

Aos meus pais



Comissão Julgadora

Dra. CIBELE BUGNO ZAMBONI

Dr. GLACIO DIETZSCH

Dr. RAJENDRA NARAIN SAXENA (Orle.)

Agradeço a todos que , direta ou indiretamente
contribuíram para o bom desempenho deste trabalho , e em especial :

Dr. Rajendra Narain Saxena Pela dedicada e segura orientação.

Dra. Cibele Bugno Zamboni Pelo enorme auxílio prestado na execução e análise
deste trabalho.

André L. Lapolli Pela ajuda na análise dos dados via computador e
grande apoio e coleguismo dado.

Dra. Maria Carolina Nemes Pela discussões de modelos teóricos , e
principalmente à amizade.

Prof. Dr. Olácio Dietzsch Pela gentil permissão de utilização dos
equipamentos do Laboratório de Instrumentação
e Partículas.

Ronny Shimazaki Pela paciente ajuda na confecção dos gráficos.

Artur Pela permissão de usar até o último byte dos
micros do seu laboratório.

Ana e Inelde Pelos serviços prestados junto à secretaria da
divisão de Física Nuclear.

Rangel Pelas fotos dos espectros.

Alex Pela rápida digitação dos dados.

Operação do Reator Pelo pronto auxílio nas irradiações das amostras.

Proteção Pela constante e eficiente monitoração das
Radiológica amostras.

Comissão Nacional Pela concessão de uma bolsa de mestrado e uso das
de Energia Nuclear dependências deste Instituto.
CNEN/SP

Membros da Comissão Pelo apoio dado aos alunos de Pós-Graduação.
de Pós-Graduação

Carlos H. e Flávio Pela demonstração III.5 do exercício IV.3.

Aos colegas Pela amizade e coleguismo, e por compadecerem
Agostinho, Eudice, e padecerem pelo mesmo ideal de se tentar
Hércules, Jacó, fazer ciência nesse país com força de vontade
José R., Kátia, e dignidade.
Marcos A., Mário,
Marlete, Meire,
Renato, Roberta,
Sônia, Verônica
e Willi

Finalmente agradeço aos meus amigos que esqueci de mencionar e a todos "aqueles" que frequentam o Bar do Luigi.

RESUMO

A Correlação angular de transições- γ coincidentes no ^{72}Ge foi estudada a partir do decaimento β^- do ^{72}Ga ($T_{1/2} = 14,1$ h), utilizando-se um espectrômetro constituído de um detetor de Ge(Li), e outro de GeHP.

As medidas foram realizadas para 16 cascatas gama: 630-834 keV, 894-834 keV, 1231-834 keV, 1681-834 keV, 2109-834 keV, 2202-834 keV, 2491-834 keV, 2508-834 keV, 601-(630)-834 keV, 736-(894)-834 keV, 1000-(630)-834 keV, 786-(894)-834 keV, 1051-(630)-834 keV, 1215-(630)-834 keV, 1597-(894)-834 keV, e 1861-(630)-834 keV, populadas através do decaimento β^- do ^{72}Ga .

As razões de mistura multipolar, $\delta(E2/M1)$ foram determinadas para 16 transições, onde quatro pela primeira vez :

$\delta(601) = 4.0 \pm 0.6$	$\delta(1231) = -0.53 \pm 0.07$
$\delta(630) = 32.6 \pm 5.7$	$\delta(1597) = -0.01 \pm 0.03$
$\delta(736) = -1.6 \pm 0.2$	$\delta(1681) = 0.29 \pm 0.05$
$\delta(786) = 0.05 \pm 0.01$	$\delta(1861) = 0.21 \pm 0.01$
$\delta(894) \rightarrow E2$	$\delta(2109) = 0.17 \pm 0.02$
$\delta(1000) = 0.5 \pm 0.3$	$\delta(2202) = -0.03 \pm 0.01$
$\delta(1051) = -0.29 \pm 0.05$	$\delta(2491) = 0.00 \pm 0.02$
$\delta(1215) = -0.10 \pm 0.01$	$\delta(2508) = 0.06 \pm 0.05$

Foram atribuídos spin e paridade de diversos níveis no ^{72}Ge , comparando os resultados com trabalhos anteriores.

Uma comparação sistemática de parâmetros como nível de energia, spin e paridade dos estados nucleares e razões de mistura multipolar das transições gama foi feita para diversos isótopos par-par do Ge. Os resultados são discutidos em termos de modelos teóricos propostos para os núcleos nesta região de massa.

EDUARDO LANDULFO

A B S T R A C T

The directional correlation of coincident γ -transitions in ^{72}Ge have been investigated from the β^- decay of ^{72}Ga ($T_{1/2} = 14.1$ h), using a spectrometer consisting of a Ge(Li) and a HPGe detector.

The measurements have been carried out for 16 gamma cascades : 630-834 keV ,894-834 keV, 1231-834 keV, 1681-834 keV, 2109-834 keV, 2202-834 keV, 2491-834 keV, 2508-834 keV, 601-(630)-834 keV, 736-(894)-834 keV, 1000-(630)-834 keV, 786-(894)-834 keV, 1051-(630)-834 keV, 1215-(630)-834 keV, 1597-(894)-834 keV, e 1861-(630)-834 keV ,populated in ^{72}Ge .

The multipole mixing ratios, $\delta(E2/M1)$, of 16 gamma transitions were determined from the present study, four of them for the first time :

$\delta(601) = 4.0 \pm 0.6$	$\delta(1231) = -0.53 \pm 0.07$
$\delta(630) = 32.6 \pm 5.7$	$\delta(1597) = -0.01 \pm 0.03$
$\delta(736) = -1.6 \pm 0.2$	$\delta(1681) = 0.29 \pm 0.05$
$\delta(786) = 0.05 \pm 0.01$	$\delta(1861) = 0.21 \pm 0.01$
$\delta(894) \rightarrow E2$	$\delta(2109) = 0.17 \pm 0.02$
$\delta(1000) = 0.5 \pm 0.3$	$\delta(2202) = -0.03 \pm 0.01$
$\delta(1051) = -0.29 \pm 0.05$	$\delta(2491) = 0.00 \pm 0.02$
$\delta(1215) = -0.10 \pm 0.01$	$\delta(2508) = 0.06 \pm 0.05$

The spin and parity of several levels in ^{72}Ge have been assigned. The present results are compared with those of earlier studies in this nucleus. A systematic comparison of

parameters like level energy , spin and parity and multipole mixing ratios of gamma transitions has been carried out for several neighbouring even-even Ge isotopes. The results are discussed in terms of theoretical model proposed for nuclei in this mass region.

INDICE

	página
INTRODUÇÃO	1
I - PRINCÍPIOS GERAIS DE CORRELAÇÃO ANGULAR	
I.1 - INTRODUCAO	3
I.2 - CORRELACAO ANGULAR DIRECIONAL	4
I.3 - FUNCAO CORRELACAO ANGULAR	7
I.4 - CORRELACAO ANGULAR TRIPLA	10
II - INSTRUMENTAÇÃO E ANÁLISE DE DADOS	
II.1 - INSTRUMENTACAO	13
II.1.1 - DETETORES	13
II.1.2 - ESPECTROMETRO DE CORRELACAO ANGULAR	14
II.1.3 - SISTEMA ELETRONICO	15
II.2 - ANÁLISE DE DADOS	17
II.2.1 - OBTENCAO DOS COEFICIENTES DE CORRELACAO ANGULAR	17
II.2.2 - OBTENCAO DA RAZAO DE MISTURA MULTIPOLAR	20
II.2.3 - TESTE DO EQUIPAMENTO	22
III - MEDIDAS DE CORRELAÇÃO ANGULAR GAMA-GAMA PARA TRANSIÇÕES NO ^{72}Ge	
III.1 - INTRODUCAO	24
III.2 - TECNICA EXPERIMENTAL	26
III.2.1 - PREPARACAO DA FONTE RADIOATIVA DE ^{72}Ga	26
III.2.2 - MEDIDAS DE CORRELACAO ANGULAR	26
III.2.3 - RESULTADOS	27

IV - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

49

V - CONCLUSÕES

61

BIBLIOGRAFIA

62

LISTA DE FIGURAS

Figura	Título	Página
I-1	ESQUEMA TIPOICO DE NIVEIS DE UMA CASCATA γ - γ .	5
I-2	ESQUEMA SIMPLIFICADO DO ARRANJO EXPERIMENTAL.	6
I-3	ESQUEMA TIPOICO DE NIVEIS DE UMA CASCATA - γ - TRIPLA.	11
II-1	ARRANJO EXPERIMENTAL	14
II-2	SISTEMA ELETRONICO.	16
II-3	FUNCAO CORRELACAO ANGULAR $W(\theta)$ PARA A CASCATA 1173-1332 keV NO ^{60}Ni .	23
III-1a	ESPECTRO DIRETO DE RAIOS γ DO DECAIMENTO ^{72}Ga COM O DETETOR DE HPGe.	38
III-1b	ESPECTRO DE COINCIDENCIAS γ - γ PARA A JANELA DE 834 keV COM O DETETOR DE HPGe.	38
III-2	ESPECTRO DE COINCIDENCIAS γ - γ DE CONTRIBUICAO COMPTON NA JANELA DE 834 keV COM O DETETOR DE HPGe.	39
III-3	FUNCAO CORRELACAO ANGULAR AJUSTADA E OS PONTOS EXPERIMENTAIS PARA AS CASCATAS - γ NO ^{72}Ge .	40
III-4	CURVAS PARAMETRICAS DOS VALORES DE A_{kx} PARA AS SEQUENCIAS DE SPINS , ENVOLVENDO CASCATAS SIMPLES.	46
III-5	CURVAS PARAMETRICAS DOS VALORES DE A_{kx} PARA AS SEQUENCIAS DE SPINS , ENVOLVENDO A CASCATA TRIPLA COM TRANSICAO GAMA NAO-OBSERVADA DE 894 keV.	47
III-6	ESQUEMA PARCIAL DE DECAIMENTO β^- DO ^{72}Ga .	48
IV-1	SISTEMATICA DOS ESTADOS A BAIXAS ENERCIAS NOS NUCLEOS DE Ge COM A = 66,68,70,72,74,76.	51

IV-2 RAZOES DE ENERGIA E_{41}/E_{21} , E_{01}/E_{21} E E_{22}/E_{21} PARA
OS NUCLEOS DE $^{66,68,70,72,74,76}\text{Ge}$.

LISTA DE TABELAS

Tabela	Título	Página
II.1	COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO ANGULAR DO ^{60}Ni .	22
III.1	VALORES DE A_{KK} PARA AS CASCATAS - γ DO ^{72}Ge .	36
III.2	VALORES DAS RAZÕES MULTIPOLARES PARA AS TRANSIÇÕES - γ DO ^{72}Ge .	37
IV.1	PROBABILIDADES DE TRANSIÇÃO REDUZIDA $B(E2)$, ENTRE OS PRIMEIROS ESTADOS EXCITADOS DOS ISÓTOPOS PARES DO ^{72}Ge ;	53
IV.2	VALORES EXPERIMENTAIS DO MOMENTO DE QUADRUPOLO ELETRICO DO ESTADO 2_1^+ .	54
IV.3	RAZÕES DE MISTURA MULTIPOLAR, $\delta(E2/M1)$, DAS TRANSIÇÕES- γ ENTRE OS PRIMEIROS ESTADOS EXCITADOS DOS ISÓTOPOS PARES DO ^{72}Ge .	60

INTRODUÇÃO

Nas duas últimas décadas, a Física Nuclear passou por mudanças significativas, pois com o advento de aceleradores mais potentes, um novo caminho na compreensão da estrutura nuclear foi aberto.

A Física Nuclear a baixas energias é ainda de grande importância para solucionar os problemas de entendimento da estrutura do núcleo, pois, como se sabe, a compreensão da interação nucleon-nucleon ainda não é definitiva, devido ao fato intrínseco de se considerar muitos corpos, e à medida que o número de nucleons vai variando a interação sofre também algumas mudanças, daí haver ainda uma ausência de uma teoria unificada a respeito do núcleo.

Atualmente, as técnicas experimentais estão bem desenvolvidas, e os seus métodos bem estabelecidos. Estas técnicas permitem a obtenção de parâmetros tais como energia, spin e paridade dos níveis ou ainda a probabilidade de transição, momento de quadrupólo elétrico, momento magnético e razão de mistura multipolar das transições entre os estados nucleares.

Destaca-se aqui a técnica de correlação angular, que se baseia na detecção de dois raios gama em coincidência em função do ângulo entre eles. Através deste método é possível obter indicações diretas a respeito dos spins dos níveis e a razão de mistura multipolar das transições, e de se ter indiretamente a confirmação das paridades dos estados.

A correlação angular é amplamente utilizada em física nuclear, pois a sua execução é simples e os parâmetros obtidos são de grande importância para o entendimento da estrutura nuclear.

INTRODUÇÃO

Nas duas últimas décadas, a Física Nuclear passou por mudanças significativas, pois com o advento de aceleradores mais potentes, um novo caminho na compreensão da estrutura nuclear foi aberto.

A Física Nuclear a baixas energias é ainda de grande importância para solucionar os problemas de entendimento da estrutura do núcleo, pois, como se sabe, a compreensão da interação nucleon-nucleon ainda não é definitiva, devido ao fato intrínseco de se considerar muitos corpos, e à medida que o número de nucleons vai variando a interação sofre também algumas mudanças, daí haver ainda uma ausência de uma teoria unificada a respeito do núcleo.

Atualmente, as técnicas experimentais estão bem desenvolvidas, e os seus métodos bem estabelecidos. Estas técnicas permitem a obtenção de parâmetros tais como energia, spin e paridade dos níveis ou ainda a probabilidade de transição, momento de quadrupólo elétrico, momento magnético e razão de mistura multipolar das transições entre os estados nucleares.

Destaca-se aqui a técnica de correlação angular, que se baseia na detecção de dois raios gama em coincidência em função do ângulo entre eles. Através deste método é possível obter indicações diretas a respeito dos spins dos níveis e a razão de mistura multipolar das transições, e de se ter indiretamente a confirmação das paridades dos estados.

A correlação angular é amplamente utilizada em física nuclear, pois a sua execução é simples e os parâmetros obtidos são de grande importância para o entendimento da estrutura nuclear.

Estão apresentadas neste trabalho as correlações angulares γ - γ das transições mais intensas do núcleo de ^{72}Ge .

A escolha deste núcleo foi feita face à falta de um estudo que fornecesse um número razoável de misturas multipolares das transições entre os níveis excitados a baixas energias (até ≈ 3 MeV), que poderia auxiliar na explicação de sua estrutura, cujo núcleo se encontra em uma região de transição, e ainda apresenta características peculiares tais como, transição de forma oblata (ou esférica) para prolata e coexistência de estados coletivos rotacionais e vibracionais.

Os resultados experimentais foram obtidos a partir do decaimento β^- do ^{72}Ga ($T_{1/2} = 14,1$ h), utilizando detectores de Ge(Li) e de GeHP. Foram determinadas as razões de mistura multipolar de 16 transições- γ , e atribuídos ou confirmados os spins de 9 estados nucleares.

No capítulo I é apresentado de maneira condensada a teoria de correlação angular γ - γ . As características do espectrômetro utilizado, a eletrônica associada e os métodos empregados no tratamento de dados são encontradas no capítulo II. Os resultados obtidos e uma relato de medidas efetuadas anteriormente estão no capítulo III. O capítulo IV se dedica a expor os dados experimentais a uma comparação sistemática com os isótopos par-par do ^{72}Ge , além disso é feito um levantamento dos modelos teóricos mais significativos para a interpretação da estrutura deste núcleo.

Finalmente no capítulo V, são tiradas as conclusões.

I Princípios Gerais de Correlação Angular

1.1 Introdução

Em 1940, Dunworth¹⁸ sugeriu que na emissão de radiações nucleares sucessivas haveria a possibilidade da existência de uma correlação angular. A partir daí estudos teóricos mais detalhados foram apresentados, dando destaque ao de Hamilton²⁵, que no mesmo ano publicou o primeiro trabalho teórico no assunto, e em 1946 Goertzel²³ apontou a possibilidade da existência de perturbações extra-nucleares; no ano seguinte, os primeiros resultados experimentais surgiram no trabalho de Brady e Deutsch¹², onde foram realizadas medidas de correlação angular para o decaimento do ^{60}Co .

A informação que pode ser obtida de trabalhos em correlação angular depende do tipo de radiação observada (α , β , γ , e^-), das propriedades que possam ser distinguidas pelo experimento (direção, polarização e energia), e dos campos extra-nucleares que atuam no núcleo.

Estudos que envolvam correlação angular direcional não-perturbada, i. e., livre do efeito de campos extra-nucleares, fornecem informações a respeito das propriedades dos níveis nucleares envolvidos e dos momentos angulares carregados pela radiação. Mais precisamente, correlações angulares direcionais γ - γ e α - γ permitem a indicação direta dos spins dos níveis nucleares, mas não as paridades. Estas porém, podem ser confirmadas quando se observe também a polarização dos raios- γ , ou ao se medir a

correlação direcional $e^- - \gamma$ ou $\beta - \gamma$ polarizada.

Atualmente a teoria e a técnica experimental atingiram um grau de aprimoramento, que leva a correlação angular a servir como padrão em espectroscopia nuclear. Grande parte desta sofisticação deve-se ao aperfeiçoamento dos detetores de radiação em conjunto com uma eletrônica de resposta rápida, permitindo assim, o estudo de núcleos com um esquema de decaimento complexo.

Há um número razoável de publicações completas sobre o assunto, tais como as de Biedernham e Rose¹², H. Frauenfelder e R. M. Steffen²¹ e H. J. Rose e D. M. Brink⁴². Os trabalhos de Twin⁴⁹ e W. D. Hamilton²⁶ tratam de detalhes sobre as técnicas experimentais.

1.2 Correlação Angular Direcional

A probabilidade de emissão de um raio γ por um núcleo depende em geral do ângulo entre o spin nuclear e a direção da emissão da radiação. Sob circunstâncias normais, a distribuição angular da radiação total é isotrópica, pois os núcleos estão aleatoriamente orientados no espaço. Um padrão anisotrópico pode ser observado apenas em um conjunto de núcleos cujos spins estejam alinhados.

Uma maneira de obter-se um alinhamento dos spins dos núcleos, seria quando um campo magnético ou gradiente de campo elétrico (ambos intensos) for aplicado e a amostra resfriada a temperaturas próximas do zero absoluto.

Um outro modo de conseguir-se este alinhamento, utilizado no presente trabalho, seria observar uma radiação precedente numa direção bem definida, e em seguida medir a

distribuição angular de uma radiação sucessiva à primeira. Este processo denomina-se correlação angular das radiações em cascata.

Quando se executa uma medida em correlação angular, uma típica situação ocorre : um núcleo emite em rápida sucessão dois raios-gama, γ_1 e γ_2 , onde a observação de γ_1 , em uma direção fixa k_1 , vai selecionar um conjunto de núcleos que tenham uma distribuição da orientação dos spins anisotrópica, a segunda radiação γ_2 irá apresentar então uma correlação angular em relação a k_1 .

A técnica de correlação angular permite obter informações sobre os spins dos níveis nucleares e multipolaridades das transições γ . A figura I-1 apresenta o decaimento por dois raios gama sucessivos, onde os parâmetros que caracterizam os níveis nucleares (E energia, I spin, Π paridade, e τ vida média) e as multipolaridades das transições estão em destaque.

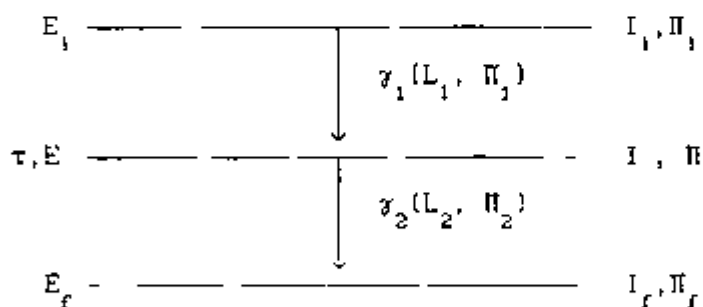


Figura I-1. Esquema de decaimento em cascata

No entanto, para que a correlação angular seja observada, é necessário que o spin do estado intermediário permaneça alinhado até a emissão de γ_2 , para tanto assume-se que os núcleos não sejam perturbados por campos extranucleares. Isto é

garantido se a vida-média τ do estado intermediário for muito mais curta que o "tempo de interação" entre o núcleo e os campos extranucleares. Para estados com vida-média $\tau \leq 10^{-10}$ s esta condição é satisfeita. Para estados com vida-média maior, perturbações podem ocorrer, e caso se queira observar uma correlação não perturbada, precisa-se conseguir um meio para a amostra onde os campos sejam pequenos, por exemplo um sítio em rede cristalina cúbica, ou onde a média dos campos no tempo seja nula, que é o caso de uma amostra sob forma líquida.

Um esquema simplificado do arranjo experimental típico, que é utilizado para serem realizadas medidas em correlação angular, é apresentado na figura I-2. Como podemos observar, um dos detetores é mantido fixo, enquanto o outro ocupa diferentes posições angulares, sendo θ o ângulo formado entre os eixos dos detetores.

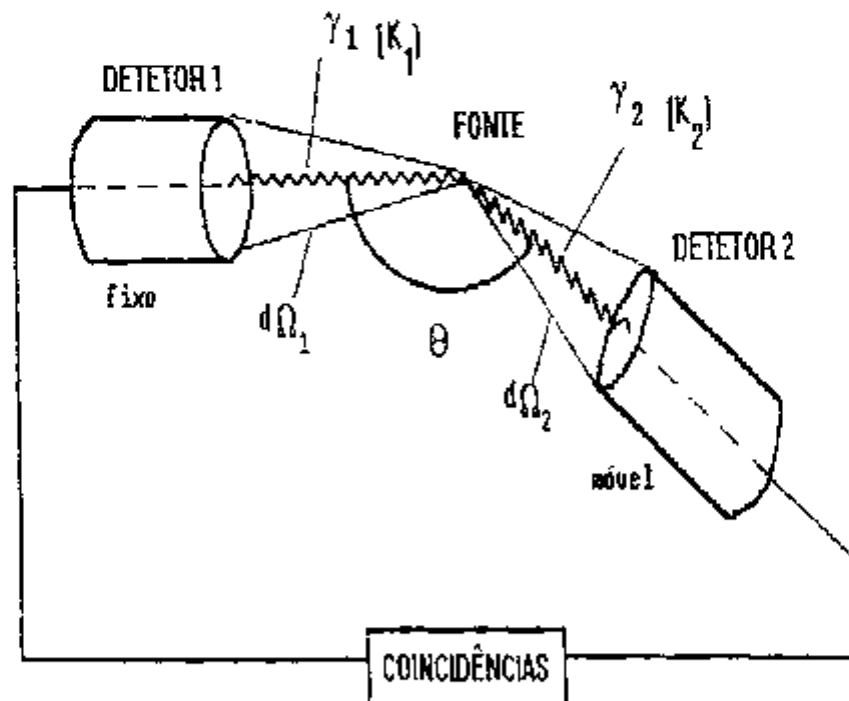


Figura I-2. Esquema simplificado do arranjo experimental

I.3 - Função Correlação Angular

Quando se realiza uma medida de correlação angular, é necessário que se obtenha uma taxa de contagens referente ao número de vezes que seja detetada a radiação γ_1 no detetor 1, e ao mesmo tempo em que γ_2 seja detetada no detetor 2. Esta taxa de coincidências entre as radiações gama em cascata, observada no esquema da figura I-1, depende do ângulo θ entre os detetores, conforme observado na figura I-2 e pode ser descrita pela função correlação angular²⁶:

$$W(\theta) = \sum_{\substack{k \\ \text{par}}}^{k_{\max}} A_{kk} P_k(\cos \theta) \quad (I-1)$$

onde: k_{\max} = ao valor mínimo entre $(2I_1, 2I_2)$.

$P_k(\cos\theta)$ - Polinômio de Legendre de ordem k . O índice k é par devido a conservação da paridade na interação eletromagnética. Geralmente $k_{\max}=4$, pois a multipolaridade das transições gama são do tipo dipolar ou quadrupolar.

A_{kk} - Coeficientes de correlação angular. Podem ser escritos da seguinte forma:

$$A_{kk} = A_k(\gamma_1) \cdot A_k(\gamma_2) \quad (I-2)$$

onde:

$A_k(\gamma_1)$ e $A_k(\gamma_2)$ - dependem das multipolaridades da primeira e da segunda transição respectivamente e dos spins dos níveis envolvidos.

os coeficientes $A_k(\gamma_n)$ são dados por:

$$A_k(\gamma_1) = \frac{F_k(I_1, L_1, L_1) + (-)^{L_1 - L_1'} \frac{2\delta_1 F_k(I_1, L_1, L_1') + \delta_1^2 F_k(I_1, L_1', L_1')}{1 + \delta_1^2}}{1 + \delta_1^2} \quad (1-3)$$

$$A_k(\gamma_2) = \frac{F_k(I_2, L_2, L_2) + 2\delta_2 F_k(I_2, L_2, L_2') + \delta_2^2 F_k(I_2, L_2', L_2')}{1 + \delta_2^2} \quad (1-4)$$

onde :

(L_1, L_1') e (L_2, L_2') são as multipolaridades das transições γ_1 e γ_2 respectivamente ;

$(I_1, I_1$ e $I_1')$ são os respectivos spins dos níveis de energia ;

F_k - Coeficientes calculados por Ferentz Rosenzweig¹⁹ que estão tabelados e são explicitamente escritos por:

$$F_k(LL'I'I') = (-)^{(I'+I-1)} \left[(2L+1)(2L'+1)(2I+1)(2K+1) \right]^{1/2} \begin{Bmatrix} L & L' & K \\ 1 & -1 & 0 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} L & L' & K \\ I' & I' & I \end{Bmatrix}$$

onde $\begin{Bmatrix} L & L' & K \\ 1 & -1 & 0 \end{Bmatrix}$ e $\begin{Bmatrix} L & L' & K \\ I' & I' & I \end{Bmatrix}$ são, respectivamente, os coeficientes $3j$ e $6j$ de Wigner.³⁶

Os δ_n ($n=1,2$) são as razões de mistura multipolar das transições gama envolvidas e são definidas da seguinte forma:

$$\delta_n = \frac{\langle f || T_{L_n}^{<\sigma'\rangle} || i \rangle / (2L_n' + 1)^{1/2}}{\langle f || T_{L_n}^{<\sigma\rangle} || i \rangle / (2L_n + 1)^{1/2}} \quad (I-5)$$

onde:

$\langle I_f || T_{L_n}^{<\sigma\rangle} || I_i \rangle$ - são os elementos de matriz reduzido, para as transições gama, de um estado inicial I_i para outro estado final I_f .

$T_L^{<\sigma'\rangle}$ e $T_L^{<\sigma\rangle}$ - operadores de interação multipolar.

L_n e $L_n' = L_n + 1$ - multipolaridades predominantes das transições γ_n .

$\langle \sigma \rangle = E$ e $\langle \sigma' \rangle = M$ - indicam interações elétrica ou magnética.

A convenção de sinal de δ é definida utilizando-se os elementos de matriz de emissão para os operadores multipolares, e é considerada negativa quando a primeira transição em $I_1 \rightarrow I_2 \rightarrow I_3$ é misturada. Se a segunda transição é misturada, então o sinal é

positivo

Interpretando-se fisicamente, a razão de mistura multipolar temos:

$$\delta^2 = \frac{\text{intensidade da transição com multipolaridade } L_n'}{\text{intensidade da transição com multipolaridade } L_n}$$

Como, em geral, apenas os três primeiros coeficientes A_{kk} são suficientes para descrever a função correlação angular, a equação (I-1) pode ser escrita como :

$$W(\theta) = 1 + A_{22} P_2(\cos \theta) + A_{42} P_4(\cos \theta) \quad (I-6)$$

onde os A_{kk} são normalizados em relação a A_{00} .

1.4 - Correlação Angular Tripla

Até agora, tratou-se de casos em que apenas uma cascata(duas transições) estava envolvida. Entretanto, pode haver no processo de desexcitação nuclear mais de duas radiações emitidas em sucessão, principalmente em núcleos com esquema de níveis complexo. A correlação angular tripla^{19,21} ocorre quando se tem um conjunto de níveis nucleares como esquematizado na figura I-3. Experimentalmente, pode-se observar correlação angular entre as radiações inicial γ_1 e final γ_3 . Nestas condições temos a função correlação angular para a cascata tripla expressa por:

$$W(\theta) = \sum_{k \text{ par}} A_k(\gamma_1) U_k(I_2, I_3) A_k(\gamma_3) P_k(\cos \theta) \quad (1-7)$$

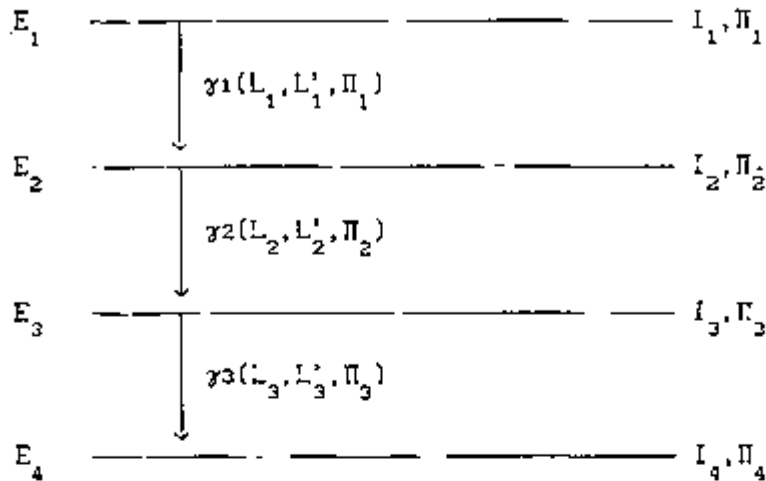


Figura 1-3 - Esquema típico de níveis de uma cascata- γ tripla.

onde $U_k(I_2, I_3)$ representa coeficiente de distribuição angular da transição não observada.

Estes coeficientes estão tabelados⁴⁷ e são descritos

por :

$$U_k(I_2, I_3) = \frac{U_k(L_2, I_2, I_3) + \delta_2 U_k(L_2', I_2, I_3)}{1 + \delta_2^2} \quad (1-8)$$

onde:

$A_k(\gamma_n)$ - é definido por (1-3), $n = 1, 2$

- δ_2 - razão de mistura multipolar de γ_2 , definida por (1-5).

A partir da determinação experimental dos coeficientes A_{22} e A_{44} e usando-se informações adicionais de outras

experiências, tais como correlação angular $\beta - \gamma$ ou reações nucleares, ou ainda parâmetros propostos por trabalhos teóricos, consegue-se extrair informações sobre os spins dos níveis e das multipolaridades das transições gama.

A expressão (I-7) pode ser generalizada para o caso de uma cascata n-upla introduzindo-se os coeficientes $U_k(I_1 I_{1+1})$, para cada raio gama não observado na cascata^{3,10,25} ;

$$W(\theta, n) = \sum_{k \text{ par}} A_k(\gamma_1) \left\{ U_k(I_1 I_2) \dots U_k(I_{n-2} I_{n-1}) \right\} A_k(\gamma_n) P_k(\cos \theta) \quad (I-9)$$

II. Instrumentação e Análise de Dados

Em uma experiência típica de correlação angular as quantidades medidas são o ângulo θ entre os detetores, e a taxa de coincidências, $W(\theta)$, dos raios γ emitidos em cascata. Neste capítulo será apresentado o arranjo experimental utilizado para a obtenção de dados e a metodologia de sua análise.

II.1 Instrumentação

II.1.1 Detetores

As medidas foram realizadas com dois detetores semicondutores : um de cristal de Germânio hiperpuro (GeHP) de 89 cm³ de volume, e outro de cristal de Germânio compensado com Lítio (Ge(Li)) de 45 cm³ de volume. Enquanto o detetor de Ge(Li) era usado para seleccionar o fotopico de interesse , o detetor de GeHP era utilizado para medir o espectro de coincidências.

A fim de se evitar coincidências β - γ , colocou-se na frente de cada detetor absorvedores de alumínio de 1cm de espessura, além disso foram colocados também colimadores cônicos de chumbo para evitar a detecção de fótons espalhados.

A resolução de cada detetor foi determinada para a transição no ⁶⁰Co com energia de 1332 keV , e obteve-se os seguintes resultados :

GeHP : 2.00 keV

Ge(Li) : 2.80 keV

II.1.2 Espectrômetro de Correlação Angular :

Os dois detetores foram colocados sobre uma base circular de aço, onde o detetor de GeHP era mantido fixo, enquanto que o outro detetor podia ocupar qualquer posição entre 90° e 270° , no intervalo de 15° em relação ao eixo horizontal do detetor fixo. A mudança da posição angular do detetor móvel era feita manualmente com o auxílio de uma plataforma giratória. No centro geométrico, onde se cruzava os eixos radiais dos dois detetores havia um pino metálico, de altura ajustável, onde a amostra radioativa era colocada. Este pino girava com uma rotação de ≈ 4 rpm, a fim de minimizar um possível efeito causado pela forma irregular da amostra. A distância radial entre a fonte e cada detetor foi mantida em 7,0 cm. O arranjo experimental está apresentado na figura II.1

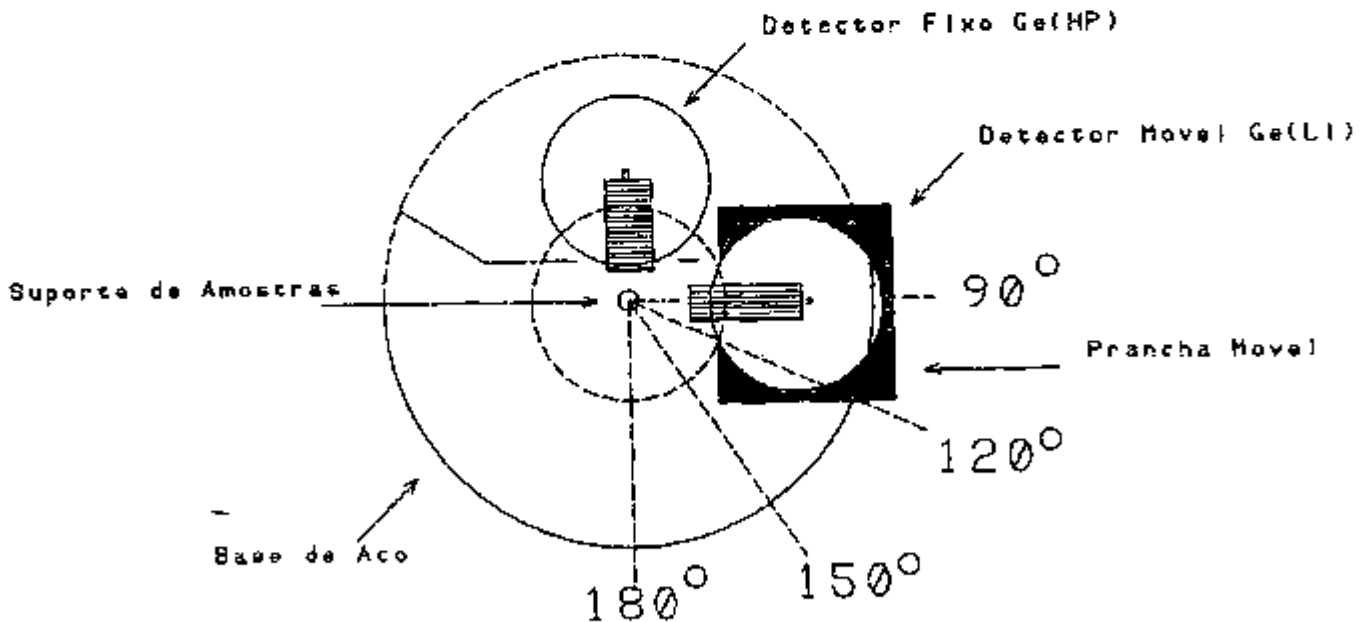


Figura II-1. Arranjo experimental

II.1.3 Sistema Eletrônico

O sistema eletrônico que se utilizou para as medidas foi o de correlação angular em tempo integral, e seu esquema é mostrado na figura II.2.

Os detetores de Ge(Li) e GeHP eram alimentados por fontes de tensão ORTEC-459 (2700 e 4900 V respectivamente) . Os pulsos eletrônicos provenientes dos detetores, após passarem pelos pré-amplificadores eram enviados para amplificadores ORTEC-572 para a formação de pulsos com boa característica em tempo. A saída bipolar de cada amplificador era conectada a um analisador monocanal, ORTEC-420. O nível de discriminação em energia foi ajustado no analisador monocanal para o pico de interesse no espectro γ do detetor de Ge(Li), enquanto que no outro detetor, o nível de discriminação era posicionado ao máximo, a fim de se registrar todo espectro em coincidência com o fotopico de interesse.

Os pulsos provenientes do dois analisadores monocanais eram enviados para uma unidade de coincidência rápida , ORTEC-414A. O tempo de resolução foi ajustado em 110 ns.

O módulo de coincidência rápida por sua vez produzia um pulso lógico, que era enviado à porta de entrada (gate in) do analisador multicanal ORTEC-6240B , que permitia a entrada do pulso unipolar já amplificado, que era produzido no detetor de GeHP. A memória do analisador multicanal foi dividida em 4 regiões de 1024 canais cada, e em cada memória era armazenado os espectros de coincidências para cada ângulo entre os detetores.

Conectado ao detetor de Ge(Li) havia um outro analisador monocanal, ORTEC-420A, cujo nível de discriminação era ajustado a fim de se ter um fotopico conveniente para a normalização

dos espectros.

Os registros das contagens simples e das coincidências eram feitos em 4 scalers e impresso por uma teletipo.

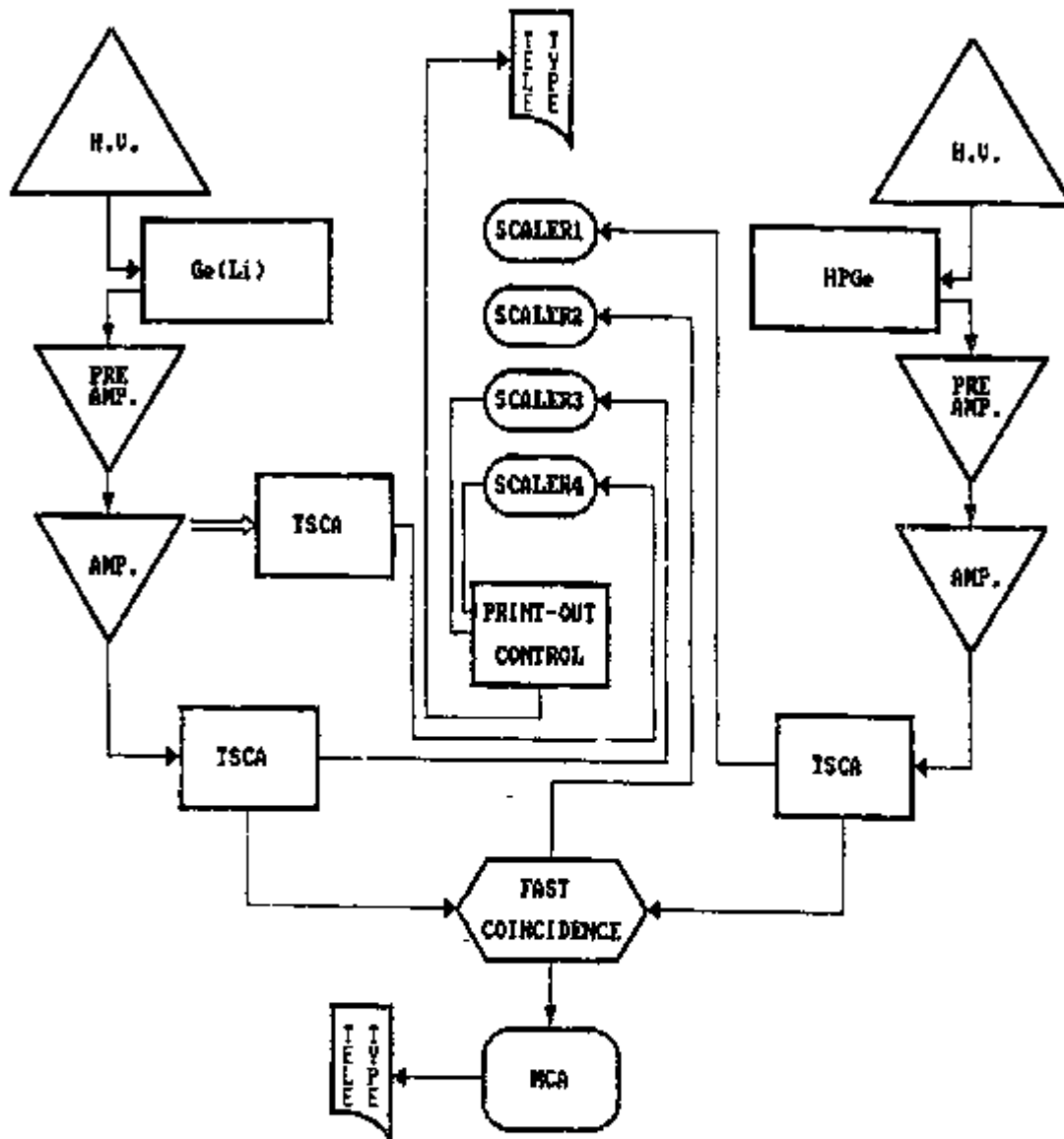


Figura II-2 - Sistema eletrônico.

II.2 Análise de Dados

II.2.1 Obtenção dos Coeficientes de Correlação Angular

Na obtenção de um espectro de coincidências, há contribuições indesejadas devido principalmente ao efeito Compton e coincidências acidentais. O efeito Compton ocorre quando existe a inclusão na janela de raios- γ de energias mais elevadas que estejam em coincidência com o fotopico de interesse. As contribuições acidentais ocorrem quando há duas transições γ coincidentes provenientes de núcleos diferentes.

Tornou-se assim necessário a realização de medidas de coincidências acidentais e por efeito Compton, de tal maneira que se pudesse extrair das contagens totais as contagens devido a estes dois efeitos, para aí então garantir-se a obtenção das coincidências verdadeiras.

As coincidências por efeito Compton foram determinadas ao deslocar-se o nível de discriminação no monocanal para uma posição adjacente, isto é, para uma região em energia próxima do fotopico usado para as coincidências, e media-se então o espectro de coincidências.

As coincidências acidentais foram obtidas ao manter-se os pulsos dos detetores atrasados em $1 \mu\text{s}$ um em relação ao outro, antes destes serem enviados para o módulo de coincidência rápida.

Convém mencionar, que as medidas de coincidências, por efeito Compton e acidentais foram feitas separadamente, o que exigiu cuidados como procurar manter as condições do sistema eletrônico e a atividade inicial das amostras. Para monitorar a

atividade das amostras utilizou-se o fotopico de normalização no detector de Ge(Li).

Os espectros de coincidências armazenados no multicanal eram diariamente transferidos para computador, tanto no caso de coincidências totais como no de coincidências por efeito Compton e Acidentais. No fim do experimento somou-se os espectros para cada caso.

A partir dos espectros soma, foram determinadas as áreas dos fotopicos de interesse. As áreas foram calculadas manualmente, somando o número de contagens para cada canal do fotopico considerado e subtraiu-se então a radiação de fundo.

Das áreas dos fotopicos de interesse calculados foram tiradas as coincidências verdadeiras através da expressão :

$$W^v(\theta) = W^t(\theta) - W^{co}(\theta) - W^{ac}$$

onde :

$W^t(\theta)$: Área do fotopico do espectro de coincidências totais;

$W^{co}(\theta)$: Área do fotopico do espectro de coincidências por efeito Compton;

W^{ac} : Área do fotopico do espectro de coincidências acidentais;

As coincidências de cada ângulo foram normalizadas a partir das contagens simples $C^s(\theta)$, obtidas pela janela de normalização selecionada no monocanal do detector de Ge(Li) em relação ao ângulo de 90° , daí as coincidências verdadeiras serem dadas pela relação :

$$W(\theta) = \frac{W^V(\theta)}{C^S(\theta)/C^S(90^\circ)}$$

Da razão experimental $W^{\text{exp}}(\theta)/W(90^\circ)$ obtêm-se coeficientes de correlação angular através do ajuste de mínimos quadrados da função $W(\theta)$ apresentada na equação I-6. O ajuste foi feito com o auxílio do computador e o erro experimental de $W^{\text{exp}}(\theta)$ é dado por $\sigma = (W^V(\theta) + W^{S_0}(\theta) + W^{A_0})^{1/2}$.

Os valores de A_{kk}^{exp} obtidos pelo ajuste foram corrigidos devido à geometria finita dos detetores, segundo a expressão :

$$A_{kk} = A_{kk}^{\text{exp}} / Q_{kk}$$

onde :

$Q_{kk} = Q_k(\gamma_1) \cdot Q_k(\gamma_2)$ - São os Fatores de Correção¹⁵ de geometria para raios- γ incidentes no detetor de Ge(Li) e GeHP respectivamente, que dependem do ângulo sólido entre a fonte e o detetor e da energia da radiação γ incidente nos detetores;

Para calcular-se os fatores de correção de geometria do detetor GeHP, foi utilizado um programa de computador, descrito na referência 41, e para o detetor de Ge(Li) consultou-se uma tabela, na referência 15. Os parâmetros de ajuste para os detetores dependiam basicamente da distância fonte detetor, o volume sensível de cada um e do intervalo de energia dos raios- γ a serem detetados.

II.2.2.- Obtenção da Razão de Mistura Multipolar

A técnica experimental de correlação angular permite que se obtenha no máximo dois coeficientes A_{22} e A_{44} normalizados, no entanto, para uma cascata simples pelo menos cinco parâmetros nucleares são necessários para que se possa caracterizar a cascata, ou seja, os valores dos spins de cada nível envolvido e a razão de mistura multipolar das duas transições correspondentes. Hestaria então a necessidade de se conhecer alguns parâmetros ad hoc, já que uma única solução do problema não pode ser obtida. A solução deste problema fica possível quando, informações adicionais são dadas através de outros experimentos, que envolvam estes parâmetros. Além disso pode-se fazer um estudo sistemático de núcleos vizinhos ou modelos nucleares para a região de massa em questão e conseguir indicações dos spins e paridades dos níveis de interesse.

Um exemplo prático seria de um núcleo par-par, pois sabe-se que tal núcleo possui estado fundamental 0^+ e primeiro estado excitado 2^+ , na grande maioria dos casos ficam caracterizados dois spins e uma mistura multipolar (a transição de $2^+ \longrightarrow 0^+$ é E2 ($\delta = 0$)) sobrando apenas dois parâmetros a determinar que podem ser obtidos através de A_{22} e A_{44} , os quais são determinados experimentalmente.

Para a obtenção da mistura multipolar e a sequência de spins correspondente faz-se um ajuste da função $W(\theta)$ teórica à experimental e verifica-se para qual sequência o valor de χ^2 é mínimo, a partir da expressão:

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^m \left[\frac{W^{\text{teo}}(\theta_j) - W^{\text{exp}}(\theta_j)}{\sigma(\theta_j)} \right]^2$$

onde :

m - número de ângulos em que as medidas foram feitas
, no caso $m = 4$;

$W^{\text{teo}}(\theta_j)$ - o valor teórico para a função correlação angular, calculado para uma dada sequência de spins;
 $W^{\text{exp}}(\theta_j)$, $\sigma(\theta_j)$ - o valor experimental e seu erro

Para uma visualização do resultado, pode-se também fazer um gráfico de $A_{22}(\delta)$ e $A_{44}(\delta)$. Estas curvas paramétricas são dadas pelos valores teóricos dos coeficientes de correlação angular em função das misturas multipolares⁴⁷, valores estes que estão tabelados, dado que se conheça o valor de uma das razões de mistura multipolar, no caso de uma cascata simples, e de duas razões no caso de uma cascata tripla. A partir da determinação da curva teórica, assinalamos os valores experimentais obtidos com as devidas barras de erro associadas a cada coeficiente.

No entanto, há casos em que mais de uma sequência é consistente com valores experimentais de A_{22} e A_{44} , dada a extensão das barras de erros, tornando-se então necessário o teste do χ^2 , ou mesmo dados experimentais encontrados através de outras técnicas.

II. 3. Teste do Equipamento

Para a verificação do bom funcionamento do espectrômetro γ foi realizada a medida de correlação angular γ - γ da cascata 1173-1332 keV do Ni^{60} , pois a correlação angular para esta cascata é definida como um padrão²¹, possuindo os valores de A_{22} e A_{44} bem conhecidos, dado a sua sequência de spins ser $4^+ - 2^+ - 0^+$, e envolve apenas transições puras, o que permite a obtenção dos coeficientes diretamente através da teoria. Os resultados da medida estão apresentados na fig II.3, que representa a curva ajustada para o polinômio $W(\theta)$ da cascata mencionada, e os valores de A_{22} e A_{44} são mostrados na tabela II.1 juntamente com os valores teóricos.

Valores	teórico	experimental
A_{22}	0.102	0.102 ± 0.004
A_{44}	0.009	-0.004 ± 0.005

Tabela II.1 - Valores teóricos e experimentais de A_{22} e A_{44} da cascata 1173-1332 keV do ^{60}Ni .

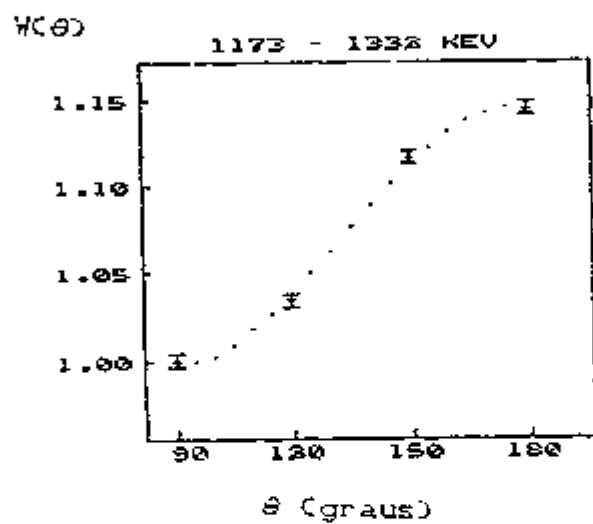


Figura II-3 - Função correlação angular $W(\theta)$ para a cascata 1173-1332 keV no ^{60}Ni .

III . Correlação Angular Direcional Gama-Gama das Transições no ^{72}Ge

III.1 Introdução

O estudo dos estados excitados do ^{72}Ge e seu decaimento gama é de particular interesse para a compreensão da estrutura nuclear em geral. Este núcleo, que possui uma subcamada fechada ($N = 40$), se encontra numa região de massa, onde há uma ligeira deformação na forma nuclear. Um motivo pelo qual tanta atenção é dada ao ^{72}Ge , é a ocorrência de um primeiro estado excitado $J^{\pi} = 0^{+}$, fato raro em núcleos par-par. Uma outra razão, deve-se a uma provável transição de forma nuclear esférica (ou oblata) para prolata, que é proposta em trabalhos experimentais³⁵ e teóricos²⁰.

Os primeiros trabalhos relevantes sobre a estrutura de níveis do ^{72}Ge foram desenvolvidos por Kraushaar *et al*^{13,30}, onde eles examinaram os níveis no ^{72}Ge a partir dos decaimentos β^{-} do ^{72}Ga e β^{+} ou captura eletrônica do ^{72}As . Em 1958, Arns e Wiedenbeck⁴ fizeram a primeira medida para a obtenção direta dos spins de vários estados excitados. Trabalhos mais recentes já apresentam um esquema de níveis mais completo, entre eles destacam-se os de Camp¹⁴ e de Rester *et al*⁴⁰, onde além da definição do esquema de decaimento, foram propostos também spins e paridades de diversos níveis excitados.

Outros trabalhos relacionados com o núcleo de ^{72}Ge , tais como: excitação Coulombiana³⁵, espalhamentos elástico de deuteron com 12 MeV por ^{70}Ga ³⁸ e inelástico de proton com 22 MeV pelos isótopos de $^{70-76}\text{Ge}$ ⁴³, correlação angular $\beta\text{-}\gamma$ polarizada circularmente (CP)⁴⁸, medida de conversão interna de pares⁶, e

também reações nucleares : (^3He , d) 1 , (α , 2n γ) 30 , (t,p) 34 e (p,t) 5 ajudaram a complementar as informações sobre o esquema de níveis em energia do ^{72}Ge , bem como o momento de quadrupólo elétrico, a razão de mistura multipolar e a probabilidade de transição reduzida para algumas transições - γ .

Trabalhos que envolvam a técnica de correlação angular gama-gama foram feitos pela primeira vez por Wiedenbeck e Arns 4 , utilizando dois detetores de cintilação (NaI(Tl)). Posteriormente, Monahan e Arns 11 utilizaram um detetor de Ge(Li) e um de NaI(Tl) e recentemente Chen *et al* 16 realizaram medidas empregando dois detetores de Ge(Li). O conjunto destes trabalhos serviu para propor os spins de alguns níveis excitados, bem como a razão de mistura multipolar de algumas transições - γ .

Todos estes parâmetros nucleares obtidos pelos trabalhos mencionados referentes ao ^{72}Ge estão apresentados no Nuclear Data Sheets 27 .

Apesar do volume de trabalhos ser considerável, há ainda a necessidade de confirmar e/ou propor as características das transições entre os primeiros níveis excitados (até 3,3 MeV). O presente trabalho foi realizado com o intuito de se medir a correlação angular γ - γ de um maior número de cascatas gama no ^{72}Ge . Para isso utilizou-se um espectrômetro com os detetores de HPGe e Ge(Li), permitindo assim uma melhor definição do spins dos níveis e a razão de mistura multipolar $\delta(E2/M1)$ para cada transição γ envolvida. Os níveis e transições do ^{72}Ge foram estudados a partir do decaimento β^- do ^{72}Ga .

Ao todo foram medidas 16 cascatas gama e determinadas as razões de mistura multipolar (δ) para 16 transições.

III.2 Técnica Experimental

III.2.1 Preparação da Fonte Radioativa de ^{72}Ga

As fontes radioativas de ^{72}Ga ($T_{1/2} = 14.1 \text{ h}$) foram produzidas através da irradiação de Ga_2O_3 com neutrons térmicos do reator IEA-R1 do IPEN em São Paulo. Aproximadamente 5 mg de Ga_2O_3 natural com 99,9% de pureza foram irradiados por 5 minutos com neutrons térmicos num fluxo de aproximadamente $5 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$. Dada a composição isotópica do Gálio natural (60% de ^{71}Ga e 40% de ^{69}Ga), foi preciso que se aguardasse por um periodo de aproximadamente 2 h antes de iniciar as medidas, pois o nuclideo de ^{70}Ga ($T_{1/2} = 21 \text{ min}$) era produzido também na irradiação. Porém, a sua produção era em menor quantidade em relação ao ^{72}Ga , devido à secção de choque de captura de neutrons térmicos do ^{69}Ga de 1.9 barns, ser menor que a do ^{71}Ga , 5.1 barns. (1 barn = 10^{-24} cm^2).

A atividade final de cada amostra era de 0.5 MBq e permitia a realização de medida por um periodo de 12 horas. Em todo o experimento foram preparadas 70 fontes.

III.2.2. Medidas de Correlação Angular

As medidas de coincidências γ - γ foram realizadas com o espectrômetro descrito em II.1.2 que consiste de um detetor de Germânio Hiperpuro de 89 cm^3 , mantido fixo e de um detetor de Ge(Li) de 45 cm^3 , móvel. Os ângulos entre os eixos dos detetores selecionados para as medidas foram de 90° , 120° , 150° e 180° , e o tempo de medida para cada ângulo foi de 90 minutos. Foi selecionado apenas um fotopico para se realizara medida de coincidências gama-gama de todas as cascatas gama estudadas. Foram realizadas

separadamente também medidas de contribuições de coincidências acidentais e coincidências por efeito Compton das transições- γ de energias mais altas.

A transição- γ de 834 keV foi escolhida para ser detetada, através do ajuste do nível de discriminação do analisador monocanal conectado ao detetor de Ge(Li), enquanto que no detetor de HPGe eram registrados os espectros de coincidências. Uma região adjacente ao fotopico de 834 keV foi escolhida para registrar as coincidências devido ao efeito Compton. Para a obtenção do espectro de coincidências acidentais atrasou-se em 1 μ s os pulsos entre os detetores antes de serem enviados à unidade de coincidência. As medidas para as correções foram realizadas separadamente. Foram medidas ao todo 16 cascatas que estão apresentadas na tabela III.1.

III.2.3 Resultados

O espectro direto de raios gama observados no decaimento β^- do ^{72}Ga é mostrado na figura III.1. O espectro de coincidências γ - γ com janela de 834 keV é apresentado na figura III.2. Na figura III.3 encontra-se o espectro de coincidências por efeito Compton. Todos os esses espectros foram registrados com o detetor de HPGe.

Os coeficientes de correlação angular (A_{kk}), obtidos de acordo com a descrição dada em II.2.1 são apresentados na tabela III.1, e pela figura III.4 pode-se observar as curvas de correlação angular das cascatas estudadas, que foram ajustadas ao polinômio $W(\theta) = 1 + A_{22}P_2(\cos \theta) + A_{44}P_4(\cos \theta)$, a partir do número de coincidências $W(\theta)$ em função do ângulo de medida. Os pontos experimentais estão assinalados nas curvas com as barras de erros.

As figuras III.5 e III.6 apresentam as curvas paramétricas, citadas no capítulo II (II.2.2), para algumas seqüências de spins escolhidas, nestas curvas estão graficados os valores de A_{22} e A_{44} em função da razão de mistura multipolar δ de uma das transições. Os pontos experimentais estão apresentados com as respectivas barras de erros. Estas curvas permitem uma opção de visualização dos valores experimentais, face à seqüência de spin escolhida.

As razões de mistura multipolar, $\delta(E2/M1)$, obtidas no atual trabalho e as propostas em trabalhos anteriores, e que foram adotadas no Nuclear Data Sheets²⁷ mais recente, estão apresentadas na tabela III.2. A convenção de sinal para $\delta(E2/M1)$ utilizada foi a de Krane e Steffen²⁹. O método de obtenção das seqüências de spins mais consistentes com os valores experimentais está descrito em II.2.2.

Na figura III.7 está representado o esquema parcial de decaimento β^- do $^{72}\text{Ga}(T_{1/2} = 14.1 \text{ h})$ ²⁷, onde apenas as transições gama e os níveis de energia estudados neste trabalho são apresentados.

A seguir prossegue-se com uma discussão dos níveis estudados e o spin e a paridade propostos para cada um, assim como a razão de mistura multipolar das transições- γ envolvidas.

O spin e a paridade para o estado fundamental é $J^\pi = 0^+$, pois trata-se de um núcleo par-par.

Nível a 834 keV

Este nível é alimentado pelo decaimento β^- do ^{72}Ga ($J^\pi = 3^-$) com $\log ft = 8.86$ ²⁷. Foi estudado por decaimento β^- ¹⁴,

captura eletrônica⁴⁰, bem como por reações nucleares : $(\alpha, 2n\gamma)$ ³⁸, (t,p) ³⁴ e (p,t) ⁴³. Todos estes trabalhos confirmam o spin e a paridade 2^+ , bem como o caráter E2 da transição de 834 keV. Neste trabalho este nível é o intermediário de todas as 16 cascatas estudadas.

Nível a 1464 keV

Este nível foi estudado através da medida de correlação angular gama-gama da cascata 630-834 keV pela primeira vez por Arns e Wiedenbeck⁴, que propuseram spin e paridade $J^\pi = 2^+$. Esta previsão foi confirmado posteriormente em outros trabalhos de correlação angular^{37,16}, decaimento β^- ¹⁴, captura eletrônica⁴⁰ e reações nucleares^{1,2,35,38}.

Neste trabalho, a medida de correlação angular da cascata 630-834 keV, que envolve o nível 1464 keV como inicial, confirma o spin e paridade $J^\pi = 2^+$ e caráter predominantemente E2 da transição de 630 keV ($\delta = 32.6 \pm 5.7$).

Nível a 1728 keV

O spin e a paridade deste nível foram inicialmente propostos como sendo 4^+ por Monahan e Arns³⁷, a partir de medidas de correlação angular gama-gama da cascata 894-834 keV. Estes valores vieram a ser confirmados posteriormente por Chen et al¹⁶ em outra medida de correlação angular, e ainda por Ball et al⁵ através de estudos com a reação nuclear (p,t) .

No presente trabalho mediu-se a cascata 894-834 keV e confirmou-se o spin e paridade do nível como sendo 4^+ . O resultado da correlação angular está consistente com a sequência de spins $4^+ \longrightarrow 2^+ \longrightarrow 0^+$, esta por sua vez envolve transições de

caráter puramente E2, deste modo a função correlação angular permite ter seus coeficientes determinados teoricamente, $A_{22} = 0.102$ e $A_{44} = 0.009$, daí os resultados experimentais deverem estar compatíveis com os valores previstos teoricamente.

Uma comparação dos valores de A_{kk} obtidos por Monahan e Arns³⁷ (tabela III-1) mostra uma discrepância com o previsto teoricamente, pois provavelmente houve a interferência de raios γ vizinhos, pois a medida foi realizada com dois detetores cintiladores, NaI(Tl), cuja resolução pode ter comprometido a análise, conforme observaram os autores. Os valores obtidos por Chen et al¹⁶ apesar de possuírem uma melhor estatística ($A_{22} = 0.125 \pm 0.005$ e $A_{44} = 0.005 \pm 0.007$), encontram-se acima do previsto, o que pode ser indicio de um erro sistemático que se observou em outras cascatas.

Nível a 2065 keV

Este nível foi proposto pela primeira vez por Kraushaar et al³⁰ a partir de estudos de decaimento β^- . Os resultados da medida de correlação angular da cascata 601-(630)-834 keV feito por Monahan e Arns³⁷, indicam a possibilidade do spin deste nível ser 1 ou 3. Rester et al⁴⁰ baseados em evidências experimentais de que este nível é pouco excitado ao se efetuar espalhamento de prótons, propuseram que a paridade deste nível fosse positiva. Estes parâmetros foram confirmados posteriormente no trabalho¹⁶ de Chen et al¹⁶.

Este nível foi inicial para estudar-se duas cascatas gama : 601-(630)-834 keV e 1231-834 keV.

O resultado de A_{kk} para a cascata 601-(630)-834 keV em comparação com trabalhos anteriores, mostrou-se em bom acordo

com os obtidos por Monahan e Arns³⁷ e discrepantes em relação aos valores de Chen et al¹⁶, que novamente como em outros casos mostrou um valor de A_{22} mais elevado. Os resultados do presente trabalho vieram a confirmar os valores $J^{\pi} = 3^{+}$.

Para o cálculo da razão de mistura multipolar utilizou-se $\delta(630) = 32.6$ para a transição não-observada de 630 keV, e a partir daí foi obtido o valor de $\delta(601) = 4.0 \pm 0.5$, o que indica que para a sequência $3 \rightarrow 2$ há a predominância de contribuição quadrupolar, consistente apenas com uma paridade positiva para o nível. Para a transição de 1231 keV encontrou-se uma mistura multipolar $\delta(1231) = -0.53 \pm 0.06$, que foi determinada pela primeira vez através deste trabalho.

Nível a 2464 keV

Estudos do decaimento β^{-} ³⁸ e captura eletrônica⁴⁰ apontam para este nível como tendo spin e paridade 4^{+} , confirmado em trabalho de reação nuclear (p,t)⁵.

No presente trabalho, foi possível estudar este nível através de duas cascatas gama : 736-(894)-834 keV e 1000-(630)-834 keV. Os resultados obtidos confirmam o valor de spin e paridade igual a 4^{+} . Para o cálculo das misturas multipolares das transições de 736 keV e 1000 keV, os valores de $\delta(630) = 32.6$ e $\delta(894) = 0$ foram utilizados. Os valores de $\delta(736)$ e $\delta(1000)$ estão apresentados na tabela III.2.

Nível a 2515 keV

Este nível foi estudado por decaimento β^{-} ⁴⁰, decaimento β^{+} e captura eletrônica^{37,14} e por reações nucleares^{1,34,35,38}. Todos estes trabalhos concordam com $J^{\pi} = 3^{-}$. Da

mesma forma, os trabalhos em correlação angular $\gamma\text{-}\gamma$ ^{37,16} confirmam estes valores.

No presente trabalho estudou-se este nível através da medida de correlação angular das cascatas 786-(894)-834 keV, 1051-(630)-834 keV e 1681-834 keV, sendo a última medida pela primeira vez. Os coeficientes A_{kk} da cascata gama 786-(894)-834 keV estão em concordância com os encontrados por Monahan e Arns³⁷, entretanto, nosso resultado apresenta erros experimentais menores. Para a cascata 1051-(630)-834 keV os valores de A_{kk} obtidos concordam com os resultados de Chen et al¹⁶. O spin e a paridade 3^- foram confirmados para este nível.

As razões de mistura multipolar de todas as transições envolvidas foram calculadas. Para o cálculo de $\delta(1051)$ utilizou-se o valor de $\delta(630)$; da mesma maneira, a determinação de $\delta(786)$ foi realizada considerando-se as transições γ de 834 keV e 894 keV puramente E2, ou seja com $\delta = 0$. Os resultados estão na tabela III.2. A razão de mistura multipolar, $\delta(1681) = 0.29 \pm 0.05$, foi determinada pela primeira vez.

Nível a 2944 keV

Este nível foi identificado pela primeira vez por Camp¹⁴ em trabalho de espectroscopia gama. Monahan e Arns³⁷ através de medidas de correlação angular propuseram spins 3 ou 4. Posteriormente Rester et al⁴⁰, em trabalho de espectroscopia, optaram por spin 3 e paridade negativa, baseados no fato de haver uma transição deste nível para o estado fundamental. Os trabalhos com reações nucleares (p,t) e (α , 2n γ), de Morand et al³⁸ e de Lecomte et al³⁵ respectivamente, confirmaram o valor de spin igual a 3.

No presente trabalho estudou-se o nível de 2944 keV pelas cascatas 2109-834 keV e 1215-(894)-834 keV e confirmou-se $J^\pi = 3^-$. Os resultados obtidos para os coeficientes A_{kk} estão apresentados na tabela III.1. Encontrou-se os seguintes valores de razão de mistura multipolar : $\delta(1215) = -0.10 \pm 0.01$ e $\delta(2109) = 0.17 \pm 0.02$, que são apresentados pela primeira vez com uma precisão razoável.

Nível a 3036 keV

Este nível se desexcita por um raio- γ de 2202 keV com intensidade relativa alta, o que permitiu que um grande número de trabalhos experimentais envolvessem este nível. As medidas de correlação angular feitas por Arns e Wiedenbeck⁴ e por Monahan e Arns³⁷ determinaram o spin do nível como sendo igual a 2. Este valor foi posteriormente confirmado por Rester et al⁴⁰, em trabalho de espectroscopia, que baseados em medida de conversão interna de pares⁶ e correlação $\beta\gamma(CP)$ ⁴⁸ propuseram paridade negativa ao nível.

No presente trabalho mediu-se a cascata 2202 - 834 keV, e os valores do spin e paridade $J^\pi = 2^-$ foram confirmados.

Os valores dos coeficientes de correlação angular A_{kk} estão de acordo com os encontrados no trabalho de Monahan e Arns³⁷, porém nosso resultado apresenta erros experimentais menores. Da mesma forma, uma melhor avaliação da razão de mistura multipolar $\delta(2202)$ foi obtida, conforme mostra-se na tabela III-2.

Níveis a 3325 e 3342 keV

Na discussão dos estados excitados do ⁷²Ge, estes dois níveis foram analisados em conjunto, dada a as bases de

argumentação para sugerir-se os seus spins e paridades. Kraushaar et al^{13,30} em trabalhos que estudaram os decaimentos β^- , β^+ e captura eletrônica indicaram que os spins destes dois níveis deveriam ser 2 ou 3. Resultados de medidas de conversão interna de pares, encontrados por Balyaev et al⁶, apontam paridade negativa para ambos os níveis. Tirsell et al⁴⁸, em trabalho de correlação $\beta\gamma$ (CP) propuseram que os spins do dois níveis não poderiam ser ambos iguais a 3. Os dados experimentais obtidos em correlação angular γ - γ por Monahan e Arns³⁷ propõe spin 3⁻ e 2⁻ para os níveis 3325 keV e 3342 keV, respectivamente.

No presente trabalho, mediu-se as 3 cascatas que envolvem o nível de 3325 keV como inicial, a saber : 2491-834 keV , 1597-(894)-834 keV e 1861-(894)-834 keV. As medidas foram analisadas levando-se em consideração as possibilidades de spin 2 e 3, sendo os resultados favoráveis ao spin 3. Todos os coeficientes de correlação angular, obtidos neste trabalho, estão consistentes com os encontrados por Monahan e Arns³⁷, entretanto nossos resultados apresentam erros experimentais menores nos casos que envolvam as duas cascatas triplas.

A cascata 2508-834 keV foi utilizada para estudar-se o nível de 3342 keV. Sua análise apresentou um ajuste melhor para o spin 2, confirmando as previsões feitas anteriormente em medida de correlação angular³⁷.

As medidas de correlação angular para as 4 cascatas gama permitiram a escolha da melhor sequência de spins, para os dois níveis, fornecendo assim condições para o cálculo da razão de mistura multipolar de todas transições- γ envolvidas. Para a transição de 1861 keV este cálculo foi feito pela primeira vez, e chegou-se ao resultado ; $\delta(1861) = 0.21 \pm 0.01$. Para as demais

transições, 1597 keV, 2491 keV e 2508 keV o caráter predominante de dipólo elétrico (E1) foi confirmado, e novamente nossos resultados apresentam menores erros, conforme mostra a tabela III.2.

TABELA III.1 - COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO ANGULAR - A_{22} e A_{44}

CASCATA (keV)	A_{22}	A_{44}	REFERÊNCIA
630-834	-0.095 (10) -0.002 (09) -0.075 (12) -0.145 (40)	0.308 (16) 0.311 (12) 0.225 (18) 0.314 (65)	ATUAL 16 37 04
894-834	0.116 (15) 0.125 (05) 0.046 (16)	0.023 (23) -0.005 (07) -0.012 (13)	ATUAL 16 37
1231-834	-0.418 (50) -0.50 (13)	0.002 (90) -0.16 (19)	ATUAL 16
1681-834	0.123 (65)	-0.113 (100)	ATUAL
2109-834	0.057 (64)	-0.068 (92)	ATUAL
2202-834	0.269 (16) 0.283 (28)	-0.022 (24) 0.002 (42)	ATUAL 37
2491-834	-0.074 (34) 0.040 (32)	-0.004 (52) -0.003 (49)	ATUAL 37
2508-834	0.206 (25) 0.181 (21)	-0.001 (40) -0.057 (33)	ATUAL 37
601-630-834	0.004 (22) 0.047 (06) 0.045 (50)	-0.007 (36) -0.020 (08) -0.092 (75)	ATUAL 16 37
736-894-834	0.117 (70)	-0.005 (110)	ATUAL
786-894-834	-0.090 (25) -0.165 (43)	-0.035 (30) -0.076 (66)	ATUAL 37
1000-630-834	-0.022 (59) -0.19 (17)	0.012 (91) -0.22 (25)	ATUAL 37
1051-630-834	0.062 (20) 0.064 (06) -0.039 (55)	0.005 (31) -0.006 (08) -0.069 (84)	ATUAL 16 37
1215-894-834	-0.051 (66) -0.28 (19)	0.016 (100) -0.06 (28)	ATUAL 37
1597-894-834	-0.121 (33) -0.182 (50)	0.035 (50) 0.081 (76)	ATUAL 37
1861-630-834	-0.017 (26) 0.058 (91)	0.005 (39) 0.14 (14)	ATUAL 37

TABELA III.2 - RAZÃO DE MISTURA MULTIPOLAR DAS TRANSIÇÕES- γ NO ^{72}Ge

NIVEL keV	TRANSICAO keV	$I_1^{\pi} - I_f^{\pi}$	$\delta(E2/M1)$ presente trabalho	$\delta(E2/M1)$ REF 27
1464	630	$2^+ \rightarrow 2^+$	32.6 ± 5.7	$-10.3(1.3)$
1728	894	$4^+ \rightarrow 2^+$	E2	≈ 0.0
2065	601	$3^+ \rightarrow 2^+$	4.0 ± 0.6	$4.0(16)$
	1231	$3^+ \rightarrow 2^+$	-0.53 ± 0.07	-2.0^{+15}_{-25}
2464	736	$4^+ \rightarrow 4^+$	-1.6 ± 0.2	$0.0(1)$
	1000	$4^+ \rightarrow 2^+$	0.05 ± 0.09	$-0.1(1)$
2515	786	$3^- \rightarrow 4^+$	0.05 ± 0.01	$0.02(5)$
	1051	$3^- \rightarrow 2^+$	-0.29 ± 0.02	$-0.01(16)$
	1681	$3^- \rightarrow 2^+$	0.29 ± 0.05	INEDITO
2943	1215	$3^- \rightarrow 4^+$	-0.10 ± 0.01	INEDITO
	2109	$3^- \rightarrow 2^+$	0.17 ± 0.02	INEDITO
3036	2202	$2^- \rightarrow 2^+$	-0.03 ± 0.01	$-0.05(4)$
3325	1861	$3^- \rightarrow 2^+$	0.21 ± 0.01	INEDITO
	1597	$3^- \rightarrow 4^+$	-0.01 ± 0.03	$0.05(6)$
	2491	$3^- \rightarrow 2^+$	0.00 ± 0.02	$0.15(4)$
3342	2508	$2^- \rightarrow 2^+$	0.06 ± 0.05	$0.09(5)$

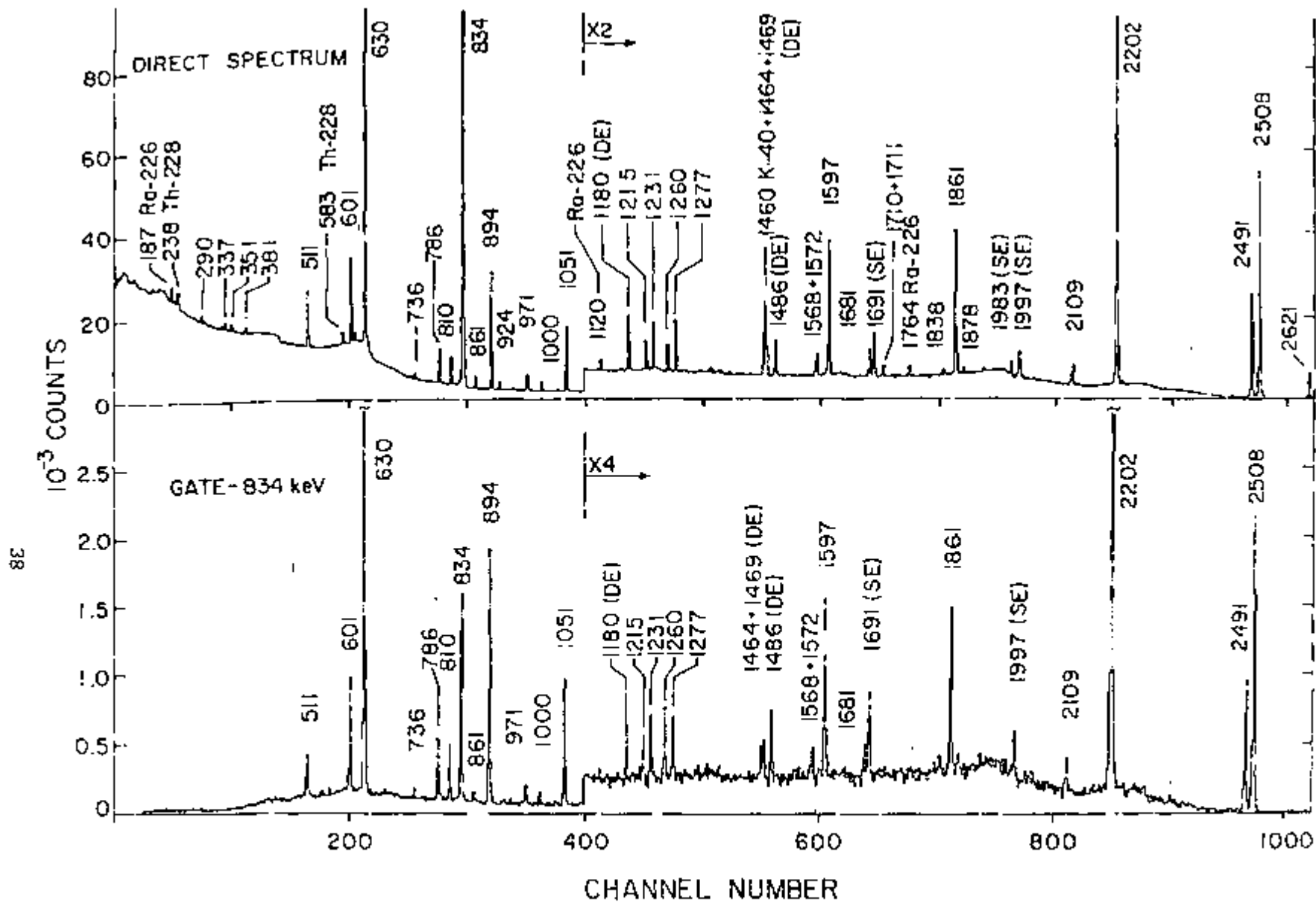


Figura III-1a - Espectro direto de raios- γ do decaimento do

^{72}Ga com o detetor HPGe.

Figura III-1b - Espectro de coincidências γ - γ com o fotômetro de

834 keV com o detetor HPGe.

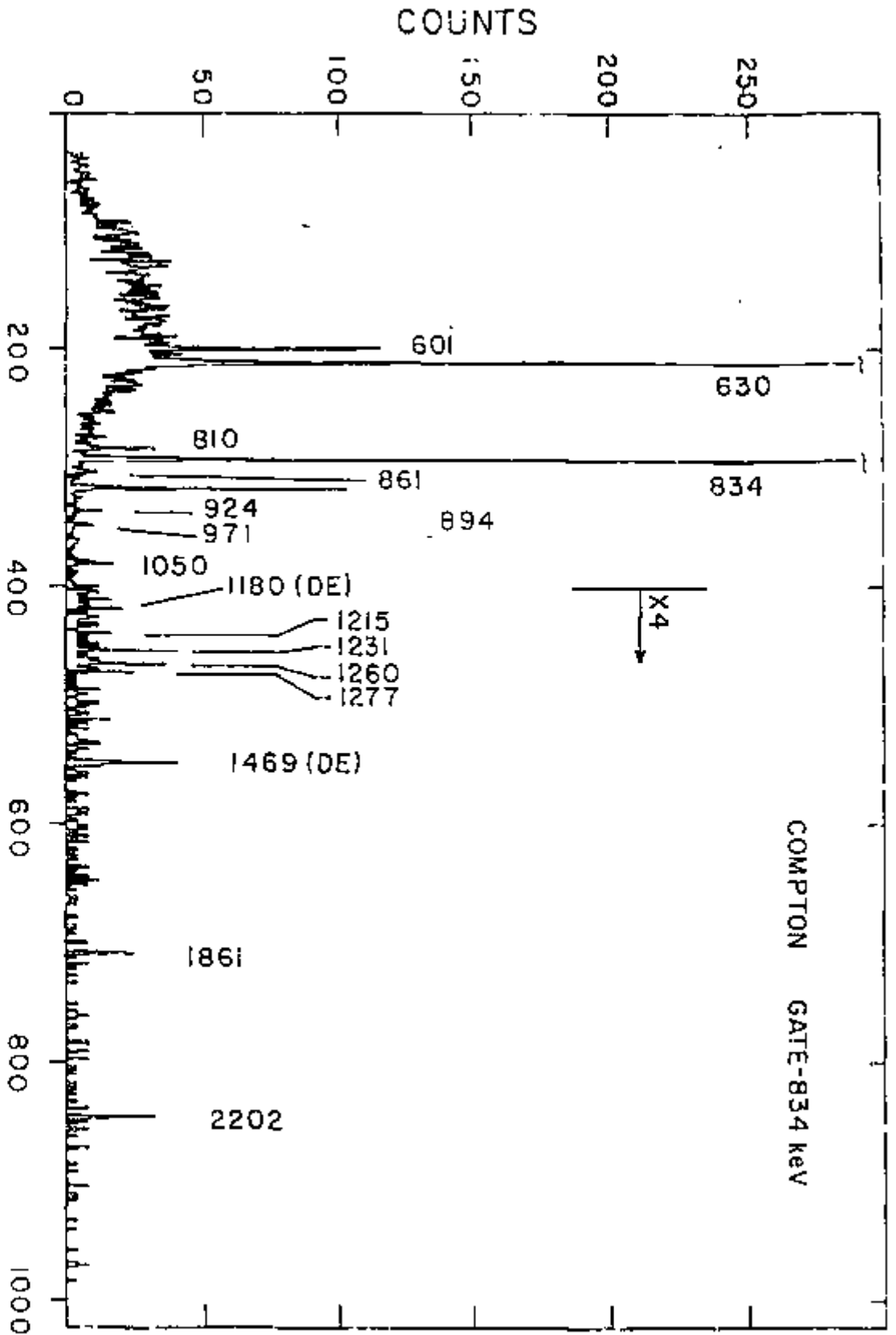


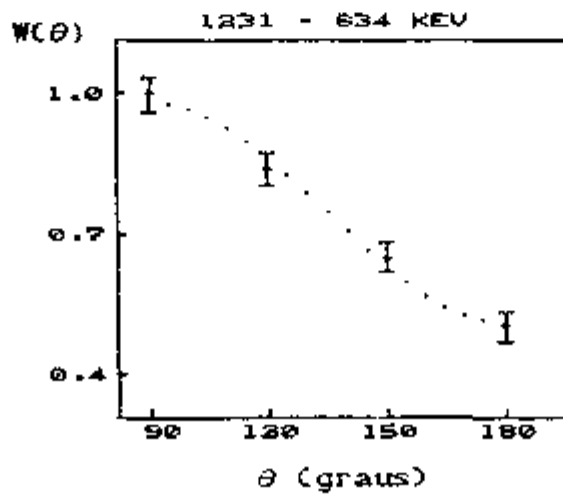
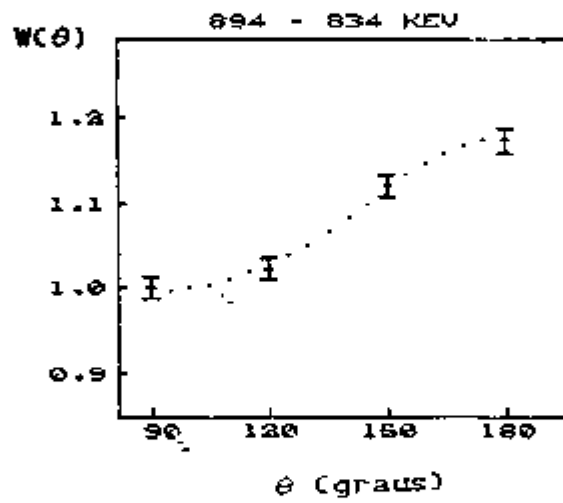
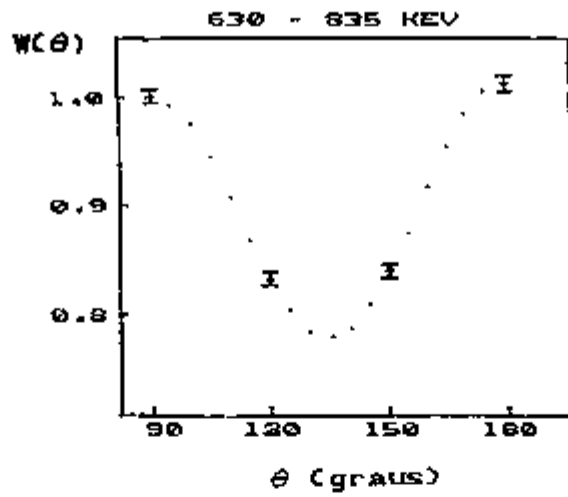
Figura III-2 - Espectro de coincidências γ - γ de

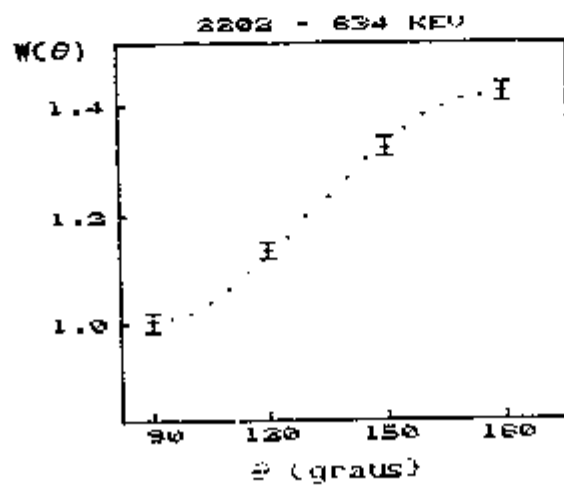
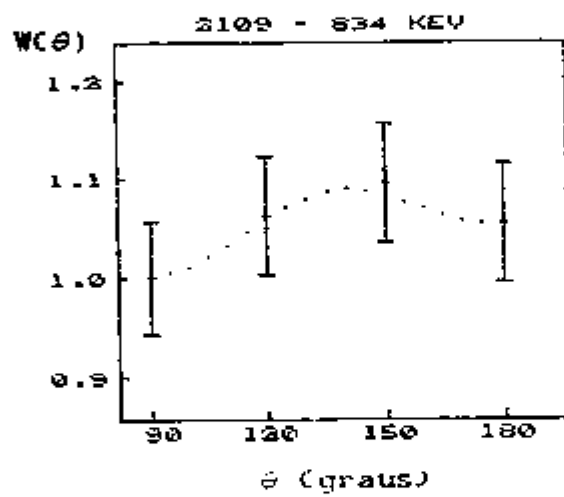
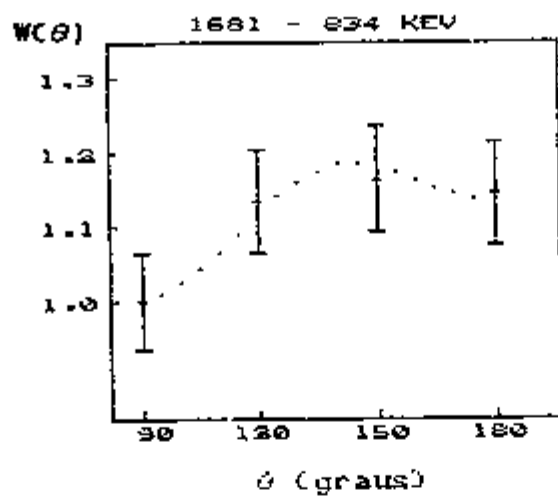
contribuição Compton no fotopico de

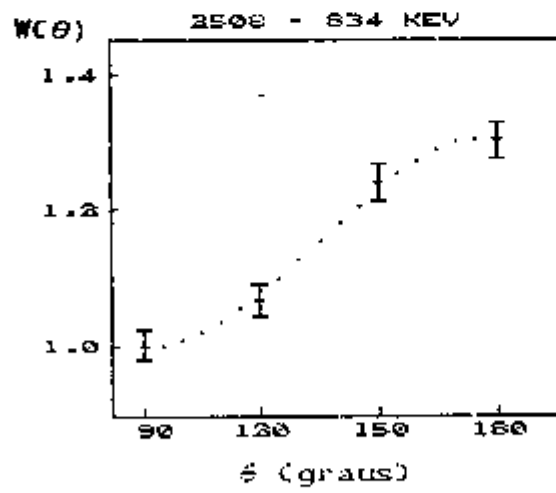
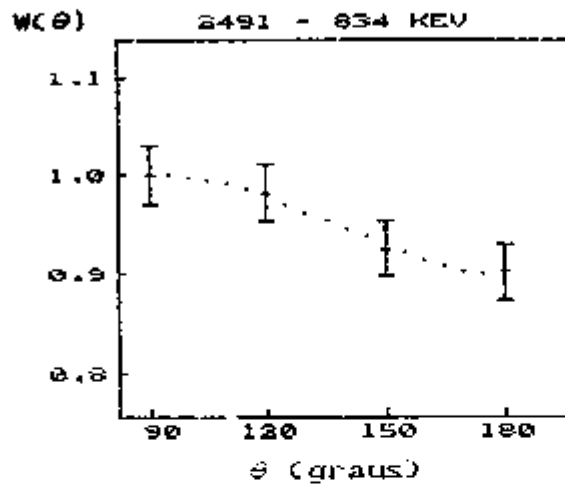
834 keV com o detector HPGe.

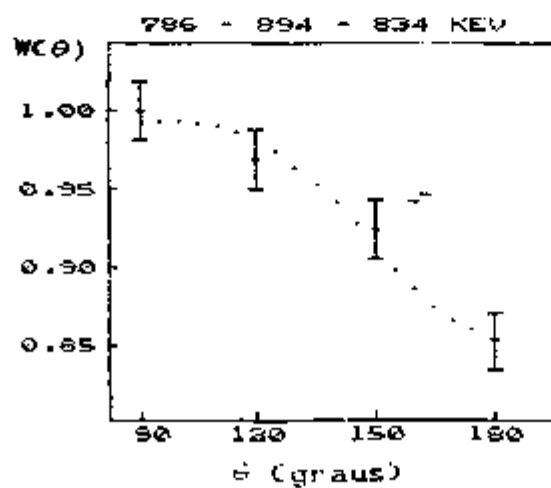
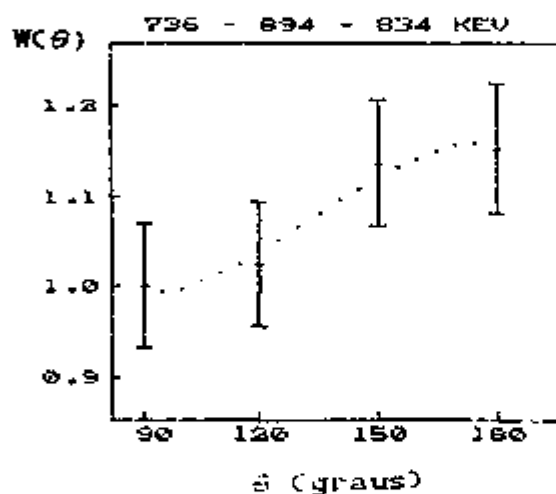
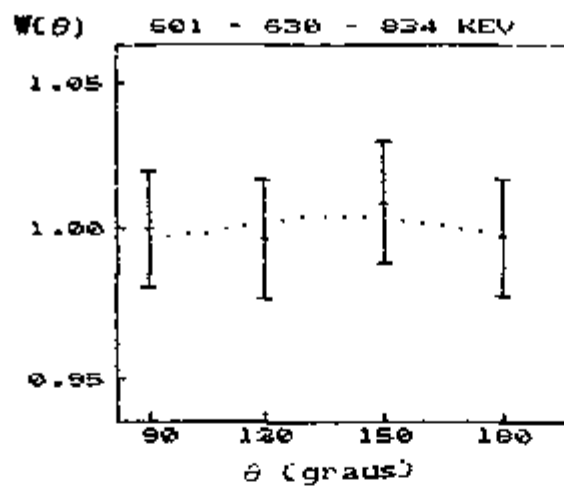
pontos experimentais para as cascatas γ

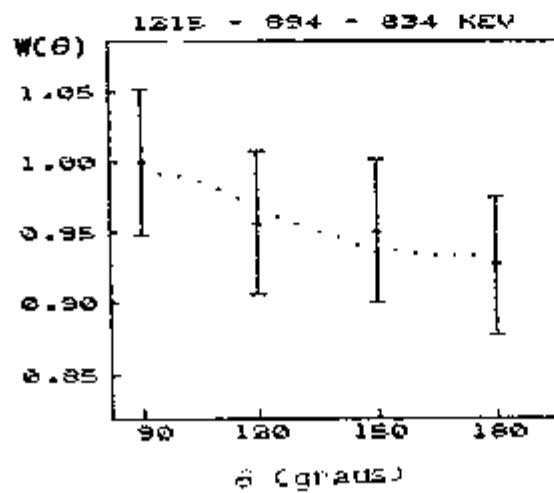
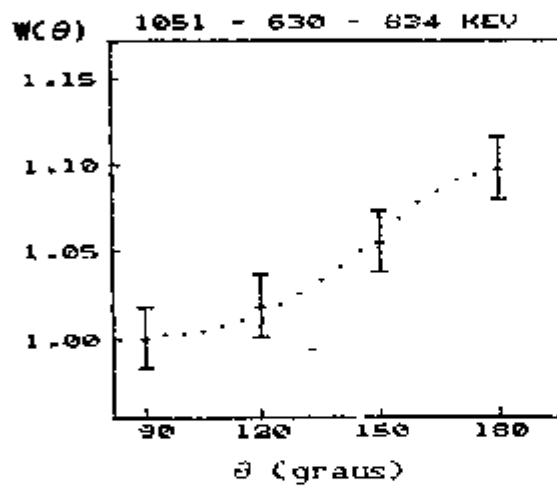
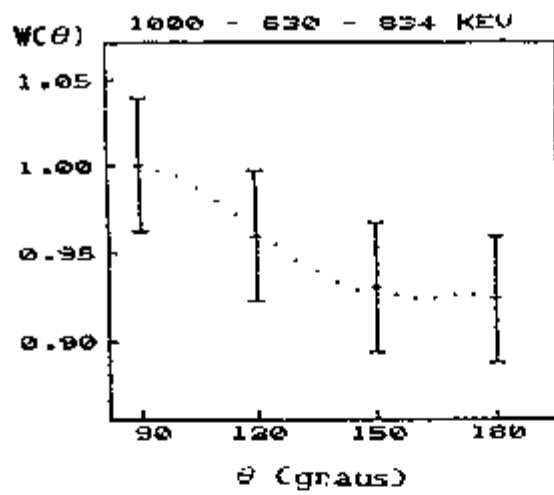
no ^{72}Ge .

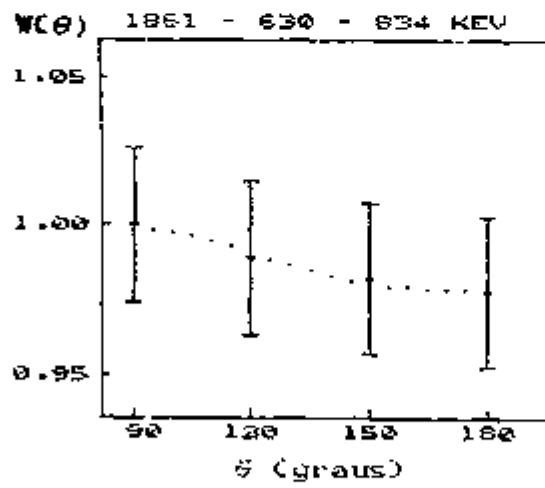
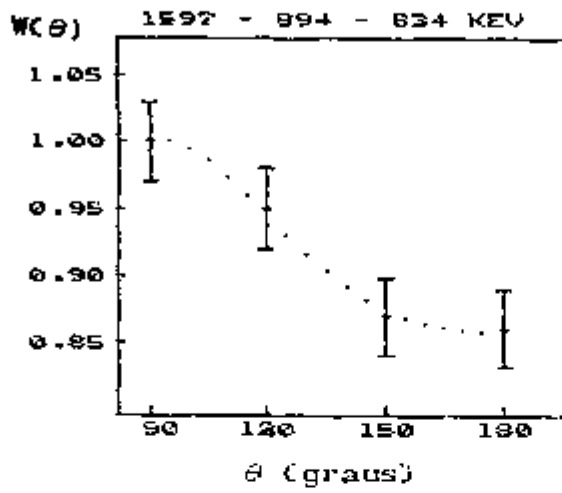












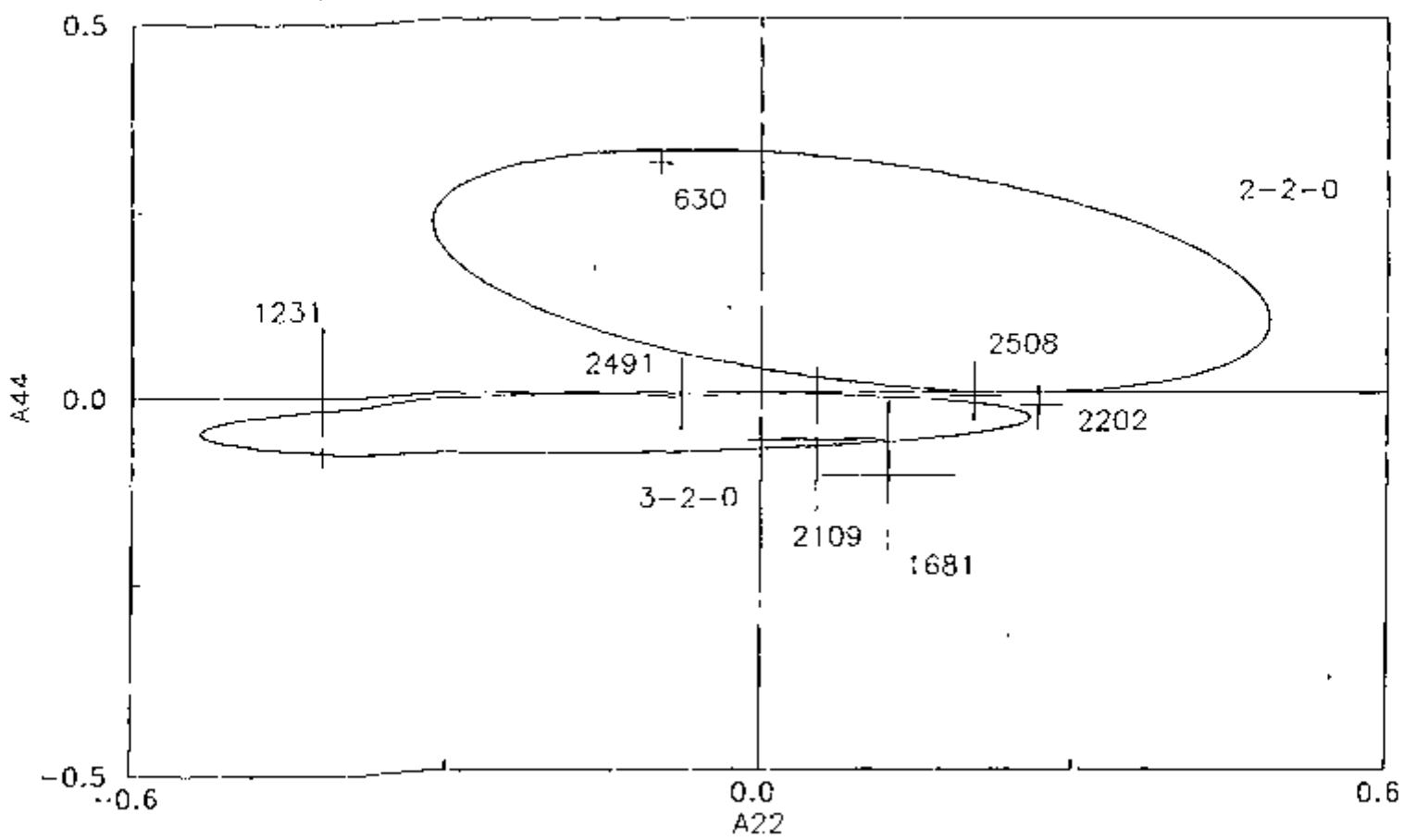
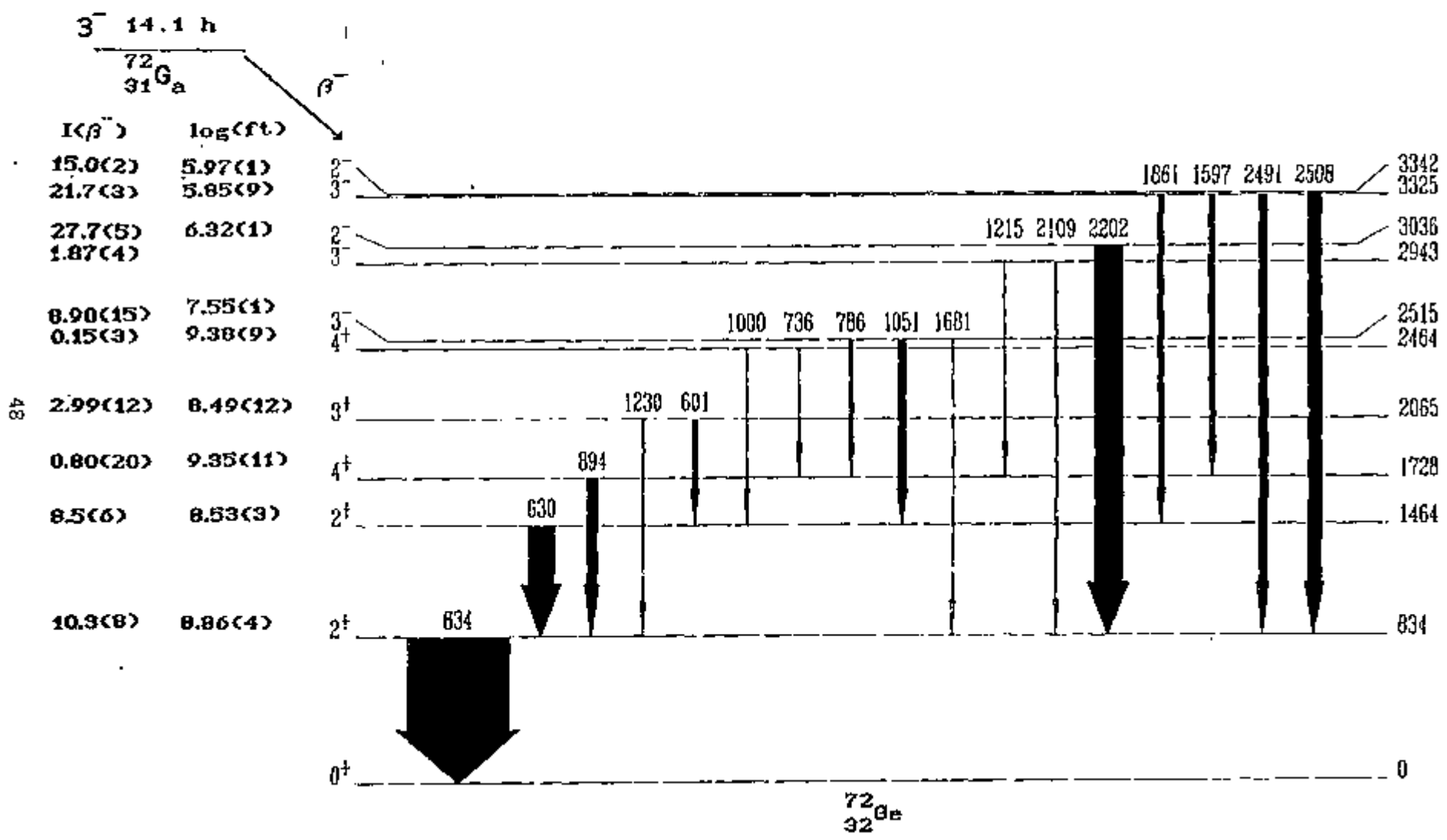


Figura III-4 Curvas paramétricas dos valores de A_{kk} para as sequências de spins , envolvendo cascatas simples.

Figura III-6 - Esquema parcial de decaimento β^- do $^{72}_{31}\text{Ga}$.



IV - Discussão dos Resultados

A interpretação das propriedades dos núcleos par-par, na região de massa $60 \leq A \leq 150$, pode ser feita em termos de três modelos não equivalentes : os estados excitados podem ser descritos como vibrações em torno de uma forma esférica de equilíbrio; como rotações de um caroço, que seja levemente deformado; ou ainda como as excitações de duas partículas (quasipartículas) do estado fundamental. Estes vários modelos fazem previsões bastante diferentes para os momentos multipolares eletromagnéticos, dinâmicos e estáticos, e pode se esperar que um estudo detalhado sobre o comportamento sistemático destes momentos revele o quanto os níveis excitados a baixas energias possam ser compreendidos em termos de modelos que levem em conta efeitos coletivos ou de partícula. Experimentalmente, pode-se testar estes modelos pela medida da probabilidade de transição eletromagnética de um estado nuclear para outro, como também a medida das razões de mistura multipolar $\delta(E2/M1)$, das transições γ , que são parâmetros que avaliam de maneira extremamente sensível as funções de onda necessárias para descrever o núcleo.

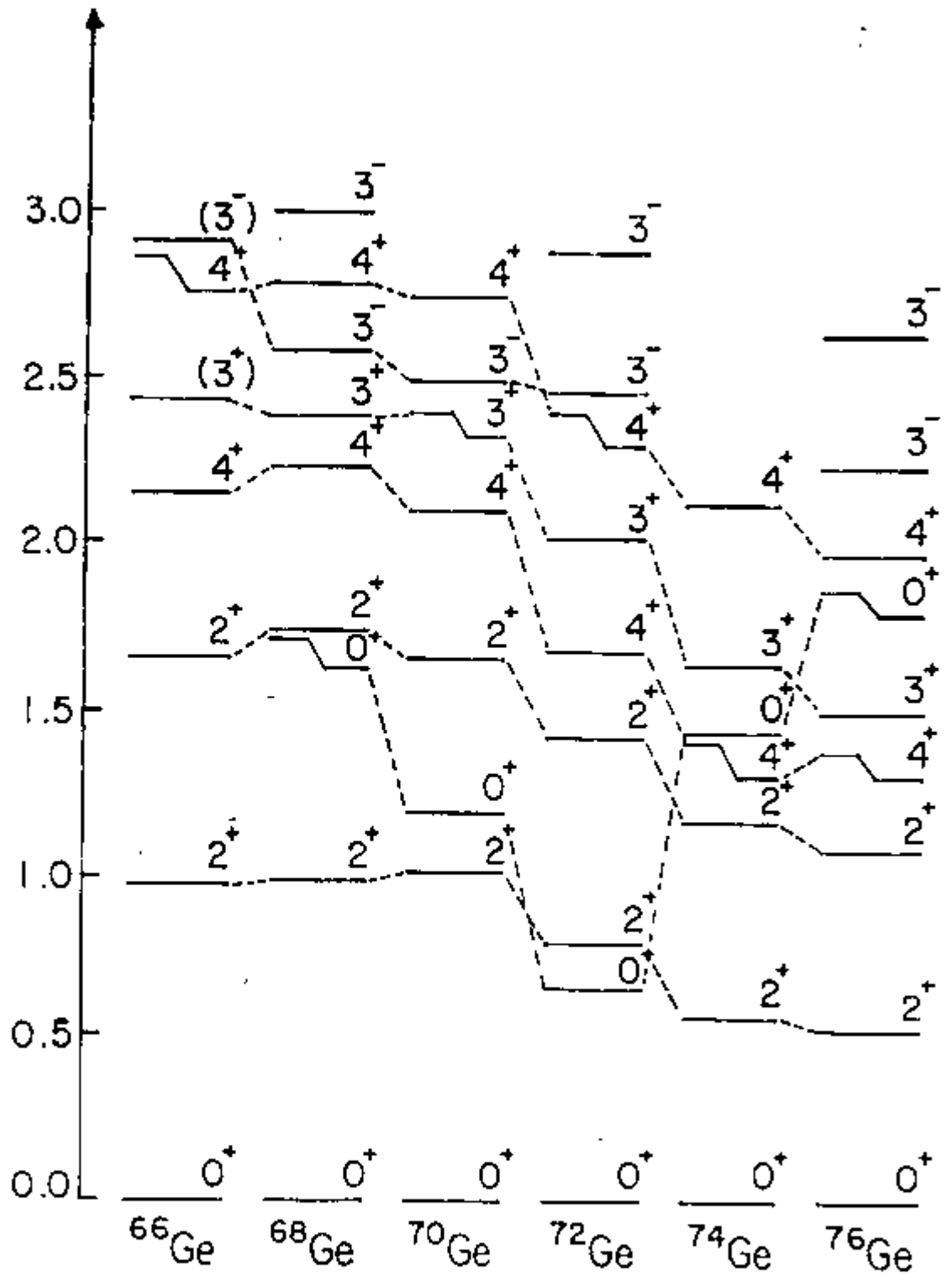
No presente capítulo, tem-se como objetivo principal sistematizar os resultados experimentais para uma melhor compreensão da estrutura do núcleo do ^{72}Ge e isótopos vizinhos par-par. Para tanto foi feita uma comparação dos espectros de energia e das razões de mistura multipolar de algumas transições γ . Além disso, são apresentadas as principais idéias na descrição da estrutura em termos de modelos propostos em outros trabalhos.

A estrutura nuclear do ^{72}Ge tem sido alvo de muitos estudos experimentais e teóricos nos últimos 20 anos, e tanto esforço pode ser atribuído principalmente à necessidade de explicar

a presença de um nível 0_1^+ como primeiro estado excitado, fenômeno que ocorre somente em outros 4 núcleos : ^{16}O , ^{40}Ca , ^{96}Zr e ^{98}Mo . A extensão do número de trabalhos sobre o ^{72}Ge é grande, pois não se tem ainda uma explicação simples sobre a estrutura deste núcleo e seus isótopos vizinhos pares. Há ainda uma variação irregular de algumas características dos seus estados a baixas energias em função do número de massa. Pode-se citar as seguintes observações : 1) a energia do estado excitado 0_1^+ nos isótopos pares do Ge diminui com o aumento do número de neutrons, sendo 1,75 MeV para $N = 36$, atingindo um valor mínimo de 0,69 MeV para $N = 40$ e aumenta de novo chegando a 1,91 MeV para $N = 44$, o que pode ser observado através da figura IV.1, onde os parâmetros mais relevantes (energia, spin e paridade) estão em destaque, observando que deu-se destaque principalmente aos níveis do ^{72}Ge estudados neste trabalho, que foram populados através do decaimento β^- do ^{72}Ga , e os correspondentes nos vizinhos pares. 2) Apesar de ser considerada uma camada semi-fechada para $N = 40$, a energia do 2_1^+ é máxima para $N = 38$ e não para $N = 40$. 3) A razão $E_{4_1^+} / E_{2_1^+}$, que é um importante indicador da deformação nuclear é aproximadamente 2,1 para os núcleos $^{66,70,72}\text{Ge}$ e sobe rapidamente para 2,5 para os núcleos vizinhos $^{74,76}\text{Ge}$, conforme mostra a figura IV.2. 4) Há uma acentuada variação na secção de choque de transferência de 2 neutrons para a população do primeiro estado excitado nos isótopos pares do Ge. Estes pontos serão discutidos em mais detalhes a seguir, em termos de trabalhos teóricos e experimentais.

energias nos núcleos do Ge com número
 $A = 66, 68, 70, 72, 74, 76.$

E (MeV)



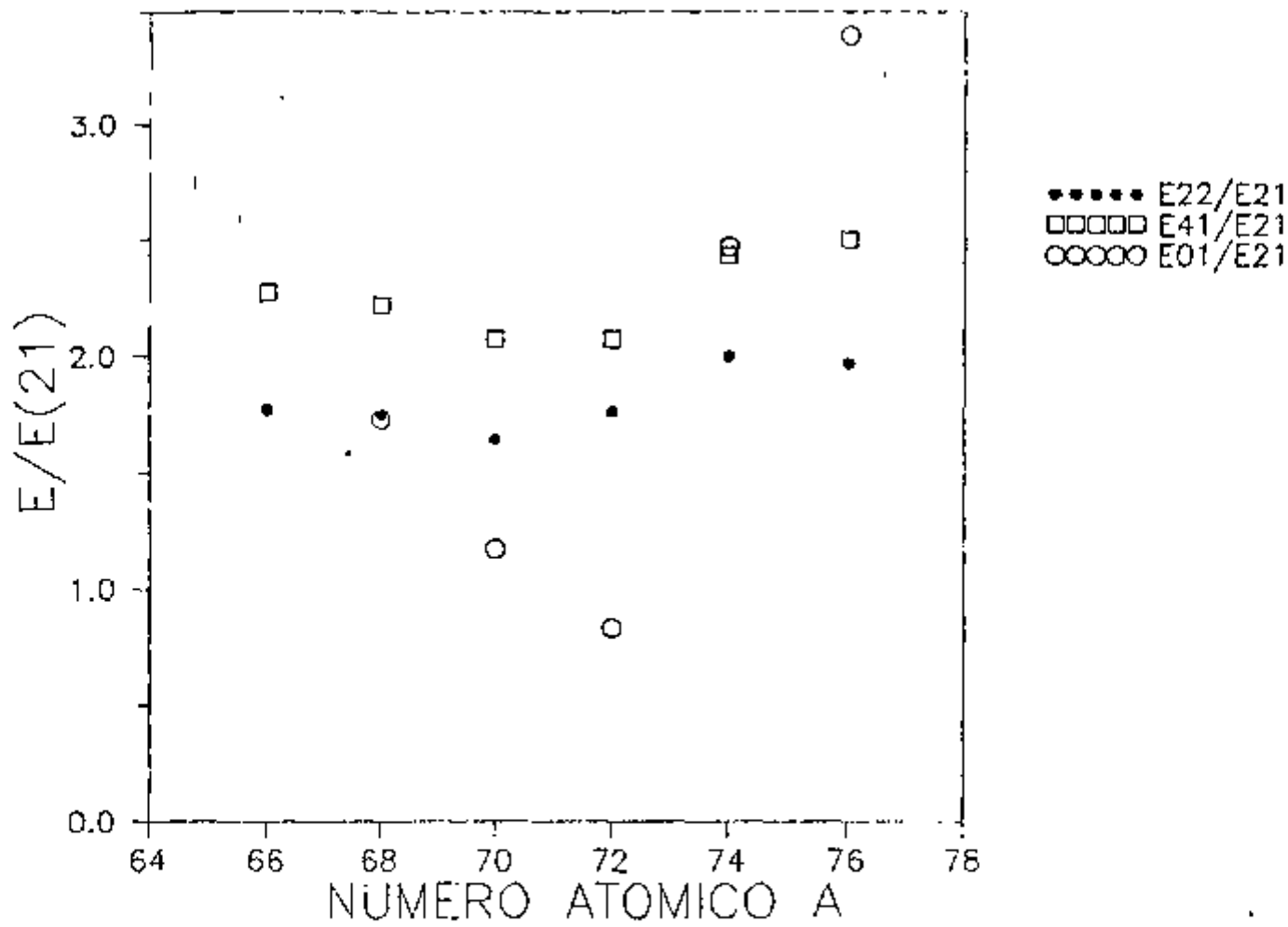


Figura IV-2. Razões de energia E_{41}/E_{21} , E_{01}/E_{21} e E_{22}/E_{21} para os núcleos de $^{66,68,70,72,74,76}\text{Ge}$.

Uma outra comparação foi feita em termos das probabilidades de transição reduzida, $B(E2)$, que mostra que as transições $2_2^+ \rightarrow 0_1^+$ são fortemente retardadas, quando comparadas com as probabilidades das transições $2_1^+ \rightarrow 0_1^+$, $2_2^+ \rightarrow 2_1^+$ e $4_1^+ \rightarrow 2_1^+$. As probabilidades $B(E2)$ estão apresentadas na tabela IV.1. Os valores foram tirados do Nuclear Data Sheets, relativos a cada isótopo. 7,8,9,27,45,46

A	$B(E2; 2_2^+ \rightarrow 2_1^+)$	$B(E2; 2_1^+ \rightarrow 0_1^+)$	$B(E2; 2_2^+ \rightarrow 0_1^+)$	$B(E2; 4_1^+ \rightarrow 2_1^+)$
66	27 (11)	12 (23)	0.11 (5)	
68	0.44 (19)	17.6 (20)	0.17 (3)	13.9 (18)
70	111 (60)	21.0 (4)	1.0 (5)	24 (6)
72	62 (11)	23.5 (4)		18.5 (25)
74	47 (13)	33 (4)	0.78 (19)	37 (4)
76	42 (9)	29 (1)	0.90 (22)	38 (9)

Tabela IV.1 Probabilidades de transição reduzida, $B(E2)$, entre os primeiros estados excitados, dos isótopos pares do ^{72}Ge . Unidade de $B(E2)$ em $e^2 \cdot \text{barn}^2$.

Estimativas de probabilidades de transição de partícula única (unidades Weisskopf) mostram que os valores experimentais são de 1 ou 2 ordens de grandeza maiores, revelando um forte caráter coletivo destes núcleos.

Os valores dos momentos de quadrupólo elétrico experimentais, Q_2 , são importantes para se avaliar a estrutura nuclear, pois proporcionam informações importantes a respeito das deformações do núcleo. Os números apresentados na tabela IV.2 do valores de Q dos estados 2_1^+ , mostram que uma transição de forma oblata para prolata ocorre nos isótopos pares do Germânio (70 a 76). Os valores foram tirados de um trabalho em excitação Coulombiana³⁵,

e por isso eles são apresentados na forma de dois resultados, pois a medida não elimina a possibilidade de interferência dos estados 2_2^+ , que pode ser construtiva (+) ou destrutiva (-).

A	Q_{21} (exp)
70	$0.03(6)^+$ $0.09(6)^-$
72	$-0.13(6)^+$ $-0.05(6)^-$
74	$-0.25(6)^+$ $-0.05(6)^-$
76	$-0.19(6)^+$ $-0.03(6)^-$

Tabela IV.2
Valores experimentais³⁵ do momento de Quadrupólo elétrico do estado 2_1^+ .
Unidades em eb
1

Foi proposto por Lecomte et al³⁵ em trabalho de reorientação em excitação Coulombiana, que o ^{72}Ge está numa região de massa, na qual ele ocupa uma posição em que ocorre uma transição na forma nuclear, à medida que o número de massa aumenta de valor : 70 \rightarrow 74. Esta mesma idéia foi proposta em trabalho de reação de transferência, ($^3\text{He},d$), feito por Ardouin et al².

Ardouin et al¹ realizaram um experimento de reação de "stripping", onde os resultados indicam também a existência de transição de forma e uma forte evidência de coexistência de formas esféricas e deformadas.

De acordo com o trabalho de Kotlinski et al²⁸, os níveis 0_1^+ (g. s.), 2_1^+ (834 keV), 4_1^+ (1728 keV), 2_2^+ (1464 keV), 3_1^+ (2065 keV) e 4_2^+ (2464 keV) são altamente coletivos. Neste trabalho é proposto ainda que, o estado 0_2^+ (691 keV) não faria parte de nenhuma

¹Os valores para $Q < 0$ são deformados prolatos, e aparecem devido à interferência construtiva do segundo estado $2+$, empregado na análise do experimento

banda rotacional, sendo considerado um estado "intruso", de forma esférica.

Os níveis 3_1^- (2515 keV), 3_2^- (2943 keV), 3_3^- (3325 keV), 2_1^- (3036 keV) e 2_2^- (3342 keV) podem ser todos interpretados como sendo de partícula, pois apresentam um seção de choque apreciável em reações de transferência ($^3\text{He,d}$), (p,t) e (t,p), realizados por Ardouin², Lebrun³⁴ e Guibault²⁴ respectivamente.

Vários trabalhos teóricos foram desenvolvidos com o objetivo de explicar a estrutura do ^{72}Ge , entre eles serão destacados os principais modelos propostos, e apesar de um número considerável já desenvolvido, não se tem ainda uma definição exata da estrutura deste núcleo. No entanto, já se conseguiu reproduzir com uma precisão razoável alguns parâmetros nucleares deste núcleo e de seus vizinhos isotópicos, resta porém um modelo que possa explicar as propriedades observadas sistematicamente nestes núcleos, e apresentar a suas principais idéias num contexto mais amplo.

Em 1976, De Vries e Brussard¹⁷ fizeram um estudo, onde eles aplicaram à região de massa $A = 72$, um modelo de quasipartícula, no qual as vibrações quadrupolares de núcleos esféricos de ^{40}Ca e ^{56}Ni foram acopladas a, no máximo duas quasipartículas, que por sua vez foram construídas a partir de quatro ou cinco orbitais fora do caroço. Neste trabalho, os núcleos de Ge e Zn foram investigados de maneira que as excitações de partícula fossem acopladas a vibrações de quadrupólio do núcleo, construídas em um espaço de configuração dado por $(1f_{3/2})$, $2p_{1/2}$, $1f_{5/2}$, $2p_{1/2}$ e $1g_{9/2}$ com um núcleo de ^{56}Ni atuando como um caroço inerte. Cálculos com o modelo de camadas foram feitos para os núcleos pares de Ge e Zn e ímpares de Zn. Em um segundo momento, foi considerada também a interação delta de superfície modificada de

mancira efetiva.²² A interação δ de superfície leva em conta os efeitos residuais, que são mais importantes na superfície nuclear do que no interior do núcleo, admitindo em primeira aproximação que estas interações sejam de longo alcance. A modificação aplicada neste trabalho levou em conta também a dependência dos efeitos residuais, tais como isospin dos nucleons. Em ambos os cálculos, uma comparação com os resultados experimentais da probabilidade de transição $B(E2)$ e razão de mistura multipolar $\delta(E2/M1)$ mostra diferenças de algumas ordens de grandeza.

Mais recentemente, a estrutura do Ge foi investigada em termos da teoria dinâmica de deformação por Kumar³², que tomou uma descrição microscópica do núcleo, acoplando os movimentos de partícula e coletivos. No caso específico do ^{72}Ge , o trabalho admitiu que há uma grande influência de flutuações de pares, como também uma forte correlação entre o número de prótons e neutrons. Assim modificações foram feitas, a fim de se considerar os fenômenos de coexistência de forma, presentes neste núcleo devido a flutuações de pares e transição de forma na região de massa $A = 66$ a 76 .

A teoria utilizada é um refinamento do modelo de emparelhamento mais quadrupólo desenvolvida por Kumar³², que surgiu com intuito de incluir todos os nucleons numa descrição do núcleo, e ao mesmo tempo reduzir o número de parâmetros a ajustar.

Neste estudo, foram feitos cálculos para a probabilidade de transição entre os primeiros estados excitados, e o esquema de níveis em energia do núcleo. Os resultados em comparação com a experiência estão razoáveis, não reproduzindo porém o nível O_2^+ do ^{72}Ge . Os cálculos indicam também uma transição de forma do ^{70}Ge , esférico e "mole", para o ^{72}Ge transicional, que

admite formas esféricas e deformadas (vibrações β - γ), atingindo o ^{74}Ge de forma oblata, portanto deformado. A coexistência de forma no ^{72}Ge , mencionada acima, não vai, segundo Kumar³³, ser apenas resultante do potencial escolhido, mas também devido às flutuações de pares (emparelhamento). Na teoria aplicada ao Germânio, os estados 0_1^+ dos $^{70,72,74}\text{Ge}$ são estados vibracionais- β que são fortemente abaixados em energia pela coexistência de forma induzida pelas flutuações de pares, que são particularmente importantes nesta região de massa, devido a uma repentina mudança na densidade de níveis de partícula única. À medida, que se parte de uma forma esférica (com uma camada semi-fechada, $N = 40$) para uma forma oblata, onde os níveis $g_{9/2}$ rapidamente decrescem em energia conforme a deformação. O que torna o estado 0_1^+ notavelmente baixo no caso do ^{72}Ge , é o fenômeno da transição de forma que ocorre. Este estado é comparativamente mais alto no ^{70}Ge , pois o núcleo é menos deformado, e conseqüentemente, as energias de excitação são mais altas. No caso do ^{74}Ge , o nível 0_1^+ é também mais alto que no ^{72}Ge , pois há uma estrutura mais deformada e mais rígida contra vibrações- β .

Weeks et al⁵⁰ aplicaram aos estados do ^{72}Ge , a técnica de expansão de bósons a fim de obter o movimento de quadrupólo coletivo e acoplá-lo às vibrações de emparelhamento monopolar, calculadas pelo método RPA (Random Phase Approximation). Neste trabalho, os autores consideraram que o comportamento coletivo para o ^{72}Ge ocorre predominantemente nos prótons, para tanto foi feita uma expansão dos estados quadrupolares de férmions em estados de bósons, isto corresponde fisicamente à superposição linear e coerente de excitações quadrupolares de partícula-buracos. Para os neutrons, considerou-se que estes assumiam estados acoplados em

pares monopolares, e com este intuito utilizou-se o método RPA para encontrar as soluções. Os resultados conseguiram reproduzir, em bom acordo com a experiência, os níveis 0_2^+ , 0_3^+ , 2_1^+ e 4_1^+ para cinco isótopos pares do Ge, 68 a 76, e os elementos de matriz de transição entre os níveis 0_1^+ , 2_1^+ , 4_1^+ e 6_1^+ . Baseados nos valores encontrados, foi proposto que o estado 0_2^+ do ^{72}Ge é uma mistura de estados excitados quadrupolares de prótons e de vibrações de emparelhamento de neutrons.

Em 1987, Fortune *et al*²⁰ apresentaram um modelo, que descreve o núcleo de ^{72}Ge em termo de estados de base generalizada, que propõe uma mistura dos estados 2^+ e 0^+ . Este modelo procura explicar o fenômeno de coexistência e a mistura de estados vibracionais e rotacionais, observando o fato de que os núcleos mais leves ($66 \leq A \leq 70$) são vibracionais e os mais pesados ($74 \leq A \leq 78$) rotacionais. Baseado nestes dados, os autores procuraram descrever os estados do isótopos pares do Ge em termos da mistura de dois estados, formados a partir da criação de uma base generalizada. Os cálculos foram realizados de maneira a explicar os 4 elementos de matriz ao acoplar-se os estados 2_1^+ , 2_2^+ , 0_1^+ , 0_2^+ juntos. Além de serem calculadas as taxas de transição entre os estados 0_1^+ , 0_2^+ , 2_1^+ e 2_2^+ , chega-se à conclusão que o estado 0_2^+ não se acopla aos outros, o que indica uma estrutura diferente para este estado.

Um cálculo microscópico elaborado livre de parametrizações foi feito por Petrovic *et al*³⁹, de maneira a tentar descrever o comportamento peculiar dos estados a baixas energias dos núcleos pares de Ge e Se. Neste trabalho, foi mostrada uma descrição autoconsistente de estados não-Yrast, conhecida como EXCITED VAMPIR⁴⁴ (Variação Após a Projecção de Médio campo "Em" espaços de modelos Realísticos). A idéia principal deste modelo é baseada na obtenção

de campos médios otimizados para cada estado de um dado spin separadamente, por meio de cálculos variacionais para os determinantes de projeção, obtidos dentro da aproximação de Hartree Fock - Bogoliubov, iniciando do estado mais baixo para um dado momento angular I e prosseguindo para o próximo estado em energia (mais baixo) com mesmo I, considerando que todas as funções de onda sejam ortogonais a aquelas já obtidas. Pode-se assim, descrever estados de estruturas bem diferentes. Os cálculos foram realizados com o auxílio de um código em computador (EXCITED VAMPIR), levando-se em consideração uma mistura forte de formas oblatas e prolatas intrínsecas ao núcleo. Os elementos de matriz indicam, que para a transição $\langle 2_2^+ | E2 | 0_2^+ \rangle$ há uma diferença, em que o valor experimental é 20 vezes menor que o teórico, o que sugere que o estado 0_2^+ é coletivo e deformado e no contexto do modelo rotacional os estados seriam cabeças de bandas diferentes. Em outras transições bons resultados foram encontrados.

O estudo mais recente pertence a Kotlinski et al²⁷, que realizaram um experimento de excitação Coulombiana, e a partir dos resultados, que consistiu na determinação de 17 elementos de matriz E2, foi possível a criação de um modelo fenomenológico, que sugere que a estrutura do ⁷²Ge é triaxialmente deformada.

No presente trabalho, obteve-se um número considerável de razões de mistura multipolar $\delta(E2/M1)$, ao todo 16, o que permitiu uma comparação dos valores para as transições entre os primeiros níveis de energia de outros núcleos, conforme mostra a tabela IV.3.

$I_i^{\pi} \rightarrow I_f^{\pi}$	^{66}Ge	^{68}Ge	^{70}Ge	^{72}Ge	^{74}Ge	^{76}Ge
$2_2^+ \rightarrow 2_1^+$	-3.3(30)	-0.15(3)	-3.6(11)	32.6(7)	3.4(4)	3.5(15)
$3_1^+ \rightarrow 2_2^+$	-2.2(2)	0.06(2)	-0.05(8)	4.0(6)	1.3(4)	
$3_1^- \rightarrow 2_1^+$		0.09(3)	-0.11(10)	0.29(5)		
$3_1^+ \rightarrow 2_1^+$		0.16(8)		-0.53(7)	-0.34(5)	

Tabela IV.3 . Razões de Mistura Multipolar $\delta(E2/M1)$

Os dados apresentados nesta tabela permitem algumas considerações importantes, no que concerne a prováveis mudanças na estrutura deste núcleo, quando ocorre a transição de $A = 70$ para 72. Isto pode ser notado pela inversão de sinal da razão de mistura multipolar, $\delta(E2/M1)$, das transições $2_2^+ \rightarrow 2_1^+$, $3_1^+ \rightarrow 2_2^+$, e $3_1^- \rightarrow 2_1^+$. Um outro ponto a se levantar, é o elevado valor de δ na transição $2_2^+ \rightarrow 2_1^+$ em todos os isótopos do Ge, excetuando o ^{68}Ge . Isto pode ser compreendido como um efeito do tipo ressonância no ^{72}Ge , onde o valor da mistura multipolar, $\delta(E2/M1)$ é aproximadamente 10 vezes maior em relação a dos outros isótopos. A transição $2_2^+ \rightarrow 2_1^+$ é predominantemente E2, bem como no caso da transição $4_1^+ \rightarrow 2_1^+$, o que é de se esperar para núcleos vibracionais, e ainda neste contexto é sabido que a mistura M1 é rigorosamente proibida.

V Conclusões :

No presente trabalho, foram realizadas medidas de correlação angular γ - γ para 16 cascatas no núcleo de ^{72}Ge , três entre elas medidas pela primeira vez. Foi utilizado para a realização deste estudo um espectrômetro constituído de um detetor de GeHP, de 89 cm^3 , e outro de Ge(Li), de 45 cm^3 .

Os resultados experimentais possibilitaram confirmar e estabelecer definitivamente o spin e a paridade de 9 níveis excitados do ^{72}Ge , até energia de 3,3 MeV. Além disso, foram determinados os valores de razão de mistura multipolar, $\delta(E2/M1)$, para 16 transições gama neste núcleo, sendo 13 valores determinados com boa precisão pela primeira vez. A obtenção destes dados permitiu fazer uma comparação sistemática das propriedades nucleares dos núcleos vizinhos par-par do ^{72}Ge , envolvendo por exemplo a energia, spin e paridade para níveis correspondentes, bem como a mistura multipolar, $\delta(E2/M1)$, para as transições entre eles.

Acredita-se que a contribuição dada por este trabalho permita esclarecer ambigüidades a respeito do spin e paridade de alguns níveis, fez-se também uma medida mais precisa de um conjunto de misturas multipolares para diversas transições no ^{72}Ge . Deste modo, espera-se que os resultados aqui apresentados sejam úteis nos cálculos teóricos, com o objetivo de se ter uma melhor compreensão da estrutura nuclear do ^{72}Ge .

BIBLIOGRAFIA

1. ARDOUIN, D. ; TAMISIER, R. ; BARRIER, G. ; KALIFA, J. ; ROTBARD, G. ; VERGNES M. Study of ^{72}Ge with the $^{71}\text{Ga}(^3\text{He}, d)^{72}\text{Ge}$ reaction. *Phys. Rev., C* 11(5):1649-57, 1975
2. ARDOUIN, D. ; TAMISIER R. ; VERGNES M. ; ROTBARD G. ; KALIFA J. ; BARRIER G. ; GRAMMATICOS B. Systematics of the proton stripping reaction on $^{69,71}\text{Ga}$, ^{75}As , $^{79,81}\text{Zn}$ isotopes. *Phys. Rev., C* 12(6):1745-61, 1975
3. ARFKEN, G. B. ; BIEDENHARN, L. C. ; ROSE, M. E. Angular correlation of first and third gamma-rays. *Phys. Rev.,* 86(5):761-63, 1952
4. ARNS R. G. & WIEDENBECK M. L. Directional correlation of gamma rays in ^{72}Ge . *Phys. Rev.,* 112(1):229-30, 1958
5. BALL G. C. ; FOURNIER R. ; KROON J. ; HSU T. H. ; HIRD B. Study of the germanium isotopes with the (p,t) reaction. *Nucl. Phys., A* 231:334-48, 1974.
6. BELYAEV B. N. ; VASILENKO S.S. ; GVOZDEV V.S. AND GRIGOR'EV. Conversion transition with pair production in ^{72}Ge . *Sov. J. Nucl. Phys.,* 3(1):9-11, 1966
7. BHAT M. R. Nuclear data sheets for A = 66. *Nucl. Data Sheets* 61(4):1989

8. BHAT M. R. Nuclear data sheets for $A = 68$. *Nucl. Data Sheets* 55(1):1988
9. BHAT M. R. Nuclear data sheets for $A = 70$. *Nucl. Data Sheets* 51(1):1987
10. BIEDERNHARN, L. C. ; ARFKEN G. B. ; ROSE , M. E. Angular correlation in the triple cascade transition. *Phys. Rev.*, 83(3):586- 93, 1951
11. BIEDENHARN, L.C. & ROSE M. E. Theory of angular correlation of nuclear radiation. *Rev. Mod. Physics*, 25(3):729-77, 1953
12. BRADY, E.I. & DEUTSCH, M. Angular correlation of successive gamma ray quanta. *Phys. Rev.*, 72(9):870-1, 1947
13. BRUN E. ; KRAUSHAAR J. J. ; MEYERHOF W. E. Decay of ^{72}As . *Phys. Rev.*, 102:808-13, 1956
14. CAMP D. C. Energy levels in ^{72}Ge from the decay of ^{72}Ga and ^{72}As . *Nucl. Phys.*, A 121:561-91, 1968
15. CAMP, D. C. & VAN LEHN, A. L. Finite solid angle corrections for Ge(Li) detectors . *Nucl. Instrum. Methods.*, 76:192-240, 1969
16. CHEN H. ; GARDULSKI P. L. ; WIEDENBECK M. L. Energy levels and mixing ratios of transitions in ^{72}Ge . *Nucl. Phys.*, A 219:365-69, 1974

17. DE VRIES H. F. Model calculations on Zn and Ge nuclei :
Utrecht , Netherlands, 1976. (Ph.D. thesis)

18. DUNWORTH, J.W. The application of the coincidence counting to
experiments in nuclear physics. *Nucl. Instrum. Methods*,
11:1167-80, 1960.940.

19. FERENTZ, M. & ROSENZWEIG, N. Table of angular correlation
coefficients. In: SIEGBAHN, K., *Alpha, beta and gamma-ray
spectroscopy*. Amsterdam, North-Holland, 1965. p. 1687-90.

20. FORTUNE H. T. & CARCHIDI M. Coexistence and $b(E2)$'s in even ge
nuclei. *Phys. Rev., C* 36(6):2584-89, 1987

21. FRAUENFELDER, H. & STEFFEN, R.M. Angular distribution of nuclear
radiation : (A) Angular correlation. In: SIEGBAHN, K., ed.
Alpha, beta and gamma-ray spectroscopy. Amsterdam,
North-Holland, 1965. v.2, p.997-1198.

22. GLAUDEMANS P.W.M ; BRUSSAARD P. J. ; WILDENTHAL B. H. Two-Body
elements from a modified surface delta interaction. *Nucl.*
Phys., A 102:593-601, 1967 1967

23. GOERTZEL, G. Angular correlation of gamma-rays. *Phys. Rev.*,
70(11-12):897-909, 1946

24. GUILBAULT F. ; ARDOUIN D. ; UZURFAU J. ; AVIGNON P. ; TAMISIER R. ; ROTBARD G. ; VERGNES M. ; DESCHAMPS Y. ; BERRIER G. ; SELTZ R. Levels of $^{70,72,74}\text{Ge}$ excited by the (p,t) reaction. *Phys. Rev., C* 16(5):1840-56, 1977
25. HAMILTON, D.R. On directional correlation of successive quanta. *Phys. Rev.,* 58:122-31, 1940.
26. HAMILTON, W.D. *The electromagnetic interaction in nuclear spectroscopy.* Amsterdam, North-Holland, 1975.
27. KING M. M. Nuclear data sheets for A = 72. *Nucl. Data Sheets* 56(1):1989
28. KOTLINSKI, B. ; CZOSNYKA, T. ; CLINE , D. ; SREBRNY, J. ; WU , C. Y. ; BÄCKLIN, A. ; HASSELGREN, L. ; WESTERBERG, L. ; BAKTASH, C. ; STEADMAN, S. G. Heavy-ion coulomb excitation of ^{72}Ge . *Nucl. Phys., A* 519:646-658 , 1990
29. KRANE K. S. & STEFFEN R. M. Determination of the E2/M1 multipole mixing ratios of the gamma transitions in ^{110}Cd . *Phys. Rev., C* 2:724-31, 1970
30. KRAUSHAAR J. J. ; BRUN E. ; MEYERHOF W. E. Decay of gallium 72. *Phys. Rev.,* 101:139-47, 1956
31. KREGAR M. & ELBEK B.- Investigation of the low-lying states on ^{72}Ge . *Nucl. Phys., A* 93:49-62, 1967

32. KUMAR K. Collective and microscopic model predictions of electromagnetic moments in: HAMILTON, W.D., ed. *The electromagnetic interaction in nuclear spectroscopy*. Amsterdam, North-Holland, 1975.
33. KUMAR K. Dynamic deformation theory of shape coexistence, pair fluctuations, and shape transition in Ge nuclei. *J. Phys., C* 4(6):849-856, 1978
34. LEBRUN C. ; GUILBAULT F. ; ARDOUIN D. ; FLYNN E. R. ; HANSON D. L. ; ORBESEN S. D. ; ROTBARD R. ; VERGNES M. N. Study of $^{72,74,76}\text{Ge}$ by the (t,p) reaction. *Phys. Rev., C* 19(4):1224-35 1979
35. LECOMTE R. ; IRSHAD M. ; LANDSBERGER S. ; PARADIS P. ; MONARO S. Evidence of a spherical to prolate transition in the germanium nuclei. *Phys. Rev., C* 22(4):1530-31, 1980
36. MESSIAH, A. *Quantum Mechanics* New York , John Wiley & Sons , 1970. v.2.
37. MONAHAN W. G. & ARNS R. G. Directional correlation of gamma rays in ^{72}Ge . *Phys. Rev.,* 184(4):1135-41, 1969
38. MORAND C. ; BRUANDET J. F. ; CHAMBON B. ; DAUCHY A. ; DRAIN D. ; GIORNI A. et TSAN UNG CHAN Niveaux de spin élevée du ^{72}Ge atteints par la réaction $^{70}\text{Zn}(\alpha, \text{Zn}\gamma)$ à $E_{\alpha} = 30 \text{ MeV}$. *Nucl. Phys., A* 313:45-76 , 1979

39. PETROVICI, A. ; SCHMID, K. W. ; GRÜMMER, F. ; FAESSLER, Amand ; HORIBATA, T. Microscopic description of low-lying states in even Ge and Se Nuclei. *Nucl. Phys., A* 483:317-47, 1988
40. RESTER A. C. ; RAMAYYA A. V. ; HAMILTON J. H. ; KRMPOTIC D. Levels in ^{72}Ge populated by ^{72}Ga . *Nucl. Phys., A* 162:461-80, 1971
41. RIBAS, R. São Paulo, Univ. São Paulo, Instituto de Física (Comunicação Privada)
42. ROSE, H.J. & BRINK, D.M. Angular distributions of gamma rays in terms of phase-defined reduced matrix elements. *Rev. Mod. Phys.*, 39(2):306-47, 1967.
43. ROSIER L. H. ; JABBOUR J. ; RAMSTEIN B. ; AVIGNON P. AND TAMISIER R. Spectroscopy of the $^{70,72}\text{Ge}$ isotopes and structure of low-lying states of the $^{70,72,74,76}\text{Ge}$ isotopes by (p,p') inelastic scattering at 22 Mev. *Nucl. Phys., A* 453:1389-416, 1986
44. SCHMID K. W. ; GRÜMMER F. ; KYOTOKU M.; FAESSLER AMAND Selfconsistent description of non-yrast states in nuclei : the excited vampir approach. *Nucl. Phys., A* 452:493-512, 1986
45. SINGH B. & VIGGARS D. A. Nuclear data sheets for A = 74. *Nucl. Data Sheets* 51(2):1987

46. SINGH B. & VIGGARS D. A. Nuclear data sheets for $A = 76$. *Nucl. Data Sheets* 42(3):1984
47. TAYLOR H. W. ; SINGH B. ; PRATO F. S. and McPHERSON R. A tabulation of gamma-gamma directional-correlation coefficients. *Nucl. Data Tables* , A9:1-83, 1971
48. TIRSELL K.G. & BLOCH S. D. β - γ (CP) correlation studies of ^{70}Ga and spin assignments in ^{72}Ge . *Nucl. Phys.*, A 103:461-73, 1967
49. TWIN, P.J. Gamma-ray angular distribution and correlation measurement experimental methods following nuclear reaction. In: HAMILTON, W.D., ed. *The electromagnetic interaction in nuclear spectroscopy*. Amsterdam, North-Holland, 1975.
50. WEEKS K. J. ; TAMURA T. ; UDAGAWA T. ; HAHNE F. J. W. Coupling of collective quadrupole and monopole pairing vibrations in the Ge Nuclei. *Phys. Rev.*, C 24:703-11, 1981