos [Figura 6].

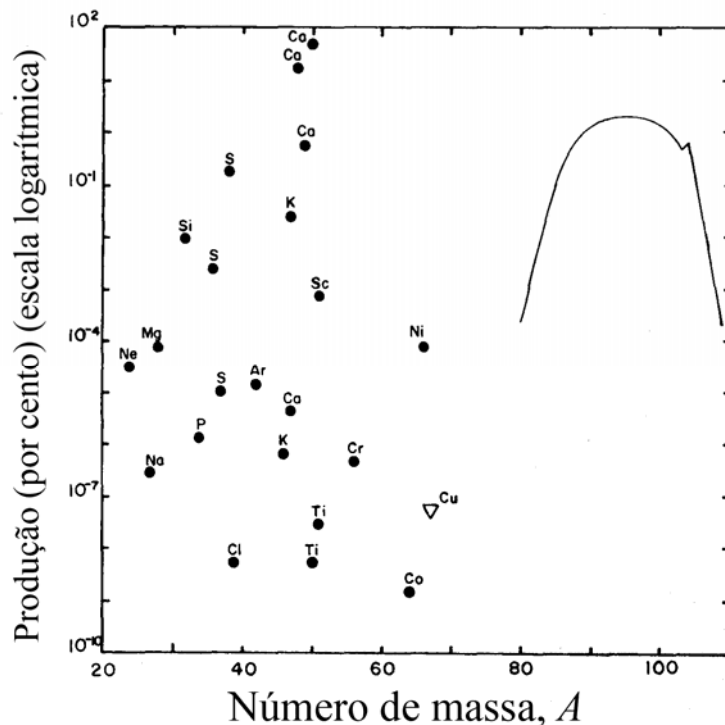


Fig.6 – Alguns modos de partição espontânea do ^{238}U gerando fragmentos de massas entre 20 e 70 como calculado pelo autor em 1975 usando o efeito quântico de tunelamento (círculos cheios) [39]. A curva representa a distribuição de massa dos fragmentos leves da fissão obtida em 1966 pelos radioquímicos M.N. Rao e P.K. Kuroda no Departamento de Química da Universidade de Arkansas (EUA) [Phys. Rev. 147, 884 (1966)]

Aqueles cálculos indicaram ainda como sendo mais prováveis os modos de partição em que os núcleos produzidos possuísem estrutura de camada fechada. Explicando resumidamente: um grande número de evidências experimentais notadas durante a década de 1940 tornou claro que nêutrons e prótons, à semelhança de elétrons nos átomos, se distribuíam em camadas no núcleo, o que levou à ideia do modelo nuclear em camadas formulado em 1949 independentemente pela física alemã Maria Göppert-Mayer (1906-1972) e o físico alemão Johannes Jensen (1907-1973) [41]. Quando uma camada é completada (seja com nêutrons ou prótons) significa que o núcleo se apresenta fortemente

ligado, isto é, com uma estrutura bastante compacta, rígida, em comparação com aqueles que ainda não preencheram uma camada (os números de prótons ou nêutrons que completam uma camada são 2, 8, 20, 28, 50, 82 e 126, e são conhecidos como ‘números mágicos’). Então, em outras palavras, o efeito túnel se mostrava mais pronunciado e, portanto, oferecia maior facilidade para a emissão de fragmentos, quando os núcleos produtos da desintegração exibiam números mágicos de prótons e/ou nêutrons, sobretudo desses últimos. E assim, das observações e análise dos resultados dos cálculos, o grupo de pesquisadores do CBPF formulou em meados de 1975 a hipótese de que núcleos atômicos pesados, como urânio e outros, podem muito provavelmente também se desintegrar emitindo íons de massas intermediárias, quer dizer, maiores do que a da partícula alfa (4 unidades de massa) e menores do que as massas dos fragmentos da fissão ordinária (que era sabido variar de ~80 a ~160 unidades de massa) [37].

Estes resultados surpreendentes foram interpretados dois anos depois pelo físico romeno Aurel Sandulescu, do Instituto de Física e Tecnologia Nuclear de Bucareste, e pelo físico alemão Walter Greiner, do Instituto de Física Teórica da Universidade J.W. Göthe em Frankfurt am Main, como um caso de alta assimetria na distribuição de massa dos fragmentos proveniente dos efeitos da estrutura de camadas de um ou de ambos os fragmentos [42]. Mais tarde, em 1980, cálculos bem mais refinados foram desenvolvidos pelos físicos teóricos Sandulescu e Greiner (já mencionados) e Denin Poenaru (também de Bucareste) com a finalidade de avaliar o efeito quântico de tunelamento em núcleos pesados na emissão de aglomerados compostos de prótons e nêutrons (os chamados “clusters” nucleares) [43]. Os cálculos indicaram que as condições mais favoráveis eram para a emissão espontânea de neônio-24 (^{24}Ne) e magnésio-28 (^{28}Mg) de isótopos do tório, silício-32 (^{32}Si) e ^{34}Si de isótopos do urânio, argônio-46 (^{46}Ar) de isótopos do plutônio e cúrio (dois elementos transurânicos, portanto, artificiais), e cálcio-48 (^{48}Ca) de isótopos do califórnio, fêrmio e nobélio (outros três elementos transurânicos). Os casos de desintegração radioativa por emissão de íons pesados ficaram conhecidos por radioatividade por emissão de clusters, radioatividade exótica ou, mais simplesmente, decaimentos exóticos.

7. Descoberta da radioatividade exótica

A primeira identificação experimental de um caso de radioatividade exótica foi conseguida pelos físicos ingleses H. J. Rose e G. A. Jones na Universidade de Oxford (Inglaterra) os quais relataram na revista inglesa *Nature* de 19 de janeiro de 1984 a observação da desintegração radioativa do isótopo do rádio ^{223}Ra por emissão do cluster carbono-14 (^{14}C) na proporção de um evento para cerca de um bilhão de partículas alfa do ^{223}Ra [44]. A meia-vida deste novo modo de desintegração foi obtida como sendo 36 milhões de anos. A massa e energia dos íons ^{14}C emitidos pelo ^{223}Ra foram medidas um ano depois com bastante precisão pelo físico austríaco Walter Kutschera e grande equipe de colaboração trabalhando na Divisão de Física do Argonne National Laboratory (Chicago, EUA). A natureza dos íons ^{14}C em 24 eventos de energia cinco vezes maior do que a emissão alfa ficou estabelecida sem qualquer ambigüidade [45]. Até a primeira metade dos anos 1980 oito casos de radioatividade exótica já estavam confirmados experimentalmente, com emissões de ^{14}C a partir de isótopos do rádio, e de ^{24}Ne de isótopos de tório, protactínio e urânio (veja, por exemplo, Ref. [46]).

8. Decaimentos exóticos hoje

Logo após a confirmação experimental da descoberta da radioatividade exótica, grupos de físicos teóricos e físicos e químicos experimentais em vários laboratórios do mundo se interessaram em investigar novos possíveis casos de emissão espontânea de íons pesados. Atualmente, decorridos 37 anos de estudo e pesquisa desde o anúncio desta provável nova forma de desintegração radioativa pelos físicos brasileiros do Rio de Janeiro, são conhecidos vinte e sete casos de desintegração exótica, com emissão de íons desde ^{14}C até o ^{34}Si [47-50]. Deste total, onze ocorrem em isótopos presentes na natureza, e os demais foram observados em isótopos produzidos artificialmente. O caso mais frequente é o da emissão de ^{14}C pelo ^{222}Ra (meia-vida de ~ 4 mil anos), e o mais exótico observado até o presente é o da emissão de ^{30}Mg pelo ^{236}U (meia-vida de $\sim 10^{20}$ anos). Em ambos os casos os núcleos residuais produzidos (chumbo-208 e mercúrio-206, respectivamente) possuem estrutura de camada fechada com 126 nêutrons. A Figura 7 mostra onze casos de radioatividade exótica dentre os conhecidos até o presente. Nota-se grande semelhança com a desintegração alfa (cf. Fig.2), isto é,

diminuição da meia-vida com o aumento da energia liberada na desintegração, como percebido no decaimento alfa por Geiger e o físico inglês John Nuttall (1890-1958) há cerca de um século [52].

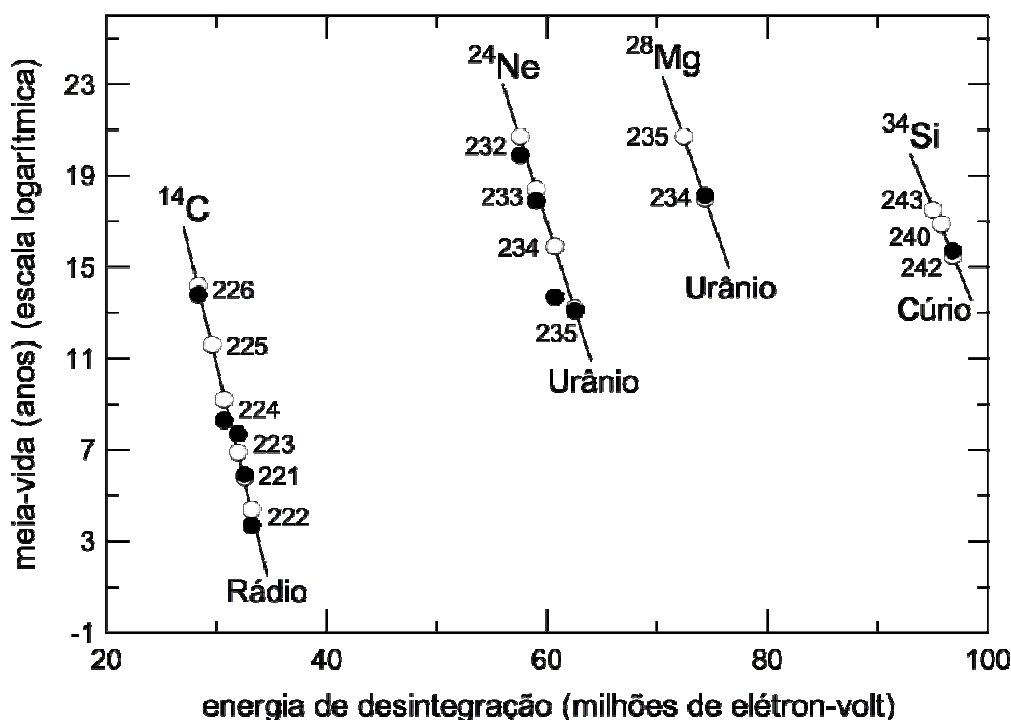


Fig.7 – O mesmo como na Figura 2, porém para casos de desintegração exótica. Círculos cheios indicam valores medidos, e os vazios são valores calculados usando o efeito túnel. Cada linha representa uma seqüência de isótopos que se desintegram emitindo o cluster indicado. Números de massa estão mostrados junto aos pontos (dados extraídos da Ref. [51]).

Decaimentos exóticos são também previstos em núcleos atômicos de massa intermediária deficitários em nêutrons. Já há quase vinte anos, cálculos feitos com base no efeito quântico de tunelamento indicavam como prováveis as emissões espontâneas de ^{12}C , ^{16}O e ^{28}Si em isótopos de $^{114-116}_{56}\text{Ba}$ (bário), $^{118,120}_{58}\text{Ce}$ (cério) e $^{127}_{62}\text{Sm}$ (samário), respectivamente [53]. E, recentemente, verificou-se também serem prováveis modos de decaimento por emissão de clusters de maior carga e massa ($Z \geq 28$ e $A \geq 70$) a partir de núcleos ditos superpesados, isto é, aqueles de número atômico não menor que $Z=104$, onde seria possível descobrir casos de radioatividades exóticas competitivos com a emissão alfa [54]. Entretanto, nenhuma dessas previsões pôde ser ainda confirmada em laboratório [55]. A dificuldade de se detectar desintegrações exóticas em núcleos ordinários acima do

chumbo e do urânio reside na taxa extremamente competitiva das emissões alfa que dificulta diferenciar uma da outra, exigindo métodos de detecção ultrasensíveis e diferenciadores, conjugado a tempos de exposição em geral bastante longos, dada a raridade dos eventos.

Concluindo, o autor relembra aqui que o possível, provável e detectável modo de desintegração dos núcleos atômicos por emissão de clusters mais robustos que a partícula alfa foi pela primeira vez investigado quantitativamente por físicos do CBPF (Rio de Janeiro) em 1974-1975. Apesar de eventuais incompatibilidades das conclusões tiradas àquela época com o que hoje se sabe sobre o assunto, elas deram partida às ideias básicas e forneceram a vários grupos de pesquisa no mundo, tanto teóricos como experimentais, as motivações para uma investigação aprofundada e sistemática desta nova e rara forma de desintegração nuclear. Modelos recentes de cálculo do efeito túnel [47] indicam o cluster ^{34}Si como o fragmento mais provável para a desintegração exótica do isótopo ^{238}U , com meia-vida estimada entre 3×10^{20} e 5×10^{22} anos, entretanto ainda não observado até o presente.

Agradecimento - É com prazer que o autor agradece ao Dr. Emil Medeiros pela leitura crítica dos originais e preparação esmerada de parte das ilustrações. Ao jovem José Guilherme Monteiro o reconhecimento do autor pela dedicação e competência colocadas na diagramação final do trabalho.

Referências citadas:

- [1] A. H. Becquerel: Sur les radiations invisibles émises par les corps phosphorescents. *Compt. Rend. Acad. Sci. (Paris)* **122**, 501 (1896).
- [2] M. Sklodowska Curie: Rayons émis par les composés de l'uranium et du thorium, *Compt. Rend. Acad. Sci. (Paris)* **126**, 1101 (1898); G. C. Schmidt: Sur les radiations émises par le thorium e ses composés, *Compt. Rend. Acad. Sci. (Paris)* **126**, 1264 (1898).
- [3] E. Rutherford: Uranium radiation and the electrical conduction produced by it. *Phil. Mag.* **47**, 109 (1899).
- [4] P. Curie et S. Curie: Sur une substance nouvelle radio-active contenue dans la pechblende. *Compt. Rend. Acad. Sci. (Paris)* **127**, 175 (1898).

- [5] P. Curie, M. Curie et G. Bémont: Sur une nouvelle substance fortement radioactive contenue dans la pechblende. *Comp. Rend. Acad. Sci. (Paris)* **127**, 1215 (1898).
- [6] E. Rutherford: A Radioactive Substance Emitted from Thorium Compounds. *Phil. Mag.* **49**, 1 (1900).
- [7] H. Becquerel: Déviation du Rayonnement du Radium dans un Champ Électrique. *Compt. Rend. Acad. Sci. (Paris)* **130**, 809 (1900).
- [8] J. J. Thomson: Cathode Rays. *Phil. Mag.* **44**, 293 (1897).
- [9] E. Rutherford: The Magnetic and Electric Deviation of the Easily Absorbed Rays from Radium. *Phil. Mag.* **5**, 177 (1903); The Mass and Velocity of the α Particles Expelled from Radium and Actinium. *Phil. Mag.* **12**, 348 (1906); E. Rutherford and O. Hahn: Mass of the α -Particles from Thorium. *Phil. Mag.* **12**, 371 (1906).
- [10] E. Rutherford and F. Soddy: The Cause and Nature of Radioactivity. *Phil. Mag.* **4**, 370 (1902).
- [11] W. Ramsay and F. Soddy: Gases Occluded by Radium Bromide. *Nature* **68**, 246 (1903); Experiments in Radioactivity and the Production of Helium from Radium. *Proc. Roy. Soc. A* **72**, 204 (1903); Further Experiments on the Production of Helium from Radium. *Proc. Roy. Soc. A* **73**, 346 (1904).
- [12] E. Rutherford e H. Geiger: The Charge and Nature of the Alpha Particle, *Proc. Roy. Soc. (London)* **A81**, 162 (1908); E. Rutherford: The Nature and Charge of the α -Particles from Radioactive Substances, *Nature* **79**, 12 (1908).
- [13] E. Rutherford and T. Royds: The Nature of the α Particle from Radioactive Substances. *Phil. Mag.* **17**, 281 (1909).
- [14] H. Geiger: On the Scattering of the α -Particles by Matter. *Proc. Roy. Soc. A* **81**, 174 (1908); The Scattering of the Alpha Particles by Matter, *Proc. Roy. Soc.* **A83**, 492 (1910).
- [15] H. Geiger and E. Marsden: On a Diffuse Reflection of the α Particles. *Proc. Roy. Soc.* **A82**, 495 (1909).
- [16] E. Rutherford: The Scattering of α and β Particles by Matter and the Structure of the Atom. *Phil. Mag.* **21**, 669 (1911).
- [17] E. Schrödinger: An Undulatory Theory of the Mechanics of Atoms and Molecules, *Phys. Rev.* **28**, 1049 (1926).
- [18] G. Gamow: Zur Quantentheorie des Atomkernes, *Z. Phys.* **51**, 204 (1928).
- [19] R.W. Gurney e E.U. Condon: Quantum Mechanics and Radioactive Disintegration, *Nature* **122**, 439 (1928).

- [20] I. Perlman, A. Ghiorso e G.T. Seaborg: Systematics of Alpha Radioactivity, *Phys. Rev.* **77**, 26 (1950).
- [21] O. A. P. Tavares, M. L. Terranova e E. L. Medeiros: New evaluation of alpha decay half-life of ^{190}Pt isotope for the Pt-Os dating system, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* **243**, 256 (2006).
- [22] E. Rutherford: Collision of α -Particles with Light Atoms, Part IV. An Anomalous Effect in Nitrogen, *Phil. Mag.* **37**, 581(1919).
- [23] E. Rutherford e J. Chadwick: Artificial Disintegration of Light Elements, *Phil. Mag.* **42**, 809 (1921).
- [24] W. Bothe e H. Becker: Künstliche Erregung von Kern- γ Strahlen, *Z. Physik* **66**, 289 (1930).
- [25] I. Joliot-Curie e F. Joliot: Émissions de protons de grand vitesse par les substances hydrogénées sous l'influence des rayons γ très pénétrants, *Compt. Rend. Acad. Sci. (Paris)* **194**, 273 (1932).
- [26] J. Chadwick: The Existence of a Neutron, *Proc. Roy. Soc. (London)* **A136**, 696 (1932).
- [27] V. Morcelle, V. Campbell, O.A.P. Tavares e N.V. Vugman: Ettore Majorana: O Drama de Consciência de um Jovem Cientista, *Ciência e Sociedade CBPF-CS-004/2006*; E. Recami: Ricordo di Ettore Majorana a Cinquant'Anni dalla sua Scomparsa (L'Opera Scientifica Edita e Inedita), *Ciência e Sociedade CBPF-CS-09/1988*.
- [28] E. Fermi, E. Amaldi, O. D'Agostino, F. Rasetti e E. Segré: Artificial Radioactivity Produced by Neutron Bombardment, *Proc. Roy. Soc. (London)* **A146**, 483 (1934).
- [29] E. Fermi: Possible Production of Elements of Atomic Number Higher than 92. *Nature* **133**, 898 (1934).
- [30] O. Hahn e F. Strassmann: 'Über den Nachweis und das Verhalten der bei der Bestrahlung des Urans mittels Neutronen entstehenden Erdalkalimetalle' (Sobre a identificação e o comportamento dos metais alcalino-terrosos provenientes da irradiação de Urânio por meio de neutrons). *Naturwiss.* **27**, 11 (1939); O. Hahn e Fritz Strassmann: Nachweis der Entstehung aktiver Bariumisotope aus Uran und Thorium durch Neutronenbestrahlung; Nachweis weiterer aktiver Bruchstücke bei der Uranspaltung (Identificação da produção de isótopos ativos de Bário pela irradiação de Urânio e Tório por nêutrons; identificação de outros fragmentos da fragmentação do Urânio), *Naturwiss.* **27**, 89 (1939).
- [31] L. Meitner e O. R. Frisch: Disintegration of Uranium by Neutrons: a New Type of Nuclear Reaction. *Nature* **143**, 239 (1939).
- [32] G.N. Flerov e K.A. Petrzhak: Spontaneous fission of uranium, *J. Phys. (USSR)* **3**, 275 (1940); ver também: K.A. Petrzhak e G.N. Flerov: Spontaneous fission of nuclei, *Sov. Phys. Uspekhi* **4**, 305 (1961).

- [33] R. Bonetti, C. Chiesa, A. Guglielmetti, R. Matheoud, G. Poli, V.L. Mikheev e S.P. Tretyakova: First observation of spontaneous fission and search for cluster decay of ^{232}Th , *Phys. Rev. C* **51**, 2530 (1995).
- [34] H.G. de Carvalho, J.B. Martins, E.L. Medeiros e O.A.P. Tavares: Decay Constant for the Spontaneous-Fission Process in ^{238}U , *Nucl. Instr. Methods*. **197**, 417 (1982).
- [35] H.G. de Carvalho e A.G. da Silva: Discrimination of Tracks of Photofission Fragments with Very High Background of Alpha-Particles and Electrons in Nuclear Emulsion, *Nuovo Cimento (Supl.)* **19**, 24 (1961); H.G. de Carvalho, “The Processing and Loading of Nuclear Emulsions” em *Progress in Nuclear Techniques and Instrumentation*”, North Holland (1965), Cap. V..
- [36] Odilon Tavares: Nova forma de radioatividade natural?, *Ciência Hoje* **3** (14), 18 (1984).
- [37] H. G. de Carvalho, J. B. Martins, I. O. de Souza e O. A. P. Tavares: Emissão espontânea de íons pesados pelo urânio, *An. Acad. Brasil. Ciênc.* **47**, 567 (1975); apresentado na Sessão Ordinária da Academia Brasileira de Ciências-ABC em 23 de setembro, 1975; veja também: H. G. de Carvalho, J. B. Martins, I. O. de Souza e O. A. P. Tavares: Spontaneous emission of heavy ions from Uranium, *Chem. Abstr.* **85**, 441 (1976) (entry No. 85: 100326j).
- [38] Iraci O. de Souza: ‘Meia-Vida de Fissão Espontânea do Urânio-238 e uma Provável Nova Forma de Radioatividade’, Tese de Mestrado, Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas-CBPF (Rio de Janeiro), setembro/1975.
- [39] H. G. de Carvalho, J. B. Martins, I. O. de Souza e O. A. P. Tavares : Spontaneous emission of heavy-ions from uranium, *An. Acad. Brasil. Ciênc.* **48** 205 (1976).
- [40] Odilon A.P. Tavares: ‘Alta Assimetria de Massa na Desintegração Espontânea e Induzida de Núcleos Pesados’, Tese de Doutorado, Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas-CBPF (Rio de Janeiro), dezembro/1978.
- [41] M. Göppert-Mayer: On Closed Shells in Nuclei. II, *Phys. Rev.* **75**, 1969 (1949); O. Haxell, J.H.D. Jensen e H.E. Suess: On the ‘Magic Numbers’ in Nuclear Structure, *Phys. Rev* **75**, 1766 (1949).
- [42] A. Sandulescu e W. Greiner : Mass asymmetry in fission, fusion and mass-transfer due to fragmentation in valleys, *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* **3** L189 (1977); A. Sandulescu, H. J. Lustig, J. Hahn e W. Greiner: High mass-asymmetry distributions of fissioning nuclei, *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* **4**, L279 (1978).
- [43] A. Sandulescu, D. N. Poenaru e W. Greiner: New type of decay of heavy nuclei intermediate between fission and α decay, *Fiz. Elem. Chas-tist Yadra* **11**, 1334 (1980); [tradução para o inglês: A. Sandulescu, D. N. Poenaru e W. Greiner, *Sov. J. Part. Nucl.* **11**, 528 (1980)].
- [44] H. J. Rose e G. A. Jones : A new kind of natural radioactivity, *Nature* **307**, 245 (1984).

- [45] W. Kutschera, I. Ahmad , S. G. Armato III , A. M. Friedman , J. E. Gindler, W. Henning, T. Ishic, M. Paul e K. E. Rehm: Spontaneous ^{14}C emission from ^{223}Ra , *Phys. Rev. C* **32**, 2036 (1985).
- [46] H. G. de Carvalho, J. B. Martins e O. A. P. Tavares: Radioactive decay of radium and radon isotopes by ^{14}C emission, *Phys. Rev. C* **34**, 2261 (1986)..
- [47] O. A. P. Tavares, L. A. M. Roberto e E. L. Medeiros: Radioactive decay by the emission of heavy nuclear fragments, *Phys. Scr.* **76**, 375 (2007).
- [48] A. Guglielmetti , D. Faccio, R. Bonetti, S. V. Shishkin, S. P. Tretyakova, S. V. Dmitriev, A. A. Ogloblin, G. A. Pik-Pickak, N. P. van der Meulen, G. F. Steyn, T. N. van der Walt , C. Vermeulen e D. McGee: Carbon radioactivity of ^{223}Ac and a search for nitrogen emission, *J. Phys.: Conf. Ser.* **111**, 012050 (2008).
- [49] R. Bonetti e A. Guglielmetti : Cluster radioactivity: an overview after twenty years, *Roman. Rep. Phys* **59**, 301 (2007).
- [50] D. N. Poenaru (ed) : *Nuclear Decay Modes* (Bristol: Institute of Physics Publishing, 1996) chapters 6–9.
- [51] O. A. P. Tavares e E. L. Medeiros: Simple description of cluster radioactivity, *Physica Scripta*, **86**, 015201 (2012).
- [52] H. Geiger and J.M. Nuttall: The Ranges of the α -Particles from Various Radioactive Substances and a Relation Between Range and Period of Transformation, *Phil. Mag.* **22**, 613 (1911); H. Geiger: Reichweitemessungen α - Strahlen, *Z. Phys.* **8**, 45 (1922).
- [53] D.N. Poenaru, W Greiner e R. Gherghescu: New island of cluster emitters, *Phys. Rev. C* **47**, 2030 (1993).
- [54] D.N. Poenaru, R.A. Gherghescu e W. Greiner: Heavy-Particle Radioactivity of Superheavy Nuclei, *Phys. Rev. Letters.* **107**, 062503 (2011).
- [55] A. Guglielmetti , R. Bonetti, G. Poli , R. Collatz , Z. Hu , R. Kirchner , E. Roeckl, N. Gunn, P. B. Price , B. A. Weaver , A. Westphal e J. Szerypo : Nonobservation of ^{12}C cluster decay of ^{114}Ba , *Phys. Rev. C* **56**, R2912 (1997).