

# APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE COINCIDÊNCIA GAMA-GAMA NO LFNA-CRPQ

*Guilherme S. Zahn, Frederico A. Genezini, Iberê S. Ribeiro Jr.*

Centro do Reator de Pesquisas – IPEN-CNEN/SP  
Av. Professor Lineu Prestes, 2242  
05508-000 São Paulo – SP  
gzahn@ipen.br

## RESUMO

As técnicas de coincidência  $\gamma$ - $\gamma$  consistem no uso de mais de um detector para registrar a radiação proveniente de alguma amostra, registrando-se apenas os eventosem que fótons foram registrados em mais de um detector. Essa técnica foi trazida ao Laboratório de Física Nuclear Aplicada (LFNA-CRPq) em decorrência da experiência em trabalhos anteriores em estrutura nuclear, e permite uma redução significativa no BG dos espectros, bem como nas interferências espectrais encontradas. Neste trabalho será apresentada uma pequena introdução ao uso da técnica, bem como o estado atual de sua implementação no LFNA-CRPq, possíveis aplicações e perspectivas futuras.

## 1. INTRODUÇÃO

Medidas de radiação em coincidência são uma ferramenta extremamente útil no arcabouço dos estudos de física nuclear [1,2]. Neste tipo de medida, um evento só é registrado caso um segundo evento seja registrado em outro detector, o que permite aumentar a compreensão do decaimento radioativo ou então reduzir significativamente o número de eventos registrados, em especial os eventos que não estejam associados ao decaimento radioativo da fonte em estudo.

Entre os diversos tipos de medidas em coincidência, a coincidência  $\gamma$ - $\gamma$  caracteriza-se pelo uso de mais de um detector de fótons, sem o emprego de detectores de partículas. Este tipo específico de medida idealmente restringe-se a registrar decaimentos em que haja a emissão de mais de um fóton, reduzindo muito a quantidade de decaimentos que serão registrados, bem como suprimindo fortemente a presença de fótons de bremsstrahlung na medida.

Além destas características, a coincidência  $\gamma$ - $\gamma$  permite estudar a estrutura nuclear do nuclídeo analisado, uma vez que a existência de uma coincidência exige que os fótons emitidos pertençam a uma mesma cascata de decaimento [3], sendo ferramenta fundamental neste tipo de estudo.

## 2. A TÉCNICA DE COINCIDÊNCIA GAMA-GAMA

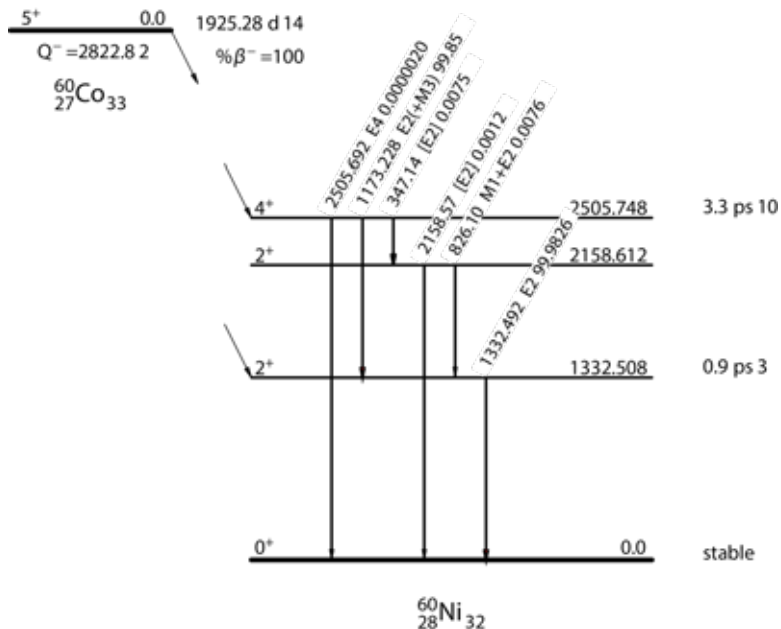
Quando um núcleo radioativo decai, ele gera um núcleo-filho que, na maioria das vezes, está em estado excitado, emitindo uma ou mais radiações gama para decair até o estado fundamental [1]. Na Figura 1 temos um exemplo de decaimento radioativo, no caso do  $^{60}\text{Co}$  para o  $^{60}\text{Ni}$ ; como se vê, neste caso há múltiplas possibilidades de combinação de emissões:

$\beta^-$  seguida de um  $\gamma$  (de 2506 ou 1332 keV, dependendo da energia do  $\beta$ ) ou  $\beta^-$  seguida de múltiplas emissões  $\gamma$  (1173+1332 keV, 347+2159 keV ou ainda 347+826+1332 keV). Analisando as possibilidades, a emissão de 2506 keV jamais será emitida junto com outra radiação gama, a de 1173 keV sempre será emitida juntamente com a de 1332 keV (mas nunca com nenhuma outra), entre outras combinações possíveis. Isto significa que, quando este decaimento for analisado usando-se a técnica de coincidência  $\gamma$ - $\gamma$ , a emissão de 2506 keV não será vista, enquanto as demais serão vistas sempre em pares (ou multiplicidades superiores), acompanhadas daquelas emissões que estejam na mesma cascata. Pode-se perceber, deste modo, que a técnica de coincidência gama-gama é fundamental no estudo da estrutura nuclear, uma vez que permite, pelo estudo dos pares de emissões

registrados em conjunto, determinar quais as cascatas possíveis e, a partir desta informação, inferir os estados excitados presentes na estrutura daquele núcleo\*.

Para além da sua utilidade em estudos de estrutura nuclear, a técnica de coincidência  $\gamma\text{-}\gamma$  pode ser utilizada para distinguir entre emissões gama de energias muito próximas – por exemplo, uma emissão de aproximadamente 136 keV pode acontecer tanto no decaimento do  $^{75}\text{Se}$  como do  $^{181}\text{Hf}$ ; uma de 264 keV pode ocorrer tanto no decaimento do  $^{75}\text{Se}$  quanto do  $^{182}\text{Ta}$ , entre diversas outras *interferências espectrais* possíveis, de modo que o estudo das emissões detectadas coincidentemente permite diferenciar entre as possíveis origens. Além disso, a técnica de coincidência  $\gamma\text{-}\gamma$  também reduz massivamente o contínuo sob os picos e a influência dos raios-x de bremsstrahlung no espectro.

**Figura 1** – Esquema de decaimento do  $^{60}\text{Co}$ , mostrando as emissões beta possíveis (setas diagonais à esquerda), os níveis excitados do  $^{60}\text{Ni}$  que podem ser povoados, bem como as emissões gama possíveis (setas verticais).



Fonte: Extraído de [4].

## 2.1 Experiências anteriores do LFNA com coincidência gama-gama

A equipe do LFNA é composta, essencialmente, por pesquisadores que desenvolveram seus primeiros trabalhos na área de estrutura nuclear, onde travaram contato com sistemas de coincidência de diversos tipos. Em especial,

os pesquisadores Frederico Genezini e Guilherme Zahn trabalharam durante sua formação com sistemas de coincidência  $\gamma$ - $\gamma$  aplicados ao estudo da estrutura de diversos núcleos, tanto em experimentos em aceleradores de partículas [5] como em experimentos *off-beam* empregando radionuclídeos produzidos por irradiação com nêutrons [6-8].

Ao longo dos anos, a experiência adquirida com sistemas de aquisição para coincidência  $\gamma$ - $\gamma$ , muito mais complexos que os sistemas de aquisição *uniparamétricos* empregados em espectroscopia gama simples, serviu de apoio para o desenvolvimento de diversas aplicações de sistemas de coincidência para medidas em física aplicada [9,10].

## 2.2. Alguns resultados relevantes obtidos com o sistema de coincidência gama-gama e perspectivas futuras

No trabalho de Ribeiro Jr. [11], verificou-se que o uso da técnica de Análise por Ativação Neutrônica (NAA) com medidas em coincidência permitiu determinar com boa precisão e exatidão concentrações de Sc, Co, Cs, Se, As, La, Sb e Sm, mesmo em matrizes altamente complexas – ao custo de tempos de aquisição bem mais longos, é importante que se diga.

Uma possibilidade que está sendo estudada atualmente é a de medir elementos-traço em matrizes ricas em Na, Cl e P, nas quais geralmente o contínuo gerado por bremsstrahlung e Compton impede as análises. Outras potencialidades a serem exploradas são o uso do sistema de coincidência gama-gama para determinação direta do grau de enriquecimento de urânio, que dispensa considerações sobre o equilíbrio da cascata, e a determinação de atividades extremamente baixas.

## 3. CONCLUSÕES

O desenvolvimento de um sistema de detecção gama-gama em coincidência no LFNA apresentou diversas dificuldades ao longo do percurso, mas foi concluído satisfatoriamente. O uso do sistema mostrou-se positivo para a análise de diversos elementos por NAA, entregando resultados superiores ao da NAA convencional.

Os próximos desafios a serem enfrentados no uso desse sistema incluem a determinação de fontes extremamente fracas, em que a redução da contribuição da radiação de fundo obtida pela técnica pode ser extremamente valiosa, e também a determinação de elementos-traço em matrizes em que a contribuição dos efeitos Compton e bremsstrahlung impede a análise tradicional.

## REFERÊNCIAS

1. KNOLL, G. F. *Radiation detection and measurement*. 4<sup>th</sup> ed. New York: John Wiley & Sons, 2010.
2. LEO, W. R. *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*. Berlin/Germany: Springer, 1994.
3. SIEGBAHN, K. (ed.), *Alpha-, Beta- and Gamma-Ray Spectroscopy*. Amsterdam/Holland: North-Holland, 1965.
4. BROWNE, E.; TULI, J. K. Nuclear Data Sheets for A=60. *Nucl. Data Sheets*, v. 114, p. 1849, 2013.
5. RIZZUTTO, M. A. *et al.* High spin states above the 28<sup>-</sup> isomer in <sup>152</sup>Ho. *Phys. Rev. C*, v. 55, p. 1130-1136, 1997.
6. GENEZINI, F. A. *Estudo do decaimento beta dos núcleos <sup>101</sup>Mo e <sup>101</sup>Tc*. 1999. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 1999.
7. GENEZINI, F. A. *Estrutura nuclear do <sup>155</sup>Eu*. 2004. Tese (Doutorado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2004.
8. ZAHN, G. S. *Estudo do decaimento  $\beta^-$  do <sup>193</sup>Os*. 2006. 106 p. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear – Aplicações) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2006. DOI: 10.11606/T.85.2006.tde-18052012-132711.
9. ZAHN, G. S.; GENEZINI, F. A.; ZAMBONI, B. B. Proposal of a methodology to measure neutron activation using gamma-gamma coincidence spectroscopy. *In: 2007 INTERNATIONAL NUCLEAR ATLANTIC CONFERENCE, 29/09-05/10 2007, Santos-SP. Proceedings [...]*, 2007.,
10. GENEZINI, F. A.; ZAHN, G. S.; ZAMBONI, C.B.; CRUZ, M. T. F. An alternative method to determine <sup>235</sup>U in environmental samples. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON NUCLEAR DATA FOR SCIENCE AND TECHNOLOGY, 22-27 abr. 2007, Nice/França. Proceedings[...]*, 2007.
11. RIBEIRO JR., I. S. *Uso de sistema de coincidência gama-gama associado à espectroscopia simples em medidas de Análise por Ativação Neutrônica*. 2019. 154 p. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear – Aplicações) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2019. DOI: <https://doi.org/10.11606/T.85.2019.tde-22072019-080949>.

12. ZEISLER, R. *et al.* On neutron activation analysis with  $\gamma$ - $\gamma$  coincidence spectrometry. *Journal of Radioanal. Nucl. Chem.*, 314, p. 513-519, 2017.
13. ZAHN, G. S.; GENEZINI, F. A.; RIBEIRO JR., I. AnalisaCAEN, a simple software suite to reduce and analyze coincidence data collected using CAENv1724 digitizer. *J. Phys.: Conf. Ser.*, v. 1291, p. 012044, 2019.
14. ZAHN, G. S.; RIBEIRO JR., I.; GENEZINI, F. A. Pile-up correction for coincidence counting using a CAEN 1724 digitizer. *Brazilian Journal of Radiation Sciences*, v. 7, p. 1, 2019.