

37.095878



AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE  
DE SÃO PAULO

**CORRELAÇÃO ANGULAR DIRECIONAL GAMA-GAMA  
NO NÚCLEO  $^{72}\text{Ge}$**

**JOSÉ AGOSTINHO GONÇALVES DE MEDEIROS**

Tese apresentada como parte dos  
requisitos para obtenção do Grau de  
Doutor em Ciências na Área de  
Tecnologia Nuclear-Aplicações.

Orientadora:  
Dra. Cibele Bugno Zamboni

**São Paulo  
2000**

**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**

**Autarquia Associada à Universidade de São Paulo**

**CORRELAÇÃO ANGULAR DIRECIONAL GAMA-GAMA  
NO NÚCLEO  $^{72}\text{Ge}$**



**José Agostinho Gonçalves de Medeiros**

**Tese apresentada como parte dos requisitos  
para obtenção do Grau de Doutor em Ciências na  
Área de Tecnologia Nuclear – Aplicações.**

**Orientadora:**

**Dra. Cibele Bugno Zamboni**

**São Paulo  
2000**

Dedico este trabalho  
a minha esposa Ilca Marli Moitinho Amaral Medeiros  
e a minha filha Sofia Amaral Medeiros

## Agradecimentos

Diversas pessoas contribuíram direta e indiretamente para que este trabalho fosse viável. Em especial gostaria de agradecer:

À prof. Cibele B. Zamboni, pela orientação, incentivo e compreensão, desde minha iniciação na pesquisa científica.

Ao prof. Manoel Tiago Freitas da Cruz, pelas substanciais contribuições em diversas etapas do trabalho.

Aos amigos Fred, Eduardo, André, Renato, Juan, Sonia e Geralda, por toda ajuda, incentivo e amizade.

Ao amigo Mario pelo uso do servidor (além do limite) e dúvidas com relação ao sistema Linux.

Ao Zwinglio O. Guimarães Filho pelas valiosas discussões e pelo auxílio no uso do programa BIDIM.

Ao David pelo auxílio no uso do programa Bidi de aquisição multiparamétrica.

Ao corpo técnico do reator IEAR1m e Proteção Radiológica pelo pronto atendimento nas irradiações.

Ao Laboratório do Acelerador Linear do IFUSP por possibilitar a realização das medidas utilizando o controlador multidetetor.

À Prof. Linda Caldas pela colaboração relativa ao uso do computador utilizado na análise de dados.

Ao IPEN/CNEN por possibilitar a realização deste trabalho.

Ao CNPq pelo suporte financeiro.

À minha esposa e filha, pela paciência, compreensão e companheirismo.

Finalmente meus pais, tios, irmã e primos pelo carinho e apoio em todos os momentos.

E a todos que a minha memória não colaborou em incluir nesta pequena lista, mas que merecem um agradecimento especial.

# CORRELAÇÃO ANGULAR DIRECIONAL GAMA-GAMA NO NÚCLEO $^{72}\text{Ge}$

José Agostinho Gonçalves de Medeiros

## RESUMO

A correlação angular direcional de transições- $\gamma$  coincidentes no núcleo de  $^{72}\text{Ge}$  foi medida a partir do decaimento  $\beta^-$  do  $^{72}\text{Ga}$ . Foram realizadas medidas para 44 cascatas resultando na determinação de razões de mistura multipolar para 23 transições. Os resultados da presente medida confirmam alguns dos valores de  $\delta(E2/M1)$  obtidos por outros estudos além de propor spin para todos os níveis estudados. As previsões do presente trabalho foram discutidas dentro do contexto de modelos teóricos propostos para esta região de massa e, particularmente, o modelo vibracional anarmônico forneceu a melhor descrição dos dados experimentais.

# DIRECTIONAL GAMMA-GAMMA ANGULAR CORRELATION IN $^{72}\text{Ge}$

José Agostinho Gonçalves de Medeiros

## ABSTRACT

The directional angular correlation of coincident  $\gamma$ -transitions in  $^{72}\text{Ge}$  has been measured following the  $\beta^-$  decay of  $^{72}\text{Ga}$ . Measurements have been carried out for 44 gamma cascades resulting in the determination of multipole mixing for 23  $\gamma$ -transitions. The present results confirmed some of the mixing ratios determined in the earlier studies and permitted definite assignments of spin to all the excited levels studied. The experimental results were discussed in terms of theoretical models proposed for this mass region and particularly, the anharmonic vibrational model gave the best description of the experimental data.

## SUMÁRIO

	Página
INTRODUÇÃO.....	1
1 PRINCÍPIOS GERAIS DE CORRELAÇÃO ANGULAR.....	3
1.1 Introdução.....	3
1.2 Correlação Angular Direcional $\gamma\gamma$ .....	3
1.3 Correlação Angular Tripla.....	7
2 COINCIDÊNCIAS MULTIPARAMÉTRICAS.....	10
2.1 Introdução.....	10
2.2 Instrumentação.....	11
2.2.1 Espectrômetro $\gamma\gamma$ .....	12
2.2.2 Eletrônica de Coincidência.....	14
2.3 Aquisição de Coincidência Multiparamétrica.....	19
2.4 Teste de Desempenho do Arranjo Experimental.....	19
3 TÉCNICA EXPERIMENTAL E ANÁLISE DE DADOS.....	21
3.1 Produção da Amostra de $^{72}\text{Ga}$ .....	21
3.2 Análise de Dados.....	22
3.2.1 Correção para o Decaimento da Fonte.....	22
3.2.2 Relocação de Espectros.....	25
3.2.3 Correção de Ângulo Sólido dos Detetores.....	26
3.3 Tratamento dos Dados para Obtenção dos Coeficientes $A_{kk}$ .....	27
3.3.1 Ajuste de Fotopicos Bidimensionais.....	30
3.4 Cálculo da Razão de Mistura Multipolar.....	33
3.5 Obtenção das Curvas Paramétricas de $A_{kk}$ .....	34
4 RESULTADOS.....	39
4.1 Análise dos Níveis.....	58

4.1.1 Nível 2402 keV .....	58
4.1.2 Nível 2943 keV .....	58
4.1.3 Nível 3097 keV .....	62
4.1.4 Nível 3439 keV .....	64
4.1.5 Nível 3455 keV .....	67
4.1.6 Nível 3565 keV .....	68
4.1.7 Nível 3678 keV .....	69
5 ESTRUTURA NUCLEAR DO $^{72}\text{Ge}$ .....	72
5.1 Estudo Sistemático da Razão $\delta(E2/M1, 2_2^+ \rightarrow 2_1^+)$ .....	72
5.2 Estudo Sistemático da Razão $E_{4^+}/E_{2^+}$ .....	75
5.3 Modelos Nucleares .....	81
6 CONCLUSÕES .....	89
APÊNDICE A .....	91
APÊNDICE B .....	97
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	99



## LISTA DE TABELAS

### Página

2.1: Coeficientes $A_{kk}$ da cascata 894-834 keV do $^{72}\text{Ge}$ .....	19
3.1: Dados da medida de coincidência $\gamma$ - $\gamma$ .....	22
4.1: Valores obtidos para os coeficientes $A_{22}$ e $A_{44}$ no núcleo de $^{72}\text{Ge}$ .....	40
4.2: Valores das razões de mistura multipolar para as transições gama no $^{72}\text{Ge}$ .....	53
A.1: Posição das transições monitoradas.....	92
A.2: Posição referente a transição $\gamma$ selecionado.....	93
A.3: Dados comparativos entre o espectro não relocado e os espectros relocados.....	94

## LISTA DE FIGURAS

### Página

1.1: Esquema típico de níveis de uma cascata $\gamma\gamma$ , onde cada nível é caracterizado pela sua energia (E), pelo seu spin (I) e paridade ( $\pi$ ) e cada transição $\gamma$ pelo número quântico momento angular (L).....	4
1.2: Esquema simplificado do arranjo experimental.....	4
1.3: Esquema típico de níveis de uma cascata tripla.....	8
2.1: Esquema de níveis parcial do decaimento $\beta^-$ do $^{72}\text{Ga}$ (energia em keV).....	11
2.2: Esquema do espectrômetro $\gamma\gamma$ .....	13
2.3: Eletrônica de coincidência do sistema multidetector do LAL/ IFUSP.....	14
2.4: Carta de tempo do controlador multidetector.....	17
2.5: Histograma de tempo obtido com os dados da presente medida para o ângulo de $150^\circ$ .....	18
2.6: Função correlação angular $W(\theta)$ para a cascata 894-834 do $^{72}\text{Ge}$ .....	20
3.1: Gráfico esquemático da atividade $A(t)$ em função do tempo (t).....	23
3.2: Histograma tridimensional da região de coincidência entre 834-894 keV e 810-894 keV, para a soma de todas as medidas no ângulo de $150^\circ$ .....	28
3.3: Tela principal do programa BIDIM.....	29
3.4: Tela de ajuste do Programa BIDIM.....	31
3.5: Tela do programa BIDIM para o resultado final do ajuste (exemplo).....	32
3.6: Curvas de correlação angular ajustada para o polinômio $W(\theta)$ versus $\theta$ para as cascatas 336-894 keV, 600-1464 keV e 1230-834 keV.....	36
3.7: Gráfico de $\chi^2$ versus $\arctg(\delta)$ , para as cascatas 336-894 keV, para as seqüências de spin: 1-4-2, 2-4-2 e 3-4-2 e para as cascatas 600-1464 keV e 1230-834 keV para as seqüências 1-2-0, 2-2-0 e 3-2-0.....	37

3.8: Curvas paramétricas de $A_{kk}$ para as cascatas 336-894 keV, para as seqüências de spin: 1-4-2, 2-4-2 e 3-4-2 (assinaladas em vermelho) e para as cascatas 600-1464 keV e 1230-834 keV para as seqüências 1-2-0, 2-2-0 e 3-2-0.....	38
4.1: Curvas de correlação angular ajustada para o polinômio $W(\theta)/W(90^\circ)$ versus $\theta$ para cada cascata $\gamma\gamma$ apresentada na Tabela 4.1.....	52
4.2: Esquema parcial de decaimento $\beta^-$ do $^{72}\text{Ga}$ proposto no presente estudo (energia em keV).....	57
4.3: Gráfico de $\chi^2$ versus $\arctg(\delta)$ para a cascata 479-1000 keV do núcleo de $^{72}\text{Ge}$ , considerando-se as seqüências de spin 3-4-2 e 4-4-2.....	59
4.4: Gráfico de $\chi^2$ versus $\arctg(\delta)$ para a cascata 878-600 keV do núcleo de $^{72}\text{Ge}$ , considerando-se as seqüências de spin 3-3-2 e 4-3-2.....	60
4.5: Gráfico de $\chi^2$ versus $\arctg(\delta)$ para a cascata 1215-894 keV do núcleo de $^{72}\text{Ge}$ , considerando-se as seqüências de spin 3 - 4 - 2 e 4 - 4 - 2.....	60
4.6: Gráfico de $\chi^2$ versus $\arctg(\delta)$ para a cascata 1215-(894)-834 keV do núcleo de $^{72}\text{Ge}$ , considerando-se as seqüências de spin 3-4-2-0 e 4-4-2-0.....	61
4.7: Gráfico de $\chi^2$ versus $\arctg(\delta)$ para a cascata 2109-834 keV do núcleo de $^{72}\text{Ge}$ , considerando-se as seqüências de spin 3-2-0 e 4-2-0.....	61
4.8: Valores de $A_{22}$ e $A_{44}$ em função da razão de mistura multipolar .....	62
4.9: Gráfico de $\chi^2$ versus $\arctg(\delta)$ para a cascata 1032-600 keV do núcleo de $^{72}\text{Ge}$ , considerando-se as seqüências de spin 1-3-2 e 2-3-2.....	63
4.10: Elipses de correlação angular e valores de $A_{22}$ e $A_{44}$ obtidos dos ajustes referentes a cascata 1032-600 keV do núcleo de $^{72}\text{Ge}$ , considerando-se as seqüências de spin: 1-3-2 e 2-3-2.....	63
4.11: Gráfico de $\chi^2$ versus $\arctg(\delta)$ para a cascata 1711-894 keV do núcleo de $^{72}\text{Ge}$ , considerando-se as seqüências de spin 2-4-2, 3-4-2 e 4-4-2.....	65
4.12: Gráfico de $\chi^2$ versus $\arctg(\delta)$ para a cascata 975-1000 keV do núcleo de $^{72}\text{Ge}$ , considerando-se as seqüências de spin 2-4-2, 3-4-2 e 4-4-2.....	65

4.13: Elipses de correlação angular e valores de $A_{22}$ e $A_{44}$ obtidos dos ajustes referentes a cascata 975-1000 keV e 1711-894 keV do núcleo de $^{72}\text{Ge}$ , considerando-se as seqüências de spin: 2-4-2, 3-4-2 e 4-4-2.....	66
4.14: $W(\theta)$ em função de $\theta$ considerando-se o ajuste simultâneo das duas cascatas medidas, para a seqüência de spin 4-4-2.....	66
4.15: $W(\theta)$ em função de $\theta$ considerando-se o ajuste simultâneo das duas cascatas medidas, para a seqüência de spin 3-4-2.....	67
4.16: Gráfico de $\chi^2$ versus $\arctg(\delta)$ para a cascata 2621-834 keV do núcleo de $^{72}\text{Ge}$ , considerando-se as seqüências de spin 2-2-0 e 3-2-0.....	68
4.17: Gráfico de $\chi^2$ versus $\arctg(\delta)$ para a cascata 2214-630 keV do núcleo de $^{72}\text{Ge}$ , considerando-se as seqüências de spin 2-2-2 e 3-2-2.....	70
4.18: Gráfico de $\chi^2$ versus $\arctg(\delta)$ para a cascata 2844-834 keV do núcleo de $^{72}\text{Ge}$ , considerando-se as seqüências de spin 2-2-0 e 3-2-0.....	70
4.19: Elipses de correlação angular e valores de $A_{22}$ e $A_{44}$ obtidos dos ajustes referentes a cascata 2844-834 keV do núcleo de $^{72}\text{Ge}$ , considerando-se as seqüências de spin: 2-2-0, 3-2-0.....	71
5.1: Magnitude de $\delta(E2/M1, 2_2^+ \rightarrow 2_1^+)$ para núcleos par-par em função do número de massa ( $58 \leq A \leq 92$ ).....	73
5.2: Gráfico de $\log [\delta(E2/M1, 2_2^+ \rightarrow 2_1^+)/E\gamma]^2$ em função de $A$ .....	74
5.3: Razão $B(E2)_{\text{exp}}/B(E2)_{\text{PU}}$ para os primeiros estados excitados dos isótopos par-par de $\text{Ge}(A=66-76)$ em função de $A$ .....	75
5.4: Razão $E_{4^+}/E_{2^+}$ em função do número de massa, para os isótopos par-par de $\text{Zn}$ , $\text{Ge}$ e $\text{Se}$ .....	77
5.5: Diagrama parcial de níveis experimental obtido no presente estudo e o previsto pelos modelos coletivos.....	78
5.6: Curva da energia de excitação versus $I(I+1)$ para a banda fundamental nos isótopos par-par de $\text{Ge}$ .....	79
5.7: Gráfico de $2\xi/\hbar^2$ versus $(\hbar\omega)^2$ para a banda fundamental do isótopo de $^{72}\text{Ge}$ .....	80
5.8: Diagrama de níveis de energia de $^{72}\text{Ge}$ obtido experimentalmente e a previsão teórica calculada com o modelo de Das <i>et al.</i> [47] (energia em keV).....	83

5.9: Diagrama de níveis de energia de $^{72}\text{Ge}$ obtido experimentalmente e a previsão teórica calculada com o modelo de anarmônico de Haderman <i>et al.</i> [48] (energia em keV).....	85
5.10: Relação entre os níveis vibracionais e rotacionais de acordo com a perspectiva de bandas quase-rotacionais [50]. Na primeira coluna tem-se a descrição do espectro vibracional para fonons quadrupolares (onde N representa o número de fonons) e nas colunas seguintes a decomposição em bandas quase-rotacional identificadas (em ordem) por: bandas fundamenta, $\gamma$ e $\beta$ .....	86
5.11: Diagrama experimental dos níveis de energia do $^{72}\text{Ge}$ classificados de acordo com o modelo de bandas quase-rotacionais de Sakai [50] (energia em keV).....	87
A.1: Espectro comparativo para o detetor 1.....	95
A.2: Espectro comparativo para o detetor 2.....	96

## INTRODUÇÃO

Parâmetros nucleares, referentes à estrutura nuclear, podem ser obtidos por meio de várias técnicas experimentais e dentre as disponíveis, no campo de espectroscopia nuclear, temos a correlação angular direcional gama-gama [1,2,3]. Esta técnica baseia-se em medidas de coincidência entre transições gama emitidas em cascata por um núcleo excitado, em função do ângulo formado entre as direções de emissão de cada uma destas radiações. A medida de correlação angular gama-gama fornece informações sobre o spin e momentos nucleares dos níveis excitados bem como dados para o cálculo da razão de mistura multipolar das transições  $\gamma$ . A comparação destes parâmetros com modelos nucleares possibilitam a compreensão da estrutura nuclear bem como o desenvolvimento e ou aprimoramento de modelos.

Neste trabalho pretende-se obter informações adicionais do núcleo de  $^{72}\text{Ge}$ , utilizando-se a técnica de correlação angular direcional  $\gamma\gamma$ . Este trabalho faz parte de um programa de colaboração existente entre o Laboratório de Estrutura Nuclear do IPEN e Laboratório do Acelerador Linear (LAL) do IFUSP. O experimento de correlação angular foi realizado no LAL utilizando o arranjo experimental de multideteção.

O interesse bem como a necessidade das medidas de correlação angular neste núcleo devem-se a resultados obtidos de estudos anteriores, a saber: Níveis excitados do  $^{72}\text{Ge}$  populados pelo decaimento  $\beta^-$  do  $^{72}\text{Ga}$  [4] e Medidas de correlação angular direcional  $\gamma\gamma$  para transições no  $^{72}\text{Ge}$  [5], que serão discutidos a seguir.

O trabalho realizado por Medeiros [4] compreende medidas de espectroscopia  $\gamma$  e coincidências  $\gamma\gamma$ , na faixa de energia de 200 keV a 3600 keV. Os resultados deste estudo propõem várias modificações ao esquema de decaimento  $\beta^-$  do  $^{72}\text{Ga}$ , isto é, posicionamento de 22 transições  $\gamma$  sendo 15 observadas pela primeira vez e proposição de 6 novos níveis de energia. Com relação ao trabalho realizado por Landulfo *et al.* [5], os níveis e as transições  $\gamma$  no núcleo de  $^{72}\text{Ge}$  foram estudados através da medida

de correlação angular direcional de 16 cascatas intensas, a partir de uma única janela em energia, sendo determinada pela primeira vez a razão de mistura multipolar para 13 transições, além de propor spin e paridade para nove níveis excitados.

Apesar da importante contribuição de dados ao esquema de decaimento  $\beta^-$  do  $^{72}\text{Ga}$ , obtidos nestes estudos [4,5] bem como em medidas anteriores de correlação angular [6], não existem spin e paridade definitivos ou propostos para a maioria dos níveis excitados do  $^{72}\text{Ge}$ , nem medidas de correlação angular envolvendo transições  $\gamma$  de intensidade relativa intermediárias ou fracas, isto é, entre  $0,1 < I < 1\%$ , que compõem a maior parte da desexcitação nuclear, onde a intensidade relativa (em percentagem) é avaliada considerando-se a transição  $\gamma$  de 834 keV, a mais intensa do espectro, como 100%.

A apresentação dessas medidas é abordada em 6 capítulos. O capítulo 1 apresenta, de forma sucinta, os aspectos teóricos relevantes sobre correlação angular. O capítulo 2 contém uma descrição do arranjo experimental utilizado. O capítulo 3 dispõe sobre os métodos utilizados no tratamento dos dados experimentais. O capítulo 4 apresenta os dados experimentais obtidos em comparação com os resultados mais recentes da literatura e a discussão dos resultados experimentais no que diz respeito à atribuição de spin e paridade para cada um dos níveis estudados. O capítulo 5 apresenta um estudo teórico dos níveis excitados do  $^{72}\text{Ge}$ . O capítulo 6 apresenta as conclusões do presente estudo. Na seqüência são listadas as referências em ordem de citação. O apêndice A apresenta o programa FILAREL e o apêndice B apresenta o programa DELTA.

# 1 PRINCÍPIOS GERAIS DE CORRELAÇÃO ANGULAR

## 1.1 Introdução

A técnica da Correlação Angular Direcional  $\gamma\gamma$  tem por base princípios gerais de simetria que levam em consideração a conservação do momento angular e da paridade. As informações que podem ser obtidas estão relacionadas a propriedades de níveis nucleares, tais como spin de níveis excitados e razão de mistura multipolar associada à transição  $\gamma$ .

A teoria da correlação angular direcional foi introduzida na década de 40 como descrito nos artigos de Dunworth [7] e Hamilton [8] e mais detalhes relacionados ao tratamento teórico podem ser apreciados nos trabalhos de Rose e Brink [1], Frauenfelder e Steffen [2], Biedenharn e Rose [3] e Steffen e Alder [9]. Dentre os primeiros experimentos destacam-se as medidas de correlação angular direcional  $\gamma\gamma$ , realizadas por Brady e Deutsch [10], Twin [11] e Hamilton [12].

## 1.2 Correlação Angular Direcional $\gamma\gamma$

Quando um núcleo emite uma radiação gama, existe uma dependência angular entre a direção de emissão deste raio gama e o spin do nível envolvido. Entretanto, esta dependência não é observada em condições normais, pois a distribuição ao acaso da orientação desses spins em uma amostra provoca isotropia angular. É necessário, então, que se selecione núcleos orientados em uma determinada direção, criando-se um padrão anisotrópico. Uma das maneiras de se observar prováveis anisotropias consiste em detectar raios  $\gamma$  em coincidência, fixando um detetor na direção de emissão do raio  $\gamma_1$  e detectar o raio  $\gamma_2$  com um detetor móvel em diferentes ângulos em relação ao detetor de  $\gamma_1$ .



Na figura 1.1 tem-se a ilustração de uma cascata  $\gamma\gamma$  e na figura 1.2 tem-se a representação da geometria utilizada no experimento de correlação angular direcional.

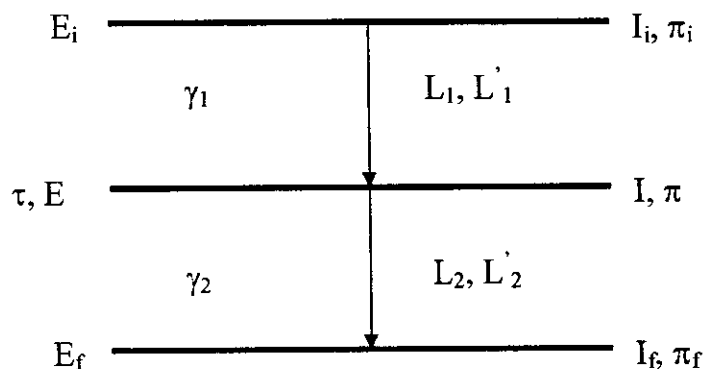


Figura 1.1: Esquema típico de níveis de uma cascata  $\gamma\gamma$ , onde cada nível é caracterizado pela sua energia (E), pelo seu spin (I) e paridade ( $\pi$ ) e cada transição  $\gamma$  pelo número quântico momento angular (L).

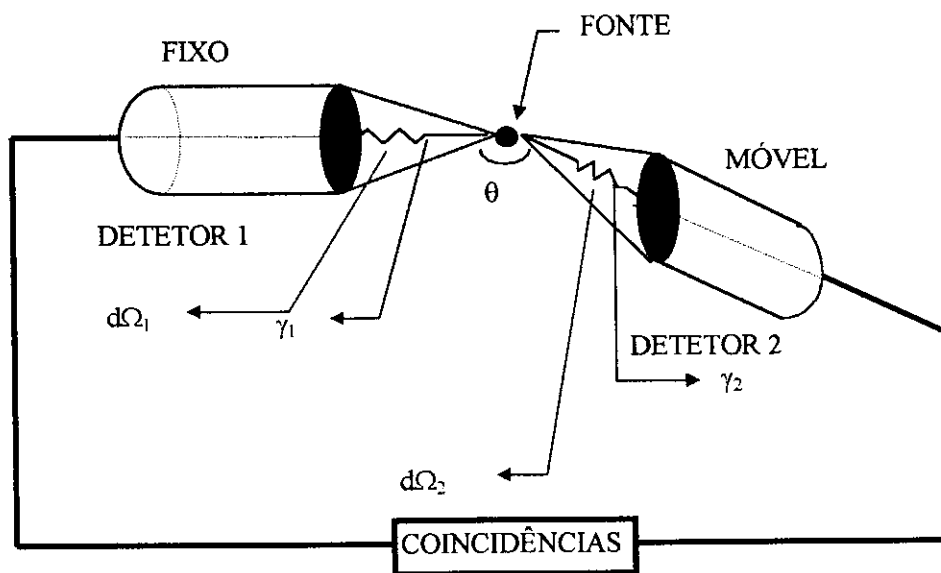


Figura 1.2: Esquema simplificado do arranjo experimental.

Desta forma podemos obter a variação da taxa de coincidência entre raios  $\gamma$  ( $\gamma_1$  e  $\gamma_2$ ) nos diferentes ângulos ( $\theta$ ) formados entre os detetores (fixo e móvel). Entretanto a correlação angular direcional entre dois raios gama sucessivos, pode ser afetada se a

orientação do spin do nível intermediário sofrer alterações durante o período que o núcleo permanece neste estado. Neste caso teremos a chamada correlação angular perturbada. No entanto, essas perturbações podem ser insignificantes se a vida média ( $\tau$ , conforme ilustrado na figura 1.1) do nível intermediário for menor que  $10^{-10}$  segundos.

A partir do esquema apresentado na figura 1.1, é possível definir uma função que descreve a dependência angular das coincidências  $\gamma\gamma$ . Esta função é dada por [2]:

$$W(\theta) = \sum_k A_{kk} P_k(\cos \theta) \quad , \quad k \text{ par} \quad (1.1)$$

onde,

$W(\theta)$  = taxa de eventos de coincidência adquiridos em função do ângulo ( $\theta$ ) entre os detetores.

$A_{kk}$  = coeficientes de correlação angular.

$P_k(\cos \theta)$  = polinômio de Legendre de ordem  $k$ , onde só os termos pares aparecem devido à conservação da paridade nas interações eletromagnéticas.

$k = 0, 2, 4$  pois as multipolaridades das transições  $\gamma$  ( $L_n$  e  $L_n'$ ) são, na maioria das vezes, do tipo dipolar ou quadrupolar.

Na prática, é usual a normalização de  $W(\theta)$  em relação a  $A_{00}$ , o que leva ao valor unitário o termo  $A_{00} P_0(\cos \theta)$  (equação 1.1), ou seja:

$$W(\theta) = 1 + \frac{A_{22}}{A_{00}} P_2(\cos \theta) + \frac{A_{44}}{A_{00}} P_4(\cos \theta) \quad (1.2)$$

Os coeficientes  $\frac{A_{22}}{A_{00}}$  e  $\frac{A_{44}}{A_{00}}$  serão escritos respectivamente  $A_{22}$  e  $A_{44}$  por conveniência.

Os coeficientes de correlação angular  $A_{kk}$  podem ser escritos na forma de um produto de dois fatores, onde cada fator depende apenas de uma das transições  $\gamma$ :

$$A_{kk} = A_k(\gamma_1) A_k(\gamma_2) \quad (1.3)$$

onde  $A_k(\gamma_1)$  é o coeficiente de orientação direcional e  $A_k(\gamma_2)$  o coeficiente de distribuição direcional de  $\gamma_2$ .

A descrição da correlação angular para cascata  $\gamma\gamma$ , onde existem transições de multipolaridade mista, pode ser expressa por [2]:

$$A_k(\gamma_1) = \frac{F_k(I_i L_1 L_1) + (-1)^{L_1 - L_1'} 2\delta_1 F_k(I_i L_1 L_1') + \delta_1^2 F_k(I_i L_1' L_1')}{1 + \delta_1^2} \quad (1.4)$$

$$A_k(\gamma_2) = \frac{F_k(I_f L_2 L_2) + 2\delta_2 F_k(I_f L_2 L_2') + \delta_2^2 F_k(I_f L_2' L_2')}{1 + \delta_2^2} \quad (1.5)$$

onde os coeficientes  $F_k$  dependem dos spins dos níveis e das multipolaridades das transições  $\gamma$ . São definidos para o estado inicial  $I_i$ , intermediário  $I$  e final  $I_f$ , como [2]:

$$F_k(I_i, LL') = (-1)^{I_i + I - 1} [(2L + 1)(2L' + 1)(2I + 1)(2K + 1)]^{1/2} \begin{pmatrix} L & L' & K \\ 1 & -1 & 0 \end{pmatrix} \left\{ \begin{matrix} L & L' & K \\ I & I & I_i \end{matrix} \right\} \quad (1.6)$$

onde:

$\begin{pmatrix} L & L' & K \\ 1 & -1 & 0 \end{pmatrix}$  são os coeficientes 3-J de Wigner,

e

$\left\{ \begin{matrix} L & L' & K \\ I & I & I_i \end{matrix} \right\}$  são os coeficientes 6-J de Wigner.

Estes coeficientes foram tabelados por Ferentz e Rosenzweig [13].

Os  $\delta_n$  ( $n=1,2$ ) são razões de mistura multipolar para cada transição  $\gamma$ , expressa por:

$$\delta_n = \frac{\langle I_f \| T_{L_n}^* \| I_i \rangle / (2L_n' + 1)^{1/2}}{\langle I_f \| T_{L_n}^* \| I_i \rangle / (2L_n + 1)^{1/2}} \quad (1.7)$$

onde:

$T_{L_n}^{\pi}$  são os operadores de interação multipolar definidos no apêndice da referência [1], sendo que  $\langle \pi \rangle = E$  representa a interação elétrica e  $\langle \pi \rangle = M$  representa a interação magnética.

$\langle I_f \| T_{L_n}^{\pi} \| I_i \rangle$  são os elementos de matriz reduzida, para transições gama, de um estado inicial  $I_i$  para outro  $I_f$ , final.

$L_n, L'_n = L_n + 1$  e  $\langle \pi \rangle, \langle \pi' \rangle$  caracterizam a transição elétrica ou magnética ( $\langle E \rangle$  ou  $\langle M \rangle$ ) de multipolaridades  $L$  e  $L'$ .

As informações sobre os elementos de matriz podem ser obtidas através do cálculo das interações dos núcleos com o campo eletromagnético. Um estudo completo sobre esse tipo de interação é apresentado na referência [14].

A interpretação física da razão de mistura multipolar pode ser expressa por:

$$\delta_n^2 = \frac{\text{Intensidade da transição } \gamma \text{ com multipolaridade } L'_n}{\text{Intensidade da transição } \gamma \text{ com multipolaridade } L_n} \quad (1.8)$$

Experimentalmente pode-se testar modelos nucleares pela medida da razão multipolar,  $\delta_n(L'_n/L_n)$  associada a transições  $\gamma$  pois trata-se de parâmetro sensível às funções de onda que descrevem o modelo em uso.

### 1.3 Correlação Angular Tripla

O tratamento quantitativo dado ao mecanismo da correlação angular considerou, até então, por questão de simplicidade, o caso de uma cascata simples. Entretanto, no

processo de desexcitação nuclear pode-se ter mais de duas radiações emitidas em cascata, principalmente em núcleos com esquema de níveis mais complexos. A figura 1.4 representa uma cascata tripla com os parâmetros que a caracterizam, isto é, energia (E), spin (I), paridade ( $\pi$ ) de níveis nucleares e razão de mistura multipolar ( $\delta$ ) associada à transição  $\gamma$ .

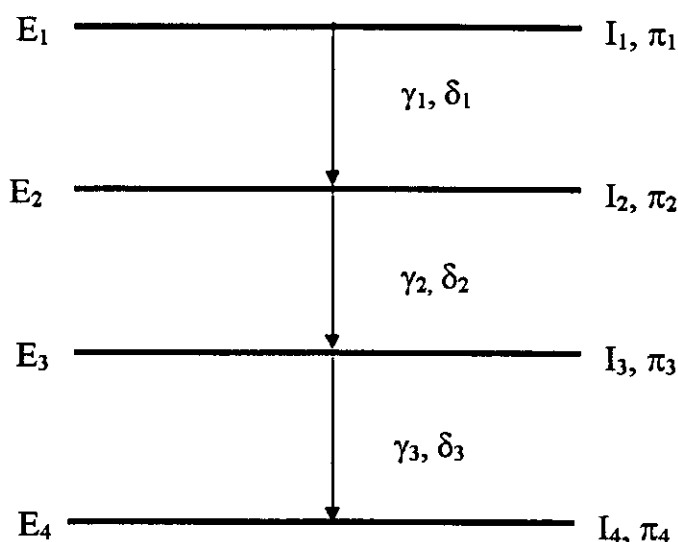


Figura 1.3: Esquema típico de níveis de uma cascata gama tripla.

Quando há emissão de três raios gama em sucessão formando uma cascata tripla, obtém-se uma expressão para a função correlação angular entre a transição  $\gamma_1$  e a transição  $\gamma_3$ , sem a observação da transição  $\gamma_2$ , introduzindo-se na equação (1.1) um fator multiplicativo  $U_k(I_2 I_3)$ , que é denominado coeficiente de distribuição angular da transição  $\gamma$  não observada [7,15].

Este fator  $U_k$  é dado por:

$$U_k(I_2 I_3) = \frac{U_k(L_2 I_2 I_3) + \delta_2^2 U_k(L'_2 I_2 I_3)}{1 + \delta_2^2} \quad (1.9)$$

onde os coeficientes  $U_k(L_2 I_2 I_3)$  e  $U_k(L'_2 I_2 I_3)$  encontram-se tabelados na referência [1]; os  $L_2$  e  $L'_2$  representam as menores ordens multipolares da transição  $\gamma_2$ ;  $\delta_2$  é a razão de mistura multipolar de  $\gamma_2$  (transição não observada).

Desta maneira, a função correlação angular direcional tripla, sem a observação da transição intermediária (no caso  $\gamma_2$ ), pode ser expressa da seguinte forma:

$$W(\theta)(\gamma_1, \gamma_3) = \sum_{k=2,4} A_k(\gamma_1) U_k(I_2 I_3) A_k(\gamma_3) P_k(\cos\theta) \quad (1.10)$$

onde  $A_k(\gamma_n)$  é definido em (1.3).

A função correlação angular direcional, pode ser generalizada para o caso de um i-ésimo raio gama não observado de uma cascata n-upla, introduzindo-se coeficientes,  $U_k(I_i I_{i+1})$ , o que resulta na expressão:

$$W(\theta)(\gamma_1, \gamma_n) = \sum_{k=2,4} A_k(\gamma_1) U_k(\gamma_2) \cdots U_k(\gamma_{n-1}) A_k(\gamma_n) P_k(\cos\theta) \quad k = 2,4 \quad (1.11)$$

onde  $A_k(\gamma_1) \cdots A_k(\gamma_n)$  são coeficientes de correlação angular referentes às transições observadas e  $U_k(\gamma_2) \cdots U_k(\gamma_{n-1})$  são fatores de reorientação referentes às radiações intermediárias não observadas.

## 2 COINCIDÊNCIAS MULTIPARAMÉTRICAS

### 2.1 Introdução

Neste capítulo será descrita a instrumentação utilizada na medida de coincidência multiparamétrica das transições  $\gamma$  provenientes do decaimento  $\beta^-$  do  $^{72}\text{Ga}$ .

Diz-se que duas ou mais transições  $\gamma$  estão em coincidência quando são emitidas sucessivamente pelo mesmo núcleo. Essas emissões têm diferenças de tempo da ordem da meia-vida dos estados excitados envolvidos que, se menores que a resolução temporal dos sistemas de aquisição (geralmente da ordem de alguns ns), dão origem a sinais considerados coincidentes. A coincidência assim descrita é denominada coincidência real, em oposição à coincidência acidental, onde raios  $\gamma$  provenientes de núcleos distintos são detetados com uma diferença de tempo aceita pelo sistema de aquisição. Na prática a medida de coincidência  $\gamma\gamma$  utiliza pelo menos dois detetores, cada um medindo um fóton. Para exemplificar tomemos algumas relações de coincidências, provenientes do decaimento  $\beta^-$  do  $^{72}\text{Ga}$ , cujo esquema de desintegração é apresentado na figura 2.1. Podemos observar que as transições  $\gamma$  de 772 e 834 keV não são emitidas em cascata e podem gerar somente coincidências acidentais, isto é, coincidências de transições  $\gamma$  provenientes de núcleos distintos, por outro lado as transições  $\gamma$  de 630 e 834 keV são emitidos em cascata e podem gerar coincidências reais e também coincidências acidentais (usualmente denominamos a soma das coincidências reais e acidentais por coincidências totais).

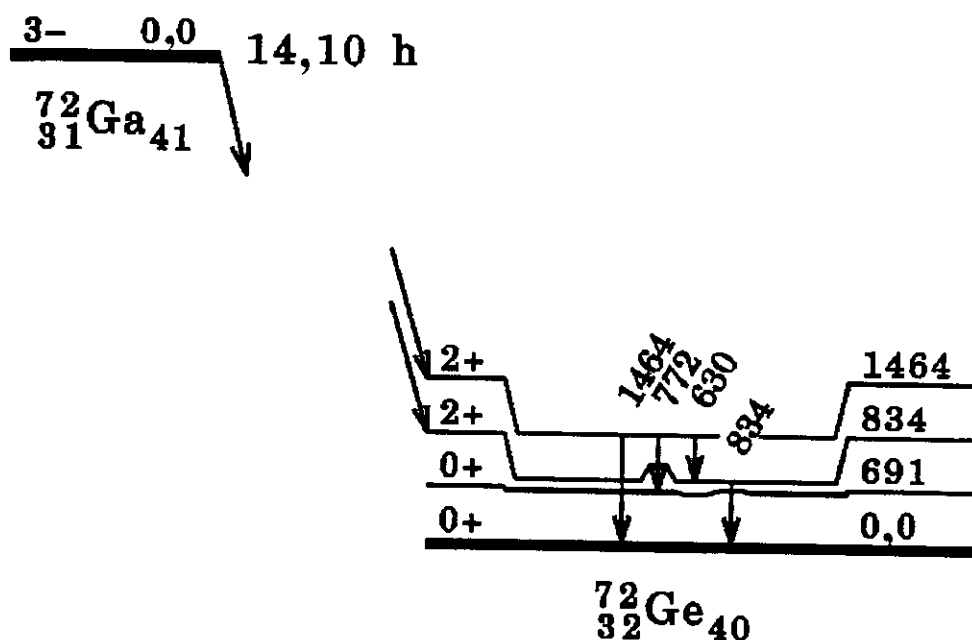


Figura 2.1: Esquema de níveis parcial do decaimento  $\beta^-$  do  $^{72}\text{Ga}$  (energia em keV).

## 2.2 Instrumentação

A medida de coincidência  $\gamma\gamma$  do presente estudo foi realizada utilizando-se um sistema multiparamétrico [16] instalado no Laboratório do Acelerador Linear do Instituto de Física da Universidade de São Paulo.

A instrumentação nuclear utilizada na aquisição dos dados de coincidência multiparamétrica constitui-se de um espectrômetro  $\gamma\gamma$  e um sistema eletrônico associado descritos a seguir.



### 2.2.1 Espectrômetro $\gamma\gamma$

O espectrômetro  $\gamma\gamma$  consiste de uma base com eixo mecânico e duas mesas, uma móvel e outra fixa, que suportam os dois detetores utilizados. A mesa móvel, que pode ocupar qualquer posição entre  $90^\circ$  e  $180^\circ$ , gira em torno de um eixo de rotação, posicionado exatamente no centro geométrico do arranjo, onde é posicionada a fonte radioativa.

O sistema porta-fonte consiste de um pequeno eixo que gira com velocidade angular constante, da ordem de 30 rpm, acionado por um pequeno motor elétrico, o que proporciona simetria cilíndrica à fonte. A distância entre a fonte radioativa e os cristais detetores é de 70 mm.

Um medidor angular digital com precisão angular de  $0,01^\circ$ , associado à mesa móvel, proporciona a verificação instantânea da posição da mesa.

Nas medidas de coincidências  $\gamma\gamma$ , do presente estudo, foram utilizados dois detetores HPGe, um com  $89\text{ cm}^3$  (fixo) e outro com  $50\text{ cm}^3$  (móvel). Colimadores cônicos de chumbo envolviam os detetores com a finalidade de impedir que fótons espalhados em um detetor sejam coletados no outro, provocando eventos espúrios de coincidências.

As coincidências foram adquiridas em quatro ângulos:  $90^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $150^\circ$  e  $180^\circ$ . Um motor de passo, associado à mesa móvel e a um microcomputador, proporcionava a mudança dos ângulos entre os detetores de forma automática.

Este arranjo experimental pode ser observado na figura 2.2.

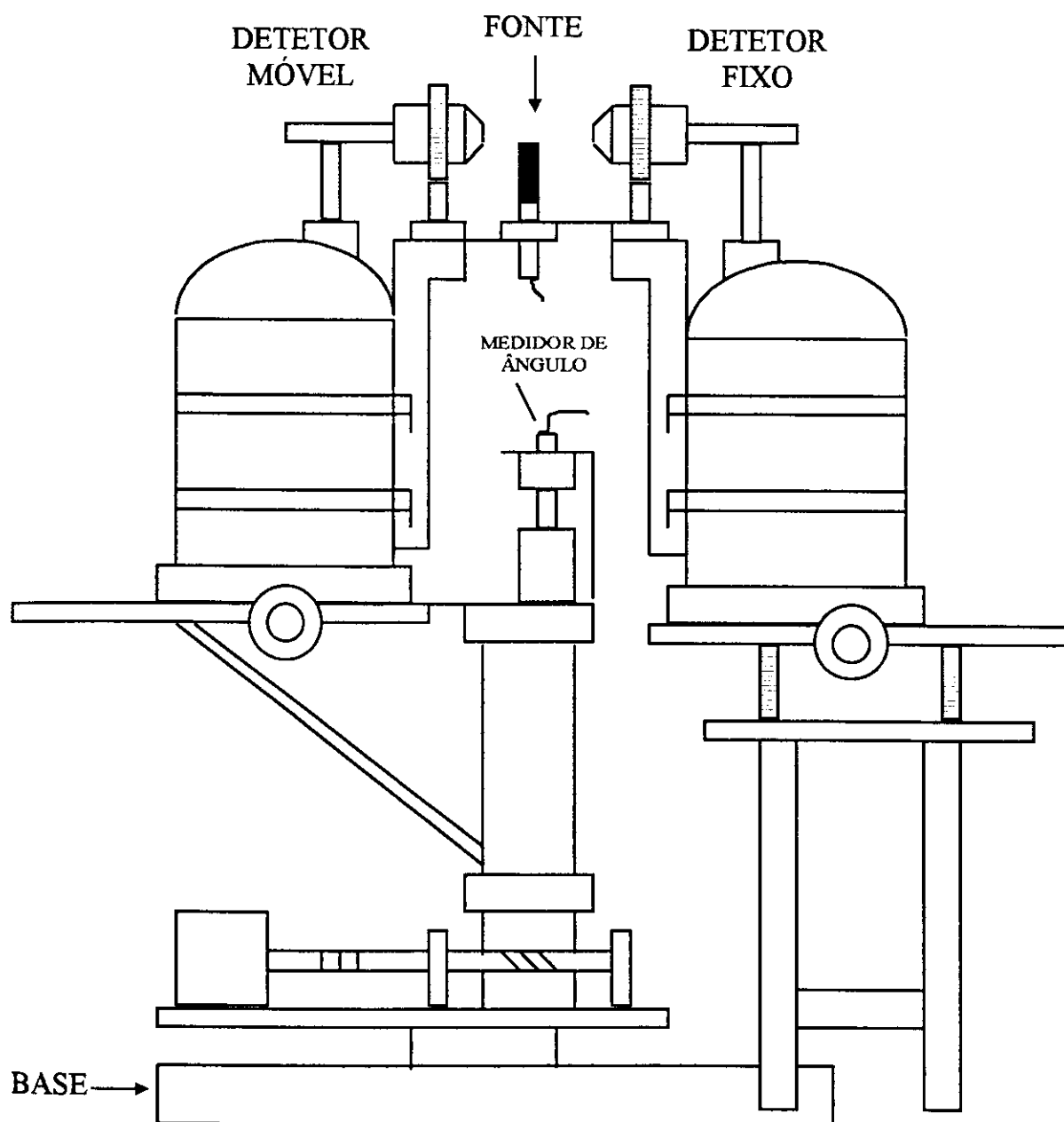


Figura 2.2: Esquema do espectrômetro  $\gamma\gamma$ .

## 2.2.2 Eletrônica de Coincidência

A eletrônica de coincidência, associada ao espectrômetro, consiste de dois amplificadores lineares ORTEC-572, dois amplificadores rápidos ORTEC-579, dois discriminadores de fração constante ORTEC-473A, dois conversores analógicos digitais ORTEC-800, um conversor de diferença de tempo LeCroy 2228A, uma interface GPIB LeCroy 8901-A e o controlador multidetector. Esses três últimos módulos são do padrão CAMAC, diferentemente dos outros que são do padrão NIM. O diagrama de blocos da eletrônica utilizada está esquematizado na figura 2.3.

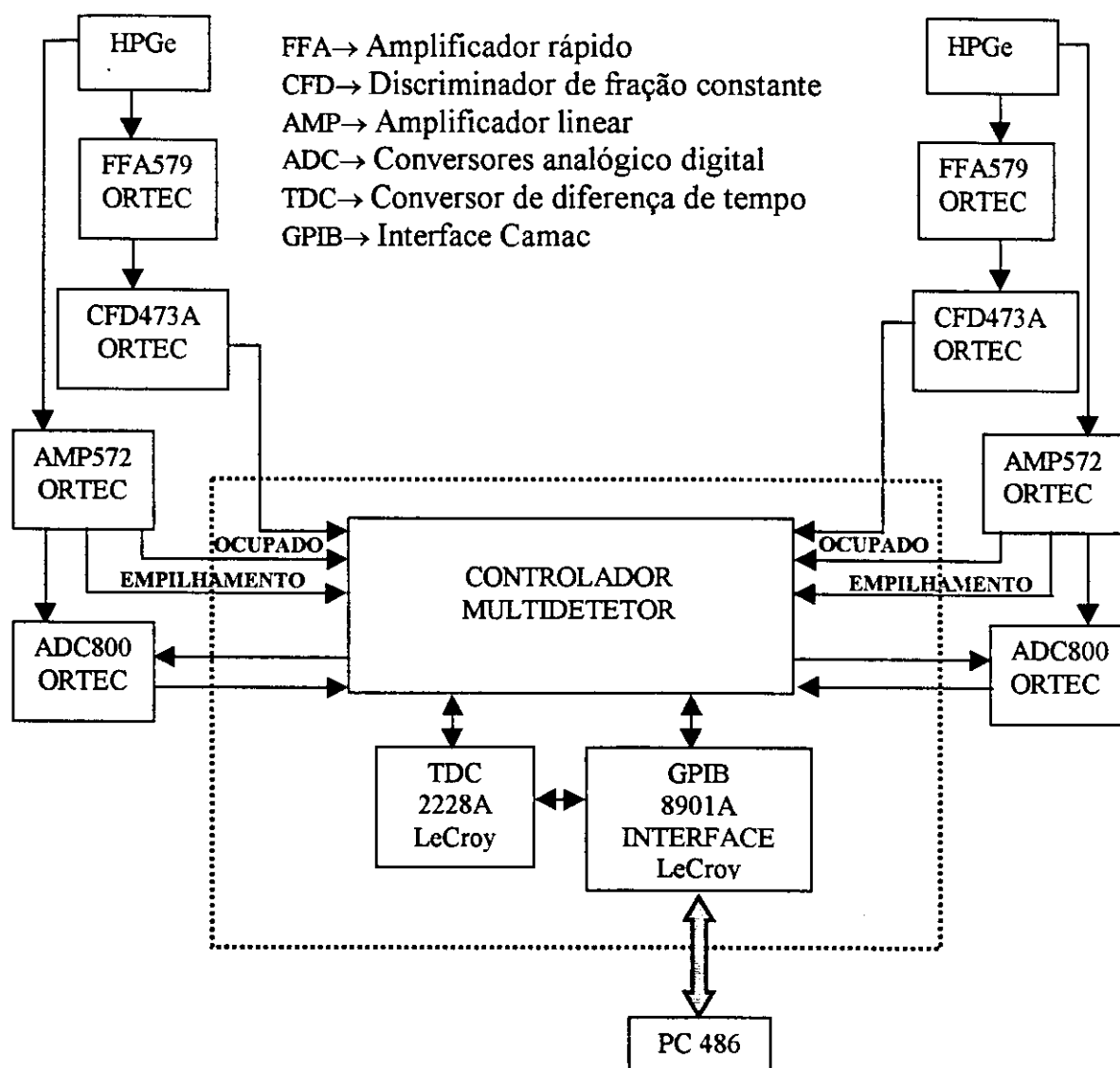


Figura 2.3: Eletrônica de coincidência do sistema multidetector do LAL/ IFUSP.

De cada detetor são extraídos dois sinais, um sinal lento e o outro rápido. Os sinais lentos alimentam amplificadores lineares e após receberem tratamento adequado alimentam os conversores analógicos digitais. Do amplificador linear também são extraídos os sinais de ocupado e empilhamento que avisam para o controlador multidetector toda vez que o amplificador está processando um pulso e toda vez que ocorrer empilhamento de pulsos, respectivamente. O conversor analógico digital trabalha em modo de coincidência e precisa receber um sinal de gate (lógico) coincidente com o sinal linear para processá-lo e fornecer a informação referente à energia do pulso. Na linha rápida os sinais são processados por amplificadores rápidos e alimentam os discriminadores de fração constante, que tem a função de marcar com precisão o tempo de sinais, emitindo um sinal lógico toda vez que receber um pulso. Esse sinal lógico alimenta o controlador multidetector.

O controlador multidetector é um módulo eletrônico padrão CAMAC, desenvolvido no Laboratório do Acelerador Linear [16], destinado à realização de medidas em coincidência com até oito detetores, registrando a ocorrência de uma coincidência entre dois ou mais deles, desde que quaisquer dois detetores apresentem sinais separados por menos de 200 ns.

A forma de operação do controlador multidetector pode ser entendida analisando-se o diagrama apresentado na figura 2.4. Supondo que o controlador multidetector receba dois pulsos contendo informação de tempo dos detetores, sua primeira tarefa é verificar se esses pulsos estão dentro do tempo de discriminação do controlador. Para isso ele prolonga os sinais em 200 ns e os soma. Se os sinais se distanciarem menos do que 200 ns os dois pulsos são considerados coincidentes e então ele envia um sinal de gate para o conversor analógico digital. O primeiro dos dois pulsos que chega no controlador produz um sinal atrasado em 150 ns que alimenta o conversor de diferença de tempo disparando o start comum. O stop é fornecido pelos dois pulsos atrasados em 200 ns. Dessa forma, tem-se a medida absoluta do tempo dos eventos em cada detetor. Essa informação de tempo é devolvida ao controlador pois este é responsável pelo interfaceamento com o microcomputador no qual se faz a aquisição dos dados. Note que se durante o processamento de sinais o controlador não receber um sinal de ocupado ou receber um

sinal de empilhamento, ele aborta a operação, pois isso significa que não foi um pulso que disparou o amplificador linear ou que ele empilhou dois pulsos, respectivamente. O conversor analógico digital recebendo o pulso do amplificador linear e o gate do controlador processa o pulso linear e envia a informação de energia do pulso para o controlador novamente, porque ele é o responsável pela interface de aquisição. Portanto, cada evento registrado deve conter a informação de energia e tempo das transições que chegaram nos dois detetores.

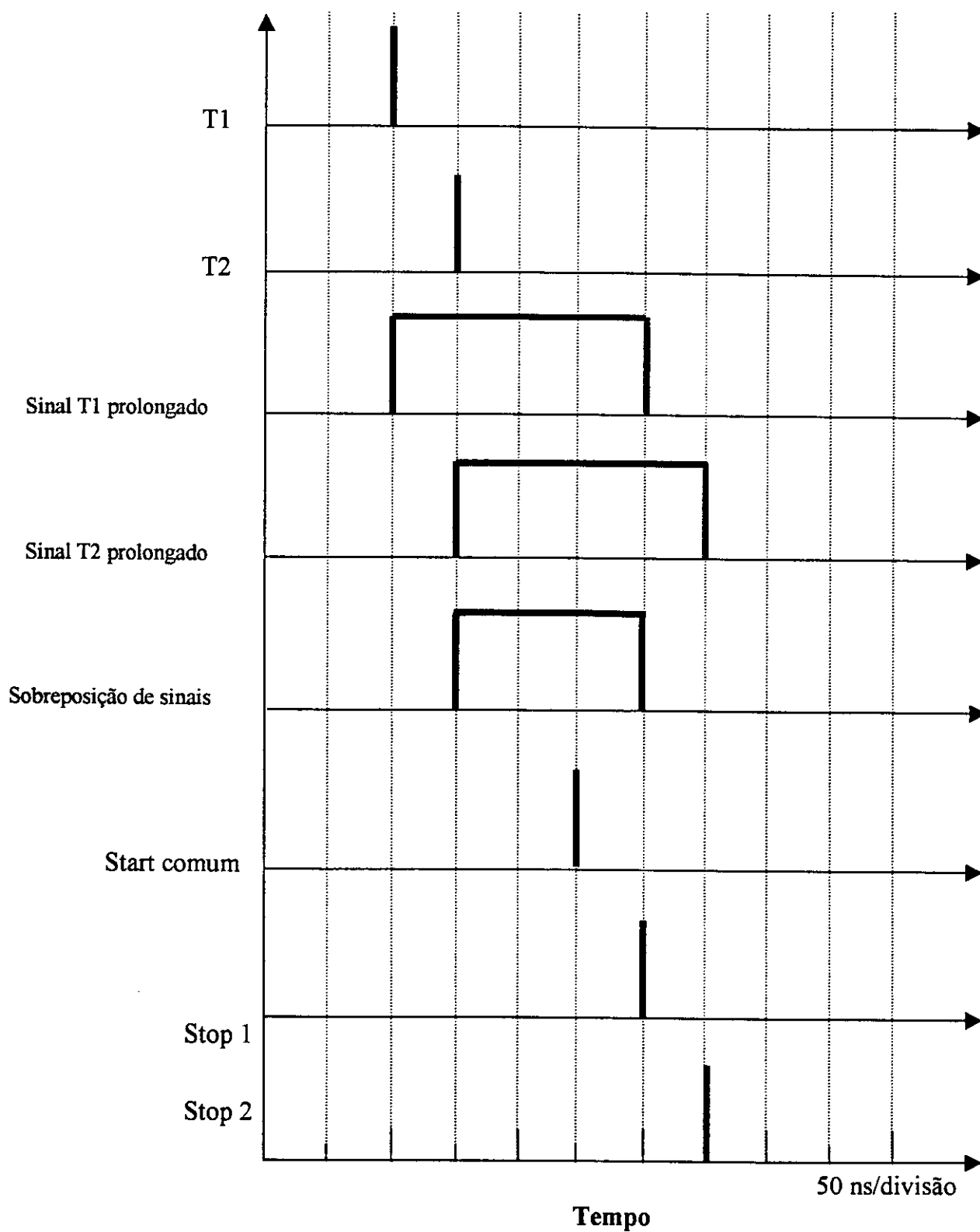


Figura 2.4: Carta de tempo do controlador multidetector.

Analisando o histograma de diferença de tempo entre os eventos coletados pelos dois detetores observa-se um pico relacionado com as coincidências reais, cuja centróide é posicionada em  $\Delta t = 0$  com largura da ordem da resolução temporal do sistema de aquisição (10 ns para a presente medida), enquanto coincidências acidentais, que não têm preferência temporal, são representadas no histograma de diferença de tempo por uma distribuição uniforme (figura 2.5). Desta forma pode-se obter as coincidências reais subtraindo-se as coincidências acidentais das coincidências totais.

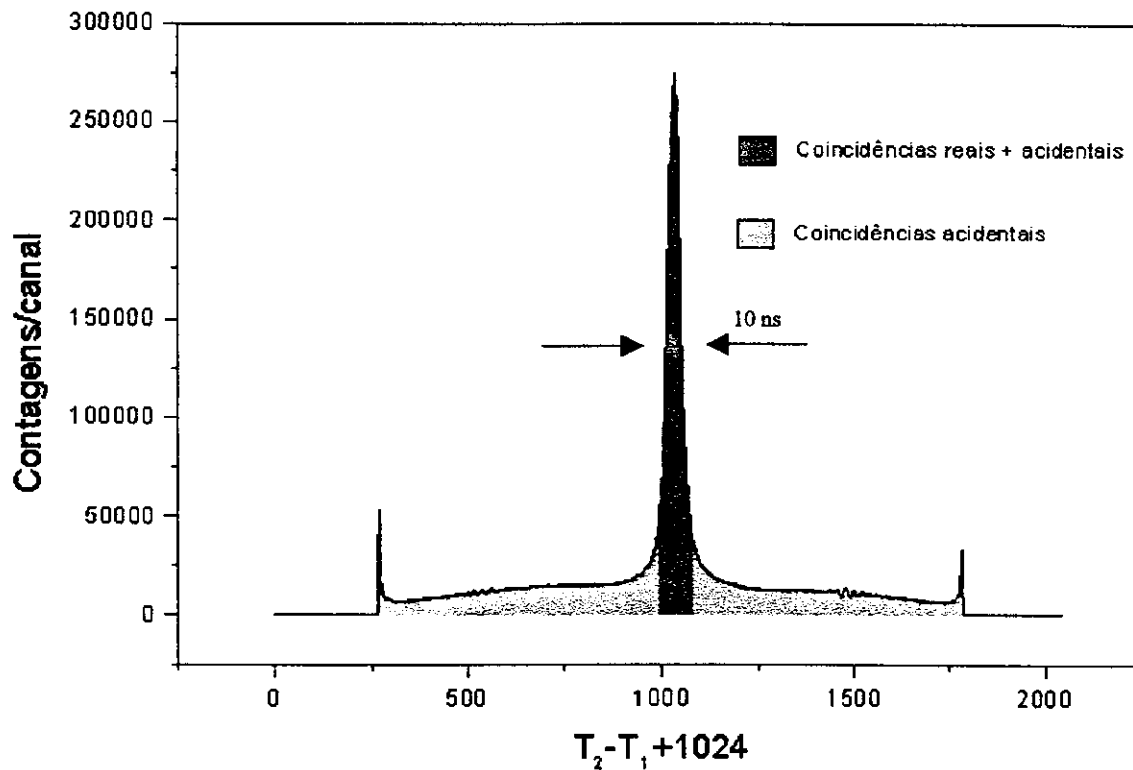


Figura 2.5: Histograma de tempo obtido com os dados da presente medida para o ângulo de  $150^\circ$ .

### 2.3 Aquisição de Coincidências Multiparamétricas

A aquisição de dados é feita através do programa Bidi [17] que possibilita o uso de dois detetores. Os eventos são registrados em um arquivo binário de forma seqüencial em que cada evento ocupa 8 bytes contendo a informação E1, E2, T1, T2, inteiros simples (2 bytes cada), onde E corresponde a energia e T ao tempo, e os índices 1 e 2 identificam os detetores. Essa forma de aquisição seqüencial é denominada modo fila. Os dados são armazenados em um microcomputador para posterior análise.

### 2.4 Teste de Desempenho do Arranjo Experimental

Para verificação do funcionamento do sistema eletrônico bem como do espectrômetro de multideteção mediu-se a cascata 894-834 keV do  $^{72}\text{Ge}$  cuja seqüência de spins  $4^+ \rightarrow 2^+ \rightarrow 0^+$  envolve transições de caráter puramente E2, o que permite a determinação teórica dos coeficientes  $A_{kk}$  e conseqüentemente sua comparação com os valores determinados experimentalmente.

A medida foi realizada com o espectrômetro descrito em 2.2.1. Os coeficientes de correlação angular obtidos são apresentados na tabela 2.1 e estão em bom acordo com os valores teóricos, o que garante o bom desempenho do arranjo experimental utilizado. Na figura 2.6 é apresentada a curva ajustada para o polinômio  $W(\theta)$  da cascata 894-834 keV do  $^{72}\text{Ge}$ .

Tabela 2.1: Coeficientes  $A_{kk}$  da cascata 894-834 keV do  $^{72}\text{Ge}$ .

$A_{kk}$	Experimental	Teórico
$A_{22}$	$0,115 \pm 0,007$	0,102
$A_{44}$	$0,019 \pm 0,011$	0,009



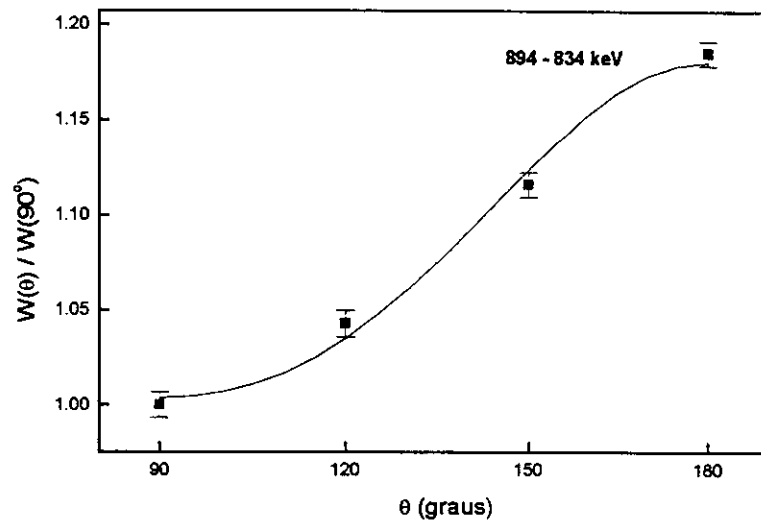


Figura 2.6: Função correlação angular  $W(\theta)$  para a cascata 894-834 do  $^{72}\text{Ge}$ .

### 3 TÉCNICA EXPERIMENTAL E ANÁLISE DE DADOS

Neste capítulo é descrita a metodologia utilizada para obtenção das amostras de  $^{72}\text{Ga}$  bem como o procedimento da análise de dados de coincidências multiparamétricas.

#### 3.1 Produção das Amostras de $^{72}\text{Ga}$

As fontes radioativas de  $^{72}\text{Ga}$  ( $T_{1/2} = 14,1$  h) foram produzidas através da irradiação de  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  com nêutrons térmicos do reator IEA-R1 do IPEN em São Paulo. Aproximadamente 10 mg de  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  natural, com 99,99% de pureza química, foram irradiados por 5 minutos com nêutrons térmicos num fluxo de aproximadamente  $5 \times 10^{12}$  n/cm<sup>2</sup>.s. Dada a composição isotópica do Gálio natural (40% de  $^{71}\text{Ga}$  e 60% de  $^{69}\text{Ga}$ ), foi preciso que se aguardasse por um período de aproximadamente duas horas antes de iniciar as medidas, pois o nuclídeo de  $^{70}\text{Ga}$  ( $T_{1/2}=21$ min) também era produzido na irradiação. A atividade final de cada amostra permitia a realização das medidas dentro de um limite de 10% de tempo morto nos módulos ADC e permitia a utilização de cada amostra por um período de até 16 horas.

Para a realização das medidas foram confeccionadas 3 amostras que foram irradiadas alternadamente, totalizando 40 irradiações. O tempo total de medida, o tempo de medida por ângulo (90°, 120°, 150° e 180°) e o número de amostras utilizadas estão relacionados na tabela 3.1.

Tabela 3.1: Dados da medida de coincidência  $\gamma$ - $\gamma$ .

Tempo total de medida (horas)	Tempo de medida por ângulo(horas)	Número de irradiações de $^{72}\text{Ga}$ produzidas
574 h e 40 min	143 h e 40 min	40

### 3.2 Análise de Dados

A aquisição dos dados se deu em 4096 canais para cada um dos detetores abrangendo energias de 100 keV a 3000 keV para o detetor fixo e móvel. Para o detetor fixo obteve-se uma resolução de 2,2 keV e para o detetor móvel uma resolução de 1,9 keV para a transição  $\gamma$  de 1332 keV do  $^{60}\text{Ni}$  nos dois casos.

Para obtenção dos valores de  $A_{kk}$  e  $\delta_n(L'_n/L_n)$  foram utilizados os espectros biparamétricos, referentes à aquisição de 73 espectros por ângulo medido, perfazendo um total de 584 espectros a serem analisados. Para estas análises várias correções foram efetuadas e são descritas a seguir.

#### 3.2.1 Correção para o Decaimento da Fonte

A medida de correlação angular direcional é realizada fazendo-se medidas sucessivas da taxa de coincidência para uma dada seqüência de ângulos. Se a meia vida da fonte é comparável ao tempo de medida, a atividade da fonte diminui com o decorrer da medida. Uma das formas de minimizar os efeitos do decaimento da fonte é a escolha da

seqüência de ângulos de modo que cada ângulo é medido por duas vezes e posteriormente somados conforme mostra a figura 3.1.

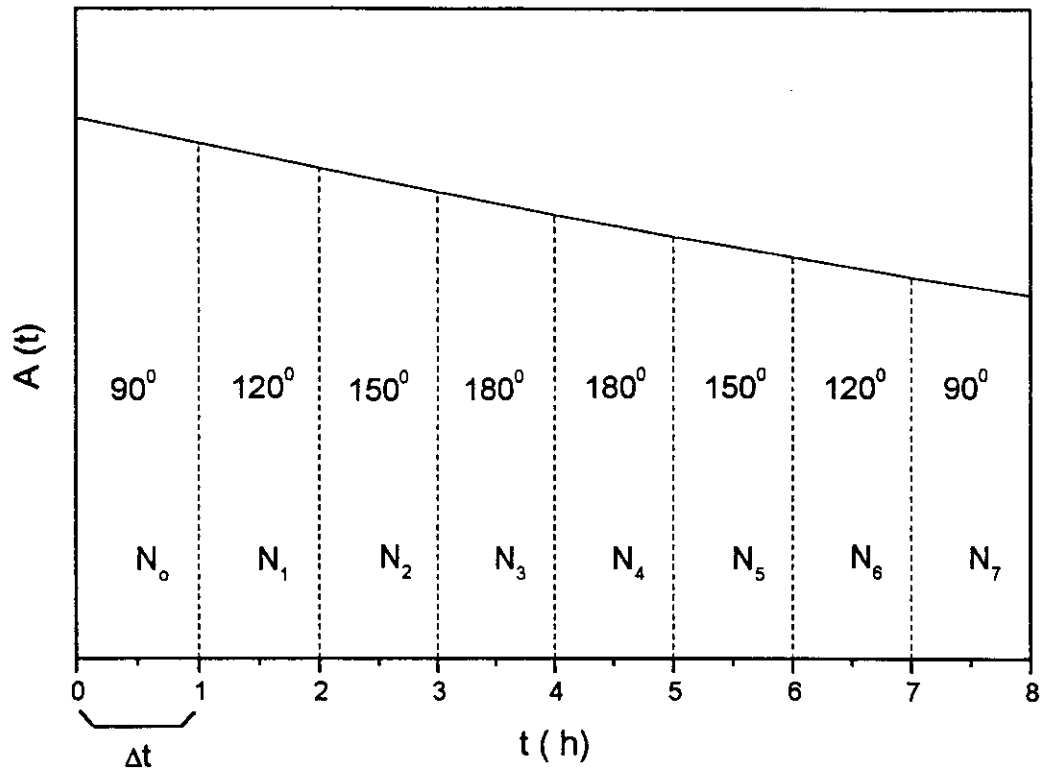


Figura 3.1: Gráfico esquemático da atividade  $A(t)$  em função do tempo  $(t)$ .

Podemos calcular a diferença máxima nas contagens entre os ângulos de  $90^\circ$  e  $180^\circ$ , verificando desta forma a necessidade de correção para o decaimento da fonte.

Da análise da figura 3.1, segue que:

$$N_i = N(t_i \rightarrow t_i + \Delta t) = \int_{t_i}^{t_i + \Delta t} A(t) dt \Rightarrow A(t) = A_0 e^{-\lambda t} \quad (3.1)$$

e

$$N_i = \frac{A_0}{\lambda} e^{-\lambda t_i} (1 - e^{-\lambda \Delta t}) \quad \text{com } t_i = i \Delta t \quad (3.2)$$

A medida foi realizada em quatro ângulos e a seqüência completa formava um ciclo iniciando-se no ângulo de  $90^\circ$ , passando por  $120^\circ$ ,  $150^\circ$  e  $180^\circ$ , e retornando na ordem

inversa da primeira seqüência. Adicionando-se as contagens ocorridas no mesmo ângulo, temos, a menos de constantes:

$$\begin{aligned}
 N_0 + N_7 &\cong e^{-0\lambda\Delta t} + e^{-7\lambda\Delta t} \\
 N_1 + N_6 &\cong e^{-\lambda\Delta t} + e^{-6\lambda\Delta t} \\
 N_2 + N_5 &\cong e^{-2\lambda\Delta t} + e^{-5\lambda\Delta t} \\
 N_3 + N_4 &\cong e^{-3\lambda\Delta t} + e^{-4\lambda\Delta t}
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

cada uma dessas somas pode ser escrita como:

$$\begin{aligned}
 N_0 + N_7 &\cong 2e^{-7\lambda\frac{\Delta t}{2}} \cosh\left(7\lambda\frac{\Delta t}{2}\right) \\
 N_1 + N_6 &\cong 2e^{-7\lambda\frac{\Delta t}{2}} \cosh\left(5\lambda\frac{\Delta t}{2}\right) \\
 N_2 + N_5 &\cong 2e^{-7\lambda\frac{\Delta t}{2}} \cosh\left(3\lambda\frac{\Delta t}{2}\right) \\
 N_3 + N_4 &\cong 2e^{-7\lambda\frac{\Delta t}{2}} \cosh\left(\lambda\frac{\Delta t}{2}\right)
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

O termo que torna as áreas diferentes é dado pelo cosseno hiperbólico e a maior diferença é entre os extremos, então:

$$\Delta N_{\text{máx}} = \cosh\left(7\lambda\frac{\Delta t}{2}\right) - \cosh\left(\lambda\frac{\Delta t}{2}\right) \tag{3.5}$$

Expandindo até segunda ordem no argumento, temos:

$$\Delta N_{\text{máx}} \cong 6(\lambda\Delta t)^2 \tag{3.6}$$

Para  $\Delta t = 1h$  e  $T_{1/2} = 14,1h$

$$\frac{\Delta N_{\text{máx}}}{N} \cong 1,5\% \quad (3.7)$$

O resultado obtido indica que a correção prevista pode ser desprezada.

### 3.2.2 Relocação de Espectros

Em experimentos prolongados vários fatores como: variação de temperatura, queda de tensão e outros, podem gerar deslocamento dos fotopicos no decorrer da aquisição de dados comprometendo os resultados obtidos. Para verificar se houve mudança do posicionamento dos fotopicos de um espectro para outro, cada espectro foi monitorado individualmente, isto é, foram selecionados vários fotopicos ao longo do espectro sendo possível estabelecer sua posição para posterior comparação. Particularmente para esta verificação foi utilizado o programa IDF [18].

Para casos onde constatou-se um deslocamento dos fotopicos foi elaborado um programa que permite relocar eventos.

Basicamente, para que a relocação dos dados experimentais possa ser realizada é necessário estabelecer a curva de calibração em energia de cada espectro respectivamente. Para esta finalidade foram selecionados 5 fotopicos para ajuste ao longo de cada espectro, gerando ao final da verificação 2920 ajustes efetuados. Uma descrição detalhada do programa Reloca utilizado é apresentado no apêndice A.

Os dados experimentais para cada um dos detetores foram relocados e posteriormente somados, conforme o ângulo de medida.

### 3.2.3 Correção de Ângulo Sólido dos Detetores

Devido ao tamanho finito dos detetores e dimensão da fonte radiativa os coeficientes de correlação angular obtidos experimentalmente não podem ser comparados aos valores teóricos sem que sejam efetuadas as devidas correções.

Nas condições do presente experimento, os detetores possuem geometria cilíndrica e a dimensão da fonte pode ser considerada pontual. Desta forma, os coeficientes  $A_{kk}$  podem ser expressos por:

$$A_{kk} = \frac{A_{kk}^{\text{exp}}}{Q_{kk}} \quad (3.8)$$

com

$$Q_{kk} = Q_k(\gamma_1) \cdot Q_k(\gamma_2) \quad (3.9)$$

onde  $Q_{kk}$  é o produto de dois fatores de atenuação um para cada detetor. Cada um dos fatores  $Q_{kk}$  pode ser expresso por:

$$Q_{kk} = \frac{J_k^1(\gamma_1) \cdot J_k^2(\gamma_2)}{J_0^1(\gamma_1) \cdot J_0^2(\gamma_2)} \quad (3.10)$$

onde a integral  $J_k$  é definida abaixo e os superscritos (1), (2) indicam os detectores.

$$J_k(\gamma_i) = \int P_k(\cos\alpha) \varepsilon_i(\alpha, E_i) |\sin\alpha| d\alpha \quad (3.11)$$

onde  $P_k$  são os polinômios de Legendre,  $\alpha$  é ângulo entre a direção de propagação do raio- $\gamma$  e o eixo de simetria do detetor,  $\varepsilon_i(\alpha, E_i)$  é a eficiência do detetor para o ângulo  $\alpha$  e  $E_i$  a energia. Portanto os fatores  $Q_{kk}$  dependem do ângulo sólido entre os detetores, da

geometria de detecção e das energias das transições  $\gamma$  da cascata em estudo [19]. Particularmente para os detectores de HPGe os valores de  $Q_k$  foram calculados utilizando a metodologia apresentada na referência [20].

### 3.3 Tratamento dos Dados para Obtenção dos Coeficientes $A_{kk}$

Para efetuar a análise de dados da medida de correlação angular foi utilizado o programa BIDIM [21], desenvolvido no Laboratório do Acelerador Linear do Instituto de Física da Universidade de São Paulo (IFUSP). Este programa permite visualizar os dados de coincidências multiparamétricas, bem como a obtenção das áreas pelo método dos mínimos quadrados dos fotopicos bidimensionais em estudo.

Os dados obtidos neste trabalho estão no modo fila, isto é, todas as coincidências observadas são registradas em um único arquivo na seguinte seqüência: energia registrada no primeiro detetor (E1), energia registrada no segundo detetor (E2), tempo registrado no primeiro detetor (T1) e tempo registrado no segundo detetor (T2).

A figura 3.2 permite a visualização de uma região do espectro em um histograma tridimensional e apresenta a coincidência entre as transições  $\gamma$  de 834-894 keV e 810-894 keV.



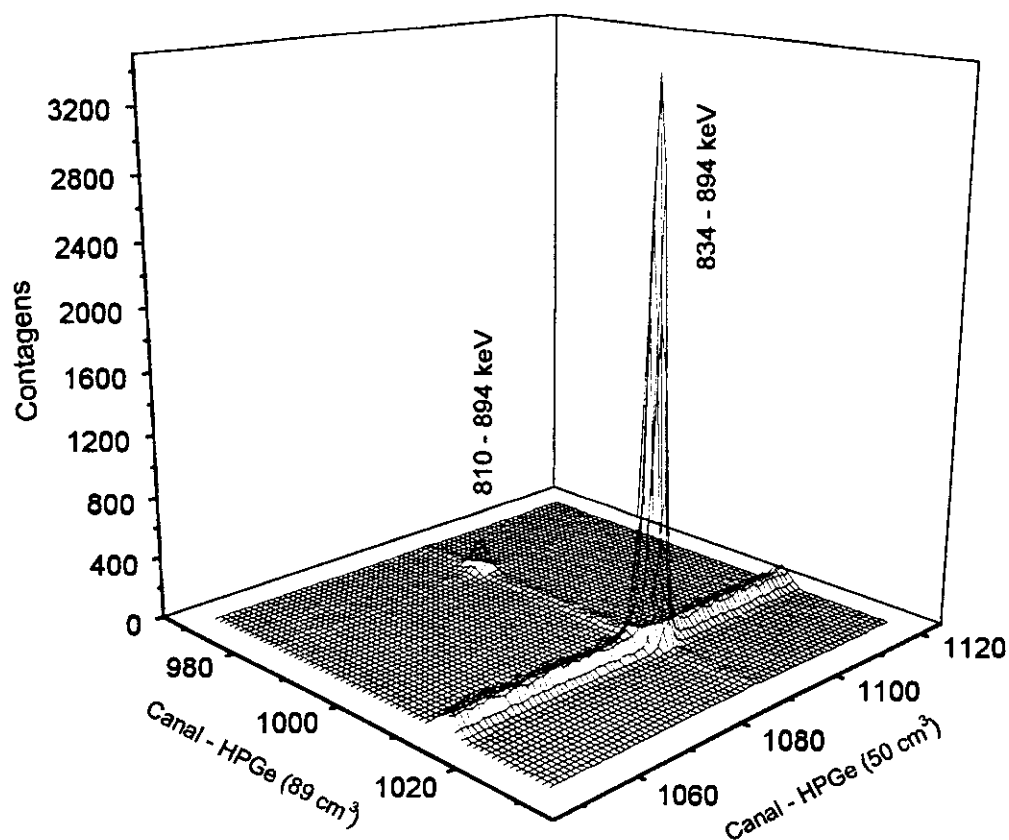


Figura 3.2: Histograma tridimensional da região de coincidência entre 834-894 keV e 810-894 keV, para a soma de todas as medidas no ângulo de  $150^\circ$

O programa possibilita selecionar um intervalo de tempo para filtrar os dados de entrada segundo a diferença de tempo entre os dois detectores. Este filtro é utilizado para selecionar eventos de coincidência nas regiões chamadas de reais ou de acidentais.

Os dados são visualizados em um histograma bidimensional onde cada um dos eixos (horizontal e vertical) corresponde à energia em cada um dos detectores, e as contagens em cada canal bidimensional são indicadas segundo um código de cores (no caso, tons de cinza e verde).

Os dados são histogramados em uma matriz de 256 colunas por 256 linhas. Para visualizar regiões maiores o programa agrupa as contagens de diversos canais em um mesmo canal bidimensional. É possível controlar independentemente estes agrupamentos para cada um dos dois detectores.

Na tela principal do programa Bidim (figura 3.3, região assinalada como 1 e 2) são apresentados os espectros unidimensionais das projeções das contagens ao longo de cada detetor, agrupados em 256 canais para cada detetor, segundo o mesmo critério de agrupamento escolhido pelo usuário para a matriz bidimensional. Na tela principal é exibido também o histograma das diferenças de tempo entre os detetores (figura 3.3, região assinalada como 3).

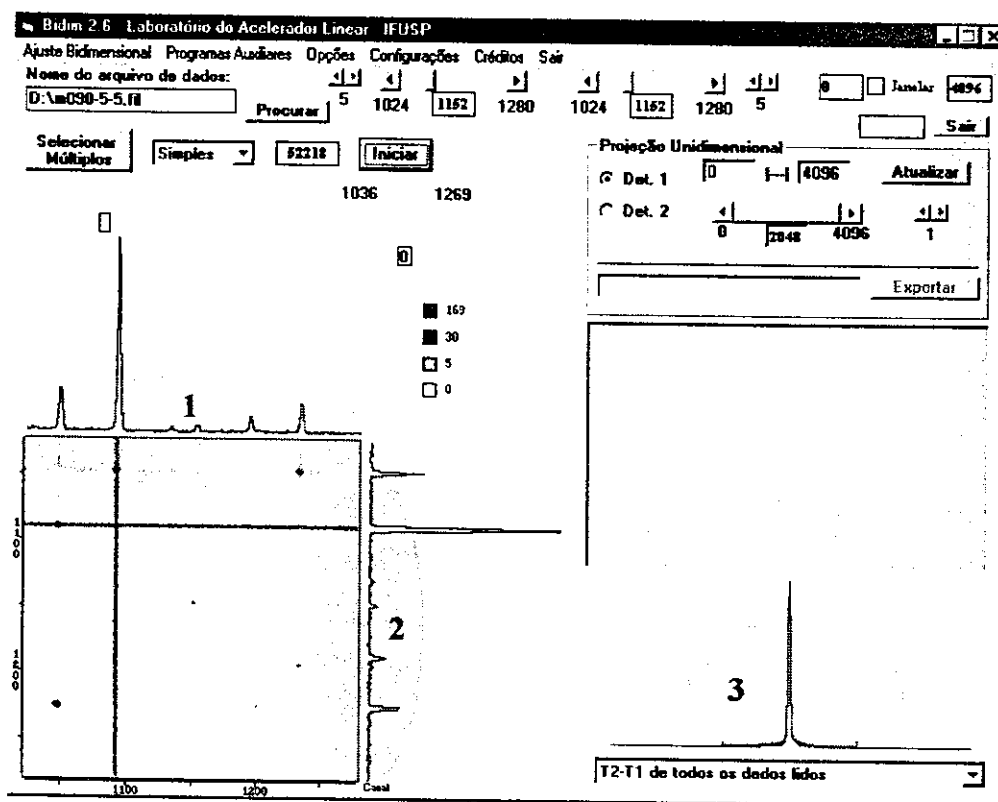


Figura 3.3: Tela principal do programa BIDIM.

É possível definir tanto um único arquivo de dados bidimensionais a ser trabalhado, quanto um conjunto de até 10 arquivos a serem trabalhados simultaneamente pelo programa. No caso de se definir um conjunto de arquivos, as informações exibidas serão sempre as correspondentes ao primeiro arquivo do conjunto e os ajustes efetuados poderão ser repetidos em todos os arquivos selecionados, mediante escolha do usuário.

Este processo permite, por exemplo, garantir que as condições dos ajustes (região, número de picos, etc) de todos os espectros correspondentes aos diversos ângulos de uma medida de correlação angular com detetor móvel sejam as mesmas.

### 3.3.1 Ajuste de Fotopicos Bidimensionais

Um fotopico bidimensional é formado pela composição dos fenômenos de detecção que ocorrem em ambos os detetores.

Consideremos inicialmente a análise dos fenômenos presentes em um pico unidimensional, onde basicamente três fenômenos destacam-se: um fundo, um pico gaussiano e um degrau centralizado na mesma posição que está centralizado o pico gaussiano, estendendo-se para energias mais baixas. A composição das funções que descrevem estes fenômenos para o caso unidimensional e para uma região com  $np$  picos é dada por:

$$F(x) = \sum_{i=0}^N a_i x^i + \sum_{j=1}^{np} A_j \left[ e^{-\frac{(x-x_{0j})^2}{2S^2}} + F \cdot \text{deg} \left( \frac{x_{0j} - x}{S} \right) \right] \quad (3.12)$$

O primeiro termo corresponde à função associada ao fundo, o segundo à função associada ao pico gaussiano e o terceiro à função associada ao degrau. No primeiro termo  $N$  indica o grau do polinômio, no segundo termo  $A_j$  a amplitude,  $x_0$  a posição do pico e  $S$  o desvio padrão onde a largura total à meia altura (FWHM) é dada por  $\text{FWHM} \cong 2,35.S$ , no terceiro termo  $A_j F$  corresponde à amplitude do degrau associado ao pico.

Em uma região bidimensional estes fenômenos existem em ambos os detetores, portanto a função a ser ajustada é uma composição destes efeitos em ambos os detetores.

Para se efetuar um ajuste no programa BIDIM [21], aciona-se a janela (tela) de ajuste bidimensional, que está reproduzida na figura 3.4. Nesta janela, deve-se definir a região de ajuste e indicar as estimativas iniciais das posições dos picos bidimensionais e calhas externas a ajustar. Opcionalmente, pode-se indicar estimativas iniciais para as larguras a meia altura (FWHM) e o fator de degrau de cada detetor.

O ajuste é efetuado pelo método dos mínimos quadrados.

**Ajuste Bidimensional**

Ajustar Configurar Opções Voltar

**Região de ajuste**

1	2
<input type="text"/> $\pm$ <input type="text"/>	<input type="text"/> $\pm$ <input type="text"/>
<input type="text"/> $\pm$ <input type="text"/>	<input type="text"/> $\pm$ <input type="text"/>

---

**FWHM**

<input type="text"/>	<input type="text"/>
----------------------	----------------------

---

**Degrau**

<input type="text"/>	<input type="text"/>
----------------------	----------------------

1100      1200      Const

**Posição dos picos bidimensionais :**

<input type="text"/> X <input type="text"/>	<input type="text"/> X <input type="text"/>	<input type="text"/> X <input type="text"/>
<input type="text"/> X <input type="text"/>	<input type="text"/> X <input type="text"/>	<input type="text"/> X <input type="text"/>
<input type="text"/> X <input type="text"/>	<input type="text"/> X <input type="text"/>	<input type="text"/> X <input type="text"/>

---

**Posição das calhas externas :**

<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------

Figura 3.4: Tela de ajuste do Programa BIDIM.

O programa aceita a inclusão de calibrações de energia, largura a meia altura e fator de degrau em função do canal. Quando o usuário requisita um ajuste com larguras ou degraus calibrados, o que o programa faz é fixar estes parâmetros iguais aos valores obtidos nas funções de calibração correspondentes, calculadas no canal médio das estimativas iniciais. A utilização do canal médio das estimativas iniciais é necessária porque o programa adota para cada detetor um único valor para a largura a meia altura e um único valor para o fator de degrau em cada ajuste.

A tela de resultado final (figura 3.5) apresenta no canto superior esquerdo o espectro bidimensional dos dados experimentais, sendo que os espectros bidimensionais

apresentados tanto abaixo dele, quanto a sua direita, são gerados a partir da função ajustada, e estão na mesma escala de tons de cinza que o dos dados experimentais. No canto inferior direito é apresentado o mapa dos resíduos canal a canal. No lado esquerdo são apresentados os resultados para a área associada a cada detector.

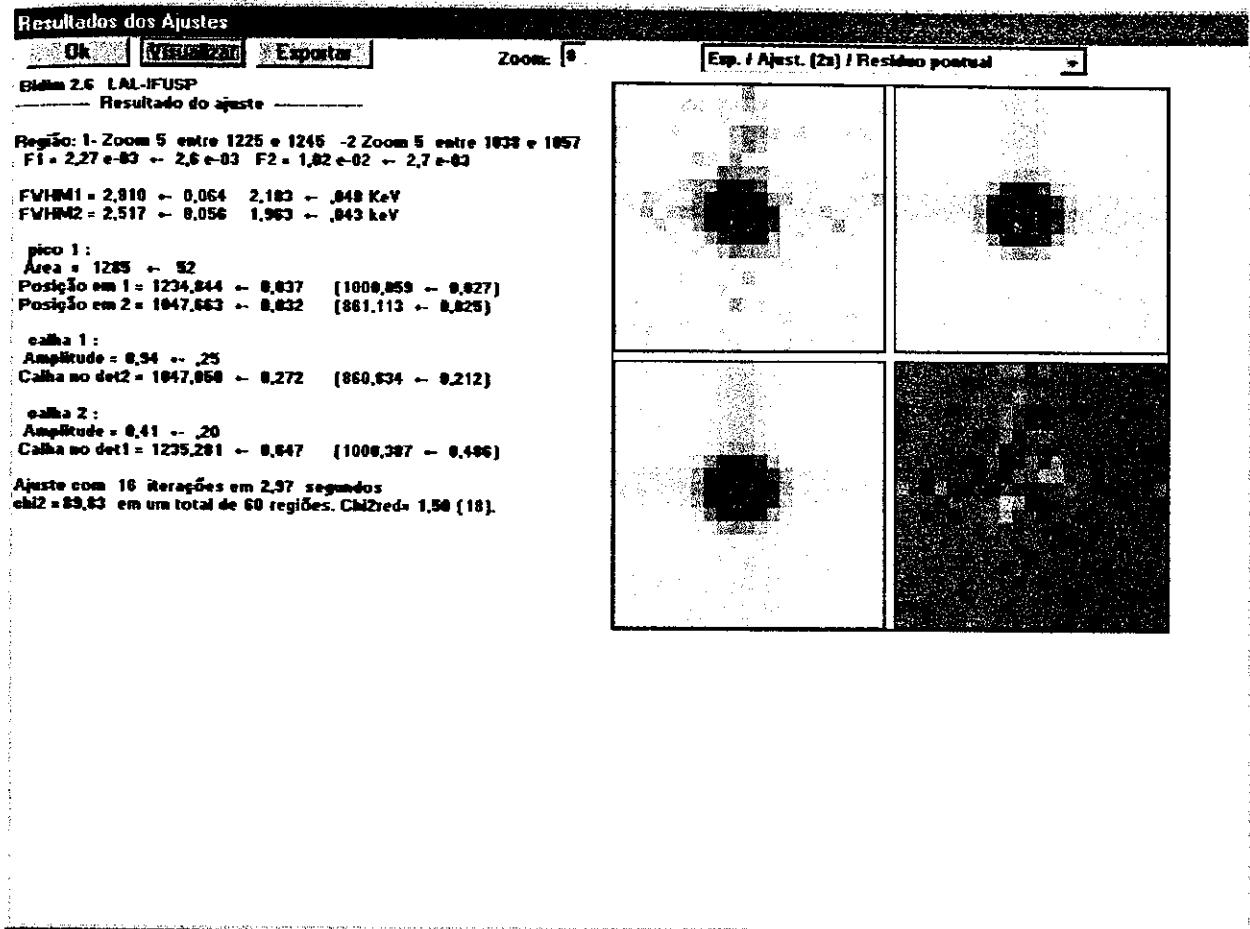


Figura 3.5: Tela do programa BIDIM para o resultado final do ajuste (exemplo).

A taxa de eventos de coincidências para cada ângulo é determinada por:

$$W^{\text{exp}}(\theta) = W^{\text{total}}(\theta) - W^{\text{acidental}} \quad (3.13)$$

onde  $W^{\text{total}}(\theta)$  é obtido selecionando um intervalo de tempo em torno da centroide do histograma de diferença de tempo (coincidências reais + acidentais) e  $W^{\text{acidental}}$  é obtido selecionando um intervalo de tempo de mesma extensão que o anterior, na região das coincidências acidentais e analisando-se os eventos da forma discutida anteriormente.

### 3.4 Cálculo da Razão de Mistura Multipolar

Analisando-se as equações que descrevem os coeficientes  $A_{kk}$ , tem-se que  $A_k(\gamma_n)$  depende do spin dos níveis envolvidos na cascata em estudo, bem como da razão de misturas multipolares associada às transições gama, conforme as equações (1.4) e (1.5), desta forma não é possível obter todos os parâmetros simultaneamente. Portanto é necessário o uso de informações, sejam experimentais ou teóricas, sobre os níveis e transições envolvidas na cascata em estudo.

Pode-se tomar como exemplo o caso onde já existam informações sobre os spins de dois dos três níveis e a razão de mistura multipolar  $\delta_n(L'_n / L_n)$  de uma das duas transições, considerando-se uma cascata simples. Neste caso a correlação angular direcional  $\gamma\gamma$  permite a determinação dos outros dois parâmetros que faltam: o spin do terceiro nível e o valor da razão de mistura multipolar da outra transição. A obtenção desses dois parâmetros segue o seguinte procedimento:

Inicialmente supõe-se que o spin desconhecido tenha um certo valor, com este procedimento fixamos os valores de  $F_k$  da expressão (1.4) ou (1.5). Em seguida obtemos o valor da razão de mistura multipolar,  $\delta_n(L'_n / L_n)$ , a partir do mínimo de  $\chi^2$  em função do  $\arctg(\delta)$  utilizando o programa delta, descrito no apêndice B.

Sendo  $\chi^2$  definido por:

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^m \left[ \frac{W^{teo}(\theta_j) - W^{exp}(\theta_j)}{\sigma(\theta_j)} \right]^2 \quad (3.14)$$

onde:

$m$  : é o número de ângulos utilizados nas medidas.

$W^{teo}(\theta_j)$  : é o valor teórico da função correlação angular calculado conforme equação(1.2), para a seqüência de spins escolhida.

$W^{\text{exp}}(\theta_j)$ : é o valor experimental obtido para a função correlação angular.

$\sigma(\theta_j)$ : é o desvio padrão.

o valor de  $\delta_n(L'_n/L_n)$  é associado ao menor valor de  $\chi^2$ . No caso em que os valores  $\chi^2$ , para diferentes escolhas de parâmetros, são comparáveis não é possível escolha.

### 3.5 Obtenção das Curvas Paramétricas de $A_{kk}$

Como os coeficientes  $A_{22}$  e  $A_{44}$  estão vinculados a razão de mistura multipolar das transições- $\gamma$  envolvidas,  $\delta(\gamma_1)$  e  $\delta(\gamma_2)$ , e supondo conhecida uma das razões de mistura multipolar, tem-se um vínculo entre  $A_{kk}$  e  $\delta_n(L'_n/L_n)$  que gera, no plano  $(A_{22}, A_{44})$ , uma curva paramétrica com forma de elipse que depende da seqüência de spins e do valor conhecido da razão de mistura multipolar de uma das transições- $\gamma$ . Desta forma, a determinação de um spin duvidoso pode ser obtida analisando-se as elipses geradas para todas as seqüências de spins possíveis verificando se os valores experimentais de  $A_{22}$  e  $A_{44}$ , com seus respectivos desvios, interceptam uma das elipses. Este procedimento não é conclusivo quando os valores experimentais interceptam mais de uma elipse.

Para ilustrar o procedimento adotado, serão apresentadas a seguir as análises realizadas, no presente estudo, que confirmam o spin atribuído ao nível 2065 keV do decaimento  $\beta^-$  do núcleo de  $^{72}\text{Ga}$ .

Este nível de 2065 keV foi estudado no presente trabalho pela medida de correlação angular das cascatas 336-894 keV, 600-1464 keV e 1230-834 keV, na figura 3.6 são apresentadas as curvas de correlação angular ajustadas ao polinômio  $W(\theta) = 1 + A_{22}P_2 \cos \theta + A_{44}P_4 \cos \theta$  para cada uma das cascatas, onde os pontos experimentais estão assinalados na curva com os respectivos erros.

Para obtenção da razão de mistura multipolar da transições de 336, 600 e 1230 keV

considerou-se o caráter de dipolo elétrico atribuído as transições de 834, 894 e 1464 keV. A partir da análise gráfica do comportamento de  $\chi^2$  versus  $\arctg(\delta)$  (figura 3.7) e das curvas paramétricas de  $A_{kk}$  (figura 3.8), considerando-se as seqüências de spin prováveis: 1-2-0, 2-2-0 e 3-2-0 para as cascatas 600-1464 keV e 1230-834 keV; 1-4-2, 2-4-2 e 3-4-2 para a cascata 336-894 keV pode-se confirmar atribuição de  $I^\pi = 3^+$  para este nível.

Este procedimento foi adotado para todos os níveis estudados.



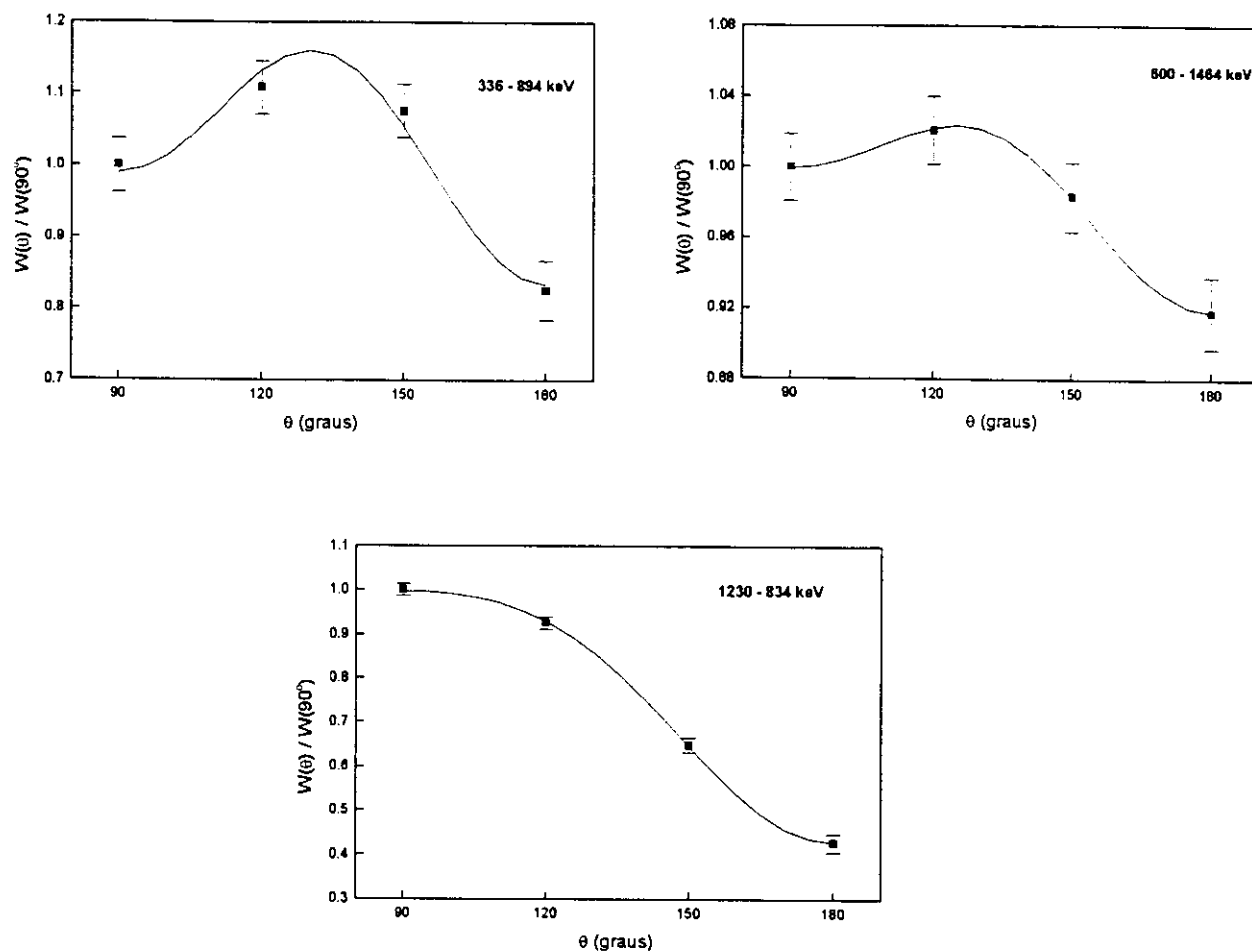


Figura 3.6: Curvas de correlação angular ajustada para o polinômio  $W(\theta)$  versus  $\theta$  para as cascatas 336-894 keV, 600-1464 keV e 1230-834 keV.

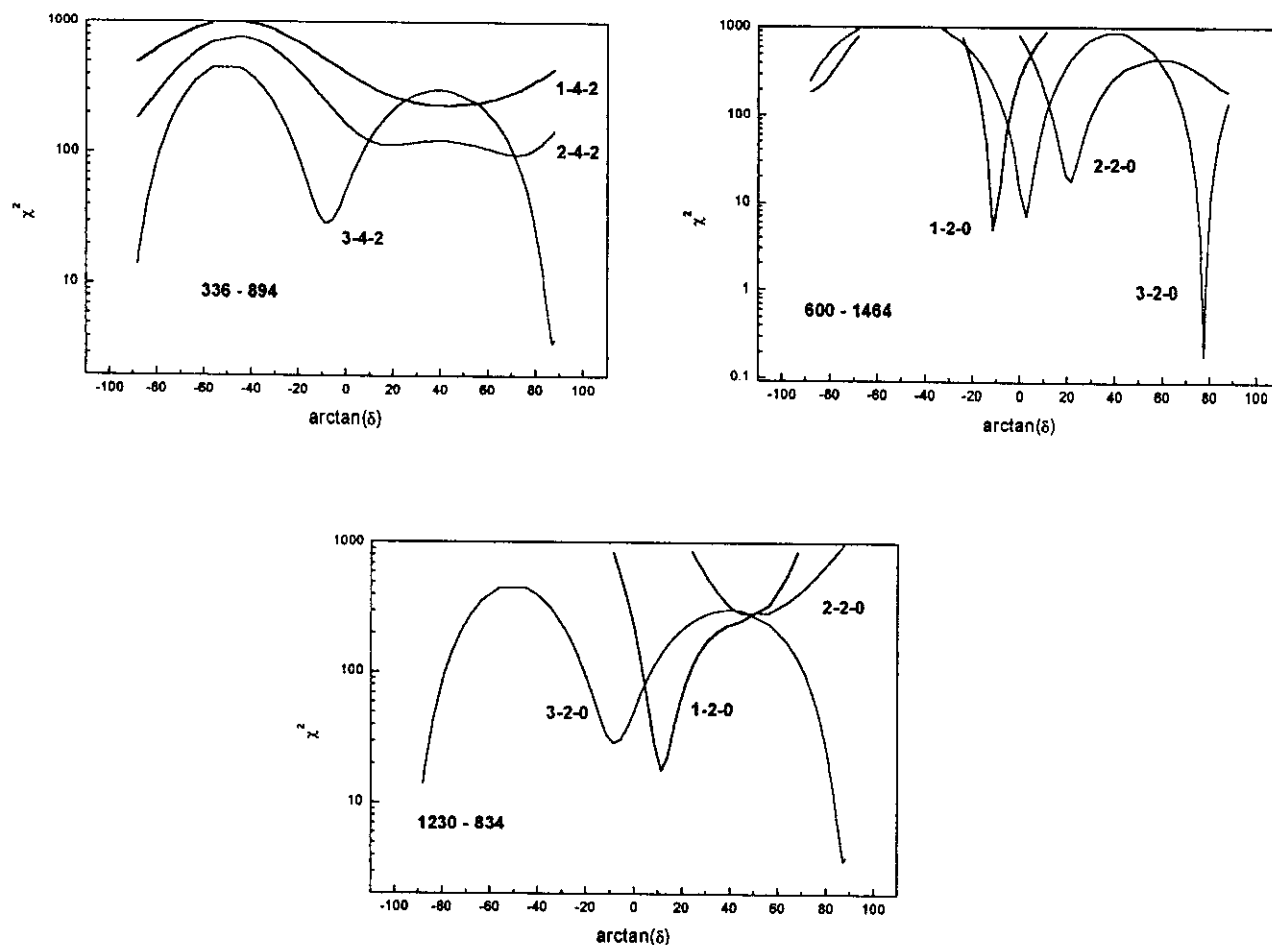


Figura 3.7: Gráfico de  $\chi^2$  versus  $\arctg(\delta)$ , para as cascatas 336-894 keV, para as seqüências de spin: 1-4-2, 2-4-2 e 3-4-2 e para as cascatas 600-1464 keV e 1230-834 keV para as seqüências 1-2-0, 2-2-0 e 3-2-0.

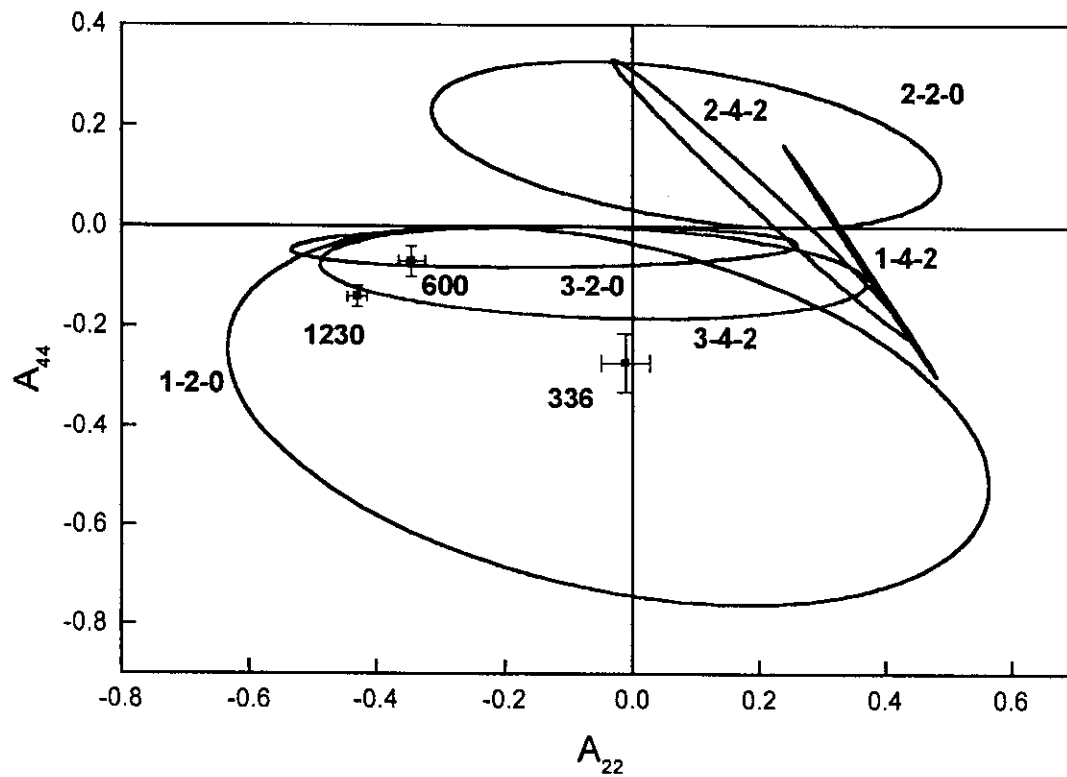


Figura 3.8: Curvas paramétricas de  $A_{kk}$  para as cascatas 336-894 keV, para as seqüências de spin: 1-4-2, 2-4-2 e 3-4-2 (assinaladas em vermelho) e para as cascatas 600-1464 keV e 1230-834 keV para as seqüências 1-2-0, 2-2-0 e 3-2-0.

## 4 RESULTADOS

No presente estudo procurou-se determinar spin de níveis excitados para o núcleo de  $^{72}\text{Ge}$  até a energia de  $\sim 3400$  keV. Foram analisadas 44 cascatas, sendo 33 medidas pela primeira vez, o que possibilitou a determinação da razão de mistura multipolar para 23 transições. Os resultados obtidos quando comparados com os demais trabalhos apresentam em muitos casos melhor precisão. Particularmente, algumas cascatas  $\gamma\gamma$  que envolvem a transição de 630 keV não foram analisadas devido à interferência do dubleto a 629 keV ( $1464$  keV  $\rightarrow$  834 keV e  $3325$  keV  $\rightarrow$  2694 keV) [4].

Os coeficientes de correlação angular  $A_{kk}$  das cascatas gama obtidos no presente estudo são apresentados na tabela 4.1. Na primeira coluna desta tabela é apresentado o nível inicial que compõe a cascata em estudo. Na segunda coluna é apresentada a cascata medida, bem como a seqüência de spins estabelecida. Na terceira coluna tem-se os valores experimentais dos coeficientes  $A_{kk}$  e os erros associados e na quarta coluna os resultados obtidos por outros trabalhos para comparação.

Tabela 4.1: Valores obtidos para os coeficientes  $A_{22}$  e  $A_{44}$  no núcleo de  $^{72}\text{Ge}$ .

NÍVEL (keV)	CASCATA $\gamma\gamma$ (keV – keV) SEQÜÊNCIA DE SPIN	$A_{22}$ $A_{44}$ PRESENTE ESTUDO	$A_{22}$ $A_{44}$ [REFERÊNCIA]
1464	630 – 834	-0,113 (4)	-0,095 (10) [5]
	$2^+ \rightarrow 2^+ \rightarrow 0^+$	0,304 (6)	0,308 (16) -0,002 (9) [22] 0,311 (12)
1728	894 – 834	0,115 (7)	0,116 (15) [5]
	$4^+ \rightarrow 2^+ \rightarrow 0^+$	0,019 (11)	0,023 (23) 0,125 (5) [22] -0,005 (7)
2065	336 – 894	-0,011 (38)	—
	$3^+ \rightarrow 4^+ \rightarrow 2^+$	-0,273 (58)	—
	600 – 1464	-0,345 (21)	—
	$3^+ \rightarrow 2^+ \rightarrow 0^+$	-0,070 (31)	—
2065	600 – 630 – 834	—	0,004 (22) [5]
	$3^+ \rightarrow 2^+ \rightarrow 2^+ \rightarrow 0^+$	—	-0,007 (36)
2065	1230 – 834	-0,430 (15)	-0,418 (50) [5]
	$3^+ \rightarrow 2^+ \rightarrow 0^+$	-0,140 (21)	0,002 (90)
2402	1568 – 834	0,163 (46)	—
	$2^+ \rightarrow 2^+ \rightarrow 0^+$	-0,217 (69)	—

Tabela 4.1: Continuação

NÍVEL (keV)	CASCATA $\gamma\gamma$ (keV – keV) SEQÜÊNCIA DE SPIN	$A_{22}$ $A_{44}$ PRESENTE ESTUDO	$A_{22}$ $A_{44}$ [REFERÊNCIA]
2464	735 – 894 $4^+ \rightarrow 4^+ \rightarrow 2^+$	0,011 (26) -0,535 (39)	—
	735 – 894 – 834 $4^+ \rightarrow 4^+ \rightarrow 2^+ \rightarrow 0^+$	—	0,117 (70) [5] -0,005 (110)
	1000 – 630 $4^+ \rightarrow 2^+ \rightarrow 2^+$	0,001 (19) -0,012 (29)	—
	1000 – 630 – 834 $4^+ \rightarrow 2^+ \rightarrow 2^+ \rightarrow 0^+$	—	-0,022 (59) [5] 0,012 (91)
2514	449 – 600 $3^- \rightarrow 3^+ \rightarrow 2^+$	0,364 (55) -0,005 (85)	—
	786 – 894 – 834 $3^- \rightarrow 4^+ \rightarrow 2^+ \rightarrow 0^+$	-0,123 (8) -0,011 (12)	-0,090 (25) [5] -0,035 (30)
	1050 – 630 $3^- \rightarrow 2^+ \rightarrow 2^+$	0,013 (6) 0,015 (10)	—
	1050 – 1464 $3^- \rightarrow 2^+ \rightarrow 0^+$	-0,071 (32) -0,008 (49)	—
	1050 – 630 – 834 $3^- \rightarrow 2^+ \rightarrow 2^+ \rightarrow 0^+$	—	0,062 (20) [5] 0,005 (31)
	1680 – 834 $3^- \rightarrow 2^+ \rightarrow 0^+$	-0,152 (21) 0,077 (32)	0,123 (65) [5] -0,113 (100)

Tabela 4.1: Continuação

NÍVEL (keV)	CASCATA $\gamma\gamma$ (keV – keV) SEQÜÊNCIA DE SPIN	$A_{22}$ $A_{44}$ PRESENTE ESTUDO	$A_{22}$ $A_{44}$ [REFERÊNCIA]
2943	428 – 786 – 894 $3^- \rightarrow 3^- \rightarrow 4^+ \rightarrow 2^+$	-0,126 (38) 0,001 (56)	—
	479 – 1000 $3^- \rightarrow 4^+ \rightarrow 2^+$	-0,108 (56) -0,158 (84)	—
	878 – 600 $3^- \rightarrow 3^+ \rightarrow 2^-$	0,117 (62) 0,050 (95)	—
	1215 – 894 $3^- \rightarrow 4^+ \rightarrow 2^-$	-0,075 (21) -0,064 (31)	—
	1215 – 894 – 834 $3^- \rightarrow 4^+ \rightarrow 2^+ \rightarrow 0^+$	-0,091 (20) -0,005 (31)	-0,051 (66) [5] 0,016 (100)
	2109 – 834 $3^- \rightarrow 2^+ \rightarrow 0^-$	-0,035 (32) 0,050 (48)	0,057 (64) [5] -0,068 (92)
3035	633 – 1710 $2^- \rightarrow 2^+ \rightarrow 0^+$	0,424 (104) 0,015 (159)	—
	970 – 600 $2^- \rightarrow 3^- \rightarrow 2^-$	-0,102 (16) -0,025 (24)	—
	1571 – 630 $2^- \rightarrow 2^+ \rightarrow 2^+$	0,008 (21) -0,003 (32)	—
	2201 – 834 $2^- \rightarrow 2^+ \rightarrow 0^-$	0,268 (5) 0,001 (7)	0,269 (16) [5] -0,022 (24)
3097	1032 – 600 $1^+ \rightarrow 3^+ \rightarrow 2^-$	0,357 (63) 0,010 (98)	—

Tabela 4.1: Continuação

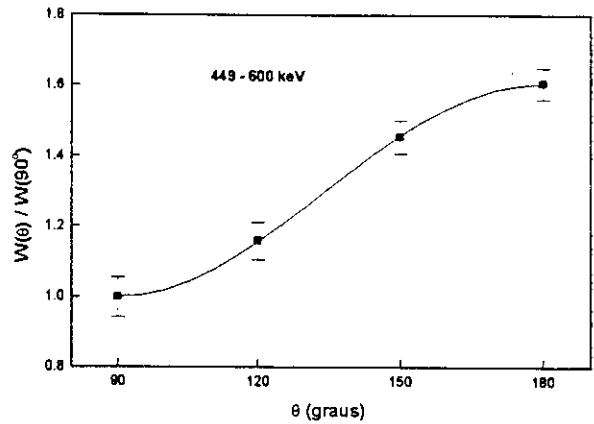
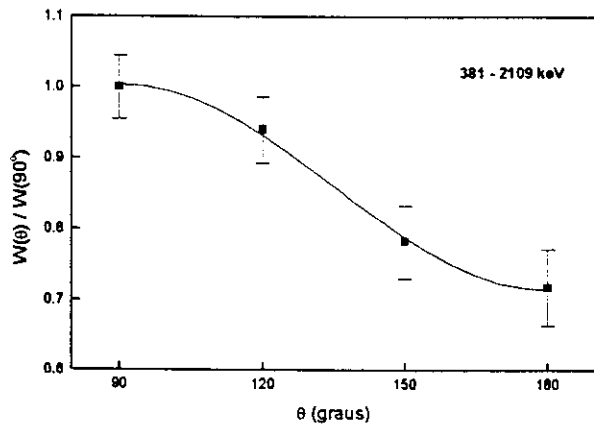
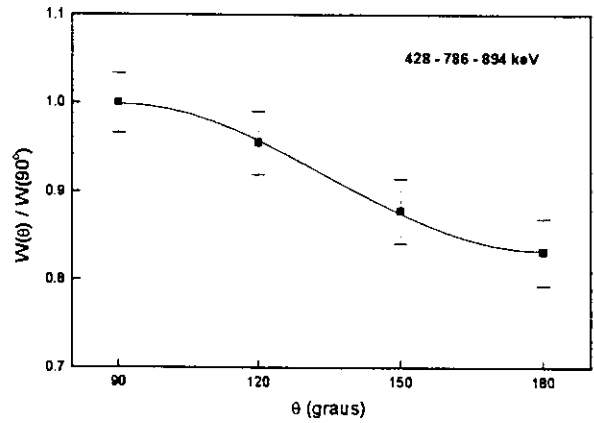
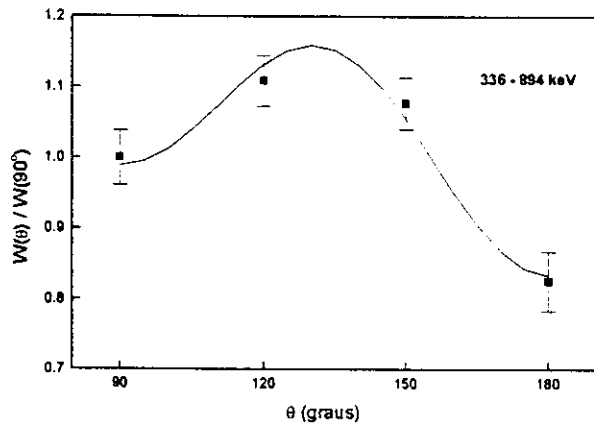
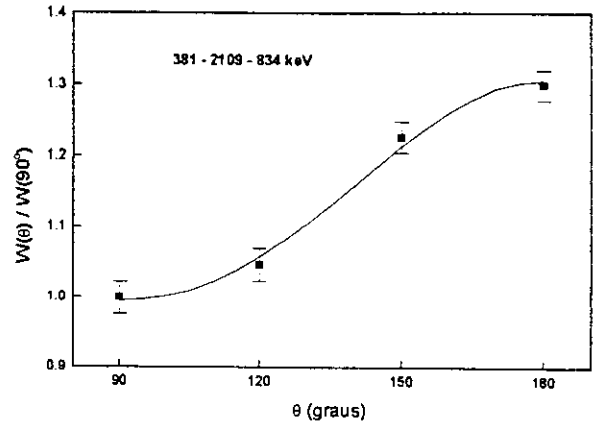
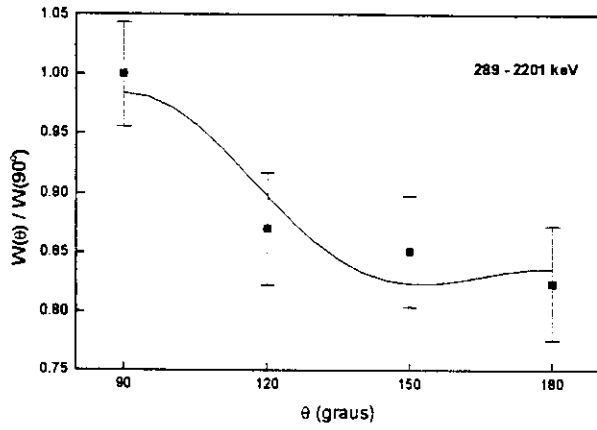
NÍVEL (keV)	CASCATA $\gamma\gamma$ (keV – keV) SEQÜÊNCIA DE SPIN	$A_{22}$ $A_{44}$ PRESENTE ESTUDO	$A_{22}$ $A_{44}$ [REFERÊNCIA]
3325	289 – 2201 $3^- \rightarrow 2^- \rightarrow 2^+$	-0,148 (51) 0,088 (74)	—
	381 – 2109 $3^- \rightarrow 3^- \rightarrow 2^+$	-0,229 (51) -0,002 (71)	—
	381 – 2109 – 834 $3^- \rightarrow 3^- \rightarrow 2^+ \rightarrow 0^+$	0,200 (25) 0,021 (38)	—
	810 – 1050 $3^- \rightarrow 3^- \rightarrow 2^+$	-0,198 (22) -0,004 (32)	—
	1260 – 600 $3^- \rightarrow 3^+ \rightarrow 2^+$	0,178 (18) 0,025 (27)	—
	1596 – 894 $3^- \rightarrow 4^+ \rightarrow 2^+$	-0,110 (14) -0,039 (21)	—
	1596 – 894 – 834 $3^- \rightarrow 4^+ \rightarrow 2^+ \rightarrow 0^+$	-0,114 (10) -0,020 (15)	-0,121 (33) [5] 0,035 (50)
	1860 – 1464 $3^- \rightarrow 2^+ \rightarrow 0^+$	-0,036 (34) 0,051 (52)	—
	1860 – 630 – 834 $3^- \rightarrow 2^+ \rightarrow 2^+ \rightarrow 0^+$	—	-0,017 (26) [5] 0,005 (39)
	2491 – 834 $3^- \rightarrow 2^+ \rightarrow 0^+$	-0,057 (9) -0,010 (14)	-0,074 (34) [5] -0,004 (52)

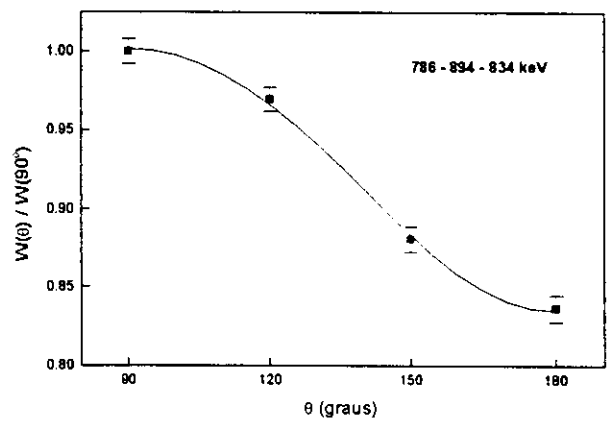
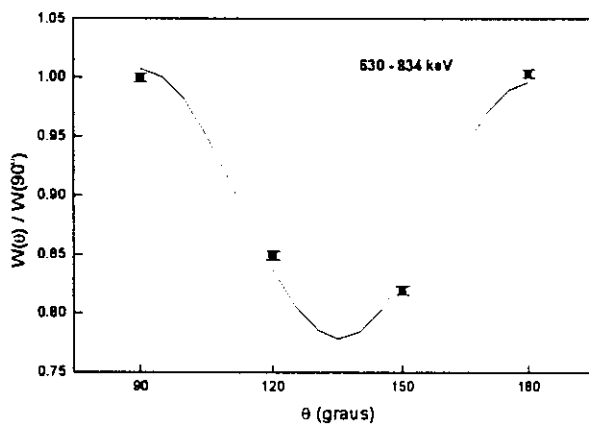
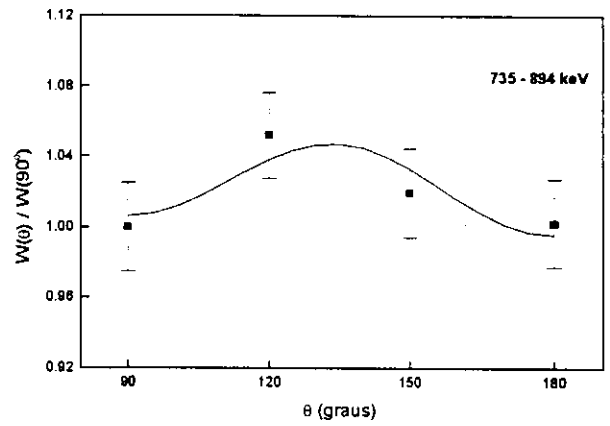
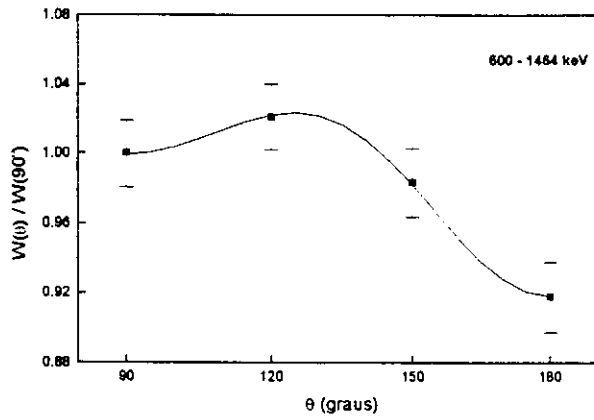
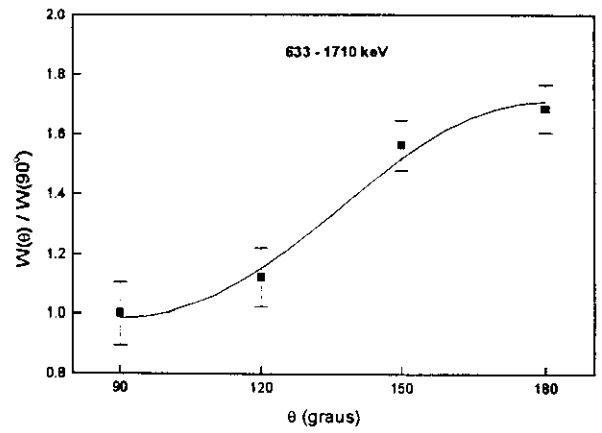
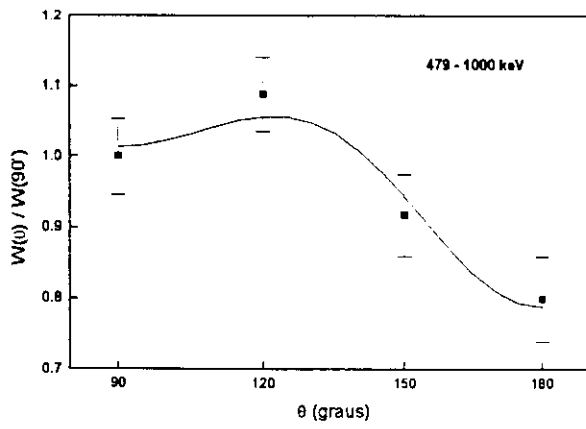


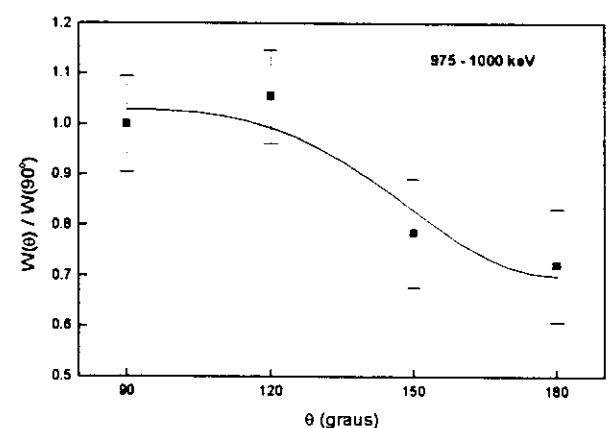
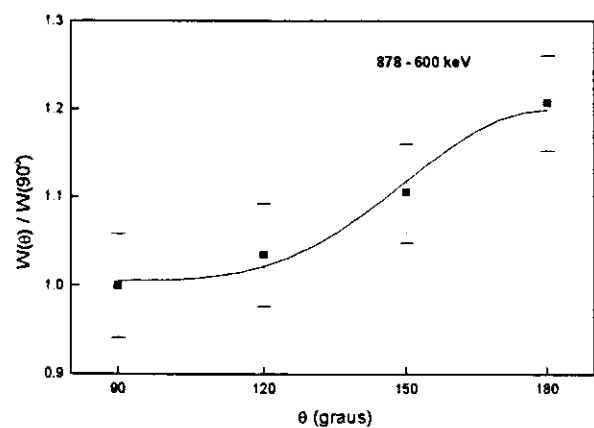
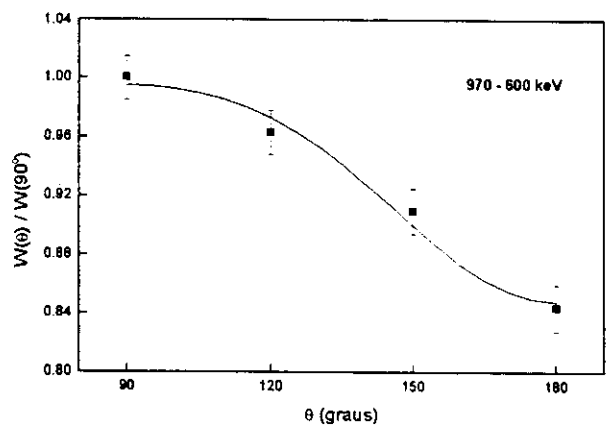
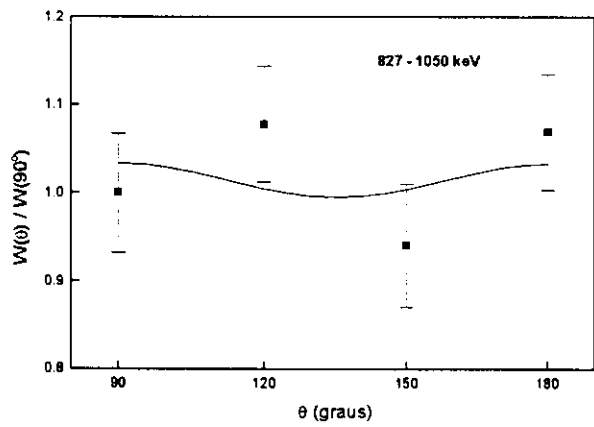
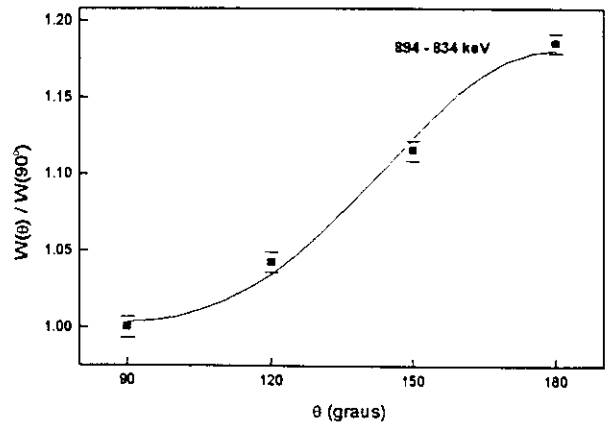
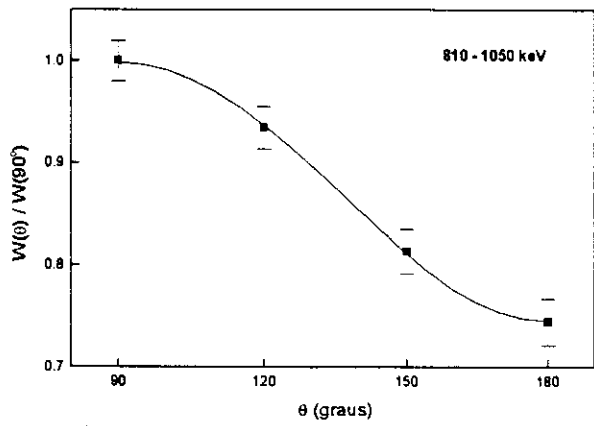
Tabela 4.1: Continuação

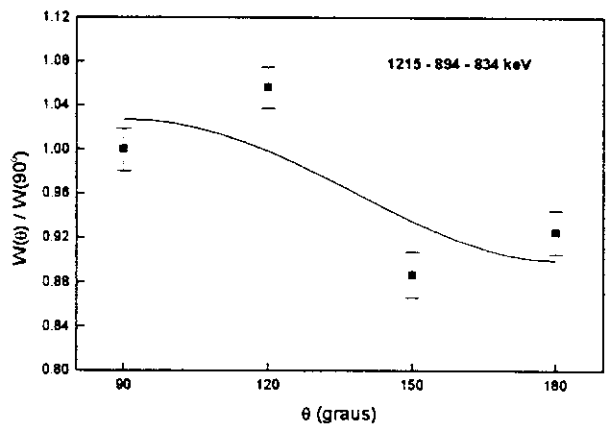
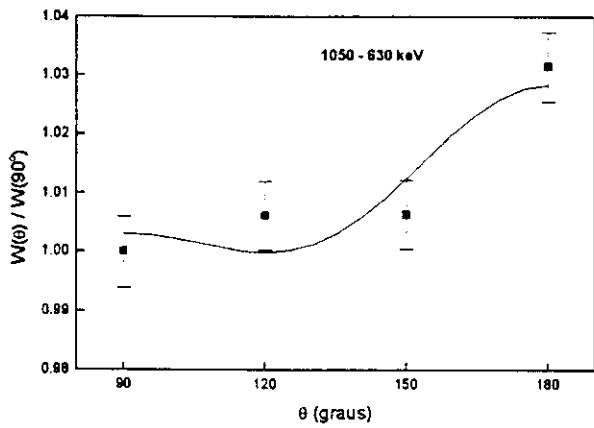
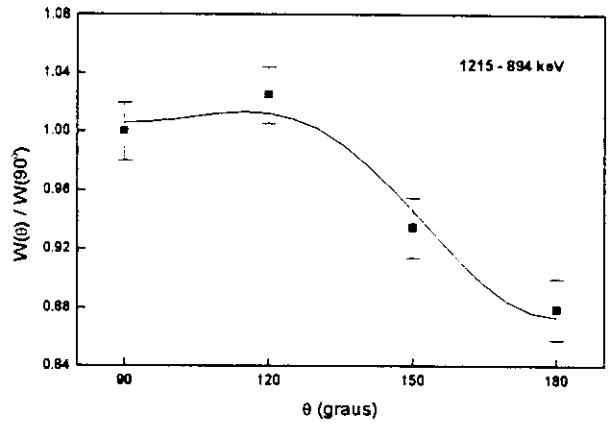
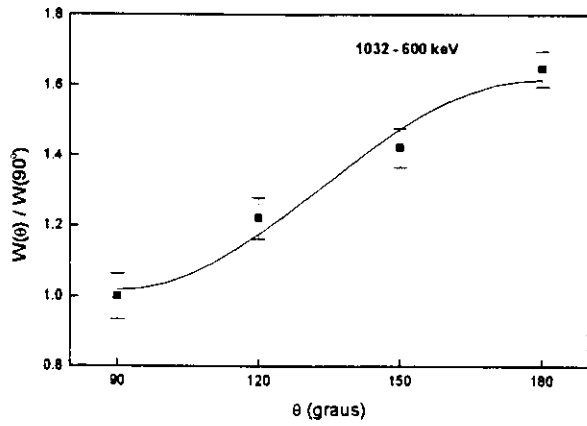
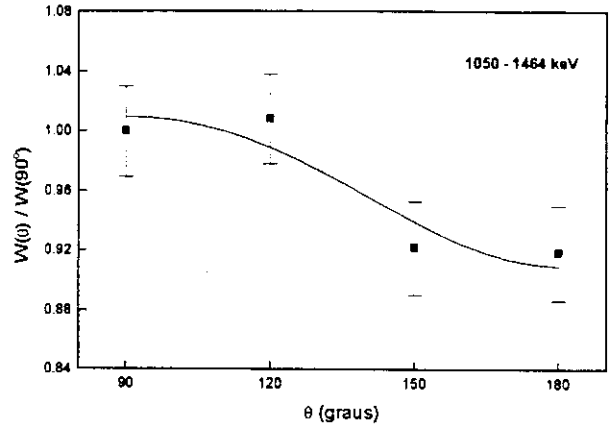
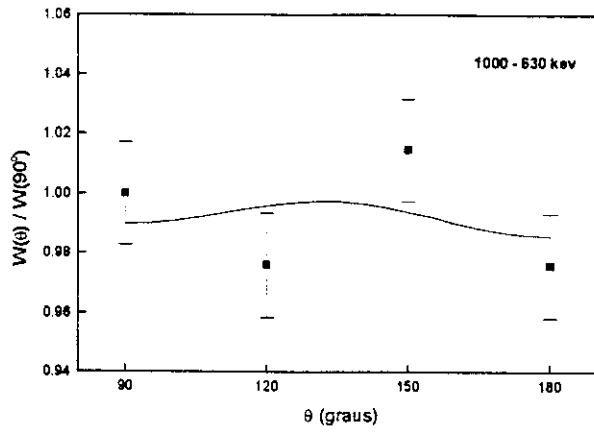
NÍVEL (keV)	CASCATA $\gamma\gamma$ (keV – keV) SEQÜÊNCIA DE SPIN	$A_{22}$ $A_{44}$ PRESENTE ESTUDO	$A_{22}$ $A_{44}$ [REFERÊNCIA]
3341	827 – 1050 $2^- \rightarrow 3^- \rightarrow 2^+$	-0,017 (71) 0,046 (109)	—
	1276 – 600 $2^- \rightarrow 3^+ \rightarrow 2^+$	0,113 (15) -0,026 (22)	—
	1877 – 630 $2^- \rightarrow 2^+ \rightarrow 2^+$	0,027 (46) -0,040 (69)	—
	2508 – 834 $2^- \rightarrow 2^+ \rightarrow 0^+$	0,239 (7) 0,013 (11)	0,206 (25) [5] -0,001 (40)
	3439	975 – 1000 $3^- \rightarrow 4^+ \rightarrow 2^+$	-0,223 (103) -0,079 (150)
1711 – 894 $3^- \rightarrow 4^+ \rightarrow 2^+$		-0,183 (67) 0,110 (98)	—
3455	2621 – 834 $3^- \rightarrow 2^+ \rightarrow 0^+$	0,178 (67) -0,283 (104)	—
3565	1837 – 894 $3^- \rightarrow 4^+ \rightarrow 2^+$	0,150 (51) 0,061 (77)	—
	1837 – 894 – 834 $3^- \rightarrow 4^+ \rightarrow 2^+ \rightarrow 0^+$	0,059 (53) -0,046 (109)	—
3678	2214 – 630 $2^+ \rightarrow 2^+ \rightarrow 2^+$	0,019 (49) 0,027 (73)	—
	2844 – 834 $2^+ \rightarrow 2^+ \rightarrow 0^+$	0,292 (59) 0,081 (91)	—

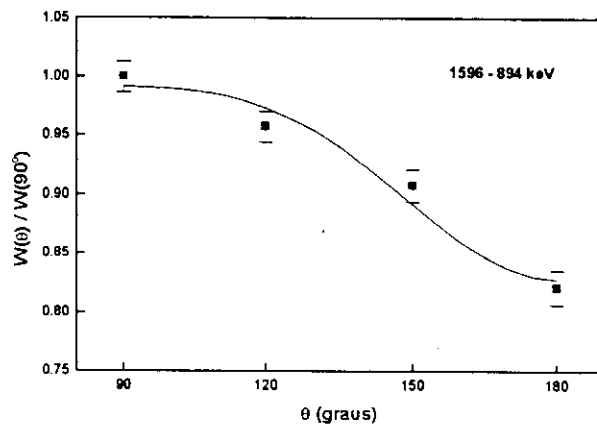
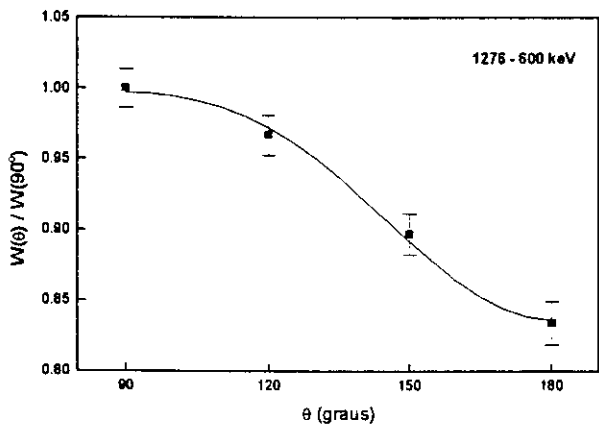
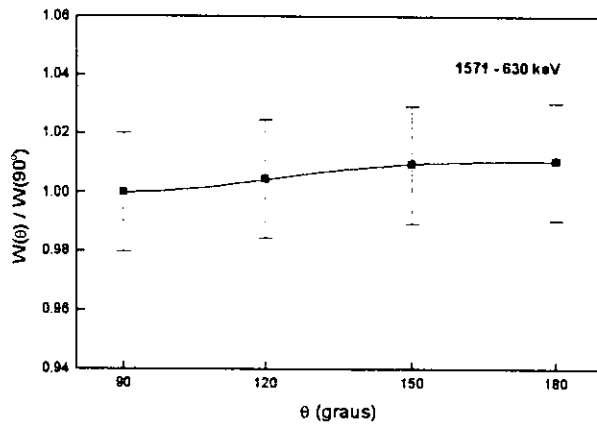
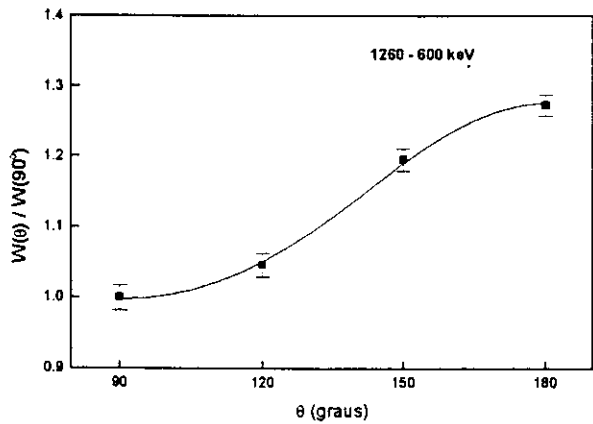
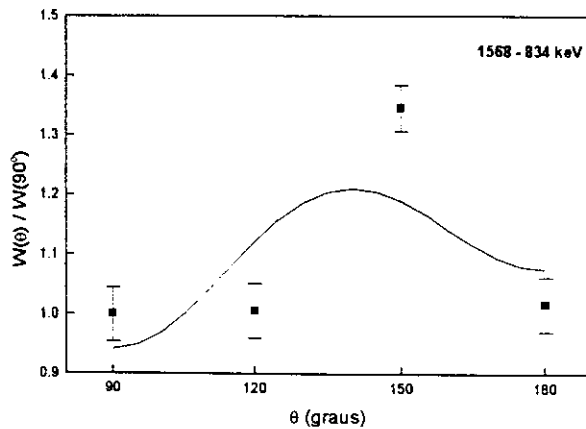
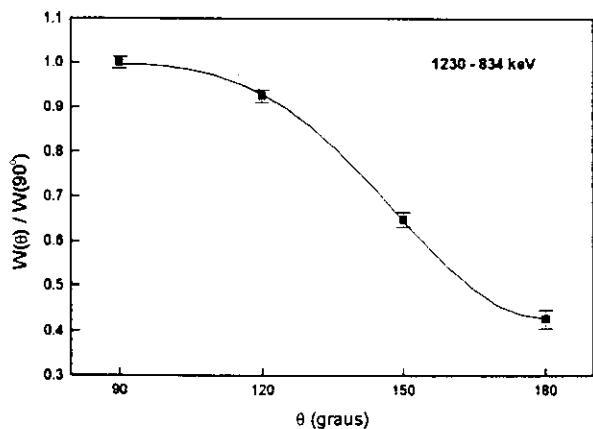
A figura 4.1 apresenta a curva de correlação angular ajustada para o polinômio  $W(\theta)$ , descrito na equação (1.2) e (1.11), para cada cascata medida.

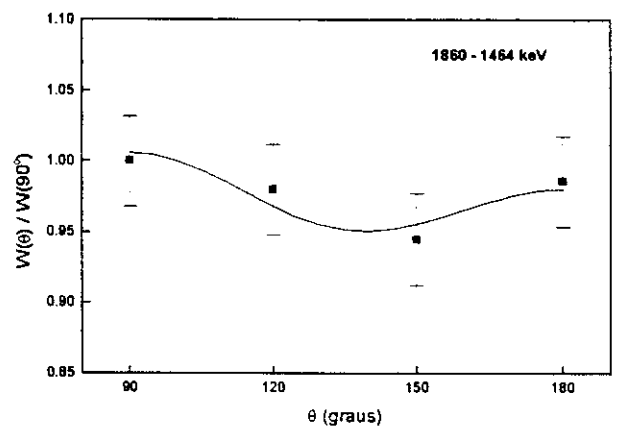
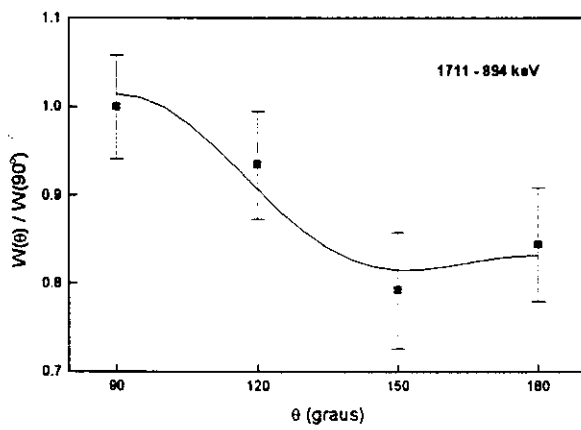
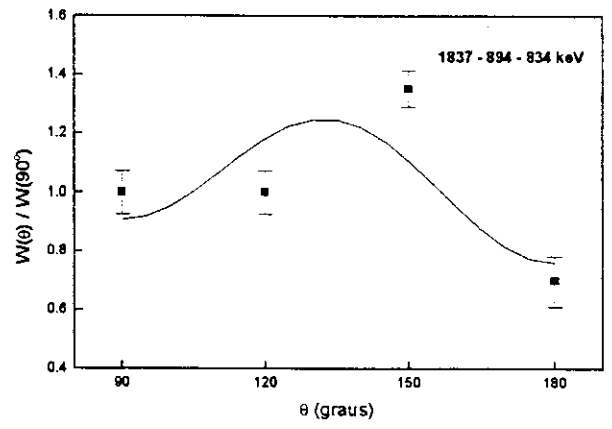
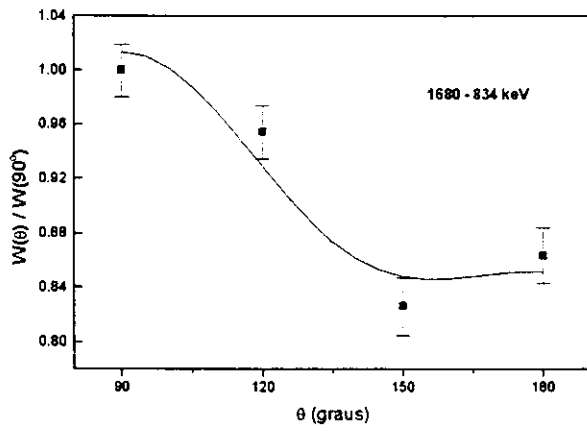
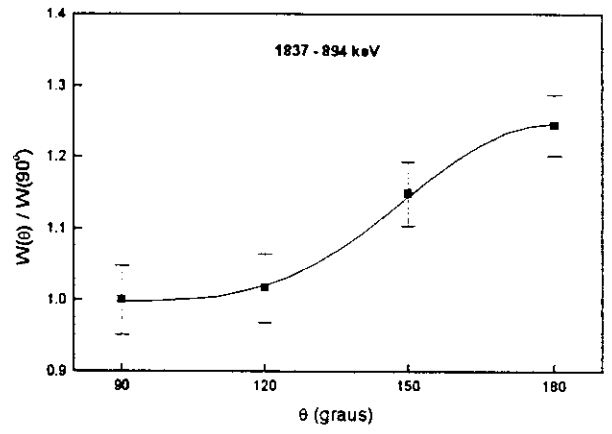
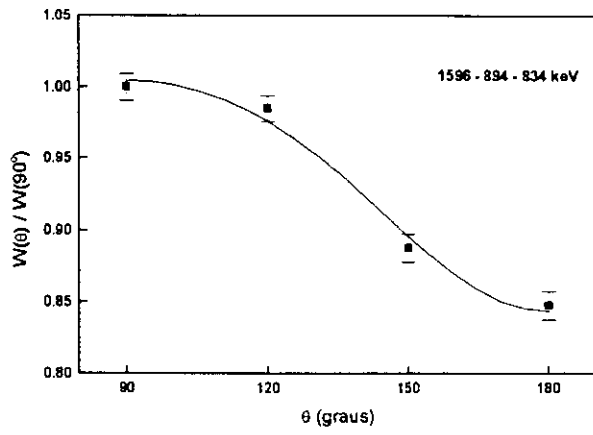


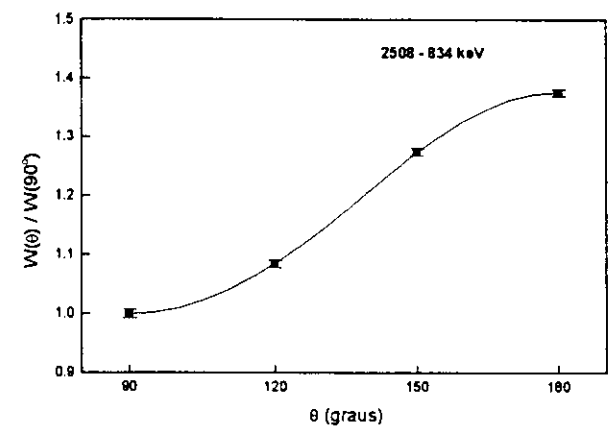
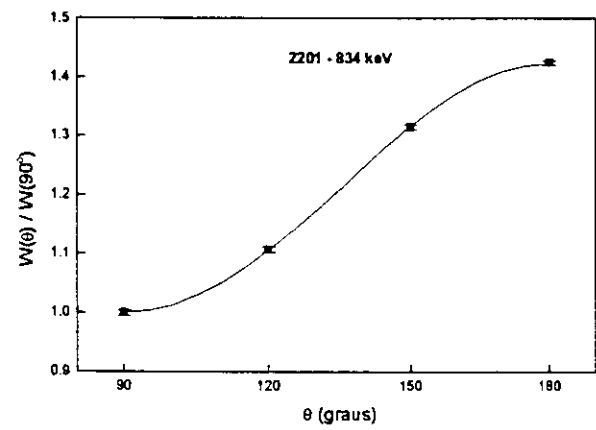
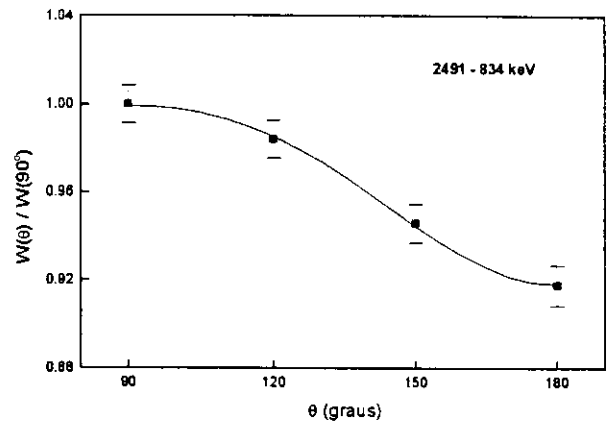
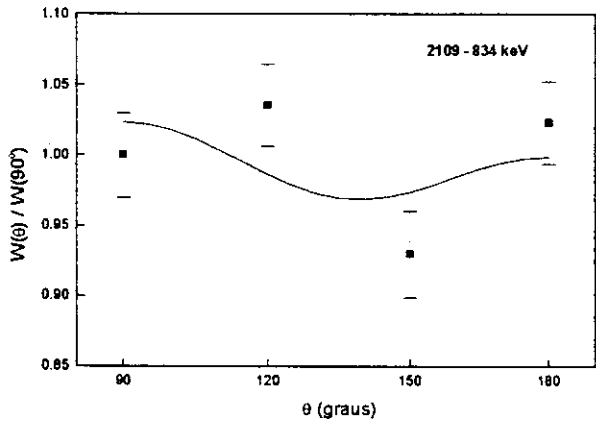
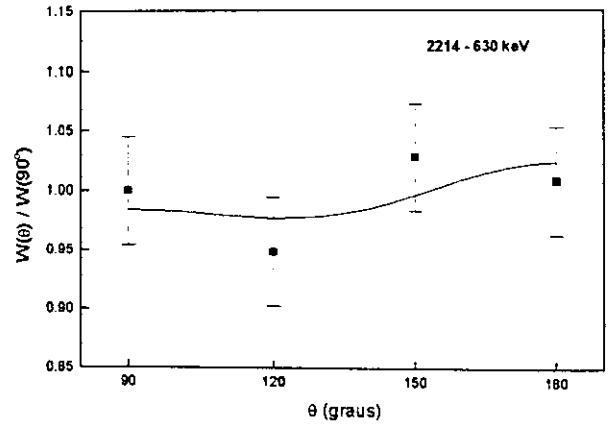
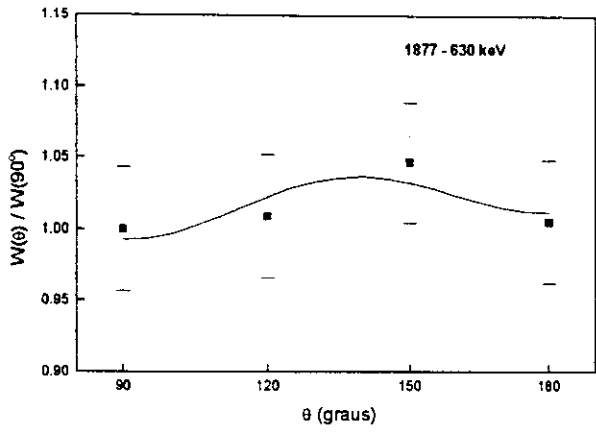














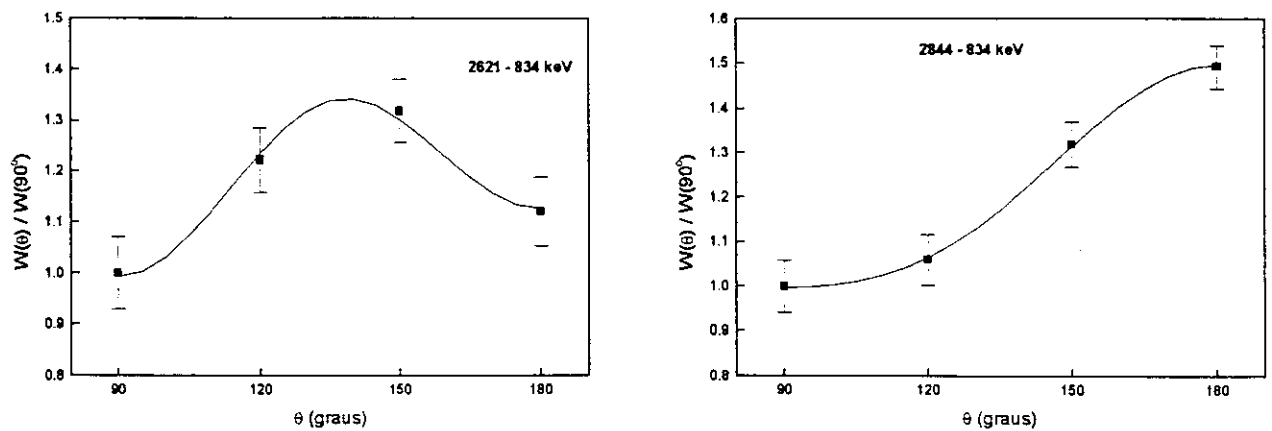


Figura 4.1: Curvas de correlação angular ajustada para o polinômio  $W(\theta)/W(90^\circ)$  versus  $\theta$  para cada cascata  $\gamma\gamma$  apresentada na Tabela 4.1.

A tabela 4.2 dispõe os dados de razão de mistura multipolar,  $\delta_n(L'_n/L_n)$  da transições gama, obtidas no presente estudo. Na primeira coluna é descrito o nível inicial que compõe a cascata em estudo. Na segunda coluna estão listados os dados referentes a energia e intensidade das transições gama. Na terceira coluna o spin e a paridade dos níveis e na quarta coluna a cascata associada. Em seguida estão listados os valores de  $\delta_n(L'_n/L_n)$  obtidos no presente estudo. Para comparação os valores de  $\delta_n(L'_n/L_n)$  obtidos por outros estudos são apresentados na última coluna.

Tabela 4.2: Valores das razões de mistura multipolar para as transições gama no  $^{72}\text{Ge}$ .

NÍVEL (keV)	TRANSIÇÃO $\gamma$ (keV) INTENSIDADE % <sup>(a)</sup> [4]	$I_i^* - I_f^*$	CASCATA $\gamma\gamma$ (keV - keV)	$\delta(L' / L)$ PRESENTE ESTUDO	$\delta(L' / L)$ [REFERÊNCIA]
1464	630 27,38 (20)	$2^+ \rightarrow 2^+$	630 - 834	$22,6^{+9,7}_{-5,3}$	—
				—	$32,6 \pm 5,7$ [5]
				—	$-10,3 \pm 1,3$ [22]
1728	894 10,63 (4)	$4^+ \rightarrow 2^+$	894 - 834	$0,028 \pm 0,008$	E2 [5] $-0,039 \pm 0,009$ [22]
2065	336 0,1308 (13)	$3^+ \rightarrow 4^+$	336 - 894	$21,8^{+28,6}_{-8,0}$	INÉDITO
	600 6,13 (5)	$3^+ \rightarrow 2^+$	600 - 1464	$4,57 \pm 0,06$	—
		$3^+ \rightarrow 2^+$	600 - 630 - 834	—	$4,0 \pm 0,6$ [5]
	1230 1,513 (10)	$3^+ \rightarrow 2^+$	1230 - 834	$-2,83 \pm 0,33$	$-0,53 \pm 0,07$ [5]
2402	1568 0,1739 (24)	$2^+ \rightarrow 2^+$	1568 - 834	$0,15 \pm 0,10$	INÉDITO
2464	735 0,3915 (27)	$4^+ \rightarrow 4^+$	735 - 894	$0,49 \pm 0,06$	—
			735 - 894 - 834	—	$-1,6 \pm 0,2$ [5]
	1000 0,851 (4)	$4^+ \rightarrow 2^+$	1000 - 630	$-0,04^{+0,13}_{-0,15}$	—
			1000 - 630 834	—	$0,05 \pm 0,09$ [5]

Tabela 4.2: Continuação.

NÍVEL (keV)	TRANSIÇÃO $\gamma$ (keV) INTENSIDADE % <sup>(a)</sup> [4]	$I_i^x - I_f^x$	CASCATA $\gamma\gamma$ (keV - keV)	$\delta(L'/L)$ PRESENTE ESTUDO	$\delta(L'/L)$ [REFERÊNCIA]
2514	449 0,1210 (19)	$3^- \rightarrow 3^+$	449 - 600	$-0,47 \pm 0,12$	INÉDITO
	786 3,352 (16)	$3^- \rightarrow 4^+$	786 - 894 - 834	$-0,021 \pm 0,005$	$0,05 \pm 0,01$ [5]
	1050 7,32 (4)	$3^- \rightarrow 2^+$	1050 - 630	$-0,08 \pm 0,04$	—
			1050 - 1464	$-0,024 \pm 0,020$	—
			1050 - 630 - 830	—	$-0,29 \pm 0,02$ [5]
1680 0,960 (10)	$3^- \rightarrow 2^+$	1680 - 834	$-0,075 \pm 0,025$	$0,29 \pm 0,05$ [5]	
2943	428 0,2306 (19)	$3^- \rightarrow 3^-$	428 - 786 - 894	$0,97 \pm 0,07$	INÉDITO
	479 0,1071 (20)	$3^- \rightarrow 4^+$	479 - 1000	$-0,04 \pm 0,06$	INÉDITO
	878 0,0705 (17)	$3^- \rightarrow 3^+$	878 - 600	$0,187 \pm 0,025$	INÉDITO
	1215 0,863 (6)	$3^- \rightarrow 4^+$	1215 - 894	$-0,078 \pm 0,022$	—
			1215 - 894 - 834	$-0,09 \pm 0,04$	$-0,10 \pm 0,01$ [5]
2109 1,147 (17)	$3^- \rightarrow 2^+$	2109 - 834	$0,084 \pm 0,033$	$0,17 \pm 0,02$ [5]	
3035	633 0,1655 (25)	$2^- \rightarrow 2^+$	633 - 1710	$-0,269 \pm 0,029$	INÉDITO
	970 1,163 (6)	$2^- \rightarrow 3^+$	970 - 600	$-0,066 \pm 0,008$	INÉDITO
	1571 0,897 (9)	$2^- \rightarrow 2^+$	1571 - 630	$0,40 \pm 0,04$	INÉDITO
	2201 28,2 (5)	$2^- \rightarrow 2^+$	2201 - 834	$-0,025 \pm 0,001$	$-0,03 \pm 0,01$ [5]

Tabela 4.2: Continuação.

NÍVEL (keV)	TRANSIÇÃO $\gamma$ (keV) INTENSIDADE % <sup>(a)</sup> [4]	$I_i^x - I_f^x$	CASCATA $\gamma\gamma$ (keV - keV)	$\delta(L'/L)$ PRESENTE ESTUDO	$\delta(L'/L)$ [REFERÊNCIA]
3097	1032 0,0766 (17)	$1^+ \rightarrow 3^+$	1032 - 600	$-0,28 \pm 0,06$	INÉDITO
3325	289 0,2131 (14)	$3^- \rightarrow 2^-$	289 - 2201	$-0,21 \pm 0,06$	INÉDITO
	381 0,3211 (17)	$3^- \rightarrow 3^-$	381 - 2109	$-1,237 \pm 0,030$	INÉDITO
			381 - 2109 - 834	$-1,41 \pm 0,15$	
	810 2,201 (10)	$3^- \rightarrow 3^-$	810 - 1050	$-0,208 \pm 0,011$	INÉDITO
	1260 1,244 (8)	$3^- \rightarrow 3^+$	1260 - 600	$0,085 \pm 0,012$	INÉDITO
	1596 4,58 (4)	$3^- \rightarrow 4^+$	1596 - 894	$-0,023 \pm 0,014$	—
			1596 - 894 - 834	$-0,033 \pm 0,010$	$-0,01 \pm 0,03[5]$
	1860 5,67 (7)	$3^- \rightarrow 2^+$	1860 - 1464	$0,058 \pm 0,016$	—
1860 - 630 - 834			—	$0,21 \pm 0,01[5]$	
2491 8,1 (2)	$3^- \rightarrow 2^+$	2491 - 834	$0,017 \pm 0,003$	$0,00 \pm 0,02[5]$	
3341	827 0,1063 (13)	$2^- \rightarrow 3^-$	827 - 1050	$-0,146 \pm 0,054$	INÉDITO
	1276 1,669 (11)	$2^- \rightarrow 3^+$	1276 - 600	$-0,057 \pm 0,007$	INÉDITO
	1877 0,244 (4)	$2^- \rightarrow 2^+$	1877 - 630	$0,48^{+0,19}_{-0,16}$	INÉDITO
	2508 14,0 (3)	$2^- \rightarrow 2^+$	2508 - 834	$0,014 \pm 0,003$	$0,09 \pm 0,05[5]$

Tabela 4.2: Continuação.

NÍVEL (keV)	TRANSIÇÃO $\gamma$ (keV) INTENSIDADE % <sup>(a)</sup> [4]	$I_i^* - I_f^*$	CASCATA $\gamma\gamma$ (keV - keV)	$\delta(L'/L)$ PRESENTE ESTUDO	$\delta(L'/L)$ [REFERÊNCIA]
3439	975 0,0474 (11)	$3^+ \rightarrow 4^+$	975 - 1000	$3,98^{+0,83}_{-0,63}$	INÉDITO
	1711 0,27 (4)	$3^+ \rightarrow 4^+$	1711 - 894	$0,18 \pm 0,03$	INÉDITO
3455	2621 0,150 (4)	$3^- \rightarrow 2^+$	2621 - 834	$0,41^{+0,23}_{-0,14}$	INÉDITO
3565	1837 0,231 (4)	$3^- \rightarrow 4^+$	1837 - 894	$-0,365 \pm 0,026$	INÉDITO
			1837 - 894 - 834	$-0,26 \pm 0,19$	
3678	2214 0,241 (4)	$2^+ \rightarrow 2^+$	2214 - 630	$0,45^{+0,024}_{-0,19}$	INÉDITO
	2844 0,467 (13)	$2^+ \rightarrow 2^+$	2844 - 834	$-0,057 \pm 0,021$	INÉDITO

(a) Intensidade relativa (em percentagem) à transição de 834 keV considerada como 100%.

Na figura 4.2 é apresentado o esquema parcial de decaimento  $\beta^-$  do  $^{72}\text{Ga}$  com as previsões de spin e paridade propostos no presente estudo para os níveis e as transições  $\gamma$  estudadas.

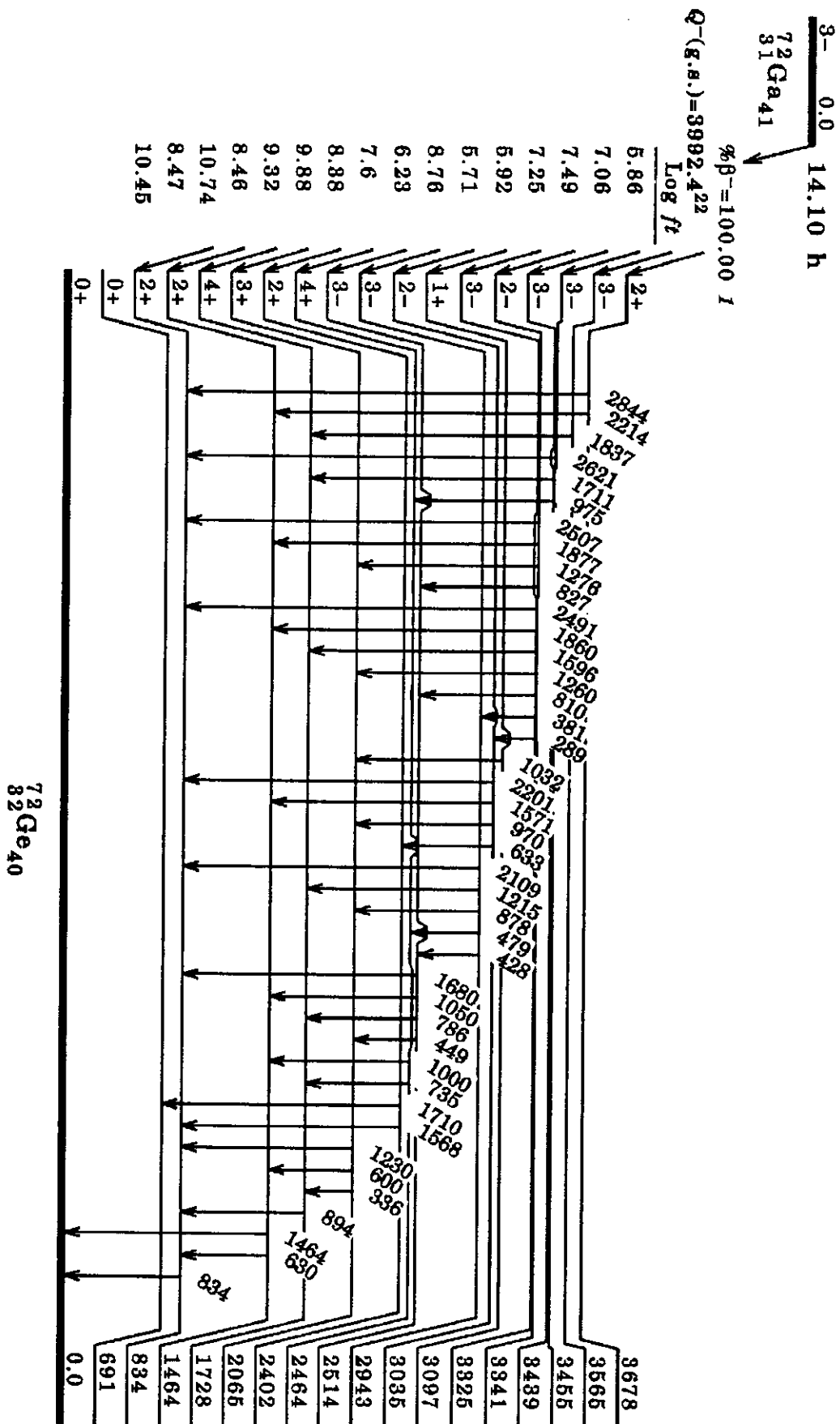


Figura 4.2: Esquema parcial de decaimento  $\beta^-$  do  $^{72}\text{Ga}$  proposto no presente estudo (energia em keV).

## 4.1 Análise dos Níveis

Para atribuição de spin e paridade dos níveis estudados levou-se em consideração dados referentes a estudos anteriores de correlação angular [5,22,23], bem como o esquema de decaimento  $\beta^-$  do  $^{72}\text{Ga}$  proposto no recente estudo de espectroscopia gama [4]. Desta forma, a partir da confirmação de spin e paridade dos níveis bem estabelecidos a 834 keV ( $2^-$ ), 1464 keV ( $2^+$ ), 1728 keV ( $4^-$ ), 2065 keV ( $3^+$ ), 2464 keV ( $4^+$ ), 2514 keV ( $3^-$ ) e 3035 keV ( $2^-$ ), através dos dados do presente estudo, obteve-se subsídios para análise das demais medidas de correlação angular. Particularmente, os níveis excitados do núcleo de  $^{72}\text{Ge}$  cujo spin foi estabelecido e ou confirmado pelo presente estudo serão discutidos, a seguir, de forma detalhada.

### 4.1.1 Nível 2402 keV

Medidas recentes de espectroscopia  $\gamma$  realizadas a partir do decaimento  $\beta^-$  do  $^{72}\text{Ga}$  [4] estabelecem que este nível se desexcita pela emissão dos raios gama de 938 keV, 1568 keV, 1710 keV e 2402 keV restringindo spin e paridade a  $2^+$ .

Este nível foi estudado pela primeira vez, no presente estudo, por meio da medida de correlação angular direcional da cascata 1568-834 keV, sendo os valores de  $A_{kk}$  (tabela 4.1) consistentes com  $I^\pi = 2^+$ . Sabendo que a transição de 1568 keV popula o estado de paridade positiva  $2^+$  (834 keV) é esperado um caráter de mistura (M1+E2) para esta transição, o que é compatível com a previsão de  $\delta(1568) = 0,15 \pm 0,10$  obtida no presente estudo.

### 4.1.2 Nível 2943 keV

Este nível se desexcita pelas transições  $\gamma$  de 428 keV, 479 keV, 878 keV, 1215 keV, 1479 keV e 2109 keV para os níveis 2514 keV( $3^-$ ), 2464 keV( $4^+$ ), 2065 keV( $3^-$ ), 1728 keV( $4^-$ ), 1464 keV( $2^+$ ) e 834 keV( $2^-$ ), respectivamente [4,6]. Medidas de correlação angular direcional para a cascata 2109-834 keV, realizadas por Monahan e Arns [23] e

Landulfo *et al.* [5] limitam o spin para este nível a  $3^-$  ou  $4^+$  enquanto que medidas de reação nuclear  $^{70}\text{Ge}(t,p)$  [24,25] restringem  $I^\pi = 3^-$ .

No presente trabalho este nível foi estudado por meio de 4 cascatas diretas e 2 triplas, a saber: 479-1000 keV, 878-600 keV, 1215-894 keV, 2109-834 keV, 428-(786)-894 keV e 1215-(894)-834 keV (tabela 4.1) o que possibilitou determinar, pela primeira vez, a razão de mistura multipolar das transições gama de 428 keV, 479 keV e 878 keV e confirmar o caráter predominante E1 atribuído as transições de 1215 keV e 2109 keV.

O procedimento adotado para proposição de spin do nível incluiu as análises gráficas de  $\chi^2$  versus  $\arctg(\delta)$  e das curvas paramétricas de  $A_{kk}$  em função da razão de mistura multipolar, onde o valor experimental dos coeficientes  $A_{22}$  e  $A_{44}$ , obtidos para cada cascata medida, é inserido com o respectivo erro. Estes gráficos são apresentadas nas figuras 4.3 a 4.8, o que confirma a proposição de spin e paridade  $3^-$  para o nível 2943 keV.

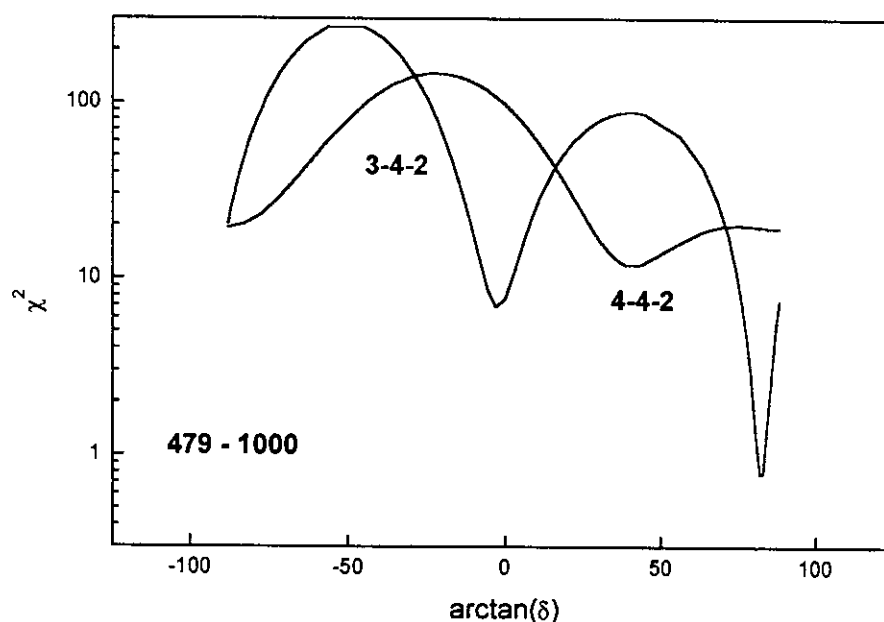


Figura 4.3: Gráfico de  $\chi^2$  versus  $\arctg(\delta)$  para a cascata 479-1000 keV do núcleo de  $^{72}\text{Ge}$ , considerando-se as seqüências de spin 3-4-2 e 4-4-2.



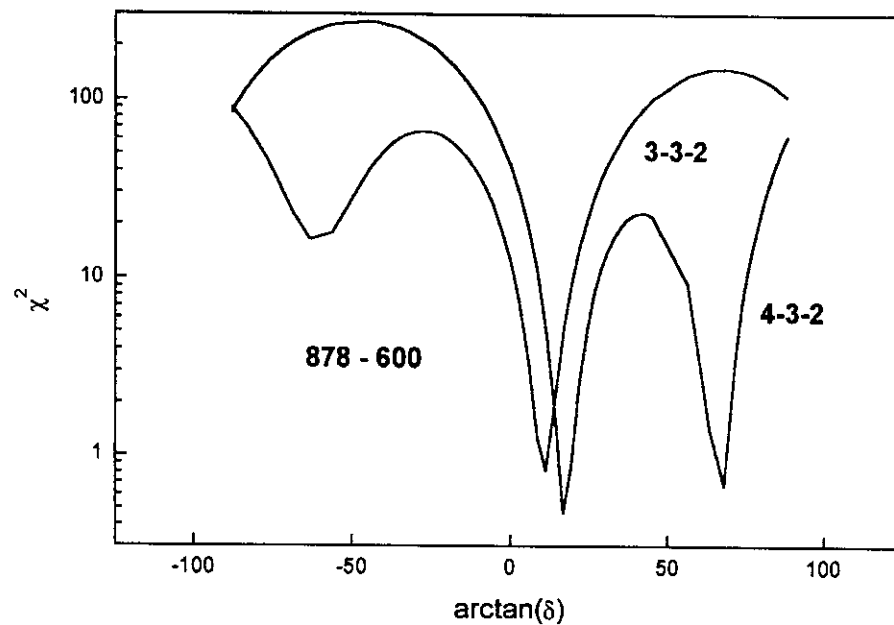


Figura 4.4: Gráfico de  $\chi^2$  versus  $\arctg(\delta)$  para a cascata 878-600 keV do núcleo de  $^{72}\text{Ge}$ , considerando-se as seqüências de spin 3-3-2 e 4-3-2.

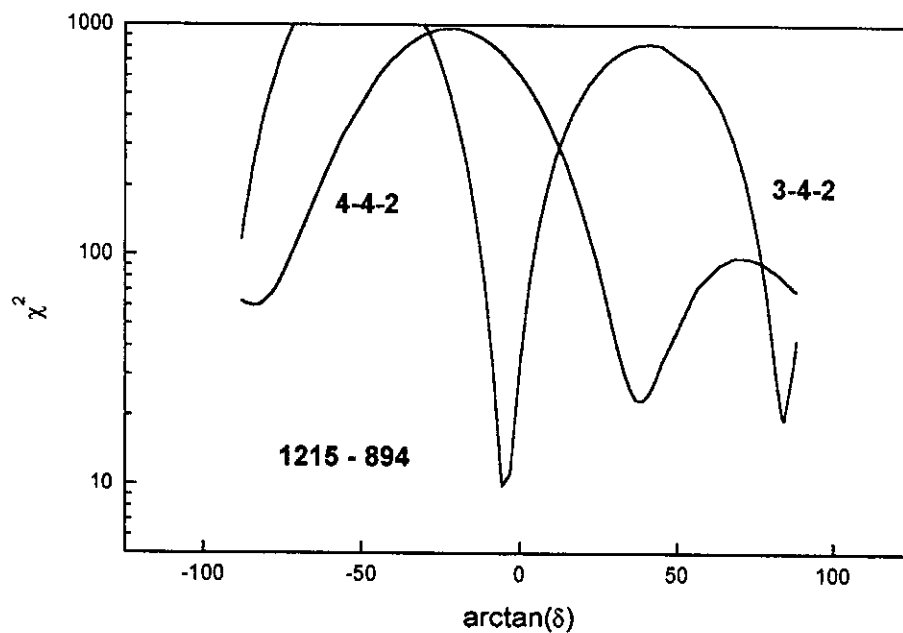


Figura 4.5: Gráfico de  $\chi^2$  versus  $\arctg(\delta)$  para a cascata 1215-894 keV do núcleo de  $^{72}\text{Ge}$ , considerando-se as seqüências de spin 3 - 4 - 2 e 4 - 4 - 2.

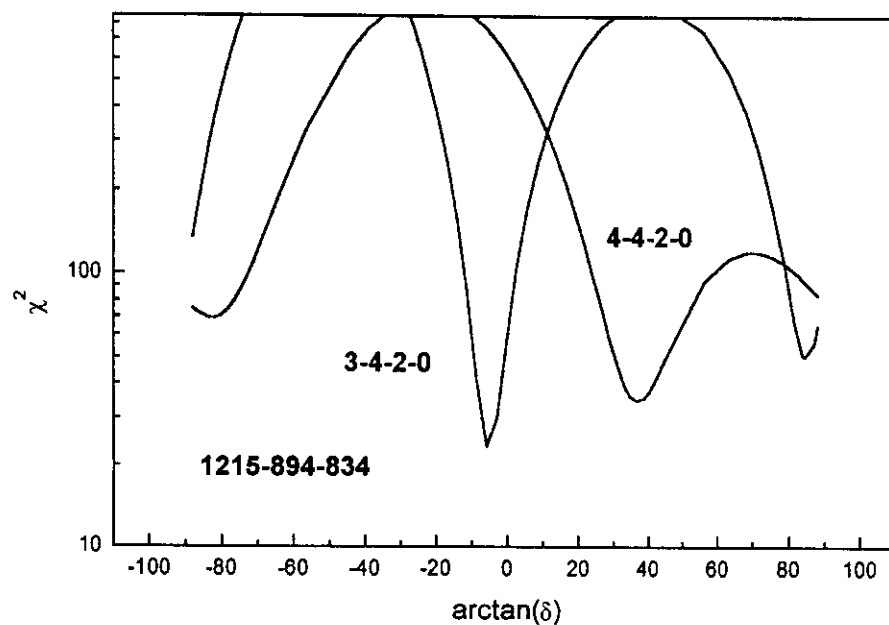


Figura 4.6: Gráfico de  $\chi^2$  versus  $\arctg(\delta)$  para a cascata 1215-(894)-834 keV do núcleo de  $^{72}\text{Ge}$ , considerando-se as seqüências de spin 3-4-2-0 e 4-4-2-0.

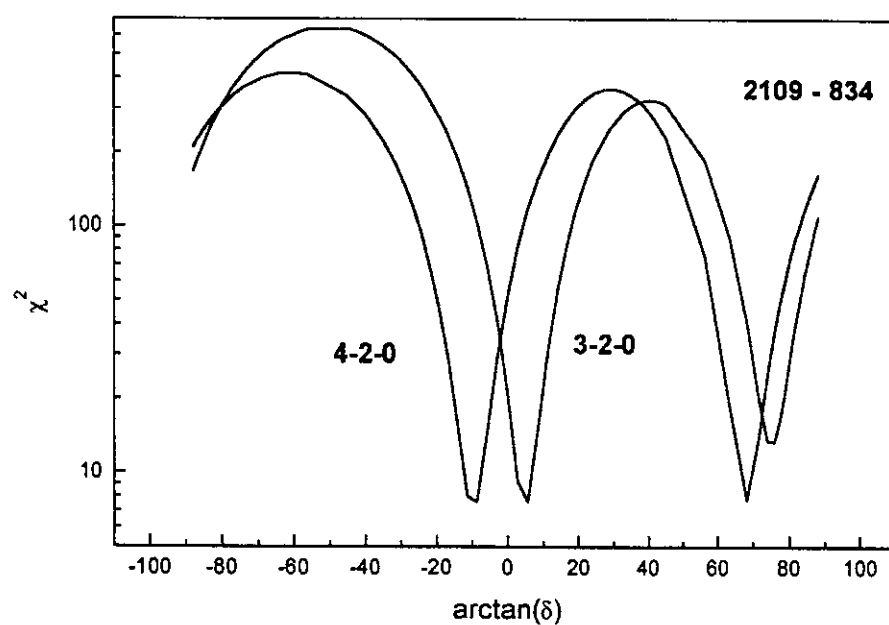


Figura 4.7: Gráfico de  $\chi^2$  versus  $\arctg(\delta)$  para a cascata 2109-834 keV do núcleo de  $^{72}\text{Ge}$ , considerando-se as seqüências de spin 3-2-0 e 4-2-0.

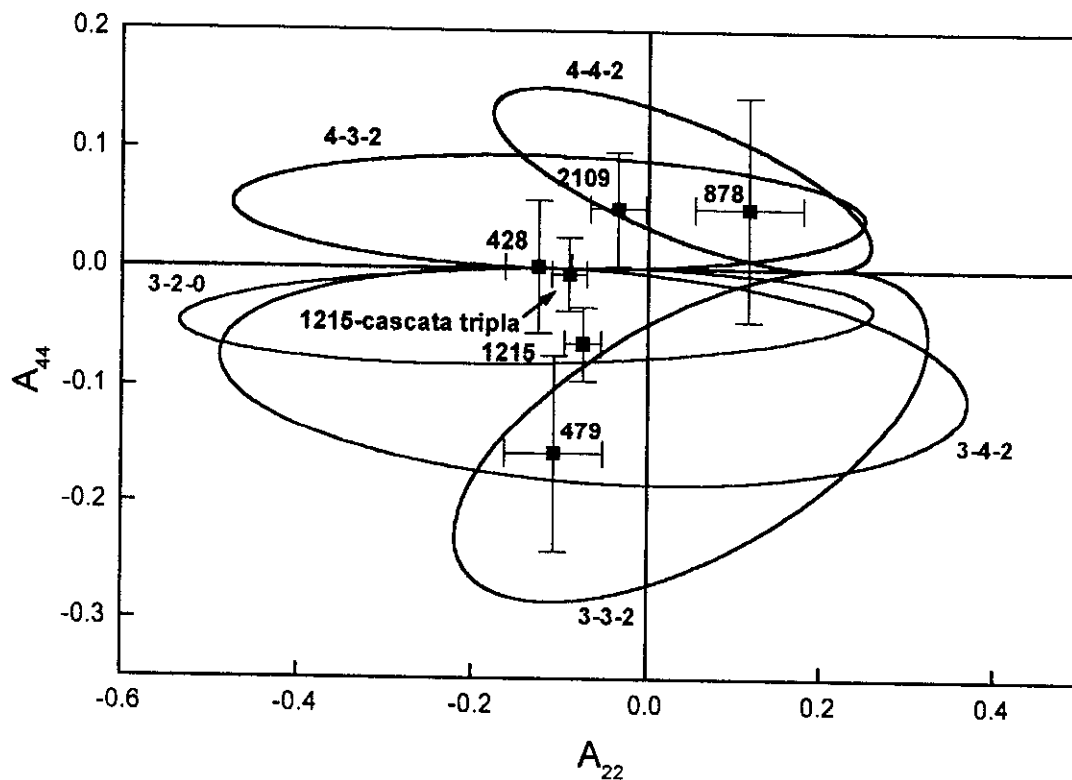


Figura 4.8: Valores de  $A_{22}$  e  $A_{44}$  em função da razão de mistura multipolar .

### 4.1.3 Nível 3097 keV

Este nível foi proposto por Medeiros [4] com base na observação das transições  $\gamma$  de 1032 keV, 1368 keV e 1633 keV, sendo consistente, segundo as regras do decaimento beta e gama, com spin 1 ou 2 e com favorecimento de paridade positiva.

O nível 3097 keV foi estudado pela primeira vez, no presente estudo, pela medida de correlação angular da cascata 1032-600 keV. Determinou-se a razão de mistura multipolar da transição de 1032 keV utilizando  $\delta(600) = 4,57 \pm 0,06$  estabelecido no presente estudo. Sabendo que a transição de 1032 keV popula o nível 2065 keV, que é bem estabelecido com  $I^\pi = 3^+$ , as possibilidades de  $I^\pi = 1^+$  e  $2^+$  para o nível 3097 keV são possíveis.

Analisando-se o comportamento  $\chi^2$  versus  $\arctg(\delta)$  considerando-se as seqüências de spin prováveis: 1-3-2 e 2-3-2 (figura 4.9) e das curvas paramétricas de  $A_{kk}$  (figura 4.10)

pode-se atribuir  $I^\pi = 1^+$ . Esta proposição é compatível com o caráter de quadrupolo elétrico atribuído a transição de 1032 keV (92,7% E2).

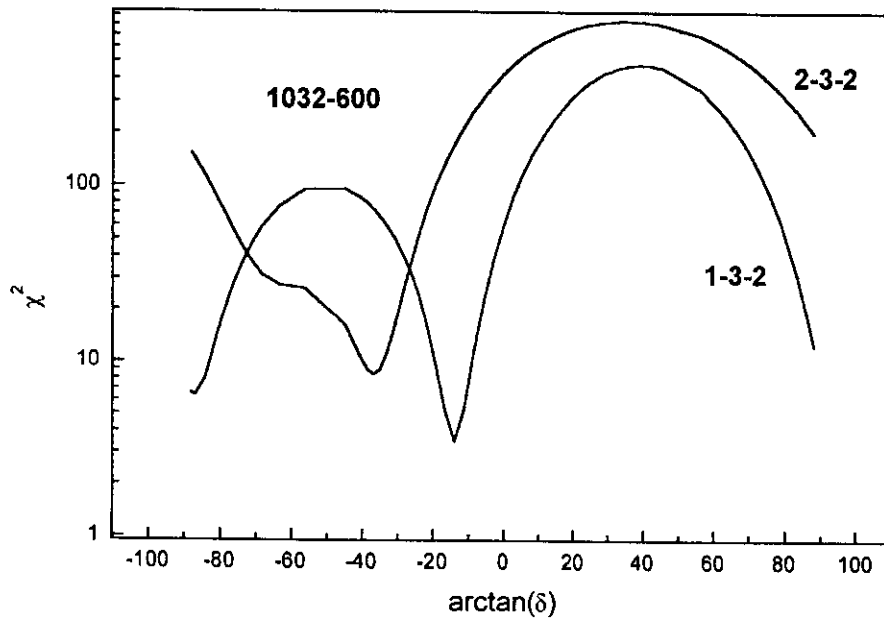


Figura 4.9: Gráfico de  $\chi^2$  versus  $\arctg(\delta)$  para a cascata 1032-600 keV do núcleo de  $^{72}\text{Ge}$ , considerando-se as seqüências de spin 1-3-2 e 2-3-2.

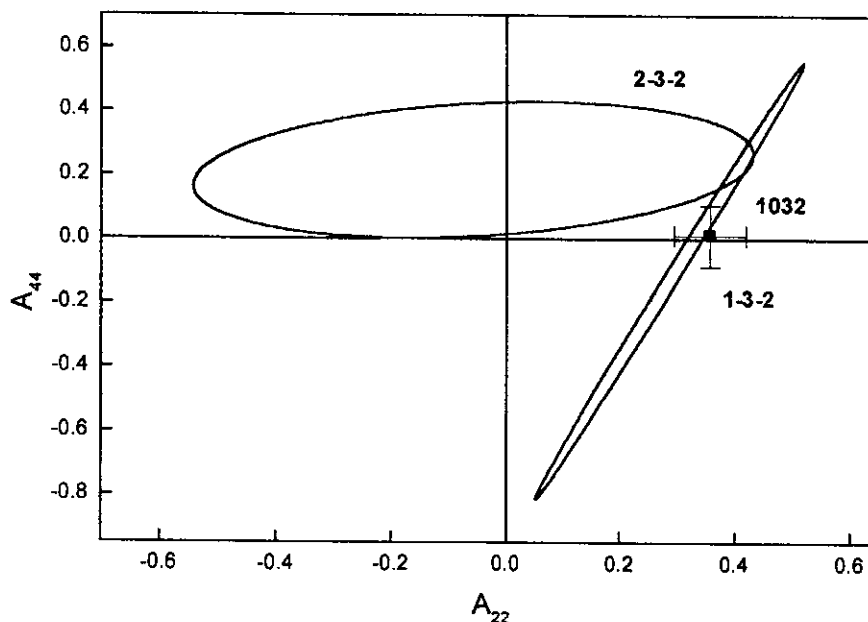


Figura 4.10: Elipses de correlação angular e valores de  $A_{22}$  e  $A_{44}$  obtidos dos ajustes referentes a cascata 1032-600 keV do núcleo de  $^{72}\text{Ge}$ , considerando-se as seqüências de spin: 1-3-2 e 2-3-2.

#### 4.1.4 Nível 3439 keV

Estudos envolvendo o decaimento  $\beta^-$  do núcleo de  $^{72}\text{Ga}$  [4,26,27] estabelecem para este nível as transições de 496 keV, 924 keV, 975 keV, 1037 keV, 1711 keV e 2605 keV que populam os níveis a 2943 keV ( $3^-$ ), 2514 keV ( $3^-$ ), 2464 keV ( $4^+$ ), 2402 keV ( $2^+$ ), 1728 keV ( $4^+$ ) e 834 keV ( $2^+$ ), respectivamente, sendo as possibilidades de spin e paridade condizentes com  $2^+$ ,  $3^-$  e  $4^+$ .

No presente trabalho o nível 3439 keV foi estudado pela primeira vez por meio da medida de correlação angular direcional de duas cascatas  $\gamma\gamma$ : 975-1000 keV e 1711-894 keV, sendo os valores dos coeficientes  $A_{kk}$  medidos apresentados na tabela 4.1.

Para a determinação da razão de mistura multipolar das transições de 975 keV e 1711 keV, utilizou-se  $\delta(1000) = -0,04^{+0,13}_{-0,15}$ , extraído da medida de correlação angular da cascata 1000-630 keV e  $\delta(894) = 0,028 \pm 0,008$ , obtido da medida da cascata 894-834 keV, considerando-se as três possibilidades de seqüência de spin prováveis, isto é, 2-4-2, 3-4-2 e 4-4-2. Entretanto, a análise de  $\chi^2$  em função  $\text{arctg}(\delta)$ , bem como as curvas paramétricas de  $A_{kk}$ , não são conclusivas pois permite somente a exclusão de  $I=2$ , como pode-se observar nas figuras 4.11, 4.12 e 4.13.

Uma segunda análise de  $W(\theta)$  em função de  $\theta$  foi realizada, considerando-se o ajuste simultâneo das duas cascatas, para as seqüências de spin: 3-4-2 e 4-4-2. Para isto, os ângulos  $\theta = 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ$  e  $180^\circ$  foram utilizados no ajuste da cascata 1711-894 keV e  $\theta = 450^\circ, 480^\circ, 510^\circ$  e  $540^\circ$  para o ajuste da cascata 975-1000 keV. Os resultados desta análise, apresentados nas figuras 4.14 e 4.15, são favoráveis ao spin 3 e paridade negativa.

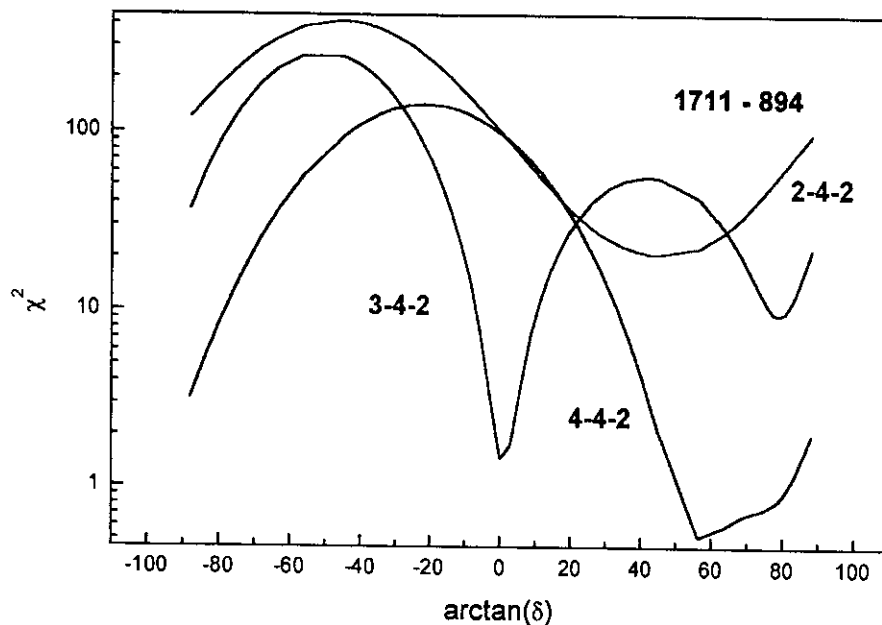


Figura 4.11: Gráfico de  $\chi^2$  versus  $\arctg(\delta)$  para a cascata 1711-894 keV do núcleo de  $^{72}\text{Ge}$ , considerando-se as seqüências de spin 2-4-2, 3-4-2 e 4-4-2.

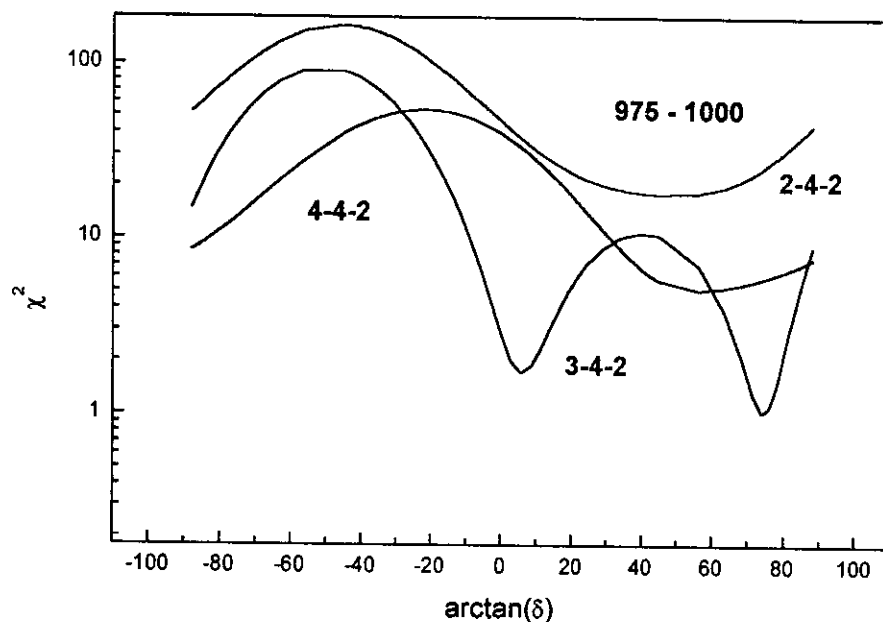


Figura 4.12: Gráfico de  $\chi^2$  versus  $\arctg(\delta)$  para a cascata 975-1000 keV do núcleo de  $^{72}\text{Ge}$ , considerando-se as seqüências de spin 2-4-2, 3-4-2 e 4-4-2.

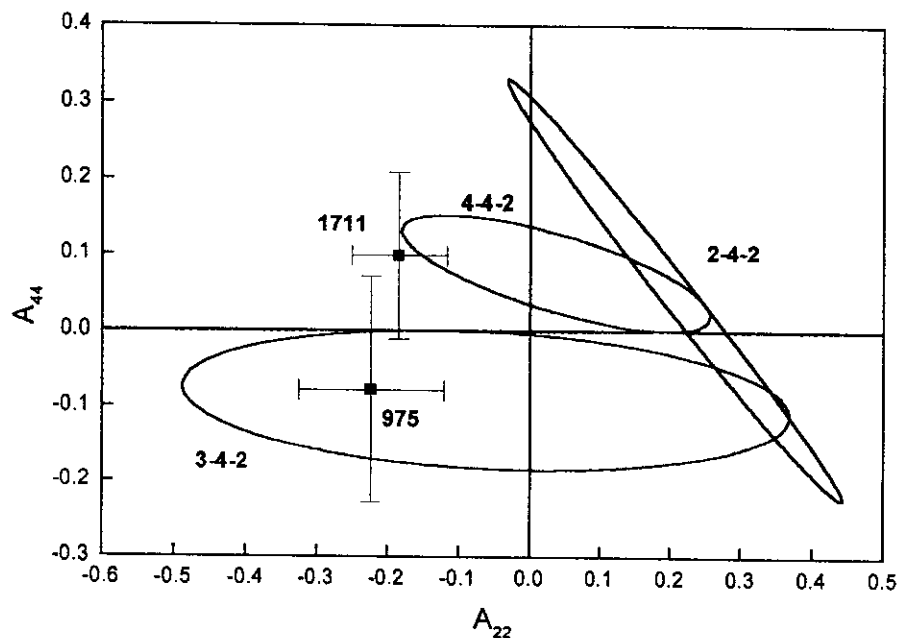


Figura 4.13: Elipses de correlação angular e valores de  $A_{22}$  e  $A_{44}$  obtidos dos ajustes referentes a cascata 975-1000 keV e 1711-894 keV do núcleo de  $^{72}\text{Ge}$ , considerando-se as seqüências de spin: 2-4-2, 3-4-2 e 4-4-2.

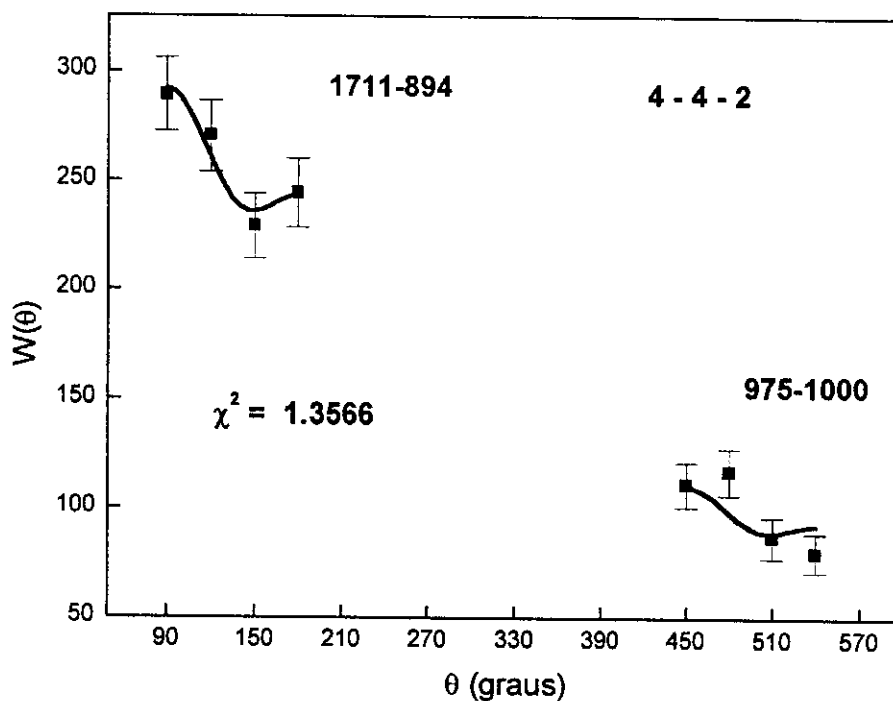


Figura 4.14:  $W(\theta)$  em função de  $\theta$  considerando-se o ajuste simultâneo das duas cascatas medidas, para a seqüência de spin 4-4-2.

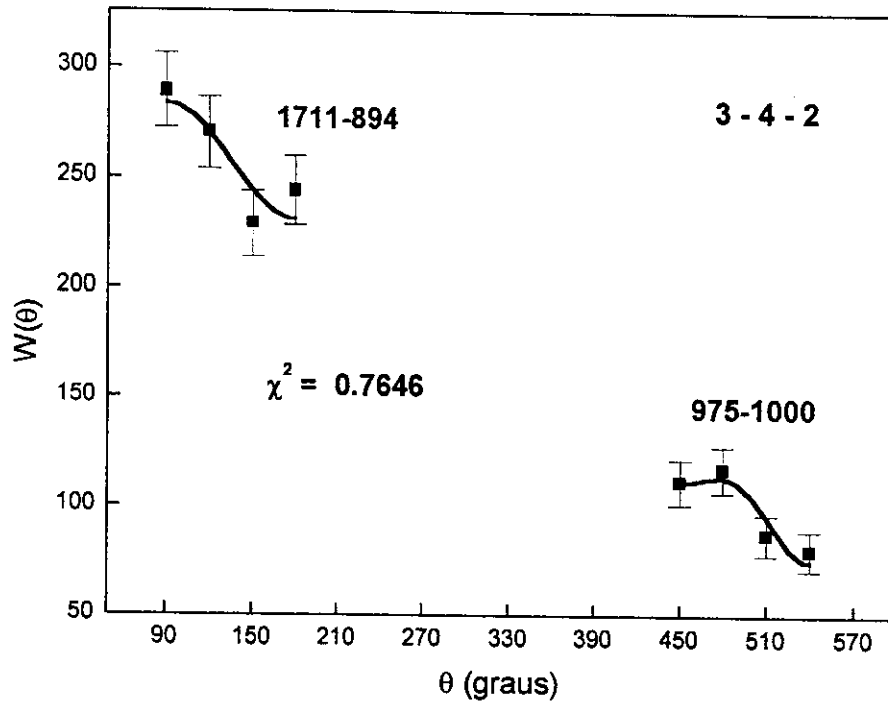


Figura 4.15:  $W(\theta)$  em função de  $\theta$  considerando-se o ajuste simultâneo das duas cascatas medidas, para as seqüências de spin 3-4-2.

#### 4.1.5 Nível 3455 keV

Este nível foi proposto em estudos que envolvem tanto o decaimento  $\beta^+/E_c$  como o decaimento  $\beta^-$  [4,26,27]. De acordo com estes estudos, esse nível se desexcita pelas transições gama de 113 keV, 940 keV, 1390 keV, 1991 keV e 2621 keV, sendo a transição de 940 keV observada somente pelo decaimento  $\beta^+$  do  $^{72}\text{As}$ . Essas informações restringem o spin a 2 e 3 e paridade negativa.

No presente trabalho foi realizada pela primeira vez a medida da correlação angular da cascata 2621-834 keV. Com os valores experimentais de  $A_{kk}$  (tabela 4.1) tentou-se definir o spin deste nível considerando-se as duas possibilidades de spin prováveis: 2-2-0 e 3-2-0. A análise deste resultado (figura 4.16) tornou possível a escolha  $I^\pi = 3^-$ .



Neste estudo foi obtida a razão de mistura multipolar da transição de 2621keV, sendo  $\delta(2621) = 0,41^{+0,23}_{-0,14}$  compatível com o caráter predominante de dipolo elétrico.

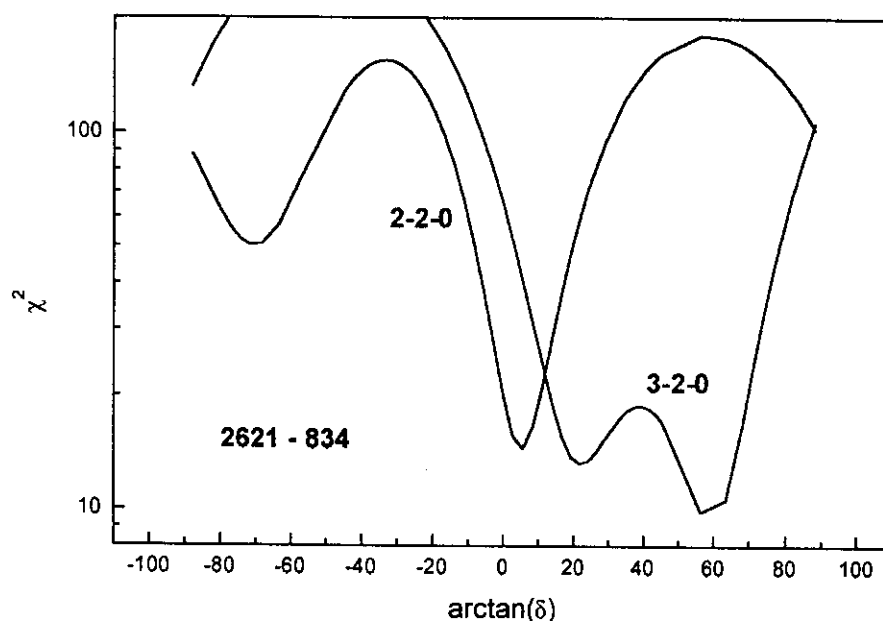


Figura 4.16: Gráfico de  $\chi^2$  versus  $\arctg(\delta)$  para a cascata 2621-834 keV do núcleo de  $^{72}\text{Ge}$ , considerando-se as seqüências de spin 2-2-0 e 3-2-0.

#### 4.1.6 Nível 3565 keV

Este nível foi observado em medidas de espectroscopia gama [4,27] e em estudos envolvendo as reações nucleares ( $^3\text{He},d$ ) [28] e ( $p,d$ ) [29] onde o  $I^\pi = 3^-$  é favorecido. De acordo com estes experimentos este nível se desexcita pelos raios gama de 317 keV, 1500 keV e 1837 keV, populando os níveis a 3247 keV, 2605 keV e 1728 keV, respectivamente.

Neste estudo, a medida de correlação angular envolvendo a cascata direta 1837-894 keV e a cascata tripla 1837-(894)-834 keV possibilitou a obtenção da razão de mistura multipolar da transição de 1837 keV tanto pela via direta  $\delta(1837) = -0,356 \pm 0,025$ , como pela cascata tripla  $\delta(1837) = -0,26 \pm 0,19$ , sendo os resultados consistentes, ou seja, concordam com o caráter predominante de dipolo elétrico (E1).

#### 4.1.7 Nível 3678 keV

Este nível é estabelecido pela observação dos raios gama de 642 keV, 738 keV, 1163 keV, 1613 keV, 2214 keV, 2844 keV e 3678 keV [4,26,27]. A existência da transição  $\gamma$  para o estado fundamental favorece os spins mais baixos ( $I = 1, 2$  e  $3$ ), entretanto para  $I = 1$  os decaimentos para os níveis  $3^-$  e  $3^+$  sugerem um caráter de quadrupolo magnético (M2) para a transição de 1163 keV, no caso de paridade positiva bem como para a transição de 1613 keV, no caso de paridade negativa, o que é pouco provável. Com relação a  $I = 3$  teríamos para a transição de 3678 keV um caráter de octopolo elétrico, no caso de paridade negativa, ou magnético no caso de paridade positiva, o que também é pouco favorável com relação a E2, isto é, para  $I^\pi = 2^+$ .

Na tentativa de estabelecer o spin do nível 3678 keV foi medida pela primeira vez a correlação angular das cascatas 2214 - 630 keV e 2844 - 834 keV bem como os valores de  $\delta_n(L'_n/L_n)$  para as transições de 2214 keV (usando  $\delta(630) = 22,58$ ) e 2844 keV (considerando caráter E2 atribuído à transição 834 keV), apresentados na tabela 4.2.

A partir dos valores experimentais de  $A_{kk}$  (tabela 4.1) foram realizadas as análises gráficas de  $\chi^2$  em função do  $\arctg(\delta)$  para as duas cascatas medidas considerando-se as seqüências de spin prováveis: 2-2-0 e 3-2-0 bem como a elaboração das elipses de correlação angular. Estes gráficos são apresentados nas figuras 4.17 a 4.19, o que confirma a proposição de spin e paridade  $2^+$  para o nível 3678 keV.

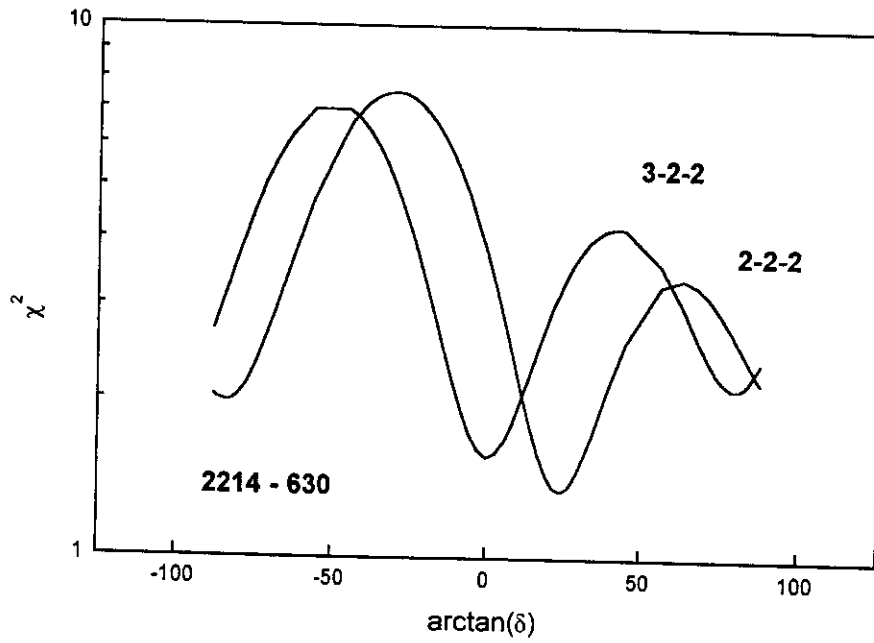


Figura 4.17: Gráfico de  $\chi^2$  versus  $\arctg(\delta)$  para a cascata 2214-630 keV do núcleo de  $^{72}\text{Ge}$ , considerando-se as seqüências de spin 2-2-2 e 3-2-2.

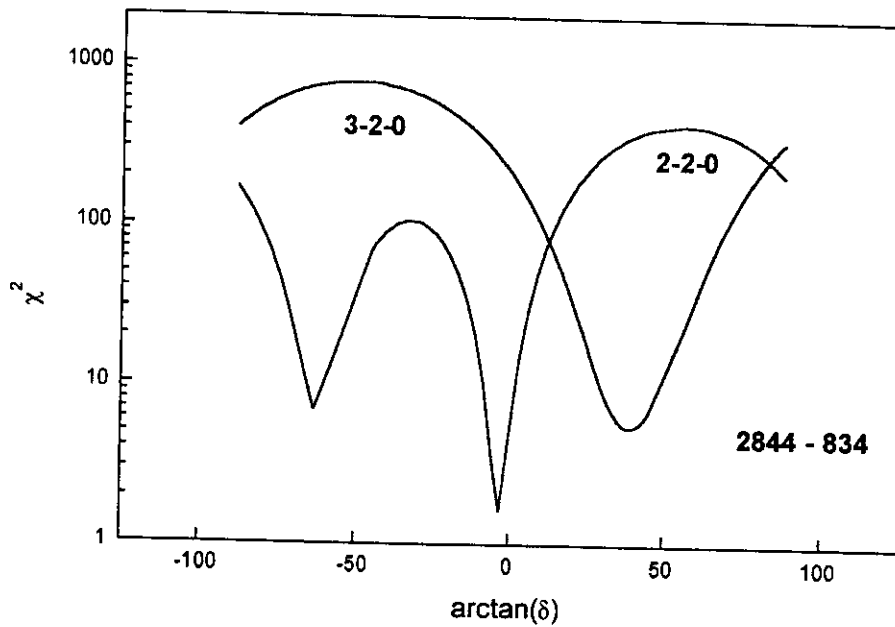


Figura 4.18: Gráfico de  $\chi^2$  versus  $\arctg(\delta)$  para a cascata 2844-834 keV do núcleo de  $^{72}\text{Ge}$ , considerando-se as seqüências de spin 2-2-0 e 3-2-0.

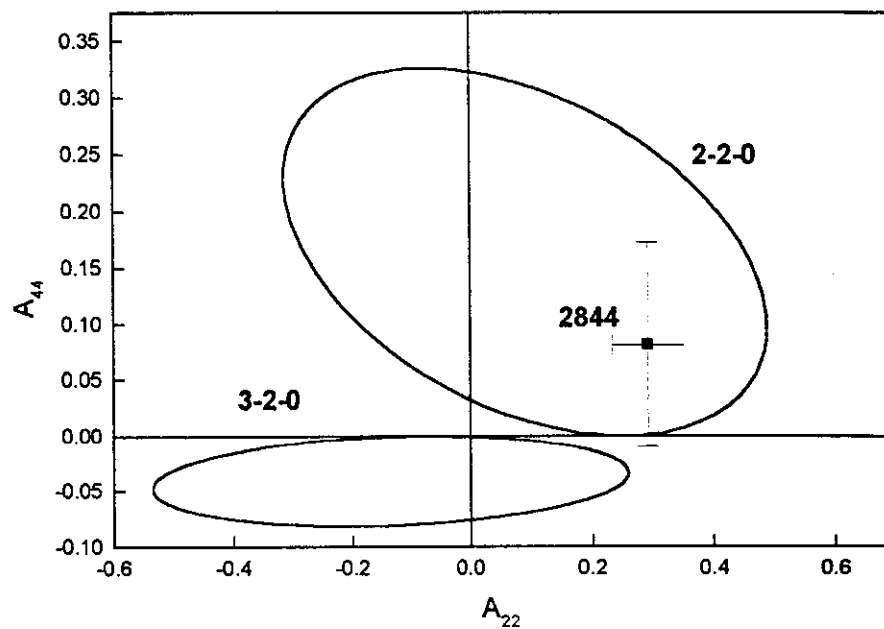


Figura 4.19: Elipses de correlação angular e valores de  $A_{22}$  e  $A_{44}$  obtidos dos ajustes referentes a cascata 2844-834 keV do núcleo de  $^{72}\text{Ge}$ , considerando-se as seqüências de spin: 2-2-0, 3-2-0.

## 5 ESTRUTURA NUCLEAR DO $^{72}\text{Ge}$

O objetivo deste capítulo é elucidar a estrutura nuclear do  $^{72}\text{Ge}$  em termos de modelos nucleares apropriados a esta região de massa. Para isto foi elaborado um estudo sistemático de alguns parâmetros nucleares envolvendo os isótopos par-par de Ge ( $A=66-78$ ) e isótonos  $N=40$ , com  $A$  par. A partir desta análise foi possível propor algumas hipóteses teóricas que descrevem com sucesso alguns níveis excitados do  $^{72}\text{Ge}$ .

### 5.1 Estudo Sistemático da Razão $\delta$ ( $E2/M1$ , $2_2^+ \rightarrow 2_1^+$ )

A análise do comportamento estrutural de núcleos par-par, na região de massa  $60 < A < 150$ , sugere a existência de núcleos quase-esféricos que podem ser descritos por vibrações, ou de núcleos levemente deformados que descrevem rotações.

Considerando-se os isótopos par-par de Ge e núcleos vizinhos, bem como dados a respeito da razão de mistura multipolar de transições gama tem-se condições de interpretar algumas das características desses núcleos. Desta forma, utilizando-se os valores médios de  $\delta(E2/M1)$  estabelecidos nas compilações de Lange *et al.* [30] e Krane [31] para as transições entre os primeiros estados excitados, (com  $I^\pi = 2^+$ ) de núcleos par-par, pode-se realizar uma análise da magnitude de  $\delta(E2/M1, 2_2^+ \rightarrow 2_1^+)$  em função do número de massa, como apresentada na figura 5.1. De modo geral os valores de  $\delta(E2/M1)$  são altos, favorecendo o caráter quadrupolar das transições  $2_2^+ \rightarrow 2_1^+$ , portanto de acordo com o comportamento esperado entre transições de estados coletivos. Especificamente, para os isótopos de Ge e particularmente para o núcleo de  $^{72}\text{Ge}$  a alta magnitude da razão de mistura multipolar, quando comparada aos demais isótopos, caracteriza o efeito do tipo ressonância.

Com relação aos valores de  $\delta(E2/M1)$  próximos às camadas fechadas ( $Z=28$  e  $N=50$ ) observa-se que a magnitude da razão de mistura multipolar diminui, o que sugere

que o comportamento dos estados nucleares são menos coletivos, podendo ser descritos por configuração de partículas. Além disso, o mínimo acentuado próximo à camada fechada de 50 nêutrons indica o domínio da configuração de prótons sobre nêutrons.

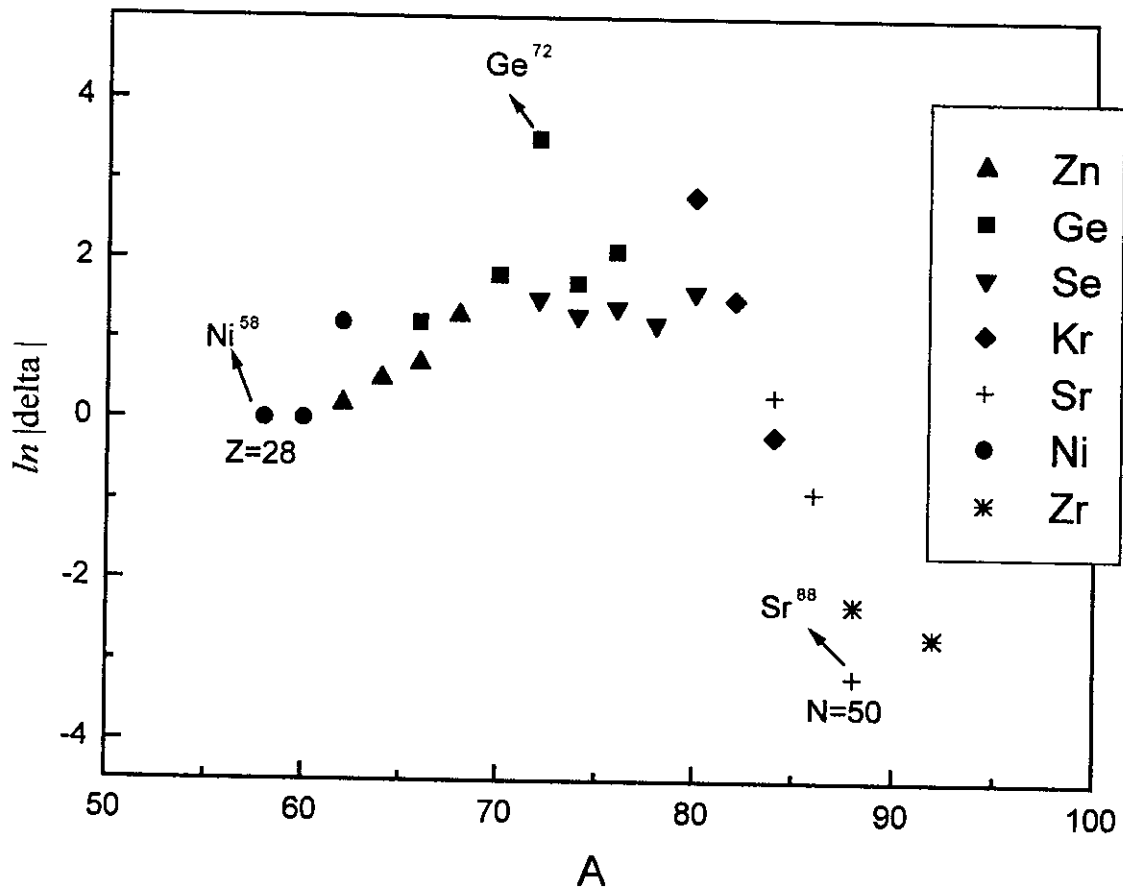


Figura 5.1: Magnitude de  $\delta(E2/M1, 2_2^+ \rightarrow 2_1^+)$  para núcleos par-par em função do número de massa ( $58 \leq A \leq 92$ ).

Em função do caráter coletivo associado aos isótopos de Ge, indicado pela análise da magnitude de  $\delta(E2/M1)$ , é esperado que o valor obtido para  $\delta(E2/M1, 2_2^+ \rightarrow 2_1^+)$  no  $^{72}\text{Ge}$  possa ser descrito de acordo com as estimativas Davydov – Phillipov ( $\delta_{DF}$ ) [32], através da análise gráfica de  $\log [\delta(E2/M1)/E\gamma]^2$  em função do número de massa, onde ( $\delta_{DF}$ ) é dado por [30]:

$$|\delta_{DF}(E2/M1, 2_2^+ \rightarrow 2_1^+)| = 3,56 \times 10^{-3} E_\gamma (\text{em MeV}) A^{5/3} \quad (5.1)$$

Na figura 5.2 é apresentado o gráfico de  $\log [\delta(E2/M1, 2_2^+ \rightarrow 2_1^+)/E\gamma]^2$  em função do número de massa. A estimativa de partícula única, ( $\delta_{PU}$ ), [30], foi incluída para comparação, onde:

$$|\delta_{PU}(E2/M1)| = 1,521 \times 10^{-3} E_\gamma (\text{em MeV}) A^{2/3} \quad (5.2)$$

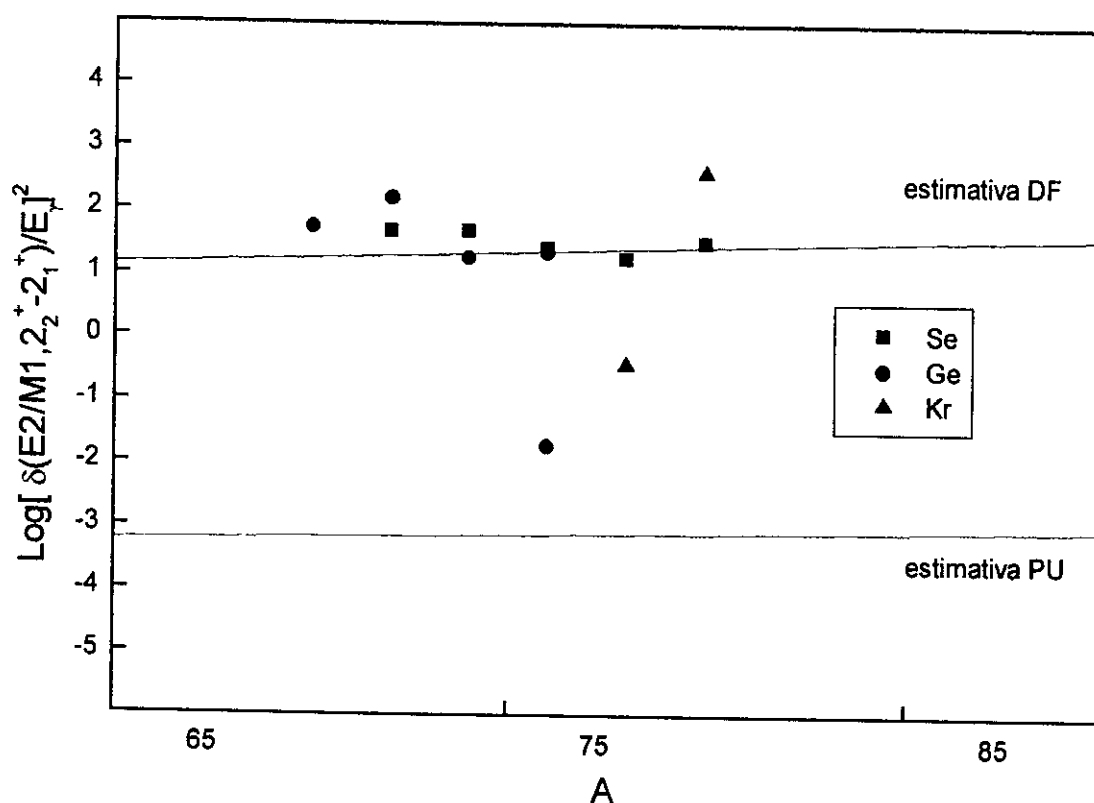


Figura 5.2: Gráfico de  $\log [\delta(E2/M1, 2_2^+ \rightarrow 2_1^+)/E\gamma]^2$  em função de A.

De acordo com a figura 5.2 observa-se que o limite coletivo representa coerentemente o valor de  $\delta(E2/M1, 2_2^+ \rightarrow 2_1^+)$  obtido no presente estudo (tabela 4.2).

A coletividade associada ao núcleo de  $^{72}\text{Ge}$  também é observada quando se analisam os valores atribuídos à probabilidade de transição reduzida  $B(E2)$  entre os primeiros estados excitados. Na figura 5.3 é apresentado o comportamento da razão  $B(E2)_{\text{exp}}/B(E2)_{\text{PU}}$  para várias transições dos isótopos par-par de Ge ( $A = 66-76$ ), em função do número de massa. Os valores de  $B(E2)$  foram obtidos da compilação do NDS, para cada

isótopo ( $A = 66$  a  $76$ ) [6,33,34,35,36,37]. Por esta análise observa-se que a maioria dos valores são substancialmente maiores do que um, o que permite associar a estes núcleos um forte caráter coletivo. Particularmente, para o  $^{72}\text{Ge}$  estas razões situam-se próximo ao valor esperado para núcleos vibracionais (40 a 50) do que para núcleos rotacionais (200).

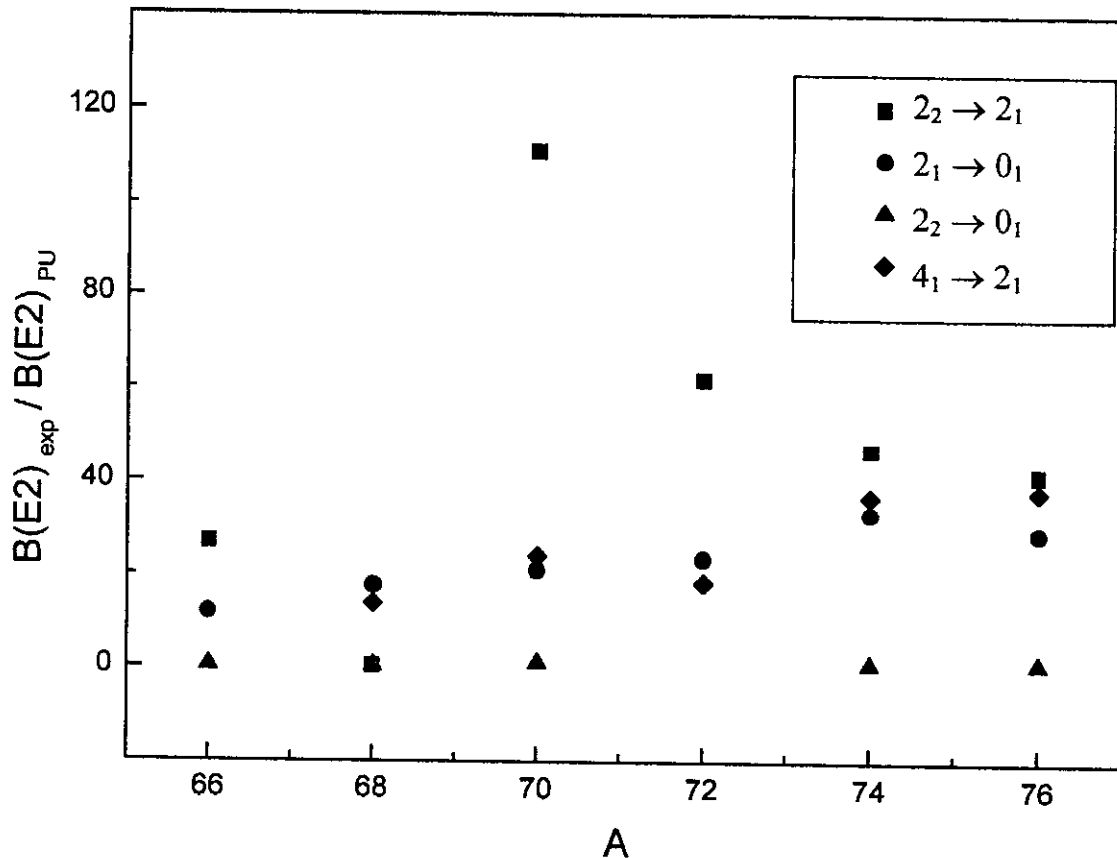


Figura 5.3: Razão  $B(E2)_{\text{exp}}/B(E2)_{\text{PU}}$  para os primeiros estados excitados dos isótopos par-par de  $\text{Ge}(A=66-76)$  em função de  $A$ .

Portanto, modelos nucleares que levem em conta graus de liberdade de deformação da superfície nuclear (geradas principalmente por vibrações) parecem viáveis para descrição estrutural do núcleo de  $^{72}\text{Ge}$ .

## 5.2 Estudo Sistemático da Razão $E_{4^+}/E_{2^+}$

A coletividade dos isótopos de  $\text{Ge}$ , sugerida pela análise de delta bem como pela probabilidade de transição reduzida, também pode ser avaliada por meio da evolução da razão entre as energias dos primeiros estados excitados com  $J^\pi = 2^+$  e  $J^\pi = 4^+$ ,



respectivamente, em função do número de massa. Dados experimentais relativos à razão  $E_{4+}/E_{2+}$  versus  $A$ , mostram as regiões de validade do comportamento estrutural descritos pelos núcleos em função do modelo nuclear considerado.

Na descrição vibracional os estados excitados são produzidos por oscilações da superfície nuclear em torno da forma de equilíbrio esférica, sendo  $E_{4+}/E_{2+}$  dado por 2,0 [38,39]. A medida que mais nucleons são adicionados e encontram-se distantes das camadas fechadas de prótons e nêutrons, o núcleo passa a se deformar adquirindo graus de liberdade de rotação e a razão  $E_{4+}/E_{2+}$  passa a ser dada por 3,3 [40]. Já no modelo de rotor assimétrico, que leva em conta em sua formulação uma mistura de “vibração-rotação”, esta razão é dada por  $2,67 < E_{4+}/E_{2+} < 3,33$  [41].

Considerando-se estas estimativas foi feita uma análise sistemática da razão  $E_{4+}/E_{2+}$  em função do número de massa, para os isótopos de Zn, Ge e Se. A comparação entre os dados é apresentada na figura 5.4. Pode-se observar que para os isótopos de Ge a razão  $E_{4+}/E_{2+}$  é da ordem de 2,2 para  $A = 66,68$ . Para  $A = 70,72$  é da ordem do limite vibracional, subindo rapidamente para 2,5 para  $A = 76$  e 78. Para os isótopos de  $^{66,70}\text{Zn}$  e  $^{70,72}\text{Se}$  os valores encontram-se próximos à estimativa do comportamento vibracional ( $2,01 < E_{4+}/E_{2+} < 2,3$ ) e para os demais isótopos esta razão apresenta valores intermediários entre o que se espera para o comportamento vibracional e o caso rotacional. Particularmente, para o núcleo  $^{72}\text{Ge}$  ( $E_{4+}/E_{2+} = 2,07$ ) o comportamento de um vibrador esférico puro é esperado, mas os aspectos coletivos associados a este isótopo, bem como a proposição da banda fundamental em medidas realizadas por meio de reações nucleares  $^{70}\text{Zn}(\alpha, 2n\gamma)$  e  $^{70}\text{Ge}(\alpha, ^2\text{He})$  [42,43] sugerem a descrição dos níveis em bandas vibracionais e rotacionais no espectro de estados excitados.

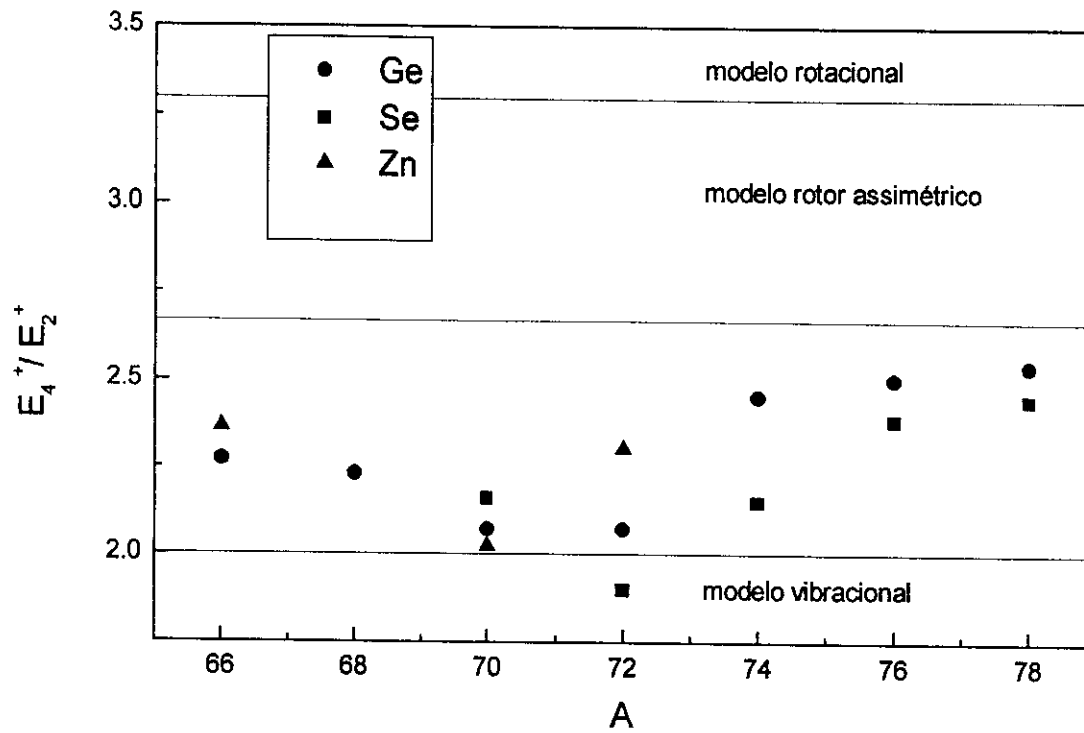


Figura 5.4: Razão  $E_{4^+}/E_{2^+}$  em função do número de massa, para os isótopos par-par de Zn, Ge e Se.

Desta forma, o diagrama de níveis do núcleo de  $^{72}\text{Ge}$  previsto pelos modelos vibracional puro (MV) e rotacional simétrico (MRS) foram calculados. Para o cálculo dos níveis de energia, usando o MV, considerou-se os estados 834 keV e 2514 keV como sendo estados de um fônon de quadrupolo e octupolo, respectivamente. Dentro do contexto de MRS o estado 834 keV foi adotado como o primeiro estado da banda  $K=0$  ( $I=0$ ). Na figura 5.5 é apresentado o diagrama de níveis experimental obtido no presente estudo e o previsto pelos modelos coletivos.

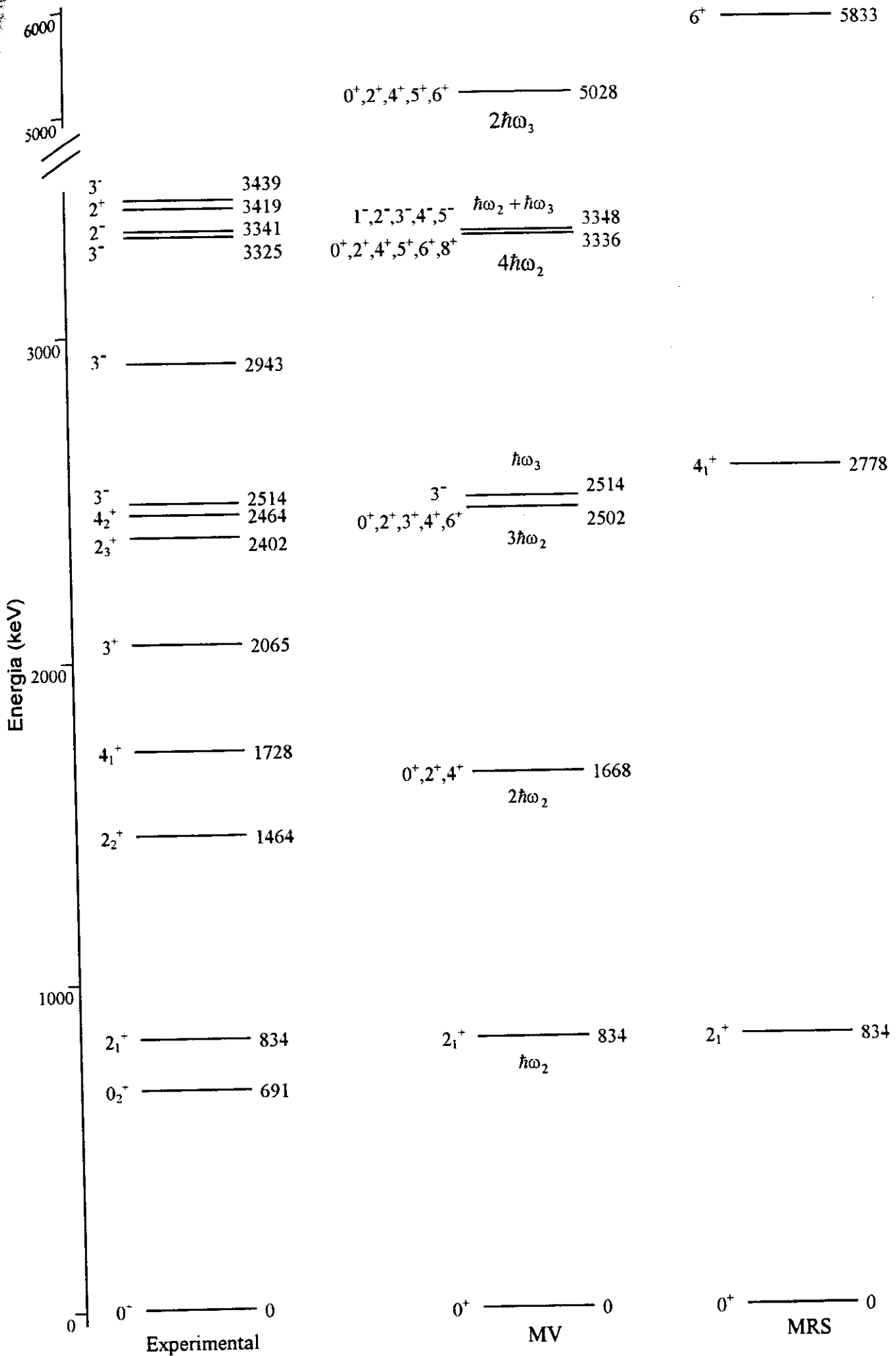


Figura 5.5: Diagrama parcial de níveis experimentais obtidos no presente estudo e o previsto pelos modelos coletivos.

De acordo com a figura 5.5 nenhuma das formulações prevê corretamente os estados excitados do  $^{72}\text{Ge}$ , no entanto, a descrição vibracional representa melhor o diagrama de níveis experimentais.

Portanto, a idéia de descrever este núcleo como um vibrador puro ou rotor rígido é inadequada, mas a hipótese de núcleo levemente deformado deve ser considerada. Uma maneira de avaliar esta deformação nuclear é através de gráficos da energia de excitação dos níveis da banda do estado fundamental em função de  $I(I+1)$ , onde o comportamento esperado para um rotor rígido (deformação permanente) é uma reta. Considerando a banda fundamental estabelecida para alguns isótopos par-par de Ge ( $A=64, 66, 68, 72$  e  $76$ ) [44] pode-se observar na figura 5.6 que as curvas geradas mostram uma leve curvatura, o que descarta a possibilidade destas bandas serem descritas como um rotor rígido nesses isótopos.

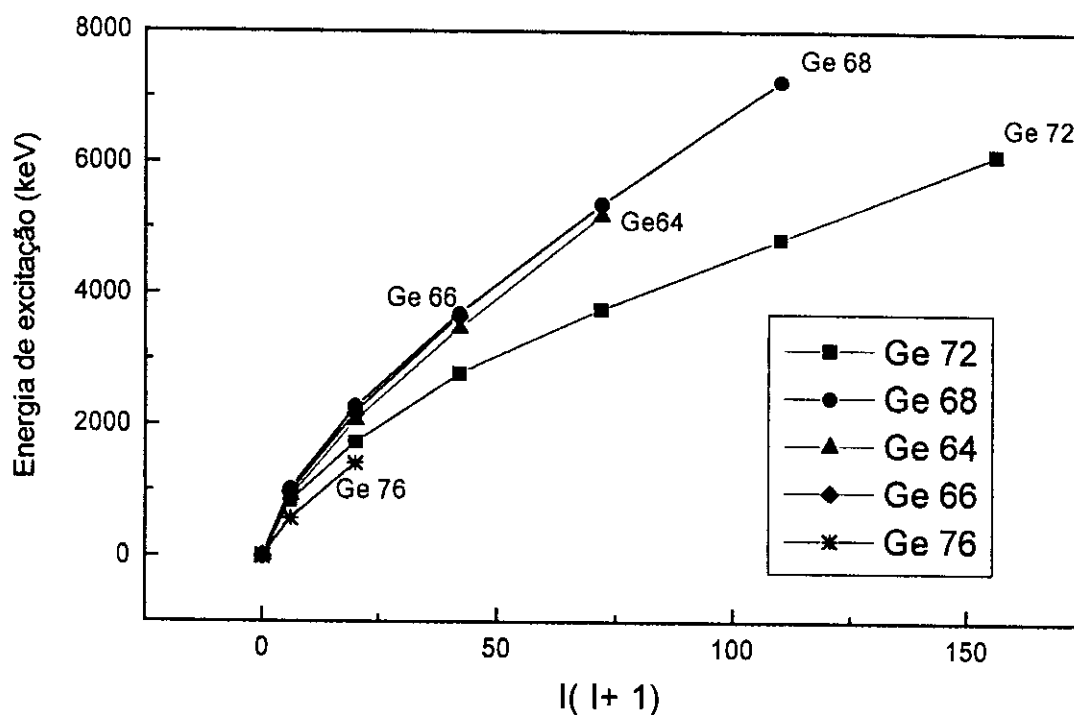


Figura 5.6: Curva da energia de excitação versus  $I(I+1)$  para a banda fundamental nos isótopos par-par de Ge.

A análise da banda fundamental ( $\Delta I=2$  e  $\pi = +$ ) em termos de  $2\xi/\hbar^2$  ( $\xi$  momento de inércia) versus  $(\hbar\omega)^2$  ( $\omega$  frequência rotacional) permite avaliar os aspectos vibracionais e rotacionais associados aos níveis de energia, isto é, no limite rotacional o gráfico é descrito por uma linha horizontal e no limite vibracional por uma linha vertical. Na figura 5.7 é apresentado o gráfico de  $2\xi/\hbar^2$  versus  $(\hbar\omega)^2$  para a banda fundamental do isótopo de  $^{72}\text{Ge}$ , onde de acordo com a metodologia estabelecida por Sorensen [45], tem-se:

$$2\xi/\hbar^2 = 4I - 2/\Delta E_{I,I-2} \quad (5.3)$$

e

$$(\hbar\omega)^2 = \frac{[\Delta E_{I,(I-2)}]^2 (2I-1)}{\left(\frac{3}{4}\right)^3 \left\{ [I(I+1)]^{2/3} - [(I-1)(I-2)]^{2/3} \right\}^3} \quad (5.4)$$

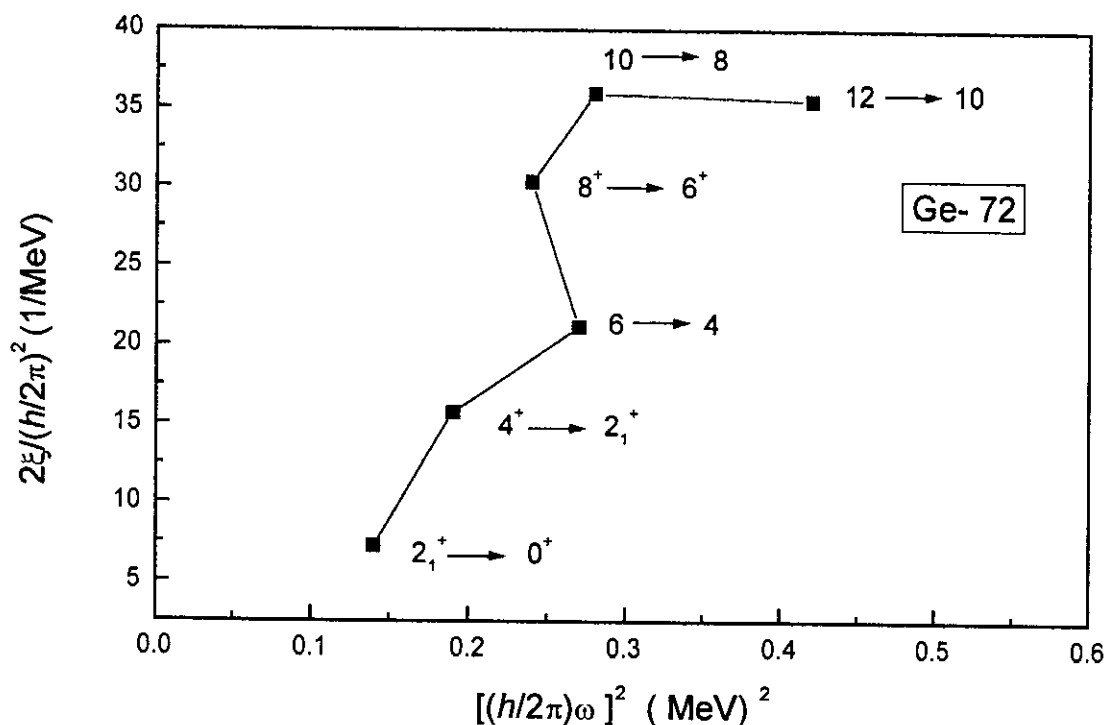


Figura 5.7: Gráfico de  $2\xi/\hbar^2$  versus  $(\hbar\omega)^2$  para a banda fundamental do isótopo de  $^{72}\text{Ge}$ .

Analisando-se a figura 5.7 tem-se para o  $^{72}\text{Ge}$  um comportamento difícil de interpretar. De acordo com o estudo realizado por Matsuzaki *et al.* [46] este comportamento também é observado no núcleo de  $^{70}\text{Se}$  o qual é tratado segundo o MRS. Entretanto a descrição proposta em termos deste modelo para  $^{72}\text{Ge}$  não é adequada (figura 5.5).

### 5.3 Modelos Nucleares

O intuito desta seção é estudar o espaçamento dos níveis de energia e alguns parâmetros nucleares que possam caracterizar a estrutura nuclear  $^{72}\text{Ge}$ . Não se procurou obter dados precisos, pois isto exigiria um tratamento matemático mais elaborado, mas sim propor hipóteses que contribuam para sua interpretação.

Para a realização desta análise levou-se em consideração o caráter transicional vibracional-rotacional sugerido por suas propriedades já estabelecidas, tais como: spin, paridade e energia de níveis, razão de mistura multipolar de transições gama e valores de  $B(E2)$  entre transições gama. Basicamente, os cálculos realizados consideram os fundamentos do modelo vibracional.

Como apresentado na seção 5.2 o MV não permite prever o desdobramento dos estados degenerados (figura 5.5), então foram considerados modelos teóricos que levem em conta também vibrações anarmonicas, como as realizadas por Das *et al.* [47] e Hadermann *et al.* [48].

Partindo das condições estabelecidas para o MV, onde o núcleo é considerado como uma gota de fluido incompressível de superfície bem definida, cuja hamiltoniana é descrita em função da energia do núcleo com forma esférica e da hamiltoniana de superfície [38,39], tem-se que o espectro de energia dado por:

$$E_{\lambda\mu} = \sum_{\lambda\mu} \hbar\omega(n_{\lambda\mu} + 1/2), \text{ com } n_{\lambda\mu} = 0,1,2,\dots \quad (5.5)$$

onde  $n_{\lambda\mu}$  é o número de fonons no modo de oscilação  $\lambda\mu$ . Desta forma, o momento angular de um fonon no estado  $\lambda\mu$  é  $\lambda$  e sua paridade é  $(-1)^\lambda$ .

A partir desta formulação Das *et al.* [47] propõem uma descrição semi-empírica para a banda fundamental de núcleos par-par transicionais, incluindo na hamiltoniana vibracional termos de quarta ordem em  $\alpha_{\lambda\mu}$ , isto é, no parâmetro de deformação que determina a distorção da superfície nuclear. Com esta expansão, a energia para os estados  $I=2N$  (onde  $N$  é o número de fonons de quadrupolo) passa a ser descrita por:

$$E_I = 1/2[b/(5)^{1/2}I] + 1/12[cI(I-2)] \quad (5.6)$$

De acordo com este modelo, na região transicional ( $2 < E_{4+}/E_{2+} < 2,4$ ) e no início da região transicional vibracional-rotacional ( $2,4 < E_{4+}/E_{2+} < 3,0$ ) tem-se que:

$$b \gg |c|$$

Aplicando o modelo vibracional anarmônico de Das *et al.* [47] ao isótopo de  $^{72}\text{Ge}$ , obtem-se  $b = 1865$  keV e  $c = 91$  keV, portanto de acordo com a previsão teórica estabelecida entre os parâmetros  $b$  e  $c$ , o que gera o diagrama de níveis apresentado na figura 5.8. A concordância dos cálculos com os dados experimentais, pode ser considerada boa. Além disso, o estado medido em 2772 keV no  $^{72}\text{Ge}$  com  $I^\pi = 6^+$  [6] é melhor descrito em termos do modelo anarmônico ( $E_{6^+} = 2682$  keV) do que em termos de um estado de três fonons de quadrupolo ( $E_{6^+} = 2502$  keV) previsto pelo modelo vibracional puro (figura 5.5).

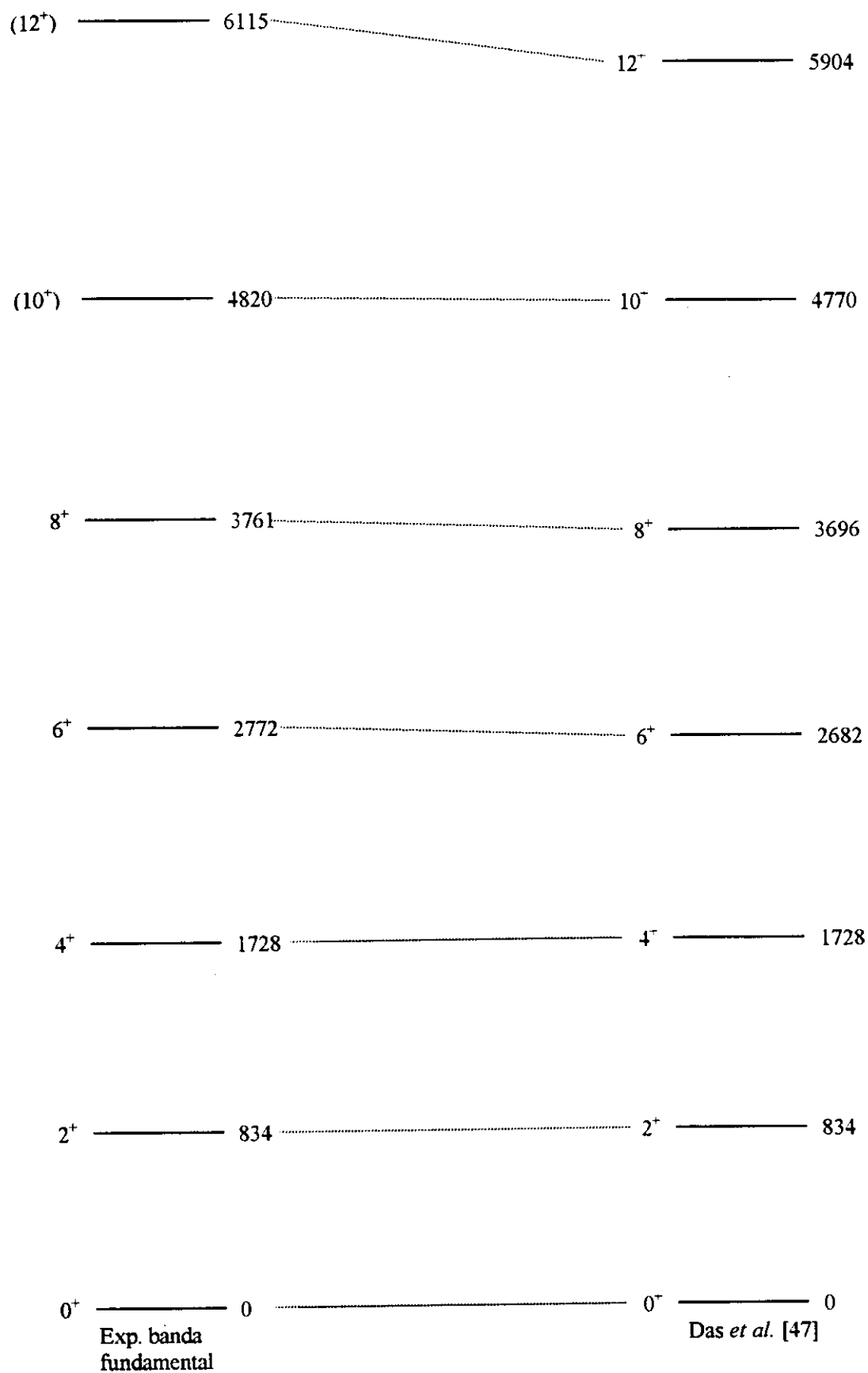


Figura 5.8: Diagrama de níveis de energia de  $^{72}\text{Ge}$  obtido experimentalmente e a previsão teórica calculada com o modelo de Das *et al.* [47] (energia em keV).



Hadermann *et al.* [48] utiliza a mesma descrição semi-empírica de Das *et al.* [47] e propõe que as energias dos estados de dois fonons de quadrupolo sejam descritas por:

$$E_I = 2h\omega + [2/(2I + 1)^{1/2}] * C_I, \text{ para } I = 0, 2, 4 \quad (5.7)$$

onde  $h\omega$  é a energia associada ao estado de um fonon de quadrupolo, sendo  $C_I = 30(2I + 1)$  keV, obtido através da compilação dos dados de energia dos estados de dois fonons de quadrupolo de 106 núcleos par-par na faixa entre:  $30 < Z < 52$  e  $34 < N < 72$ .

Utilizando-se a parametrização geral de Hadermann *et al.*, (equação 5.7) foram calculados os níveis de energia do  $^{72}\text{Ge}$ , o qual pode ser visto na figura 5.9. Entretanto, apesar de prever corretamente o posicionamento do tripleto, as energias obtidas apresentam valores muito acima dos dados experimentais. Ainda utilizando a formulação de Hadermann *et al.* [48] é possível obter as energias dos níveis associados ao tripleto calculando  $C_I$  especificamente para o núcleo de  $^{72}\text{Ge}$ . Para tanto utiliza-se a hipótese de que os níveis a 834 keV e 1464 keV sejam estados excitados, com  $I^\pi = 2^+$ , de um e dois fonons de quadrupolo, respectivamente, o que fornece  $C_I = -46(2I + 1)$ . Entretanto, o resultado deste modelo também não é bom (figura 5.9). Da mesma forma, as energias calculadas apresentam valores acima dos dados experimentais. Além disso o estado  $4^+$  é obtido na ordem invertida em relação ao diagrama de níveis experimentais. As previsões em energia do estado  $0_2^+$ , obtidas por estas parametrizações (1728 keV e 1576 keV, respectivamente), sugerem que este nível seja o membro que falta para completar o tripleto de dois fonons de quadrupolo, entretanto nenhum experimento, até o presente, propõe estados com spin e paridade  $0^+$ , exceto a presença do primeiro estado excitado a 691 keV, fenômeno só observado em outros quatro núcleos ( $^{16}\text{O}$ ,  $^{40}\text{Ca}$ ,  $^{96}\text{Zr}$  e  $^{98}\text{Mo}$ ) e particularmente para o  $^{72}\text{Ge}$  com energia muito abaixo do que o esperado para compor o tripleto previsto pelo MV (~1670 keV).

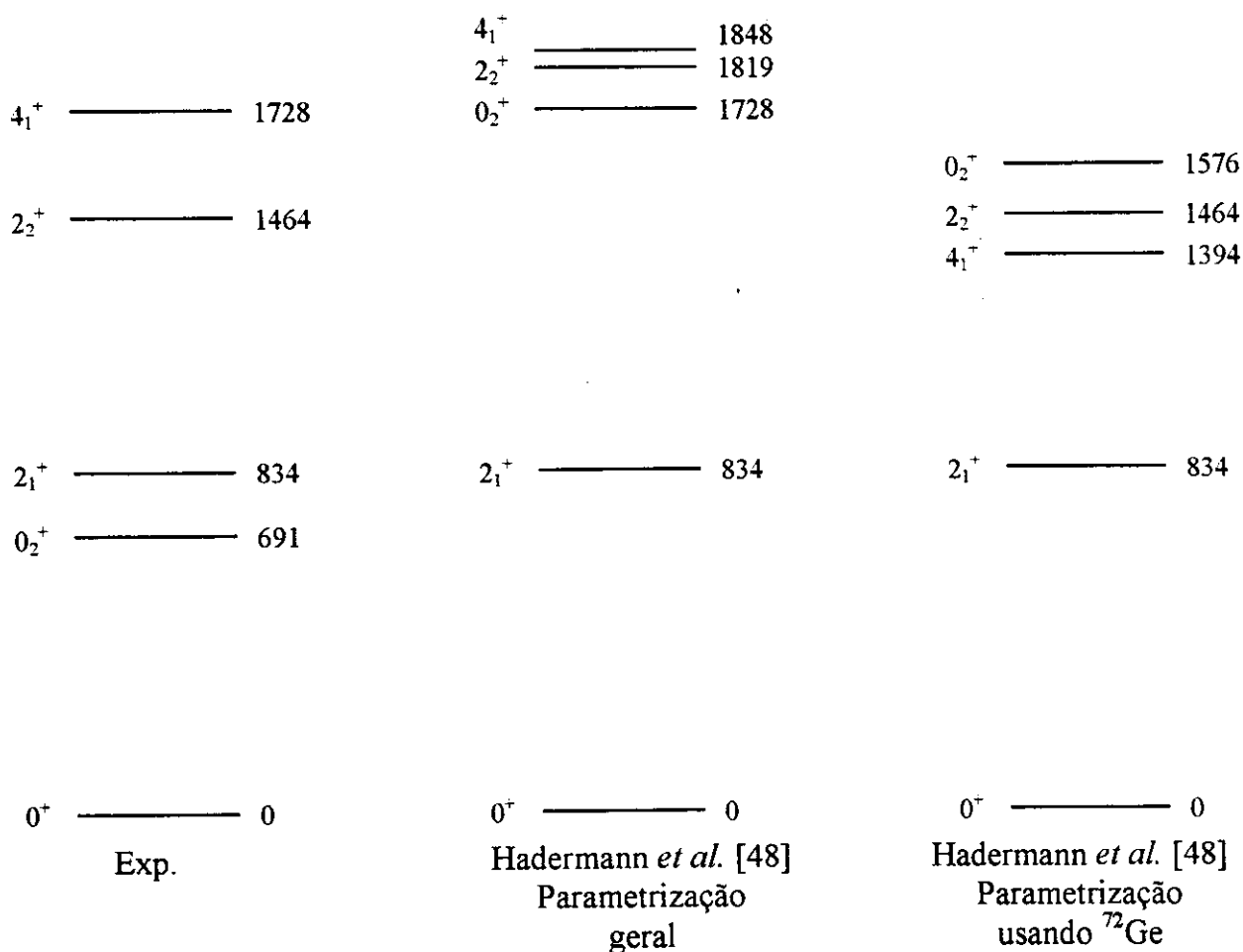


Figura 5.9: Diagrama de níveis de energia de  $^{72}\text{Ge}$  obtido experimentalmente e a previsão teórica calculada com o modelo de anarmonico de Haderman *et al.* [48] (energia em keV).

Sheline [49] e Sakai [50] analisaram dados experimentais, referentes a níveis de energia e valores de  $B(E2)$  e  $B(E3)$  de núcleos par-par, dentro de uma perspectiva vibracional-rotacional unificada. A idéia básica do modelo é que os estados  $0_2^+$  e  $2_2^+$  do tripleto de dois fonons de quadrupolo dos núcleos vibracionais evoluem, respectivamente, para cabeças de bandas rotacionais beta e gama através de uma região transicional descrita por bandas denominadas quase-rotacionais. A relação entre o diagrama de níveis dos modelos vibracional e rotacional dentro da perspectiva unificada é apresentada na figura 5.10. Especificamente, no estudo realizado por Sakai [50] esta hipótese foi aplicada aos isótopos de  $^{70,72}\text{Ge}$  bem como para alguns núcleos par-par vizinhos ( $^{48,50}\text{Ti}$ ,  $^{54,56}\text{Fe}$  e  $^{82}\text{Kr}$ ), obtendo sucesso quando a comparação com dados experimentais foi possível, como no caso de  $^{48}\text{Ti}$ .

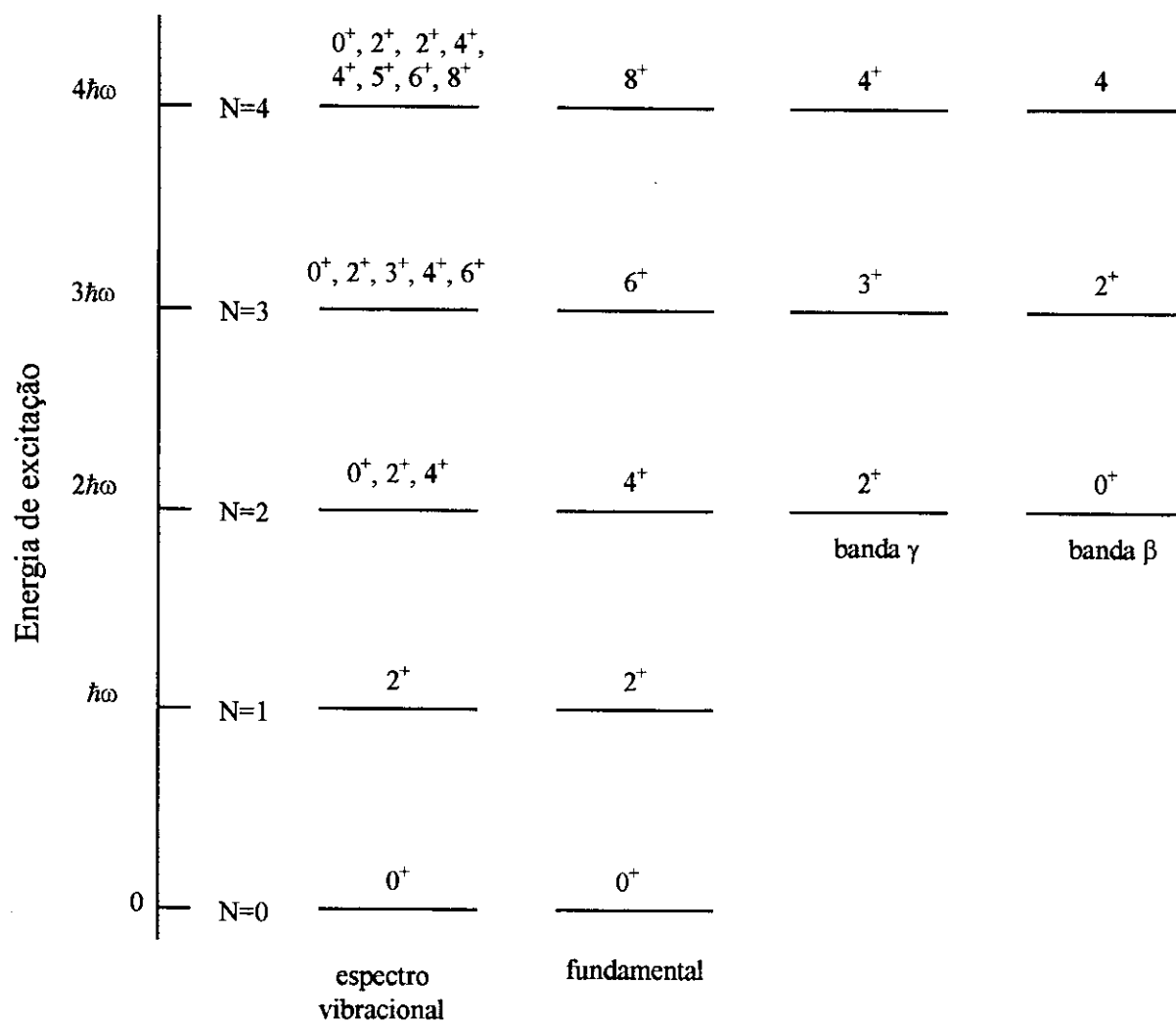


Figura 5.10: Relação entre os níveis vibracionais e rotacionais de acordo com a perspectiva de bandas quase-rotacionais [50]. Na primeira coluna tem-se a descrição do espectro vibracional para fonons quadrupolares (onde N representa o número de fonons) e nas colunas seguintes a decomposição em bandas quase-rotacional identificadas (em ordem) por: bandas fundamental,  $\gamma$  e  $\beta$ .

Dentro deste contexto, no presente trabalho, os estados excitados do isótopo de  $^{72}\text{Ge}$  foram rearranjados em diferentes membros de três bandas quase-rotacionais, a saber: banda fundamental ( $\Delta I = 2$  e  $\pi = +$ ) onde o estado de um fonon quadrupolar ( $2_1^+$ ) e o estado  $4^+$  do tripleto fazem parte; banda  $\gamma$  ( $\Delta I = 1$ ) e paridade positiva construída a partir do estado  $2_2^+$  (também membro do tripleto) e banda  $\beta$  ( $\Delta I = 1$ ) e paridade positiva construída a partir do primeiro estado excitado  $0^+$ . O diagrama de níveis de  $^{72}\text{Ge}$ , descrito segundo o modelo unificado de Sakai [50] é apresentado na figura 5.11.

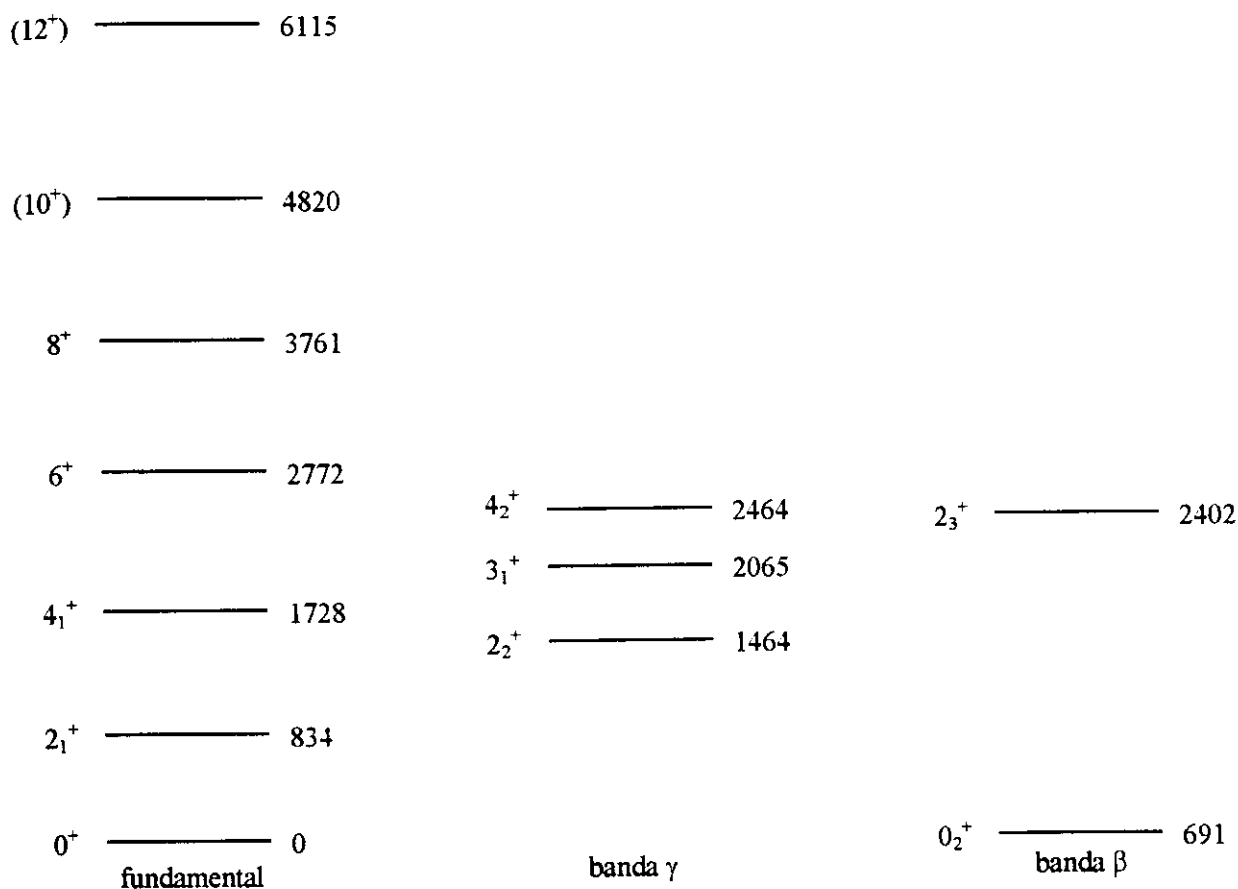


Figura 5.11: Diagrama experimental dos níveis de energia do  $^{72}\text{Ge}$  classificados de acordo com o modelo de bandas quase-rotacionais de Sakai [50] (energia em keV).

De acordo com os dados experimentais a razão  $E_{2^+}/E_{0^+} = 3,1$ , para a banda  $\beta$  quase-rotacional encontra-se próxima à previsão teórica (3,3), por outro lado a razão  $E_{4^+}/E_{2^+} = 1,7$  referente à banda  $\gamma$  quase-rotacional está muito abaixo do valor teórico (2,5). Em decorrência dos fatos apresentados pode-se concluir que o tratamento de dados através do modelo de bandas quase-rotacionais não é o mais adequado, principalmente em função dos estados não classificados e da discordância na tentativa de proposição da banda  $\gamma$  quase-rotacional. No entanto as previsões do modelo unificado propõem que o núcleo de  $^{72}\text{Ge}$  possua bandas que se desviam consideravelmente do espaçamento  $I(I+1)$  esperado para um núcleo altamente deformado, indicando “leve” deformação nuclear.

Avaliando a discussão em função dos modelos considerados pode-se esperar que o núcleo de  $^{72}\text{Ge}$  se comporte como no início da transição de vibrador anarmônico para rotor levemente deformado.

A descrição do núcleo em termos da banda fundamental dada pelo Modelo Coletivo Vibracional Anarmônico de Das *et al.* [47] é sustentada pela descrição do Modelo Unificado de Sakai [50] no caso da proposição da banda fundamental e da banda  $\beta$  quase-rotacional. Entretanto, muitos níveis não são ainda explicados por estes modelos. Portanto estudos teóricos mais refinados devem ser elaborados.

## 6. CONCLUSÕES

No presente trabalho o núcleo de  $^{72}\text{Ge}$  foi estudado a partir do decaimento  $\beta^-$  do  $^{72}\text{Ga}$  pela técnica de correlação angular direcional (CAD)  $\gamma\gamma$  utilizando um arranjo experimental tecnicamente aprimorado quando comparado aos demais experimentos de CAD já realizados.

Foram estudadas 44 cascatas, sendo 33 medidas pela primeira vez, o que possibilitou a determinação da razão de mistura multipolar para 23 transições  $\gamma$  tornando possível, juntamente com dados de outros experimentos, a proposição de spin e paridade para todos os níveis estudados. Nos casos em que foi possível a comparação dos valores de  $A_{kk}$  bem como de  $\delta(L'_n/L_n)$ , com as previsões de outros estudos, observa-se para a maioria dos resultados boa concordância entre dados e em alguns casos melhor precisão.

O uso de detetores de alta eficiência e FWHM  $\sim 2,0$  keV associados a eletrônica de coincidência multiparamétrica, que gera espectros de coincidências bidimensionais, possibilitaram uma melhor condição para análise de multipletos. Este refinamento permitiu a confirmação do dubleto 629 keV (posicionado em:  $1464 \rightarrow 834$  e  $3325 \rightarrow 2694$ ), previsto em um recente estudo envolvendo medidas espectroscopia gama [4]. Em decorrência não foi possível analisar as cascatas onde a interferência do dubleto ocorreu.

O desempenho do controlador multidetetor e da metodologia utilizada na análise de dados bidimensionais em medidas de correlação angular, foram testados pela medida da cascata de 834-894 keV do núcleo de  $^{72}\text{Ge}$ , por ser a mais intensa e bem estabelecida do decaimento  $\beta^-$  do  $^{72}\text{Ga}$ . Os valores obtidos para os coeficientes  $A_{kk}$  confirmam a multipolaridade E2 associadas às transições de 834 keV e 894 keV, portanto de acordo com a sequência de spin estabelecida para a cascata em estudo.

A abordagem teórica mostra que não é possível a descrição de todas as propriedades já estabelecidas no núcleo de  $^{72}\text{Ge}$  por um único modelo, entretanto a previsão dos níveis pelo modelo vibracional mostra que apesar do núcleo não ser um vibrador puro sua descrição representa razoavelmente bem o diagrama de níveis estabelecido experimentalmente. Ainda dentro deste contexto teórico quando se leva em conta também vibrações anarmonicas, como as realizadas por Das *et al.* [47], a concordância entre as previsões teóricas com os dados experimentais é ainda melhor. Entretanto, cálculos mais refinados devem ser elaborados, pois muitos níveis não são ainda explicados por estes modelos.

## APÊNDICE A

Para relocar dados de coincidências foi elaborado o programa FILAREL.

### A.1 Descrição do Programa FILAREL

Este programa permite relocar eventos seguindo o procedimento descrito a seguir:

variáveis:

$x$  = canal

$y$  = novo valor do canal

Portanto  $y = \text{Inteiro}(ax + b)$

Devido ao fato de  $x$  ter sido gerado através de um processo “aleatório” devemos incluir este processo na obtenção de  $y$ .

então:

$$y = \text{Inteiro} \{a.(x + \text{aleatório}) + b\}$$

onde aleatório é um número de 0 a 1 com distribuição constante.



## A.2 Teste do Programa

Para testar o programa FILAREL foram utilizados alguns dos arquivos de espectros obtidos no presente experimento para o ângulo de  $90^\circ$ , denominados por:

090_1_n2.fil	090_8_n2.fil
090_1_o2.fil	090_8_o2.fil
090_1_p2.fil	090_8_p2.fil
090_1_q2.fil	090_8_q2.fil
090_1_r2.fil	090_8_r2.fil

As posições associadas as transições  $\gamma$  de 2489 keV e 2506 keV foram utilizadas para monitorar a ocorrência de deslocamento dos espectros, conforme mostra a tabela A.1.

Tabela A.1: Posição das transições monitoradas.

Nome do arquivo $\theta = 90^\circ$	Posição (2489 keV)	Posição (2506 keV)
c901n22.chn	3125,16	3146,49
c901o22.chn	3125,05	3146,28
c901p22.chn	<b>3132,63</b>	<b>3154,15</b>
c901q22.chn	<b>3132,42</b>	<b>3153,80</b>
c901r22.chn	<b>3131,75</b>	<b>3152,97</b>
c908n22.chn	3124,98	3146,32
c908o22.chn	3126,20	3147,31
c908p22.chn	<b>3132,54</b>	<b>3153,77</b>
c908q22.chn	<b>3131,37</b>	<b>3152,85</b>
c908r22.chn	<b>3131,77</b>	<b>3152,97</b>

Conforme mostra a tabela A.1 uma parte dos espectros desloca-se em relação aos outros espectros, desta forma foi adotado o procedimento de relocar os espectros c901p22, c901q22, c901r22, c908p22, c908q22 e c908r22 em relação aos espectros c901n22, c901o22, c908n22 e c908o22.

### A.2.1 Obtenção da Curva “Reloca”

Para relocar um espectro em relação a outro é necessária obter uma curva que relaciona a posição (canal) da transição com a nova posição (canal) desejada. Para obter esta curva foram analisadas 13 transições  $\gamma$  dos espectros de coincidência do presente estudo, conforme a tabela A.2.

Tabela A.2: Posição referente a transição  $\gamma$  selecionado.

Nome do arquivo C901N22.CHN	Nome do arquivo C901P22.CHN
Posição	Posição
710,182	712,154
747,313	749,284
947,348	949,804
1008,208	1010,783
1085,148	1087,872
1182,757	1185,631
1285,159	1288,447
1515,487	1519,121
1574,206	1577,776
1982,817	1987,512
2320,311	2326,089
2755,392	2762,023
3146,514	3154,134

A partir dos dados apresentados na tabela A.1 foi obtida a curva que relaciona as duas posições.

Os arquivos 090\_1\_p2.fil, 090\_1\_q2.fil, 090\_1\_r2.fil, 090\_8\_p2.fil, 090\_8\_q2.fil e 090\_8\_r2.fil foram relocados e os fotopicos de monitoração foram analisados comparando-se os espectros relocados e não relocados. Os resultados obtidos são apresentados na tabela A.3.

Tabela A.3: Dados comparativos entre o espectro não relocado e os espectros relocados

Posição	FWHM	Área	Denominação
712,023 (9)	1,884 (19)	18013 (216)	Não relocado
710,145 (9)	2,068 (19)	17997 (197)	Relocado
749,128 (4)	2,065 (8)	63519 (344)	Não relocado
747,181 (4)	2,133 (8)	63512 (347)	Relocado
949,640 (16)	2,244 (30)	7538 (134)	Não relocado
947,239 (18)	2,549 (35)	7538 (133)	Relocado
1010,592 (4)	2,324 (6)	115470 (438)	Não relocado
1008,033 (4)	2,605 (6)	115396 (426)	Relocado
1087,693 (8)	2,248 (16)	17550 (179)	Não relocado
1084,951 (9)	2,486 (18)	17558 (180)	Relocado
1185,379 (35)	2,42 (7)	2271 (83)	Não relocado
1182,405 (35)	2,46 (7)	2300 (82)	Relocado
1288,249 (12)	2,353 (27)	10721 (149)	Não relocado
1285,056 (14)	2,535 (32)	10771 (155)	Relocado
1518,83 (6)	2,75 (13)	1883 (88)	Não relocado
1515,04 (6)	3,02 (14)	1995 (96)	Relocado
1577,49 (4)	2,485 (96)	2819 (92)	Não relocado
1573,59 (4)	2,50 (10)	2859 (94)	Relocado
1987,086 (26)	3,13 (5)	4482 (96)	Não relocado
1982,242 (27)	3,22 (5)	4471 (101)	Relocado
2325,579 (32)	3,50 (6)	4187 (100)	Não relocado
2319,951 (34)	3,75 (6)	4208 (98)	Relocado
2761,546 (18)	3,491 (36)	9474 (134)	Não relocado
2754,890 (19)	3,675 (37)	9474 (133)	Relocado
3153,563 (39)	3,64 (8)	4274 (87)	Não relocado
3146,01 (4)	3,70 (9)	4416 (91)	Relocado

Os resultados mostram que com o uso do programa FILAREL é possível relocar os espectros. O aumento da FWHM deve-se ao fato da variância de uma distribuição uniforme (números aleatórios) ser 1/12, de modo que a FWHM aumenta nesta proporção.

### A.3 Procedimento

Cada arquivo fila gerado, possui informações sobre energia e tempo para cada um dos detectores. As informações sobre energia (canais) devem ser alteradas de modo que ao somar todos os arquivos não tenha discrepâncias. A verificação foi efetuada tomando-se 5 posições ao longo do espectro para cada um dos detectores, foi possível obter para cada arquivo fila duas curvas de calibração de grau 1.

As curvas de calibração foram obtidas por meio do programa Excel.

Para testar os resultados obtidos foram considerados todos os dados referentes ao ângulo de  $90^\circ$  e relocados para uma única curva de calibração pré-definida. Os dados obtidos foram somados resultando em um espectro para o detector 1 e outro para o detector 2. Os resultados obtidos estão ilustrados na figura A.1 e A.2. Este procedimento foi repetido para todos os ângulos medidos, gerando ao final da verificação 2900 ajustes. Estes resultados foram tabulados e utilizados como entrada de dados no programa FILAREL.

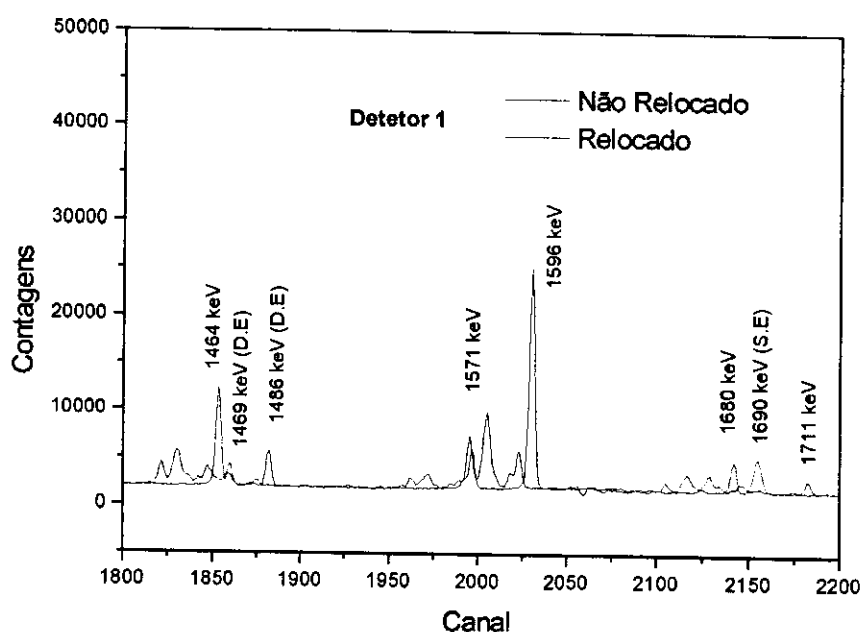


Figura A.1: Espectro comparativo para o detector 1.

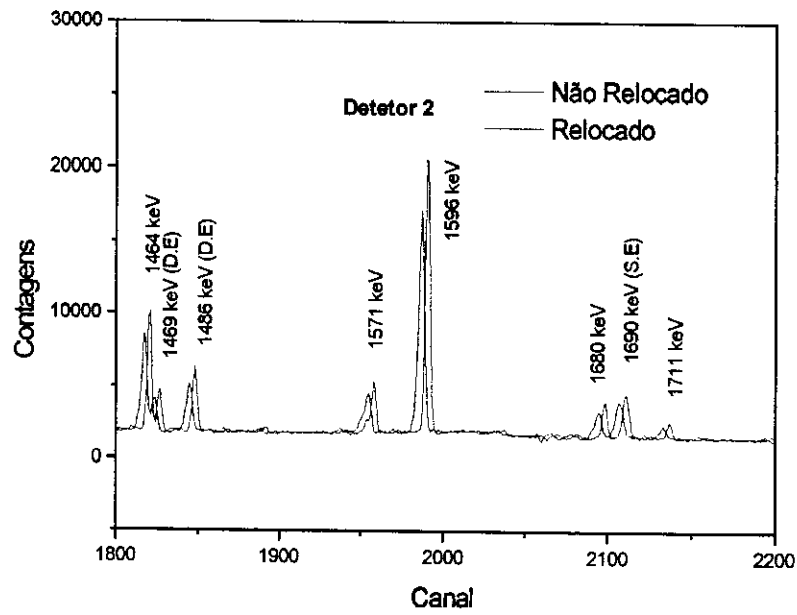


Figura A.2: Espectro comparativo para o detetor 2.

## APÊNDICE B

### PROGRAMA DELTA

O programa DELTA calcula a função  $\chi^2$ , definida por:

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

onde:

$m$ : é o número de ângulos utilizados nas medidas.

$W^{teo}(\theta_j)$ : é o valor teórico da função correlação angular.

$W^{exp}(\theta_j)$ : é o valor experimental obtido para a função correlação angular.

$\sigma(\theta_j)$ : é o desvio padrão.

onde  $W^{teo}(\theta_j)$  é determinado por:

$$W^{teo}(\theta) = 1 + A_{22}P_2(\cos \theta) + A_{44}P_4(\cos \theta) \quad (\text{B.2})$$

$W(\theta)$  = taxa de eventos de coincidência.

$A_{22}$  e  $A_{44}$  = coeficientes de correlação angular.

$P_2(\cos \theta)$  e  $P_4(\cos \theta)$  = polinômios de Legendre.

Os coeficientes de correlação angular são dados por:

$$A_{kk} = A_k(\gamma_1) \cdot A_k(\gamma_2) \quad (\text{B.3})$$

onde:

$$A_k(\gamma_1) = \frac{F_k(I_i L_1 L_1) + (-1)^{L_1 - L_1'} 2\delta_1 F_k(I_i L_1 L_1') + \delta_1^2 F_k(I_i L_1' L_1')}{1 + \delta_1^2} \quad (\text{B.4})$$

$$A_k(\gamma_2) = \frac{F_k(I_f L_2 L_2) + 2\delta_2 F_k(I_f L_2 L_2') + \delta_2^2 F_k(I_f L_2' L_2')}{1 + \delta_2^2} \quad (\text{B.5})$$

onde  $\delta$  é a razão de mistura multipolar e  $F_k$  são fatores tabelados que dependem dos spins dos níveis e das multipolaridades das transições  $\gamma$ .

Segue então que conhecendo-se a provável seqüência de spins e a razão de mistura multipolar de uma das transições  $\gamma$ , os coeficientes  $A_{kk}$  e conseqüentemente os valores de  $W^{teo}(\theta)$ , são determinados atribuindo-se valores para a razão de mistura multipolar da outra transição. O programa atribui 75 valores de  $\delta$  entre  $-10^{30}$  a  $+10^{30}$ , em intervalos que diminuem quando o módulo de  $\delta$  se aproxima de zero. São localizados os valores de  $\delta$  que correspondem aos mínimos relativos de  $\chi^2$ .

Encontrando apenas um mínimo, é realizada um inspeção do  $\delta$  no infinito positivo e negativo. Encontrando dois mínimos, a procura de mínimo no infinito não é realizada e, em torno de cada um dos dois mínimos, são feitas subdivisões menores para uma melhor determinação do  $\chi^2$  mínimo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ROSE, H. J.; BRINK, D. M., Angular distribution of gamma-rays in terms of phase-defined reduced matrix elements, *Rev. Mod. Phys.*, 39(2): 306-47, 1967.
- [2] FRAUENFELDER, H.; STEFFEN, R. M., Angular Correlations. In: SIEGBAHN, K., ed. *Alpha, beta and gamma-ray spectroscopy*, Amsterdam, North-Holland, 2: 997-1198, 1965.
- [3] BIEDENHARN, L. C.; ROSE, M. E., Theory of angular correlation of nuclear radiations, *Rev. Mod. Phys.*, 25(3): 729-77, 1953.
- [4] MEDEIROS, J. A. G., Decaimento  $\beta^-$  do  $^{72}\text{Ga}$ . Tese de mestrado apresentada no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares IPEN-CNEN/SP, 1995.
- [5] LANDULFO, E.; SAXENA, R. N.; ZAMBONI, C. B.; LAPOLLI, A. L., Directional correlation of  $\gamma$  transitions in  $^{72}\text{Ge}$  following the decay of  $^{72}\text{Ga}$ , *Phys. Rev.*, C50: 733-40, 1994.
- [6] KING, M. M., Nuclear Data Sheets for  $A = 72$ . *Nucl. Data Sheets*. 55(1):1-73, 1989.
- [7] DUMWORTH, J. W., The application of the coincidence counting to experiments in nuclear physics, *Nucl. Instrum. Methods*, 11: 167-80, 1940.
- [8] HAMILTON, D. R., On directional correlation of successive quanta, *Phys. Rev.*, 58: 122-31, 1940.



- [9] STEFFEN, R. M.; ALDER, K., Angular distribution and correlation of gamma-ray. In: HAMILTON, W.D., ed. *The electromagnetic interaction in nuclear spectroscopy*, Amsterdam, North-Holland, p. 505-582, 1975
- [10] BRADY, E. L.; DEUTSCH, M., Angular correlation of successive gamma-ray quanta, *Phys. Rev.*, 72: 870-1, 1947.
- [11] TWIN, P. J., Gamma-ray angular distribution and correlation measurement experimental methods following nuclear reactions. In: HAMILTON, W.D., ed. *The electromagnetic interaction in nuclear spectroscopy*, Amsterdam, North-Holland, 1975.
- [12] HAMILTON, W. D., Gamma-ray angular distribution and correlation measurements (I). Experimental methods using radioactive sources. In: HAMILTON, W.D., ed. *The electromagnetic interaction in nuclear spectroscopy*, Amsterdam, North-Holland, p. 645-700, 1975.
- [13] FERENTZ, M.; ROSENSWEIG, N., Table of angular correlation coefficients. In: SIEGBAHN, K., ed. *Alpha, beta and gamma-ray spectroscopy*, Amsterdam, North-Holland, v.2, p. 1689-90, 1979.
- [14] MOSZKOWSKI, S. A., Theory of multipole radiation. In: SIEGBAHN, K., ed. *Alpha, beta and gamma-ray spectroscopy*, Amsterdam, North-Holland, v2, p. 863-86, 1979.
- [15] GOERTZEL, G., Angular correlation of gamma-ray, *Phys. Rev.*, 70(11): 897-909, 1946.
- [16] BÄRG F°, D.; NEVES, R.C.; VANIN, V. R. Isa-to-CAMAC Interface. *Proceedings of the Brazilian Workshop on Nuclear Physics*, p. 422-426, Guaratinguetá, São Paulo, 1997.

- [17] BÄRG F<sup>o</sup>, D. São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Física  
(Comunicação Privada).
- [18] GOUFFON, P. *Manual do Programa Idefix*. São Paulo, Universidade de São Paulo,  
Instituto de Física, Laboratório do Acelerador Linear, 1982.
- [19] CAMP, D. R.; VAN LEHN, A. L., Finite solid-angle corrections for Ge(Li) detectors,  
*Nucl. Instr. Meth.*, 76: 192-240, 1969.
- [20] RIBAS, R. V., São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Física  
(Comunicação Privada).
- [21] GUITMARÃES FILHO, Z. O. *Medidas Precisas de Energias de Transições Gama  
em Coincidência : Espectroscopia das Séries do <sup>232</sup>U e <sup>233</sup>U*. Tese de Mestrado  
apresentada no Instituto de Física, Universidade de São Paulo, 1998.
- [22] CHEN, H.; GARDULSKI, P. L.; WIEDENBECK, M. L., Energy levels and mixing  
ratios of transitions in <sup>72</sup>Ge, *Nucl. Phys.*, A219:365-69, 1974.
- [23] MONAHAN, W. G.; ARNS, R. G., Directional correlation of gamma rays in <sup>72</sup>Ge,  
*Phys. Rev.*, 184(4): 1135-41, 1969.
- [24] MORDECHAI, S.; FORTUNE, H. T.; MIDDLETON, R.; STEPHANS, G., <sup>72</sup>Ge from  
the <sup>70</sup>Ge(t,p) reaction. *Phys. Rev.*, C19:1733-41, 1979.
- [25] ARDOUIN, D.; HANSON, D. L.; STEIN, N., Alpha-particle transfer to 0<sup>+</sup> states in  
the germanium nuclei and the role of proton pairing correlations. *Phys. Rev.*,  
C22:2253-57, 1980.
- [26] CAMP, D. C., Energy levels in <sup>72</sup>Ge from the decay of <sup>72</sup>Ga and <sup>72</sup>As. *Nucl. Phys.*,  
A121:561-91, 1968.

- [27] RESTER, A. C.; RAMAYYA, A. V.; HAMILTON, J. H.; KRMPOTIC, D., Levels in  $^{72}\text{Ge}$  populated by  $^{72}\text{Ga}$ . *Nucl. Phys.*, A162:461-80, 1971.
- [28] ARDOUIN, D.; TAMISIER, R.; BARRIER, G.; KALIFA, J.; ROTBARD, G.; VERGNES, M. Study of  $^{72}\text{Ge}$  with the  $^{71}\text{Ga}(^3\text{He},d)^{72}\text{Ge}$  reaction. *Phys. Rev.*, C11(5):1649-57, 1975.
- [29] FOURNIER, R.; KROON, J.; HSU, T. H.; HARD, B.; BALL, G. C. The neutron particle structure of the germanium isotopes. *Nucl. Phys.*, A202:1-29, 1973.
- [30] LANGE, J.; KUMAR, K.; HAMILTON, J.H., E0-E2-M1 multipole admixtures of transitions in even-even nuclei, *Rev. Mod. Phys.*, 54:119-194, 1982.
- [31] KRANE, K. S., E2/M1 multipole mixing ratios of  $2^+ \rightarrow 2^-$  gamma transitions in even-even spherical nuclei, *Phys. Rev. C*, 10(3):1197-1210, 1974.
- [32] DAVYDOV, A. S.; FILIPPOV, G. F., Rotacional states in even atomic nuclei. *Nucl. Phys.*, 8:237-249, 1958.
- [33] BHAT, M. R., Nuclear Data Sheets for A = 66. *Nucl. Data Sheets*. 61(4), 1989.
- [34] BHAT, M. R., Nuclear Data Sheets for A = 68. *Nucl. Data Sheets*. 55(1), 1988.
- [35] BHAT, M. R., Nuclear Data Sheets for A = 70. *Nucl. Data Sheets*. 51(1), 1987.
- [36] SINGH, B.; VIGGARS, D. A., Nuclear Data Sheets for A = 74. *Nucl. Data Sheets*. 51(2), 1987.
- [37] SINGH, B.; VIGGARS, D. A., Nuclear Data Sheets for A = 76. *Nucl. Data Sheets*. 42(3), 1984.

- [38] PRESTON, M. A. *Physics of the nucleus*. Reading, Mass. Addison-Wesley, 1962.
- [39] HORNYAK, W. F. *Nuclear structure*. Academic Press, 1975.
- [40] BOHR, A.; MOTTELSON, B. R. *Nuclear structure*. v. 2. W. A. Benjamin, Reading, 1975.
- [41] MARISCOTTI, M. A. J.; SCHARFF-GOLDHARBER, G.; BUCK, B.,  
Phenomenological analyses of ground-state bands in even-even nuclei. *Phys. Rev.*,  
178:1864-86, 1969.
- [42] MORAND, C.; BRUANDET, J. F.; CHAMBON, B.; DAUCHY, A.; DRAIN, D.;  
GIORNI, A.; CHAN, T. U. Niveaux de spin élevé du  $^{72}\text{Ge}$  atteints par la réaction  
 $^{70}\text{Zn}(\alpha, 2n\gamma)$  à  $E\alpha = 30$  MeV. *Nucl. Phys.*, A313:45-76, 1979.
- [43] JAHN, R.; WIENANDS, U.; WENZEL, D.; von NEUMANN-COSEL, P.,  
Systematics of nn states with high spin: A study of the  $(\alpha, ^2\text{He})$  reaction on fp shell  
nuclei. *Phys. Lett.*, 150B(5):331-34, 1985.
- [44] FIRESTONE, R. B., *Table of Isotopes CD-ROM*, Eighth Edition, Version 1.0. Wiley-  
Interscience, March 1996.
- [45] SORENSEN, R. A. Nuclear moment of inertia at high spin. *Rev. Mod. Phys.*, 45:353,  
1973.
- [46] MATSUZAKI, T.; TAKETANI, H., Band structures of  $^{76}\text{Se}$  and  $^{78}\text{Se}$ . *Nucl. Phys.*,  
A390:413-48, 1982.
- [47] DAS, T. K.; DREIZLER, R. M., Phenomenological Analysis of quasirotational  
spectra and possible evidence for higher-phonon states. *Phys. Rev. C*, 2(2):632-  
38, 1970.

- [48] HADERMANN, J.; RESTER, A. C., Two-phonon states in doubly even nuclei with  $30 \leq Z \leq 52$ . *Nucl. Phys.*, A231:120-40, 1974.
- [49] SHELINE, R. K., Vibrational states in deformed even-even nuclei., *Mod. Phys.*, 32(1):1-24, 1960.
- [50] SAKAI, M., Unified perspective of vibrational and rotational models of the nucleus., *Nucl. Phys.*, A104:301-26, 1967.



M22015



*instituto de pesquisas energéticas e nucleares*

Travessa "R", nº 400 - Cidade Universitária - Butantã  
São Paulo - CEP.: 05508-900

Tel.: (011) 816-9000 - Fax.: (011) 212-3546  
<http://www.ipen.br>

O Ipen é uma autarquia vinculada à Secretaria de Ciência, Tecnologia e Desenvolvimento Econômico do Estado de São Paulo, gerida técnica, administrativa e financeiramente pela Comissão Nacional de Energia Nuclear e associada à Universidade de São Paulo para fins de ensino de Pós-Graduação.