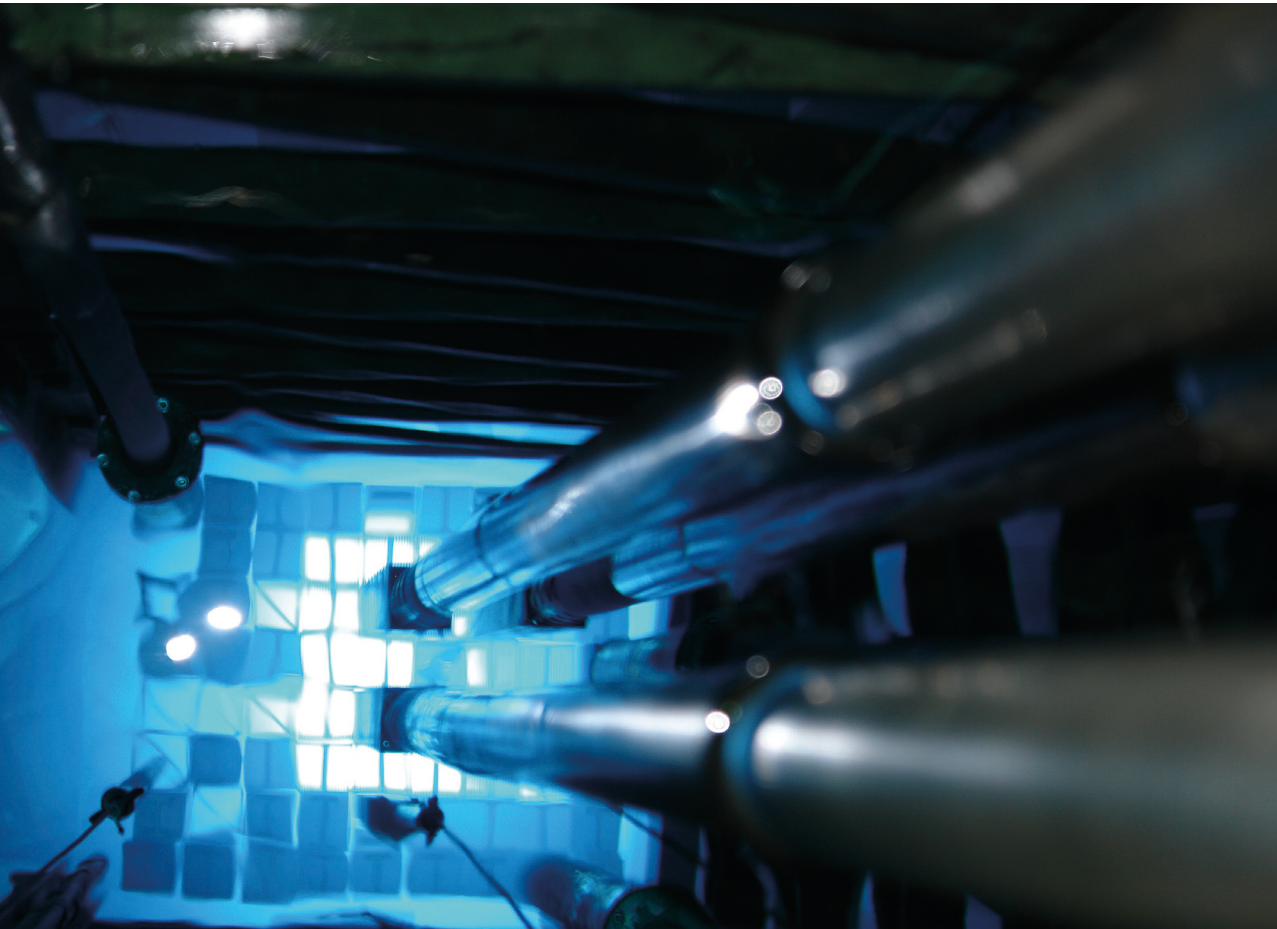


Paulo Sergio Cardoso Da Silva
Guilherme Soares Zahn
Francisco De Assis Souza
organizadores

CONTRIBUIÇÕES DO REATOR IEA-R1 PARA A PESQUISA NUCLEAR

WARP2: II Workshop Anual do Reator de Pesquisas



CONTRIBUIÇÕES DO
REATOR IEA-R1 PARA A
PESQUISA NUCLEAR

Conselho editorial

André Costa e Silva

Cecilia Consolo

Dijon de Moraes

Jarbas Vargas Nascimento

Luis Barbosa Cortez

Marco Aurélio Cremasco

Rogerio Lerner

Blucher Open Access

PAULO SERGIO CARDOSO DA SILVA
GUILHERME SOARES ZAHN
FRANCISCO DE ASSIS SOUZA
(organizadores)

CONTRIBUIÇÕES DO
REATOR IEA-R1 PARA A
PESQUISA NUCLEAR
WARP2: II Workshop Anual do
Reator de Pesquisas

21 e 22 de novembro de 2019
Centro do Reator de Pesquisas
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares

2022

Contribuições do Reator IEA-R1 para a Pesquisa Nuclear

WARP2: II Workshop Anual do Reator de Pesquisas

© 2022 Paulo Sergio Cardoso da Silva, Guilherme Soares Zahn e Francisco de Assis Souza

Editora Edgard Blücher Ltda.

Publisher Edgard Blücher

Editor Eduardo Blücher

Coordenação editorial Jonatas Eliakim

Produção editorial Thaís Costa

Diagramação Taís do Lago

Capa Laércio Flenic

Blucher

Rua Pedroso Alvarenga, 1245, 4º andar
04531-934 – São Paulo – SP – Brasil
Tel 55 11 3078-5366
contato@blucher.com.br
www.blucher.com.br

Segundo Novo Acordo Ortográfico, conforme 5. ed.
do *Vocabulário Ortográfico da Língua Portuguesa*,
Academia Brasileira de Letras, março de 2009.

É proibida a reprodução total ou parcial por quaisquer
meios, sem autorização escrita da Editora.

Todos os direitos reservados pela Editora
Edgard Blücher Ltda.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Angélica Ilacqua CRB-8/7057

Workshop anual do reator de pesquisas (2. : 2019 :
São Paulo)
Contribuições do reator IEA-R1 para a pesquisa
nuclear WARP 2 / organizado por Paulo Sergio Cardoso
da Silva, Guilherme Soares Zahn, Francisco de Assis
Souza. -- São Paulo : Blucher, 2022.
478 p : il.
21 e 22 de novembro de 2019 - Centro do Reator de
Pesquisas
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
Bibliografia
ISBN 978-65-5550-147-6 (impresso)
ISBN 978-65-5550-148-3 (eletrônico)
1. Pesquisa nuclear 2. Física nuclear I. Título II. Silva,
Paulo Sergio Cardoso da III. Zahn, Guilherme Soares IV.
Souza, Francisco de Assis IV. IPEN

21-5617

CDD 539.7

Índices para catálogo sistemático:

1. Pesquisa nuclear

COMITÊ ORGANIZADOR

Paulo Sergio Cardoso da Silva

Guilherme Soares Zahn

Francisco de Assis Souza

COMITÊ CIENTÍFICO

Paulo Sergio Cardoso da Silva

Guilherme Soares Zahn

Francisco de Assis Souza

Frederico Antônio Genezini

APOIO

O Comitê Organizador agradece o apoio do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), do Departamento de Ensino do IPEN e da Marinha do Brasil, para a realização do II Workshop Anual do Reator de Pesquisas.



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 γ - γ 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 γ - γ 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 γ - γ 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

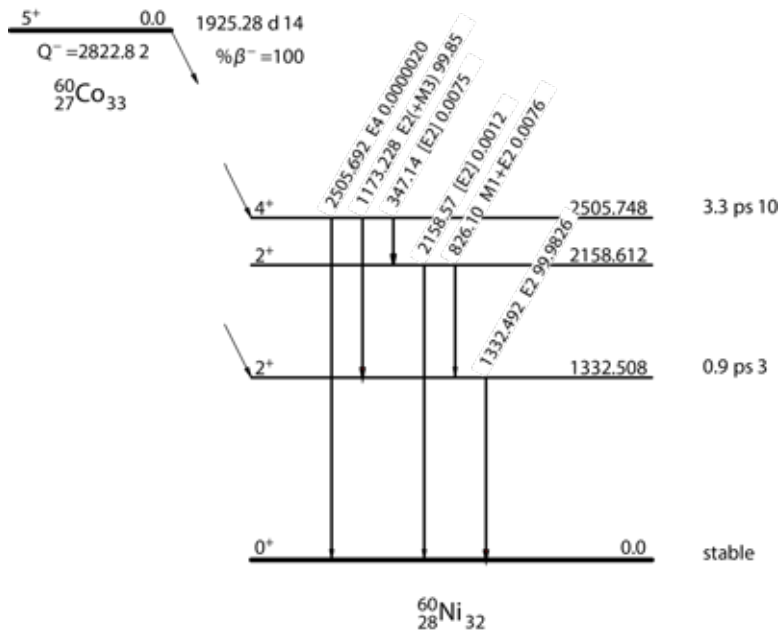
Quando um núcleo radioativo decai, ele gera um núcleo-filho que, na maioria das vezes, está em estado excitado, emitindo uma ou mais radiações gama para decair até o estado fundamental [1]. Na Figura 1 temos um exemplo de decaimento radioativo, no caso do ^{60}Co para o ^{60}Ni ; como se vê, neste caso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

β^- seguida de um γ (de 2506 ou 1332 keV, dependendo da energia do β) ou β^- seguida de múltiplas emissões γ (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 γ - γ , 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}Se como do ^{181}Hf ; uma de 264 keV pode ocorrer tanto no decaimento do ^{75}Se quanto do ^{182}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}Co , mostrando as emissões beta possíveis (setas diagonais à esquerda), os níveis excitados do ^{60}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 γ - γ 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 γ - γ , 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*. 4th 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⁻ isomer in ¹⁵²Ho. *Phys. Rev. C*, v. 55, p. 1130-1136, 1997.
6. GENEZINI, F. A. *Estudo do decaimento beta dos núcleos ¹⁰¹Mo e ¹⁰¹Tc*. 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 ¹⁵⁵Eu*. 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 β do ¹⁹³Os*. 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 ²³⁵U 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 γ - γ 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.