

# **Determinação Da Razão De Mistura Multipolar Pela Técnica De Correlação Angular Direcional $\gamma\gamma$**

## **Professores Responsáveis**

Dra. Cibele Bugno Zamboni, MSc. Sônia P. Camargo e MSc. José A. G. de  
Medeiros.

## **Participantes**

Ilca Marli M. Amaral Medeiros (IPEN), Marcos Amaku (IFUSP), Marcos  
Antonio Amaral Lins (UFPB) e Rogério Tramontano (IFUSP).

## **RESUMO**

A razão da mistura multipolar foi obtida para as transições gama no núcleo de  $^{72}\text{Ge}$  a partir de decaimento  $\beta^-$  do  $^{72}\text{Ga}$ , com  $T_{1/2} = 14,10$  h, utilizando um espectrômetro gama constituído pelos detectores de HPGe e Ge(Li), para quatro das transições observadas.

## INTRODUÇÃO

A Física Nuclear Experimental se ocupa em medir parâmetros que servem para testar os modelos e conseqüentemente elucidar as características da estrutura do núcleo. Desta forma, a determinação de parâmetros nucleares tais como: energia, spin, paridade, momentos nucleares, meia-vidas de níveis nucleares, bem como a determinação da razão da mistura multipolar de transições gama tem contribuído muito para um melhor entendimento da estrutura nuclear.

A determinação experimental de alguns destes parâmetros nucleares pode ser feita através de diversas técnicas de espectroscopia nuclear. Em particular, a técnica de correlação angular  $\gamma\gamma$ , ocupa uma posição relevante neste campo, devido ao emprego de detectores cada vez mais eficiente e de melhor resolução. Trata-se de uma técnica, fundamentada em medidas de coincidência entre radiações gamas sucessivas, que permite a determinação de spins e momentos magnéticos nucleares dos níveis envolvidos, bem como, a determinação da razão de mistura multipolar das diversas transições gamas.

A técnica da determinação da razão de mistura multipolar pela correlação angular direcional  $\gamma\gamma$  tem por base princípios gerais de simetria que levam em consideração a conservação do momento angular e da paridade. Esta técnica é atualmente empregada em diversas áreas da física e está bem estabelecida conforme mostra os artigos de Rose e Brink(1), Frauenfelder e Steffen(2), Biedenharn e Rose(3) e Steffen e Alder(4). Quanto a detalhes sobre técnicas experimentais são relevantes os trabalhos desenvolvidos por Hamilton(5) e Twin(6).

Neste trabalho, a técnica de correlação angular direcional  $\gamma\gamma$  foi utilizada para o cálculo da razão de mistura multipolar das transições  $\gamma$  de 629 keV, 894 keV, 2202 keV e 2508 keV pertencentes ao decaimento  $\beta^-$  do  $\text{Ga}^{72}$ .

## ASPECTOS TEÓRICOS

### CORRELAÇÃO ANGULAR DIRECIONAL $\gamma\gamma$

Quando um núcleo emite uma radiação gama, há uma dependência angular entre a direção de emissão e o spin nuclear. Entretanto, esta dependência não é observada em condições normais, pois a distribuição ao acaso da orientação desses spins, na amostra radioativa, provoca isotropia angular. É, portanto, necessário que esses spins sejam alinhados ou, então, que se selecione núcleos orientados em uma determinada direção criando o padrão anisotrópico, que consiste em fixar um detector na direção de emissão do fóton  $\gamma_1$ , selecionando um conjunto de núcleos com direção de spin especificado. O segundo gama emitido em sucessão,  $\gamma_2$ , mostra uma correlação angular definitiva em relação a  $\gamma_1$ .

Para que a correlação angular anisotrópica seja observada é necessário que o spin do estado intermediário ( $I'$ ) permaneça alinhado até a emissão de  $\gamma_2$ . Isso requer que a vida média do estado intermediária seja pequena ( $\tau \leq 10^{-10}$  seg) e que a forma física da amostra seja tal que não haja campos extra nucleares perturbando a orientação do spin intermediário da cascata. Nestas condições, a correlação é denominada correlação angular direcional não perturbada e permite a obtenção de dados que fornecem informações sobre spins dos níveis nucleares e multipolaridades das transições gama envolvidas.

A função correlação angular direcional que descreve a dependência angular das coincidências  $\gamma\gamma$  é dada por (7):

$$\omega(\theta) = \sum_K A_{KK} P_K \cos(\theta) \quad (1)$$

com K par, onde :

$A_{KK}$  são coeficientes de correlação angular

$P_K \cos(\theta)$  o polinômio de Legendre

Em geral,  $K_{\text{máx}} = 4$ , pois as multipolaridades das transições gama (L,L+1) são na maioria, do tipo dipolar ou quadrupolar. Desta forma a equação  $W(\theta)$  restringe-se a:

$$\omega(\theta) = A_{00} + A_{22} P_2 \cos(\theta) + A_{44} P_4 \cos(\theta) \quad (2)$$

Normaliza-se esta função em relação a  $A_{00}$ .

Os coeficientes  $A_{KK}$  dependem dos spins dos níveis e das multipolaridades das transições gama. São descritos como o produto de dois fatores, em que cada um depende, somente, de uma das transições:

$$A_{KK} = A_K(\gamma_1) A_K(\gamma_2) \quad (3)$$

onde

$$A_K(\gamma_1) = \frac{F_K(\Pi_i L_1 L_1') + (-)^{L_1 - L_1'} 2\delta_1 F_K(\Pi_i L_1 L_1') + \delta_1^2 F_K(\Pi_i L_1' L_1')}{1 + \delta_1^2} \quad (4)$$

$$A_K(\gamma_2) = \frac{F_K(\Pi_f L_1 L_1) + 2\delta_2 F_K(\Pi_f L_2 L_2) + \delta_2^2 F_K(\Pi_f L_2' L_2')}{1 + \delta_2^2} \quad (5)$$

Os coeficientes  $F_K$  dependem dos spins dos níveis e das multipolaridades das transições gama e podem ser calculados explicitamente, da teoria. Estes coeficientes foram tabelados por Ferentz e Rosenzweig (8).

Os  $\delta_n$  ( $n = 1, 2$ ) são as razões de mistura multipolar para cada transição gama. Como, em geral, somente as componentes multipolares  $L_n$  e  $L'_n = L_n + 1$ , com  $n = 1, 2$  são predominantes, a interpretação física da razão de mistura multipolar é expressa por:

$$\delta^2 = \frac{\text{Intensidade da transição com multipolaridade } L'_n}{\text{Intensidade da transição com multipolaridade } L_n} \quad (6)$$

### Correlação Angular Tripla

Quando há emissão de três raios gama em sucessão, formando uma cascata tripla, é possível obter-se uma expressão para a função correlação angular entre a primeira e a terceira transição, sem a observação da segunda transição da cascata.

Teoricamente obtém-se a função correlação angular  $\gamma_1 \gamma_3$ , sem observação de  $\gamma_2$ , introduzindo-se na equação (1) um fator multiplicativo  $U_K(I_2 I_3)$ , que é denominado coeficiente de distribuição angular da transição não observada,  $\gamma_2$ . Este fator é dado por:

$$U_{\mathbf{K}}(I_2 I_3) = \frac{U_{\mathbf{K}}(L_2 I_2 I_3) + \delta_2 U_{\mathbf{K}}(L'_2 I_2 I_3)}{1 + \delta_2^2} \quad (7)$$

onde:  $L_2$  e  $L'_2$  representam as menores ordens multipolares e  $\delta$  a mistura multipolar da transição gama não observada ( $\gamma_2$ );

e

$$U_{\mathbf{K}}(L_2 I_2 I_3) = (-1)^{I_2 + I_3 + K + L} \left[ (2I_2 + 1)(2I_3 + 1) \right]^{1/2} \begin{Bmatrix} I_2 & I_2 & K \\ I_3 & I_3 & L \end{Bmatrix} \quad (8)$$

Os coeficientes de distribuição angular,  $U_{\mathbf{K}}(L_2 I_2 I_3)$  e  $U_{\mathbf{K}}(L'_2 I_2 I_3)$  encontram-se tabelados na referência (5).

Desta forma, a função  $W(\theta)$  dada pela equação (1) pode ser escrita como:

$$\omega(\theta)_{\gamma_1, \gamma_3} = \sum_{K_{\text{par}}} A_{\mathbf{K}}(\gamma_1) U_{\mathbf{K}}(I_2 I_3) A_{\mathbf{K}}(\gamma_3) P_{\mathbf{K}} \cos(\theta) \quad (9)$$

## PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Utilizou-se uma fonte de  $^{72}\text{Ga}$ , produzida através da reação  $^{71}\text{Ga}(n, \gamma)^{72}\text{Ge}$ , que foi irradiada num fluxo de nêutrons de  $10^{13}$  n/cm<sup>2</sup>.s no Reator IEA-R1 do IPEN, por um período de um minuto. Foram produzidas duas fontes destinadas às medidas, já que o tempo para todas as medidas foi de três dias e a meia-vida da fonte é de 14,10 horas. O alvo se encontrava na forma de

$\text{Ga}_2\text{O}_3$  natural (99,99%) na quantidade de aproximadamente 5 mg selado em sílica. O tempo de espera entre a irradiação e o início da medida estava em torno de 2 horas, devido ao decaimento do  $^{70}\text{Ge}$  ( $T_{1/2} = 21$  min), produzido pela reação concorrente  $^{69}\text{Ga} (n, \gamma) ^{70}\text{Ge}$ .

O espectrômetro  $\gamma$  utilizado consiste de dois detectores, um de HPGe com volume de  $86 \text{ cm}^3$  (fixo) e um de Ge(Li) de  $45 \text{ cm}^3$  (móvel), tal qual a figura 1. A eletrônica associada é a usual em energia. A janela em energia no detector Ge(Li) foi colocada no fotopico de 834 keV, ao passo que o outro detector foi utilizado para medir os gamas em coincidência. Ao mesmo tempo foi selecionado o fotopico de 2201 keV do espectro destinado a normalizar as contagens dos espectros de coincidência, corrigindo os efeitos relativos à geometria e à meia-vida da fonte.

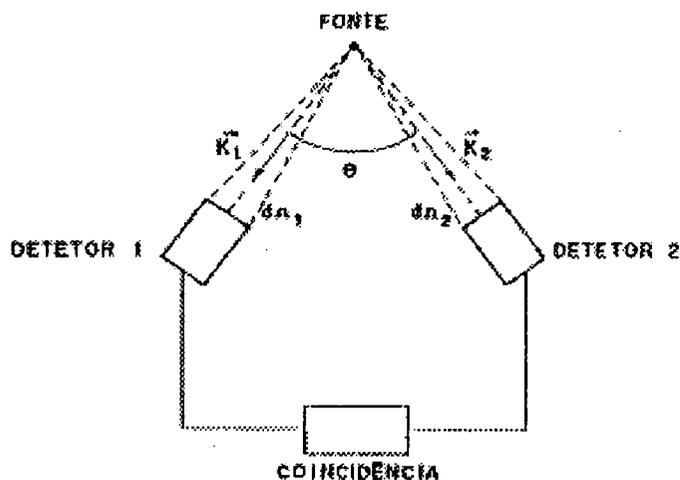


figura 1: Arranjo de detectores para coincidência gama-gama

Foram feitas tanto medidas de coincidências com os gamas em cascata, como as correções devido às coincidências com gamas espalhados por efeito Compton e acidentais. A correção de Compton foi feita tomando uma janela em energia vizinha ao gama de 834 keV e que não continha nenhum pico

devido ao efeito fotoelétrico. Um atraso de  $1\mu\text{s}$  nos pulsos de um dos detetores, antes de chegar a unidade de coincidência forneceu a contribuição de acidentais.

As medidas foram feitas em ângulos de 90, 120, 150 e 180 graus, sendo que eram obtidos um espectro na sequência dos ângulos e outro no sentido oposto. Este procedimento serve para que a estatística em cada ângulo seja aproximadamente a mesma, conforme (9).

## ANÁLISE E RESULTADOS

Para cada cascata escolhida, os valores de  $W(\theta)$  foram medidos nos 4 ângulos, selecionados segundo a relação:

$$W_r(\theta) = W_t(\theta) - W_c(\theta) - W_a \quad (10)$$

onde:

$W_r(\theta)$  = contagens das coincidências reais

$W_t(\theta)$  = contagens das coincidências totais

$W_c(\theta)$  = contagens das coincidências devido ao espalhamento

Compton

$W_a$  = contagens das coincidências acidentais (que não depende do ângulo)

Os valores experimentais de  $A_{kk}$  foram obtidos pelo ajuste de mínimos quadrados do polinômio  $W_r(\theta)$  de acordo com a equação (2) e estão apresentados na tabela 1. O programa CAKKPC (10) recebe os valores das correções de ângulo sólido que as realiza internamente. Os valores de  $A_{kk}$  são comparados aos calculados na equação (3) pelo programa MFGFUPC (11),

substituindo o valor de  $\delta$  por um compreendido entre  $10^{-31}$  e  $10^{31}$ . Os valores de  $\delta$  que geram  $W(\theta)$  “teóricos” mais próximos do experimental são avaliados pelo teste de  $\chi^2$  novamente em passos menores até que o menor valor de  $\delta$  seja considerado. O programa pode vir a fornecer dois valores, sendo descartado aquele que não tiver significado físico. Deste modo foram obtidos os valores da razão de mistura multipolar, que são apresentados na tabela 2, em comparação com os da referência (12). Os valores de  $W(\theta) / W(90)$  para as cascatas 629-834 keV, 894-834 keV, 2202-834 keV, 2508-834 keV e a previsão teórica estão nas figuras 2, 3, 4 e 5 respectivamente.

Tabela 1 - Coeficientes de Correlação Angular para as Cascatas Estudadas

Cascata (keV)	$A_{22}$	$A_{44}$	Referência
629 - 834	-0,04 (6)	0,36 (10)	Landulfo [12]
	-0,095 (10)	0,308 (16)	Este Trabalho
894 - 834	0,14 (13)	-0,00(20)	Landulfo [12]
	0,116 (15)	0,023(23)	Este Trabalho
2202 - 834	0,34 (9)	0,08(14)	Landulfo [12]
	0,269 (16)	-0,022 (24)	Este Trabalho
2508 - 834	0,44 (15)	0,03 (23)	Landulfo [12]
	0,206 (25)	-0,001 (40)	Este Trabalho

Tabela 2 - Razão de Mistura Multipolar das Transições Gama do  $^{72}\text{Ge}$ 

Nível (keV)	Transição (keV)	$I_i^\pi - I_i^\pi$	$\delta$	% L	% L+1
1464	629	$2^+ - 2^+$	0,41(11) 32,6(57) a)	85,5 (M1)	14,5 (E2)
1728	894	$4^+ - 2^+$	0,11 (5) E2 a)	98,8 (E2)	1,2 (M3)
3036	2202	$2^- - 2^+$	-0,120 (21) -0,03 (1) a)	98,6 (E1)	1,4 (M2)
3340	2508	$2^- - 2^+$	-0,58 + 20 -33 -0,06 (5) a)	75,0 (E1)	25,0 (M2)

a) referência (12)

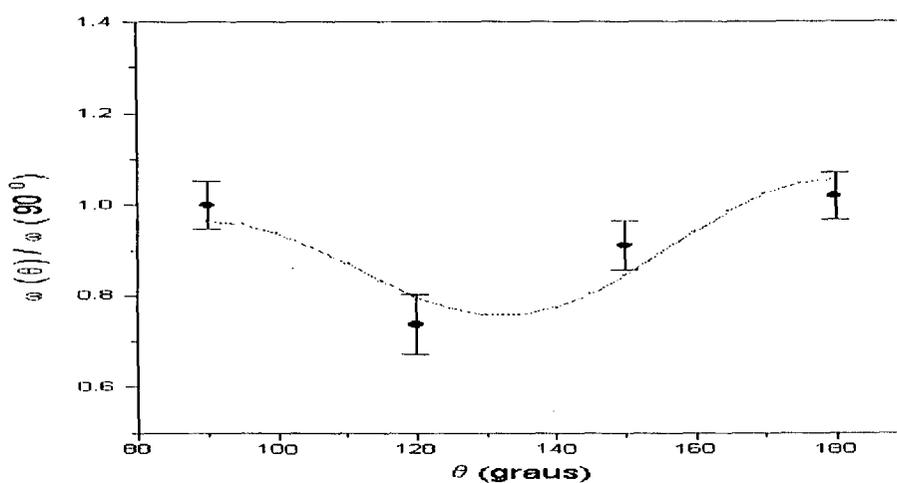


Figura 2: Valores obtidos em comparação à previsão teórica para a cascata 629 - 834 keV.

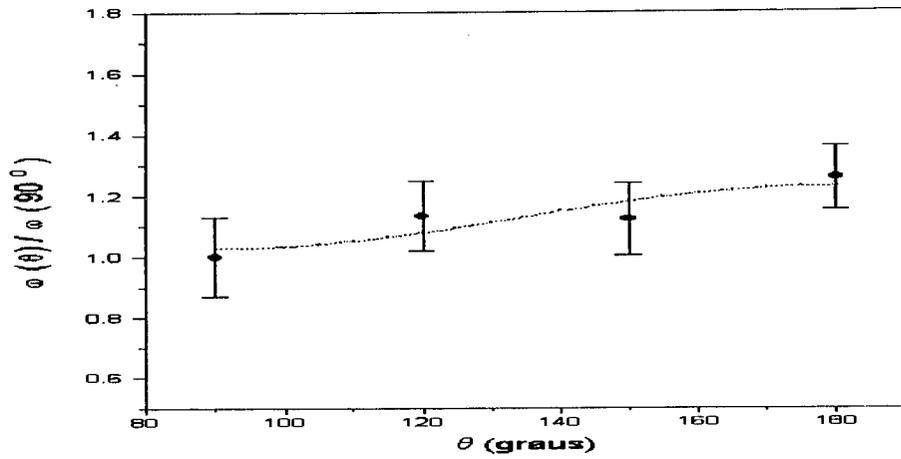


Figura 3: Valores obtidos em comparação à previsão teórica para a cascata 894 - 834 keV.

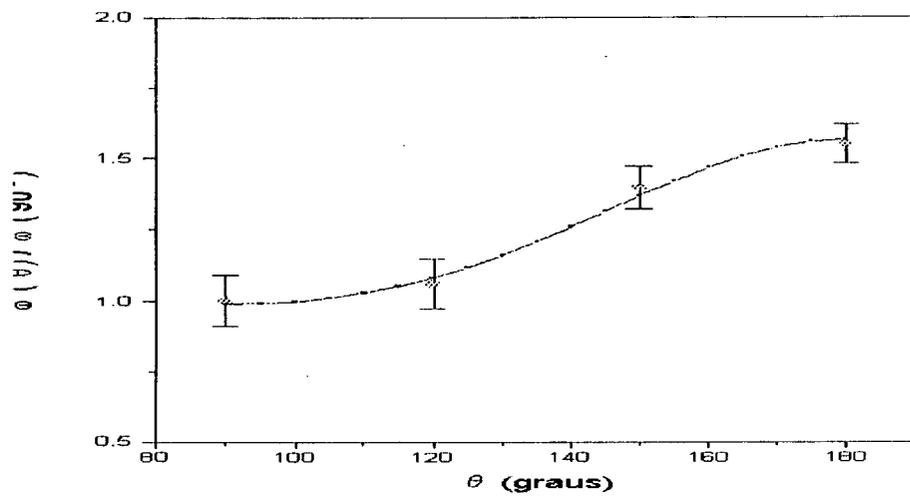


Figura 4: Valores obtidos em comparação à previsão teórica para a cascata 2202 - 834 keV.

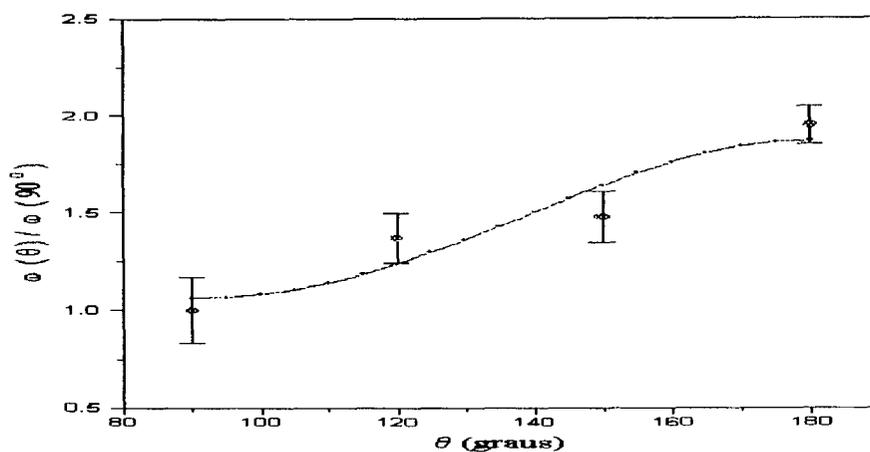


Figura 5: Valores obtidos em comparação à previsão teórica para a cascata 2508 - 834 keV.

### Referências

- 1) H. J. Rose e D. M. Brink, Angular distributions of gamma-rays in terms of phase-defined reduced matrix elements, *Rev. Mod. Phys.* **39**, 306 (1967).
- 2) H. Frauenfelder e R. M. Steffen, Angular distribution of nuclear radiation: (A) Angular Correlation, in K. Siegbahn, Alpha, beta and gamma-ray spectroscopy, Amsterdam, North-Holland, 1965, V.2.
- 3) L. C. Biedenharn e M. E. Rose, Theory of angular correlation, in K. Siegbahn, *op. cit.*
- 4) R. M. Steffen e K. Alder, Angular distribution and correlation of gamma-ray, in W. D. Hamilton, The electromagnetic interaction in nuclear spectroscopy, Amsterdam, North-Holland, 1975, p.505-82.

- 5) W. D. Hamilton , Gamma-ray angular distribution and correlation (I) experimental methods using radioactive sources, in W. D. Hamilton, *op. cit.*, p. 645.
- 6) P. J. Twin, Gamma-ray angular distribution and correlation measurement experimental methods following nuclear reaction, in W. D. Hamilton, *op. Cit.*
- 7) C. B. Zamboni e A. L. Lapolli, Fundamentos da teoria de correlação angular direcional gama-gama, Publicação IPEN 316, setembro de 1990.
- 8) M. Ferentz e N. Rosenzweig, Table of angular correlation coefficients, in K. Siegbahn, *op. Cit.*, p.1687.
- 9) M. T. Freitas da Cruz, Estudo do decaimento do  $^{132}\text{Cs}$  e estrutura nuclear do  $^{132}\text{Xe}$ , Tese de Doutorado, IFUSP, 1987.
- 10) J. A. G. Medeiros, Programa CAKKPC.
- 11) J. A. G. Medeiros, Programa MFGFUPC.
- 12) E. Landulfo, Medidas de correlação angular direcional gama-gama para transições no  $^{72}\text{Ge}$ , Dissertação de Mestrado, IPEN, 1991.