



## SEARA DA CIÊNCIA CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Bassalo



### Os Processos Radioativos.

Na sessão do dia 20 de janeiro de 1896 da Academia Francesa de Ciências, o matemático e físico francês Henri Poincaré (1854-1912) apresentou as primeiras fotografias de raios-X enviadas pelo físico alemão Wilhelm Conrad Roentgen (1845-1923; PNF, 1901), cujas descobertas dos mesmos havia por ele sido feita em 1895 (vide verbete nesta série). Presente a essa sessão, o físico francês Antoine Henry Becquerel (1852-1908) perguntou a Poincaré de que parte do tubo de Hittorf que Roentgen utilizara, haviam saído esses raios. Da parte oposto ao catodo, que se tornara fluorescente, respondeu Poincaré. Sendo especialista de luminescência (fluorescência e fosforescência) (vide verbete nesta série), especialidade que aprendera com seu avô e seu pai, respectivamente, os físicos franceses Antoine César (1788-1878) (que escreveu 559 trabalhos científicos, seis livros-texto, sendo um deles com sete volumes) e Edmond (1820-1891) (o primeiro a fotografar o espectro solar, projetar um fluoroscópio e medir a intensidade e a duração da fluorescência do urânio), Henri passou a realizar experiências procurando uma relação entre as substâncias fluorescentes e a emissão dos raios-X por parte das mesmas. Não encontrou tal relação, no entanto, descobriu um novo fenômeno físico. Vejamos como. Em fevereiro de 1896, Henri observou que cristais de sulfato de urânio-potássio [uranilo ( $\text{UO}_2$ )] eram capazes de impressionar uma chapa fotográfica recoberta com papel escuro, estando o conjunto exposto à luz solar. Como na primeira experiência que realizou, havia submetido o conjunto aos raios solares; a explicação que deu para o fato de haver sido impressionada a chapa fotográfica, foi de que a luz solar havia provocado fluorescência nos cristais com a emissão de raios-X que, por sua vez, atravessaram o papel escuro que envolvia os cristais, indo, por conseguinte, impressionar a chapa fotográfica. Em uma outra experiência, realizada no dia 1 de maio de 1896 e, desta vez, sem uso da luz solar (provavelmente em um dia chuvoso de Paris), o fenômeno se repetiu. Henri concluiu então que o composto emitia certos “raios” descobrindo, dessa forma, um novo fenômeno físico. Por essa descoberta, compartilhou com o Casal Curie [o químico e físico francês Pierre (1859-1906) e a química e física polonesa Marya (Marie) Sklodowska (1867-1934)], o Prêmio Nobel de Física (PNF) de 1903. Registre-se que essa descoberta de Becquerel foi por ele publicada em 1896 [Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Academie des Sciences de Paris (CRHSASP) 122, pgs. 420; 501].

É oportuno salientar alguns fatos curiosos relativos a essa descoberta. Segundo afirma o físico e historiador da ciência, o norte-americano Tony Rothman, em seu livro Tudo é Relativo e Outras Fábulas da Ciência e Tecnologia (DIFEL, 2005), a primeira observação sobre esse novo fenômeno da natureza foi realizada pelo químico e militar francês Claude-Félix-Abel Niepce de Saint-Victor (1805-1870). Ela foi comunicada à Academia Francesa de Ciências, em 16 de novembro de 1857 (Comptes Rendus de l'Academie des Sciences de Paris 45, p. 811), pelo químico francês Michel Eugène Chevreul (1786-1889). Em suas experiências, Niepce expunha, à luz solar, placas cobertas com uma variedade de substâncias químicas, depois de cobri-las com papel fotográfico e colocá-las em uma gaveta escura, por vários dias. Para seu espanto, ainda segundo Rothman, ele descobriu que certas substâncias expunham o papel fotográfico na escuridão absoluta. Em 1858 (CRHSASP 46, pgs. 448; 866; 1002), em novas apresentações àquela Academia, ele afirmou que para obtenção de uma imagem fotográfica rápida e “vigorosa”, era necessário impregnar um pedaço de papel com nitrato de urânio [ $(\text{NO}_3)_2(\text{UO}_2)$ ], exatamente um dos sais de urânio (U) que Becquerel também utilizou em suas experiências.

Por sua vez, o físico e historiador da ciência, o brasileiro Roberto de Andrade Martins (n.1950), em artigo publicado na Ciência & Educação 10, p. 501 (2004), registra que a descoberta de Becquerel foi realizada simultaneamente pelo físico e engenheiro elétrico Silvanus Phillips Thompson (1851-1916), também em 1896 (Nature 53, p. 437; Report of the 66th Meeting of the British Association for the Advancement of

Science 66, p. 713; The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science 5, p. 103). Em 28 de fevereiro de 1896, Thompson escreveu uma carta ao físico e matemático inglês Sir George Gabriel Stokes (1819-1903) na qual descreveu uma observação interessante que havia feito, qual seja, a de que uma substância fosforescente como o sulfeto de bário (BaS), exposto à luz solar, emite uma radiação idêntica aos raios-X capaz de atravessar o alumínio ( $Al$ ) e agir sobre uma chapa fotográfica. A essa radiação, Thompson deu o nome de hiperfosforescência. Nos trabalhos de Thompson citados acima, ele afirmou que encontrou essa mesma radiação em vários materiais luminescentes bem conhecidos, destacando sulfeto de cálcio (CaS), espato da Islândia, sulfeto de zinco (ZnS), fluoreto de urânio (UF) e de amônio ( $NH_4F$ ), e diversos platino-cianetos. Note-se que após receber a carta de Thompson, Stokes respondeu-lhe: Sua descoberta é extremamente interessante; presumo que você a publicará sem demora, especialmente porque muitos estão agora trabalhando com raios X. Para maiores detalhes do trabalho de Thompson e de Becquerel, ver o artigo de Martins.

Os fatos curiosos registrados acima colocam em dúvida a afirmação feita pelo físico, químico e filósofo da ciência, o inglês John Desmond Bernal (1901-1971) em seu famoso livro *Historia Social de la Ciencia II* (Ediciones Península, 1968): Se Becquerel tivesse realizado suas experiências com sulfeto de zinco ao invés do nitrato de urânio, talvez a descoberta da radioatividade sofresse um atraso de pelo menos cinquenta anos.

Agora, vejamos as conseqüências dessa importante descoberta de Saint-Victor, Becquerel e Thompson. Em fins de 1897, Madame Curie folheou os CRHSASP em busca de um assunto para a sua Tese de Doutorado e deteve-se diante dos trabalhos de Becquerel. Imediatamente passou a estudar os “raios de Becquerel”, expressão usada inicialmente por ela própria. Para tal estudo, utilizou a piezoelectricidade que havia sido descoberta por seu marido Pierre Curie (eles casaram em 1895) juntamente e seu irmão, o químico francês Paul-Jacques Curie (1855-1941), em 1880. Os “raios de Becquerel” ionizavam o ar e o tornavam capaz de conduzir corrente elétrica. Essa corrente era detectada por um galvanômetro, podendo, no entanto, ser neutralizada por intermédio de um potencial piezoelétrico gerado pela pressão de um cristal. O valor dessa pressão media a intensidade dos “raios de Becquerel”. Ao estudar o tório (Th), em 1898, Madame Curie observou que esse elemento químico se comportava como o urânio de Becquerel. Foi por essa ocasião que Madame Curie denominou de radioatividade a esse novo fenômeno físico. No prosseguimento de suas pesquisas sobre esse novo fenômeno físico, agora auxiliada por Pierre Curie, passou a estudar a “pechblenda”, isto é, óxido de urânio [cuja primeira tonelada foi-lhes ofertada pelo governo austríaco, proprietário que era das minas de urânio (U) de Saint Joachimsthal, na Boemia). Com esse estudo, o casal Curie conseguiu isolar um novo elemento químico, vizinho do bismuto (Bi), ao qual chamou de polônio (Po) em homenagem à pátria de Madame Curie. Tal descoberta foi anunciada nos CRHSASP 127, p. 1001, de julho de 1898. No CRHSASP 127, p. 1215, de dezembro de 1898, o casal Curie, com a colaboração do químico francês Gustave Bémont (1857-1932), anunciou a existência de um outro elemento radioativo: o rádio (Ra). Note-se que para detectar a radioatividade emitida por este novo elemento químico, foi necessário o estudo espectroscópico do físico e químico francês Eugène Anatole Demarçay (1852-1904), já que a quantidade daquele elemento era diminuta que só podia ser detectada como impureza. Por essa descoberta, Madame Curie recebeu o Prêmio Nobel de Química (PNQ) de 1911.

A descoberta dos raios-X por Roentgen, em 1895, conforme vimos, levou o físico inglês Ernest Rutherford, Lord Rutherford de Nelson (1871-1937) a medir a ionização provocada por esses raios, trabalho [Philosophical Magazine 42, p. 392 (1896)] esse que fez como colaborador do físico inglês Sir Joseph John Thomson (1856-1940; PNF, 1906) – o descobridor do elétron ( $e^-$ ) – de quem Rutherford era pesquisador-estudante no Laboratório Cavendish, em Londres. Por outro lado, a descoberta da radioatividade por Henri Becquerel, em 1896, referida anteriormente, levou Rutherford a um outro aspecto de suas pesquisas, qual seja, a de medir a ionização provocada pelos “raios de Becquerel” fazendo-os passar através de folhas metálicas. Neste seu trabalho, descobriu, em 1898 (Proceedings of the Cambridge Philosophical Society 9, p. 401), que os “raios Becquerel” eram constituídos de dois tipos de partículas: alfa ( $\alpha$ ), carregada positivamente, e beta ( $\beta$ ), carregada negativamente. Em 1899, em trabalhos independentes, Becquerel (CRHSASP 129, p. 996), os físicos austríacos Stefan Meyer (1872-1949) e Egon Ritter von Schweidler (1873-1948) (Physikalische Zeitschrift 1, p. 113), e o físico alemão Frederick Otto Giesel (1852-1927) (Annalen der Physik 69, p. 834), observaram a deflexão magnética sofrida por essas partículas. Em 1900

(CRHSASP 130, p. 809), Becquerel mostrou que os raios  $\beta$  eram raios catódicos, isto é, elétrons. Ainda em 1900 (CRHSASP 130, pgs. 1010; 1178), o físico francês Paul Villard (1860-1934) observou que a radioatividade possuía uma terceira parcela que não era defletida pelo campo magnético, parcela essa penetrante e semelhante aos raios-X., à qual Rutherford denominou de gama ( $\gamma$ ). Essa descoberta foi confirmada por Becquerel, também em 1900 (CRHSASP 130, p. 1154).

Em 1900 (Philosophical Magazine 49, p. 1), Rutherford observou que havia uma certa irregularidade no produto gasoso radioativo que escapava do tório (Th). Por haver incerteza na natureza desse produto radioativo, Rutherford deu a esse “novo” gás o nome de emanção. Foi nesse trabalho que ele introduziu o conceito de meia-vida (T) – o tempo que uma amostra radioativa leva para reduzir-se à metade da amostra. Para chegar a esse conceito, Rutherford percebeu que se  $N(t)$  é o número de átomos radioativos no instante  $t$ , então o decréscimo desse número ( $dN$ ) em um intervalo de tempo ( $dt$ ) é dado por:

$dN/dt = -\lambda N \rightarrow N(t) = N(0) \exp(-\lambda t)$ , onde  $\lambda$  representa a constante radioativa, sendo uma característica de cada elemento radioativo. Portanto, observou ainda Rutherford, quando  $N(t)/N(0) = \exp(-\lambda t) = 1/2$ , então  $t = T$  e, portanto,  $\lambda = 0,693/T$ . Para o radônio-220 (Rn<sup>220</sup>), ele calculou que  $T = 60$  s (valor atual: 56 s). É oportuno registrar que os físicos alemães Johan Philipp Ludwig Julius Elster (1854-1920) e Hans Geitel (1855-1923), em 1898 (Annalen der Physik 66, p. 735) e 1903 (Annalen der Physik 69, p. 83), realizaram experiências nas quais observaram essa “lei de desintegração radioativa”. Em 1905, von Schwiedler obteve essa lei por intermédio da Teoria das Probabilidades e apresentou-a no Premier Congrès de Radiologie.

Sobre Elster e Geitel, é oportuno registrar um episódio anedótico anotado pelo físico e historiador da ciência, o holandês-norte-americano Abraham Pais (1918-2000) em seu livro *Inward Bound: Of Matter and Forces in the Physical World* (Clarendon Press e Oxford University Press, 1995). Elster e Geitel eram amigos inseparáveis desde quando estudaram e ensinaram no Gymnasium, localizado em Wolfenbüttel, próximo de Braunschweig. Em um certo dia, uma pessoa aproximou-se de uma outra que era muito parecida com Geitel, e disse-lhe: Bom dia, Herr (Senhor) Elster. A pessoa respondeu: Em primeiro lugar, eu não sou Elster e sim Geitel; em segundo lugar, eu não sou Geitel. É ainda oportuno dizer que esses dois físicos realizaram trabalhos importantes, a grande maioria deles publicados em conjunto, que lhes valeram a indicação para o PNF, em 1905, 1907, 1908, 1910 e 1911. Nunca ganharam!

Voltemos aos trabalhos de Rutherford. Em 1902 (Philosophical Magazine 4, pgs. 370; 569), agora ensinando e pesquisando na Universidade de McGill, em Montreal, Canadá, juntamente com o químico inglês Frederick Soddy (1877-1956; PNQ, 1921), formularam a teoria de que cada processo radioativo é uma transmutação de elementos. [Aliás, a primeira transmutação de elementos sem ser por processo radioativo foi obtida pelo próprio Rutherford, em 1919 (Philosophical Magazine 47, pgs. 537; 571; 5811), ao realizar uma reação nuclear, na qual uma partícula  $\alpha$  ao atravessar um cilindro contendo gases, principalmente nitrogênio (N), havia transmutado este em oxigênio (O) com a emissão de um próton (p), em uma reação do tipo:

${}_2\text{He}^4(\alpha) + {}_7\text{N}^{14} \rightarrow {}_8\text{O}^{17} + {}_1\text{H}^1(\text{p})$ . Graças a essa reação, Rutherford é considerado o descobridor do próton.]

Em 1909 (Philosophical Magazine 17, p. 281), já de volta à Inglaterra, Rutherford, com a colaboração do químico inglês Thomas Royds (1884-1955), por intermédio de métodos espectroscópicos, demonstrou que as partículas alfa eram átomos de hélio (He) duplamente ionizados. Os trabalhos de Rutherford sobre a natureza da radioatividade valeram-lhe o PNQ de 1908.

É oportuno esclarecer que a explicação física do decaimento alfa (emissão de partículas  $\alpha$  por núcleos radioativos) só foi conseguida por intermédio da Mecânica Quântica, e foi apresentada em 1928, pelos físicos, o norte-americano Edward Uhler Condon (1902-1974) e o inglês Ronald Wilfrid Gurney (1898-1953) (Nature 122, p. 439) e, independentemente, pelo russo-norte-americano George Gamow (1904-1968) (Zeitschrift für Physik 51, p. 204), ao resolverem o problema do decaimento alfa, usando o efeito túnel, segundo o qual uma partícula pode vencer uma barreira de potencial, com energia menor que a do pico da barreira. Nessa formulação, eles conseguiram, inclusive, estimar a vida-média dos elementos radioativos.

Passemos, agora, a analisar outros processos radioativos decorrentes de experiências realizadas envolvendo colisão de partículas com alvos fixos. O primeiro deles foi a descoberta da radioatividade artificial realizada pelo casal de físicos franceses, Irène (1897-1956) e Jean Frédéric Joliot-Curie (1900-1958), em janeiro de 1934, ao bombardearem alumínio ( $Al$ ) com partículas alfa. Após removerem a fonte dessas partículas, esse casal observou que o alvo de alumínio, depois de expelir nêutrons, continuava a emitir radiações. Ainda em 1934 (Comptes Rendus l'Academie des Sciences de Paris 198, pgs. 254; 559, Nature 133, p. 201), eles interpretaram essas radiações como provenientes do isótopo do fósforo –  $P^{30}$ , não encontrado na natureza, e que acabara de se formar em decorrência de uma reação nuclear do tipo (em notação atual):  ${}_2He^4 + {}_{13}Al^{27} \rightarrow {}_{15}P^{30} + {}_0n^1$  com  ${}_{15}P^{30} \rightarrow {}_{14}Si^{30} + e^+$  ( $T = 3,25$  min). Os isótopos radioativos artificiais assim formados passaram a denominar-se de radioisótopos. É oportuno salientar que o casal Joliot-Curie esteve próximo de grandes descobertas científicas por quatro vezes: a primeira, por ocasião da descoberta do nêutron ( $n$ ) pelo físico inglês Sir James Chadwick (1891-1974), em 1932; a segunda, por ocasião da descoberta do pósitron ( $e^+$ ) pelo físico norte-americano Carl David Anderson (1905-1991), também em 1932; a terceira, por ocasião da descoberta da captura eletrônica, atribuída ao físico norte-americano Luís Walter Alvarez (1911-1988), em 1938; e a quarta, por ocasião da descoberta do neutrino ( $\nu$ ). Este, muito embora houvesse sido previsto teoricamente pelo físico austro-norte-americano Wolfgang Pauli Junior (1900-1958) em 1930, somente foi descoberto em 1956, pelos físicos norte-americanos Frederick Reines (1918-1998) e Clyde Lorrain Cowan Junior (1919-1974). Pois bem, nas experiências realizadas pelo casal Joliot-Curie e relacionadas, basicamente, com o bombardeamento de elementos leves por partículas alfa, estavam envolvidos processos de desintegração beta-menos ( $\beta^-$ ) (o nêutron desintegrando-se em um próton, com a emissão de um elétron e de seu neutrino associado); beta-mais ( $\beta^+$ ) (o próton desintegrando-se em um nêutron, com a emissão de um pósitron e de seu neutrino associado); e a captura eletrônica (captura de um elétron da camada K pelo próton do núcleo, com a formação de um nêutron e a emissão de um neutrino associado ao elétron). Desta forma, os nêutrons, pósitrons e neutrinos associados aos elétrons (pósitrons) apareciam nas experiências de Joliot-Curie como “radiações estranhas” que, no entanto, o casal não soube interpretá-las. É oportuno observar que Chadwick, Anderson, Pauli, Alvarez e Reines receberam, respectivamente, o PNF de 1935, 1936, 1945, 1968 e 1995 [este, compartilhado com o físico norte-americano Martin Lewis Perl (n.1927)]. O casal Joliot-Curie recebeu o PNQ de 1935.

Até aqui, vimos quatro (4) tipos de processos radioativos: decaimento- $\alpha$ , decaimento- $\beta^-$ , decaimento- $\beta^+$ , e decaimento por captura eletrônica. Em 1940 (Zhurnal Eksperimentalnoi i Teoreticheskoi Fiziki 9-10, p. 1013), os físicos russos Georgii Nikolaevich Flerov (1913-1990) e Konstantin Antonovich Petrzhak (1907-1998) descobriram que o urânio (U) não sofria a fissão somente quando bombardeado por nêutrons, mas que também sofria, lentamente sem interferência externa, por intermédio de um processo que foi chamado de fissão espontânea. Mais tarde, em 1955 (Soviet Physics JETP-USSR 1, p. 292), A. V. Podgurskaia, V. I. Kalashnikova, G. A. Stoliarov, E. D. Vorobev e Flerov, descobriram a fissão espontânea do tório (Th).

É oportuno salientar que Flerov e seu grupo de pesquisa no Joint Institute for Nuclear Research, em Dubna, na então União Soviética, descobriu que núcleos em estado de excitação (isômeros) também eram capazes de sofrer fissão espontânea [ao invés de emitirem fóton gama ( $\gamma$ ), como é mais provável], fissão essa, aliás, que é característica apenas de núcleos pesados (actinídeos e transactinídeos), sendo a taxa de desintegração proporcional à massa dos elementos químicos. Assim, por exemplo, eles observaram que essa taxa cresce de  $10^8$  do tório ( ${}_{90}Th$ ) ao kurchatóvio ( ${}_{104}Ku$ ). Por outro lado, a taxa de decaimento do amerício ( ${}_{95}Am$ ) excitado é  $10^8$  maior do que a do mesmo elemento em seu estado fundamental. É ainda oportuno fazer um comentário sobre a descoberta desses núcleos pesados. Em 1960 (Soviet Physics JETP-USSR 11, p. 61), Flerov, S. M. Polikanov, A. S. Karamyan, A. S. Pasyuk, D. M. Parfanovich, N. I. Tarantin, Víctor A. Karnaukhov, V. A. Druin, V. V. Volkov, A. M. Semchinova, Y. T. Oganessian, V. I. Khalizev, G. I. Khlebnikov, B. F. Myasoedov e K. A. Gavrillov produziram o elemento-102, mais tarde denominado de nobélio ( ${}_{102}No$ ). [Esse elemento químico foi descoberto pelos químicos norte-americanos Albert Ghiorso (n.1915) (descobridor de vários elementos actinídeos e transactinídeos), T. Sikkeland, J. R. Walton e Glenn Theodore Seaborg (1912-1999; PNQ, 1951) (descobridor de vários elementos transurânicos), em 1958 (Physical Review Letters 1, p. 18).] Em 1964 (Soviet Physics JETP-USSR 18, p. 964), Flerov, Polikanov,



Gavrilov, V. L. Mikheev, V. P. Pereygin e A. A. Pleve bombardearam plutônio ( ${}_{94}\text{Pu}^{242}$ ) com íons de neônio ( ${}_{10}\text{Ne}^{22}$ ) e produziram um novo elemento químico ( $Z=104$ ), com uma vida média de 0.3 s. A esse novo elemento deram o nome de kurchatóvio ( ${}_{104}\text{Ku}^{260}$ ), para homenagear o físico russo Igor Vasilievich Kurchatov (1903-1960), responsável pela explosão da Bomba Atômica Soviética, em 1949. Por sua vez, em 1969 (Physical Review Letters 22, p. 1317), Ghiorso, M. Nurmia, J. Harris, K. Eskola e P. Eskola, pesquisadores do Lawrence Radiation Laboratory, em Berkeley, Califórnia, bombardearam um alvo de califórnio ( ${}_{98}\text{Cf}^{249}$ ) com íons de carbono ( ${}_{6}\text{C}^{12}$ ) e produziram também o elemento de  $Z=104$ , com uma vida média de 4-5 s, e que era diferente do elemento produzido pelo grupo de Flerov. Para homenagear Rutherford, esses pesquisadores deram o nome de rutherfordio ( ${}_{104}\text{Rf}^{257}$ ). Depois de vários anos de disputa sobre qual seria o nome desse primeiro transactínido, a partir de 1994 ele ficou com o nome do descobridor do núcleo atômico, conforme o Dicionário Rossetti de Química.

Tratemos agora de um novo tipo de radioatividade, a radioatividade por emissão de próton. Em 1951, o físico e químico russo Vitalii Iosifovich Gol'danskii (1923-2001) desenvolveu uma teoria para esse novo tipo de radioatividade por emissão de próton, usando para isso a invariância isotópica das forças nucleares. A primeira evidência desse tipo de radioatividade foi observada pelo físico inglês Sir Ernest Marsden (1889-1970), em 1914 (Philosophical Magazine 27, p. 824), em suas experiências sobre a interação de partículas alfa com hidrogênio. Nessas experiências, Marsden notou que as cintilações emitidas pelas partículas H (como se chamavam os núcleos de hidrogênio naquela época) permaneciam mesmo quando a fonte de partículas alfa era encerrada em uma ampola de vidro ou de silício (Si) não contendo nenhum traço de hidrogênio. A primeira idéia que lhe ocorreu para explicar tal fenômeno foi a de que a fonte de  $\alpha$  era responsável pela emissão das partículas H.

Ainda em 1951, o físico russo Boris Dzelepov passou a estudar esse novo tipo de radioatividade. No entanto, suas conclusões foram desconcertantes, pois descobriu que a radioatividade por prótons só poderia se manifestar em isótopos de núcleos leves e deficientes de nêutrons, isto é, em núcleos estáveis. Tais núcleos deveriam eliminar os prótons suplementares para ter uma relação próton-nêutron próximo da unidade, como acontece com os núcleos estáveis. Em 1962, Karnaukhov, em Dubna (que já havia realizado um trabalho teórico sobre a radioatividade a um próton, em 1959), começou a estudar, juntamente com seus colaboradores, a radioatividade por emissão de prótons retardados (fissão nuclear retardada). Esse estudo foi logo acompanhado por Robert Bell e colaboradores, em Montreal, em 1963, e por E. E. Berlovichi e Yu. N. Nokivov, em Leningrado, em 1969 (Doklady Akademii Nauk SSSR 185, p. 1025). Em 1970, o volume 33B da Physics Letters, trouxe dois trabalhos distintos sobre a descoberta experimental da radioatividade a um próton: o de K. P. Jackson, C. U. Cardinal, H. C. Evans, N. A. Jelley e J. Cerny (p. 281), e o de Cerny, J. E. Esternl, R. A. Gough e R. G. Sextro (p. 284). Gol'danskii começa seus trabalhos teóricos sobre a radioatividade a dois prótons, a partir de 1965, e o volume 50 (p. 404) da Physical Review Letters de 7 de fevereiro de 1983, apresenta um artigo de M. D. Cable, J. Honkanen, R. F. Parry, S. H. Zhou, Z. Y. Zhou e Cerny, do Lawrence Berkeley Laboratory, sobre a descoberta experimental da radioatividade a dois prótons exibida pelo alumínio-22 ( ${}_{22}\text{Al}^{13}$ ). [Para maiores detalhes sobre as radioatividades, consultar o artigo de Gol'danskii, em La Recherche 28, p. 949 (1972) e, também, as Apostilas de Dona Fifi, neste site.]

Ao finalizarmos este verbete sobre os processos radioativos, é oportuno salientarmos que os pesquisadores H. J. Rose e G. A. Jones, do Departamento de Física Nuclear da Universidade de Oxford, anunciaram na Nature 307, p. 245 (1984), uma possível nova forma de radioatividade natural. Em estudo sistemático que esses dois pesquisadores fizeram das propriedades dos elementos mais pesados que o chumbo (Pb), observaram a emissão de carbono-14 ( ${}_{14}\text{C}^6$ ) por parte de núcleos de radônio-223 ( ${}_{223}\text{Rn}^{86}$ ).

