

2  
INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE

SÃO PAULO

CORRELAÇÃO ANGULAR GAMA-GAMA PARA TRANSIÇÕES NOS NÚCLEOS DE

$^{81}\text{Br}$  e  $^{83}\text{Br}$

R E N A T O M A T H E U S

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Grau de "Mestre na Área de Concentração em Tecnologia Nuclear Básica".

546.14  
R427c

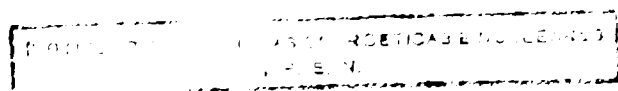
Orientador: Dr. Rajendra Narain Saxena

SÃO PAULO

1984

Que Deus maravilhoso nós temos!  
Como são grandiosos sua sabedoria, seu conhecimento e suas riquezas! Como é impossível a nós compreendermos suas decisões e seus métodos! Quem é, dentre nós, que pode conhecer a mente do Senhor? Quem é que sabe o suficiente para ser seu conselheiro e guia? E quem jamais poderia oferecer ao Senhor o bastante para persuadi-Lo a agir? Todas as coisas vêm única e exclusivamente de Deus. Tudo vive por seu poder, e tudo é para sua glória. A Ele seja a glória para todo o sempre.

Rm 11.33-36



## Agradecimentos

Ao Dr. Rajendra N. Saxena, cuja orientação neste trabalho foi segura, e que teve a compreensão e paciência necessária, nas várias fases do trabalho, deixo sinceros agradecimentos.

Aos meus pais, que deram todo apoio para a minha formação universitária, agradeço com muito carinho. À minha mãe, agradeço em especial, pela paciência e compreensão que teve, acompanhando os meus estudos diariamente.

Ao Dr. Laércio A. Vinhas, pela amizade e orientação durante parte do trabalho.

À equipe de irradiações do reator IEA-R1, e ao pessoal da proteção radiológica, que possibilitaram todas as irradiações das amostras de maneira eficiente.

Ao Manoel Tiago F.da Cruz pela valiosa ajuda na confecção de gráficos, através do computador do Laboratório de Acelerador Linear do Instituto de Física da USP.

Aos amigos da Igreja Batista do Morumbi, que apoiaram e ajudaram em algumas fases do trabalho. Em especial, agradeço à Solange G.P.Dellovo e ao Josmar E.Dellovo que fizeram a revisão dos textos, e ao Osmar R.Zago, que providenciou o acabamento final dos exemplares.

Ao José Matheus, que auxiliou na fase de datilografia dos textos e acabamento dos originais.

Ao pessoal da Divisão de Física Nuclear do IPEN, que acompanharam o desenvolvimento deste trabalho, e deram apoio no convívio diário, com compreensão e amizade.

À FAPESP, que concedeu apoio financeiro através da bolsa de mestrado no período de março.1982 a agosto.1984.

Ao IPEN-CNEN/SP que permitiu a realização deste trabalho junto ao grupo de Correlação Angular.

Ao Senhor meu Deus, que acima de todos, permitiu o desenvolvimento deste trabalho.

# CORRELAÇÃO ANGULAR GAMA-GAMA PARA TRANSIÇÕES NOS NÚCLEOS DE

$^{81}\text{Br}$  e  $^{83}\text{Br}$

Renato Mathews

## RESUMO

Medidas de correlação angular gama-gama direcional foram feitas para diversas transições gama em núcleos de  $^{81}\text{Br}$  e  $^{83}\text{Br}$  a partir do decaimento  $\beta$  do  $^{81}\text{Se}$  ( $T_{1/2} = 18,6$  minutos) e  $^{83}\text{Se}$  ( $T_{1/2} = 22,6$  minutos), respectivamente, utilizando-se um espectrômetro com detectores de Ge(Li) e Ge hiperpuro ou com Ge(Li)-NaI(Tl).

As fontes radioativas foram produzidas, irradiando-se com neutrons no reator IEA-R1, selênio metálico (natural) para obtenção de  $^{81}\text{Se}$  e selênio metálico (enriquecido a ~ 90% em  $^{82}\text{Se}$ ) para obtenção de  $^{83}\text{Se}$ .

As medidas foram realizadas para as cascatas gama 260-276 keV, 290-276 keV e 552-276 keV no  $^{81}\text{Br}$ , e as cascatas gama 225-(510)-356 keV, 510-356 keV, 572-(510)-356 keV, 718-(225)-(510)-356 keV, 1064-356 keV, 718-225 keV, 718-(225)-510 keV, 836-718 keV, 718-(225)-866 keV, 883-718 keV e 1895-799 keV no  $^{83}\text{Br}$ .

Foram determinadas as razões de mistura multipolar,  $\delta$  (E2/M1), para três transições gama no  $^{81}\text{Br}$  e onze transições gama no  $^{83}\text{Br}$ . No caso do  $^{81}\text{Br}$ , foram confirmados alguns valores de estudos anteriores. O spin e paridade da maioria dos níveis envolvidos no estudo em ambos os núcleos, também foram indicados, alguns deles confirmando os resultados anteriores.

Finalmente, são discutidos os resultados experimentais e comparadas as similaridades existentes entre os núcleos do  $^{79}\text{Br}$ ,  $^{81}\text{Br}$  e  $^{83}\text{Br}$ . Os resultados experimentais também são discutidos qualitativamente, em termos de alguns modelos nucleares que aplicam-se para descrever as propriedades dos núcleos de bromo com  $A$ -ímpar.

# ANGULAR CORRELATION GAMMA-GAMMA FOR GAMMA TRANSITIONS

IN  $^{81}\text{Br}$  AND  $^{83}\text{Br}$

Ricardo Matheus

## ABSTRACT

The directional angular correlation of coincident gamma transitions in  $^{81}\text{Br}$  and  $^{83}\text{Br}$  have been measured following the  $\beta^-$  decay of  $^{81}\text{Se}$  ( $T_{1/2}=18.6$  min) and  $^{83}\text{Se}$  ( $T_{1/2}=22.6$  min) respectively, using Ge(Li) - high purity Ge and Ge(Li)-NaI(Tl) spectrometers.

The radioactive sources were prepared by irradiating with neutrons in the IEA-R1 reactor, metallic selenium (natural) to produce  $^{81}\text{Se}$  and samples of metallic selenium enriched (to ~ 90% in  $^{82}\text{Se}$ ) to produce  $^{83}\text{Se}$ .

Measurements have been carried out for the gamma cascades 260-276 keV, 290-276 keV and 552-276 keV in  $^{81}\text{Br}$  and the gamma cascades 225-(510)-356 keV, 510-356 keV, 572-(510)-356 keV, 718-(225)-(510)-356 keV, 1064-356 keV, 718-225 keV, 718-(225)-510 keV, 836-718 keV, 718-(225)-866 keV, 883-718 keV and 1895-799 keV in  $^{83}\text{Br}$ .

The multipole mixing ratios,  $\delta$  (E2/M1), were determined for 3 gamma transitions in  $^{81}\text{Br}$  and 11 gamma transitions in  $^{83}\text{Br}$ . In the case of  $^{81}\text{Br}$  present results confirmed some of the earlier results. The spin and parity assignment were made to the majority of levels in  $^{81}\text{Br}$  and  $^{83}\text{Br}$  involved in the present study, some of them confirming the earlier results.

A comparison of some of the nuclear properties of the  $^{79}\text{Br}$ ,  $^{81}\text{Br}$  and  $^{83}\text{Br}$  is made based on the available experimental

data. The experimental results are also discussed qualitatively in terms of some nuclear models applicable for the description of the properties of odd-A bromine isotopes.

## SUMÁRIO

1. Introdução	1
2. Considerações Teóricas	4
2.1 Transições Gama	4
2.1.1 Regras de Seleção	4
2.1.2 Probabilidades de Transição	6
2.2 Correlação Angular	7
2.2.1 Correlação Angular Gama-Gama Direcional	8
2.2.2 Função Correlação Angular	12
2.2.3 Correlação Angular Tripla	14
3. Instrumentação e Análise de Dados	16
3.1 Instrumentação	16
3.1.1 Detectores	16
3.1.2 Espectrômetros para Correlação Angular Direcional	18
3.1.3 Sistema Eletrônico	20
3.2 Análise dos Dados Experimentais	22
3.2.1 Espectros de Coincidência	24
3.2.2 Cálculo dos Coeficientes de Correlação Angular e Misturas Multipolares	26
3.2.3 Testes Experimentais	29
4. Resultados	30
4.1 Núcleo do $^{81}\text{Br}$	30
4.1.1 Preparação das Amostras	31
4.1.2 Medidas de Correlação Angular Gama-Gama Direcional	32
4.1.3 Resultados Experimentais	33



**4.2 Núcleo de  $^{83}\text{Br}$  44**

**4.2.1 Preparação das Mostras 44**

**4.2.2 Medidas de Correlação Angular Gama-Gama**

**Direcional 45**

**4.2.3 Resultados Experimentais 46**

**5. Discussão 66**

**5.1 Introdução 66**

**5.2 Sistemática nos núcleos de  $^{79}\text{Br}$ ,  $^{81}\text{Br}$  e  $^{83}\text{Br}$  67**

**6. Conclusão 75**

**Referências Bibliográficas 77**

**Errata 84**

**Observações 84**

## LISTA DAS TABELAS

Tabela	Titulo	Página
1	Tipo de radiação eletromagnética com indicação de mudança, ou não de paridade.	5
2	Coefficientes de Correlação Angular para cascatas gama do núcleo do $^{81}\text{Br}$ .	39
3	Valores das razões de mistura multipolar para transições gama do $^{81}\text{Br}$ .	41
4	Coefficientes de Correlação Angular para cascatas gama do núcleo de $^{83}\text{Br}$ .	56
5	Valores das razões de mistura multipolar de transições gama do $^{83}\text{Br}$ , nas medidas realizadas em dois ângulos.	58
6	Valores das razões de mistura multipolar de transições gama do $^{83}\text{Br}$ , nas medidas realizadas em quatro ângulos.	59
7	Valores experimentais de $B(E2)$ para transições do $^{79}\text{Br}$ , obtidos por Robinson et al. <sup>56</sup>	70
8	Valores experimentais de $B(E2)$ para transições do $^{81}\text{Br}$ , obtidos por Robinson et al. <sup>57</sup>	70

## LISTA DAS FIGURAS

Figura	Título	Página
1	Representação de uma transição gama.	5
2	Representação de uma cascata gama.	9
3	(a) Esquema do espectrômetro para correlação angular. (b) Geometria de detecção para as medidas de correlação angular.	11
4	Representação de uma cascata tripla.	14
5	Espectrômetro Automático (foto).	19
6	Espectrômetro Manual (foto).	19
7	Diagrama do Sistema Eletrônico para medidas de coincidências com os detectores de Ge(Li)-NaI(Tl).	23
8	Curva de correlação angular ajustada, com os pontos experimentais, para a cascata gama 1173-1332 keV do $^{60}\text{Co}$ .	29
9	Esquema de níveis de energia do $^{81}\text{Br}$ .	34
10	Espectro direto de raios gama no decaimento do $^{81}\text{Se}$ , com detector de Ge(Li).	35
11	Espectro direto de raios gama no decaimento do $^{81}\text{Se}$ , com detector de NaI(Tl).	36
12	Espectros de coincidências gama-gama para a janela em 276 keV, com os detectores de Ge(Li)-NaI(Tl).	37

Figura	Título	Página
13	Espectro de coincidências gama-gama para a janela em 276 keV, com os detectores de Ge(Li)-HPGe.	38
14	Curvas de correlação angular ajustadas, com os pontos experimentais, para cascatas do $^{81}\text{Br}$ .	39
15	Esquema de níveis parcial do $^{81}\text{Br}$ .	43
16	Esquema de níveis de energia do $^{83}\text{Br}$ .	47
17	Espectro direto de raios gama no decaimento do $^{83}\text{Se}$ , com detector de Ge(Li).	48
18	Espectro direto de raios gama no decaimento do $^{83}\text{Se}$ , com detector de NaI(Tl).	50
19	Espectro de coincidências gama-gama para a janela em 356 keV, com os detectores de Ge(Li)-NaI(Tl).	51
20	Espectro de coincidências gama-gama para a janela em 718 keV, com os detectores de Ge(Li)-NaI(Tl).	52
21	Espectro de coincidências gama-gama para a janela em 1895 keV, com os detectores de Ge(Li)-NaI(Tl).	53
22	Espectro de coincidências gama-gama para a janela em 356 keV, com os detectores de Ge(Li)-HPGe.	54
23	Espectro de coincidências gama-gama para a janela em 718 keV, com os detectores de Ge(Li)-HPGe.	55

Figura	Título	Página
24	Curvas de correlação angular ajustadas, com os pontos experimentais, para cascatas gama do $^{83}\text{Br}$ .	57
25	Esquema de níveis parcial do $^{83}\text{Br}$ .	62
26	Comparação de níveis de baixa energia entre os núcleos de $^{79}\text{Br}$ , $^{81}\text{Br}$ e $^{83}\text{Br}$ .	73

# 1 INTRODUÇÃO

A Física Nuclear tanto teórica, quanto experimental, tem-se ocupado nos últimos anos em melhorar os modelos nucleares para explicação da estrutura nuclear. Com o avanço das condições técnicas, a física experimental tem-se beneficiado pois a eletrônica, a pesquisa e o aparecimento de novos detectores de radiação e a utilização de aceleradores e reatores, têm permitido inúmeros novos trabalhos. Do lado da física nuclear teórica, a computação tem oferecido facilidades para os cálculos envolvendo estudos de modelos nucleares.

Os estudos experimentais em Física Nuclear que determinam diversos parâmetros nucleares tais como: energia, spin e paridade dos níveis nucleares, são essenciais, não só para o conhecimento destes parâmetros para caracterização de propriedades nucleares, como também para possibilitar o aprimoramento dos estudos, com a melhoria de condições experimentais ou com investigações teóricas.

A espectroscopia nuclear apresenta diversas técnicas que são úteis para medidas de parâmetros nucleares. Uma destas técnicas é a Correlação Angular Gama-Gama, baseada na medida direcional das coincidências entre a emissão de duas radiações gama sucessivas. Esta medida possibilita a determinação de spins de níveis nucleares e de razões de mistura multipolar das transições gama.

Este trabalho apresenta medidas de correlação angular gama-gama para núcleos do  $^{81}\text{Br}$  e  $^{83}\text{Br}$  utilizando espectrômetros com detectores de Ge(Li), HPGe e NaI(Tl). As medidas envolveram diversos níveis excitados destes núcleos, populados

pelo decaimento  $\beta^-$  de respectivos isótopos de selênio.

Diversos são os estudos já realizados para isótopos do bromo com A-ímpar. Contudo poucas medidas de correlação angular gama-gama foram realizadas, pois como a meia-vida dos isótopos de selênio é curta ( $^{81}\text{Se}$ : 18 minutos,  $^{83}\text{Se}$ : 25 minutos) e como há uma relativa complexidade no espectro de energia, principalmente no caso do  $^{83}\text{Br}$ , estas medidas se tornam difíceis.

As técnicas experimentais empregadas para os estudos de níveis dos núcleos do  $^{81}\text{Br}$  e  $^{83}\text{Br}$  envolvem estudos de decaimento radioativo de isômeros de selênio (ref.: 2, 18, 22, 35, 41, 47, 48, 53, 54, 68 e 69) incluindo algumas medidas de correlação angular e de coeficientes de conversão eletrônica no caso do  $^{81}\text{Br}$ . As investigações, utilizando reações nucleares, também foram feitas para estes núcleos (ref.: 1, 3, 12, 15, 20, 28, 55, 57, 59 e 70), incluindo excitação coulombiana e transferência de partículas.

A utilização de modelos nucleares também tem sido objeto de vários estudos. Os núcleos do bromo apresentam propriedades que os tornam interessantes para investigações da sua estrutura nuclear. Os resultados experimentais obtidos pelas diversas técnicas têm permitido o delineamento de alguns modelos e têm mostrado que estes núcleos apresentam níveis de partícula única e níveis originados no acoplamento partícula - caroço (ref.: 13, 25, 32, 43, 44, 61 e 65).

O objetivo principal do presente trabalho é ampliar as informações sobre os núcleos do  $^{81}\text{Br}$  e  $^{83}\text{Br}$  através de medidas de correlação angular para diversas cascatas gama em ambos os núcleos. O núcleo de  $^{83}\text{Br}$  apresenta uma estrutura de níveis complexa com poucos valores definidos de spin e paridade e

também pouca informação sobre misturas multipolares das transições gama. Este trabalho pretende além de fornecer estas informações para alguns níveis e transições gama do  $^{83}\text{Br}$ , fazer uma comparação com outros núcleos melhor conhecidos como o  $^{79}\text{Br}$  e  $^{81}\text{Br}$ .

As possibilidades de utilização do reator nuclear e as facilidades na obtenção de amostras de selênio por reações ( $n, \gamma$ ) forneceram subsídios para a realização destas medidas de correlação angular nos núcleos do  $^{81}\text{Br}$  e  $^{83}\text{Br}$ . As medidas foram feitas para diversas cascatas gama em ambos os núcleos e permitiram a obtenção de parâmetros como spins de níveis e razões de misturas multipolares de transições.

O trabalho está apresentado em seis capítulos. A Introdução que pretendeu dar uma visão geral do estudo, inicia o trabalho. Os fundamentos teóricos sobre radiação gama e sobre correlação angular compõem o capítulo 2. A apresentação e descrição do arranjo experimental e do procedimento de análise de dados estão no capítulo 3. O capítulo 4 contém a descrição das medidas para os núcleos de  $^{81}\text{Br}$  e  $^{83}\text{Br}$  e apresenta os resultados experimentais de correlação angular em termos de spins e paridades para os níveis e misturas multipolares para as transições gama. A discussão dos resultados e comparações sistemáticas das propriedades nucleares dos isótopos  $^{79}\text{Br}$ ,  $^{81}\text{Br}$  e  $^{83}\text{Br}$  é feita no capítulo 5 e finalmente são apresentadas as conclusões no capítulo 6.



## **2** CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS

### 2.1 Transições Gama<sup>6,45,63</sup>

Todos núcleos excitados apresentam níveis que podem decair para níveis menos excitados por emissão de radiação eletromagnética espontânea. Esta radiação é conhecida como radiação gama e fica numa faixa de energia característica no espectro de radiação eletromagnética. Esta emissão gama é conhecida como transição gama entre dois níveis de energia de um núcleo excitado.

As forças nucleares são bastante intensas, e há uma grande separação entre os níveis nucleares. As transições entre estes níveis envolvem fótons com misturas multipolares e observa-se a conservação da paridade e do momento angular total. Estas leis de conservação impõem regras de seleção aos tipos de radiação emitida em qualquer transição nuclear.

O estudo da radiação gama tem representado um importante papel na Física Nuclear. Esta radiação proporciona informação sobre a energia e os números quânticos dos estados nucleares e constitui, como outras radiações do núcleo, uma ferramenta poderosa para análise dos fenômenos que ocorrem nele.

#### 2.1.1 Regras de Seleção

A conservação do momento angular e da paridade no sistema núcleo mais radiação impõe regras de seleção nas multipolaridades possíveis do raio gama emitido. As radiações eletromagnéticas podem ser classificadas pelas ordens multipolares  $L$ . Existem duas classes de radiação que diferem em paridade para cada ordem multipolar: multipolos elétricos ( $2^L$ ) chama

dos de radiação EL e multipolos magnéticos ( $2^L$ ) chamados radiação ML. A mudança de paridade do estado inicial para o estado final em que ocorre a transição para estas radiações é dada por:

$$\text{radiação EL: } \Delta\pi = (-1)^L \text{ e}$$

$$\text{radiação ML: } \Delta\pi = (-1)^{L-1}$$

onde  $\Delta\pi = +1$  indica não mudança de paridade do estado final

e  $\Delta\pi = -1$  indica mudança de paridade do estado final.

A tabela 1 mostra para três ordens multipolares, o tipo de radiação eletromagnética e a mudança ou não da paridade. Uma transição gama entre dois estados nucleares pode ser representada como na figura 1, onde o spin e paridade do estado inicial é  $I_i$  e  $\pi_i$ , e do estado final é  $I_f$  e  $\pi_f$  e a transição gama tem multipolaridade L. As regras de seleção impos-

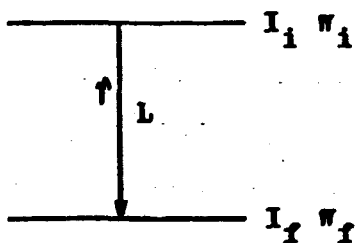


Figura 1. Representação de uma transição gama.

tas à transição gama são:

$$|I_i - I_f| \leq L \leq I_i + I_f$$

$$\Delta\pi = (-1)^L \text{ radiação EL}$$

$$\Delta\pi = (-1)^{L-1} \text{ radiação ML.}$$

Radiação Dipolo L=1	Quadrupolo L=2	Óctopolo L=3
Elétrica E1(sim)	E2(não)	E3(sim)
Magnética M1(não)	M2(sim)	M3(não)

Tabela 1. Tipo de radiação eletromagnética com indicação de mudança, ou não de paridade.

Um fato importante que ocorre para transições gama aliado às regras de seleção, é a proibição de transições entre estados nucleares  $I_i = 0$  e  $I_f = 0$ . Este fato vem da teoria do campo de radiação como consequência da propriedade de transversalidade, que não admite a presença de monopolo ( $L=0$ ).

### 2.1.2 Probabilidades de Transição

As classes de transições eletromagnéticas mostradas na seção anterior, não ocorrem para todas ordens multipolares como esperado. São observados, até agora, apenas radiação elétrica E1 a E5 e radiação magnética M1 a M4. A ocorrência misturada de radiações EL e ML, é praticamente restrita ao par E2-M1, e todos outros tipos ocorrem predominantemente puros em uma dada transição.

As intensidades destas transições eletromagnéticas, podem ser calculadas, e revelam a não ocorrência de transições com altas ordens multipolares, devido a suas intensidades pequenas, e também a não ocorrência de misturas de certas ordens multipolares pela grande diferença em suas intensidades. O cálculo da probabilidade de transição pode ser feito utilizando a teoria de perturbação dependente do tempo, e é obtida a seguinte expressão para a probabilidade de transição por unidade de tempo:

$$T = \frac{2\pi}{\hbar} \left| \langle \Psi_f | H_{int} | \Psi_i \rangle \right|^2 \frac{dN}{dE} \quad (1)$$

onde  $\Psi_i$  e  $\Psi_f$  são as autofunções do estado inicial e final do sistema não perturbado,

$H_{int}$  é a parte da hamiltoniana que representa a interação entre o campo eletromagnético e o núcleo,

$\frac{dN}{dE}$  é a densidade de estados finais do sistema.

O cálculo detalhado<sup>45</sup>, no caso do modelo de partícu-

la única, utilizando as funções de onda e a hamiltoniana na expressão (1) fornece para a probabilidade de transição, para radiação elétrica (EL):

$$\lambda(EL) = \frac{4(L+1)}{L((2L+1)!)^2} \left(\frac{3}{3+L}\right)^2 \cdot \left(\frac{E_T}{140}\right)^{2L+1} \cdot A^{2L/3} \cdot \frac{mc^2}{h} \quad (2)$$

e para radiação magnética ML:

$$\lambda(ML) = \frac{0,088(L+1)}{L((2L+1)!)^2} \left(\frac{3}{2+L}\right) \cdot \left(\frac{E_T}{140}\right)^{(2L+1)} \cdot A^{(2L-2)/3} \left(\frac{\mu_L}{2} - \frac{L}{L+1}\right)^2 \cdot \frac{mc^2}{h} \quad (3)$$

onde: E é a energia da transição gama em MeV,

$\mu_L$  é o momento de dipolo magnético do próton ( $\mu_p = 2,79 \text{ mn}$ )

e é suposto o raio nuclear R como:

$$R = 1,40 \cdot A^{1/3} \text{ fm.}$$

## 2.2 Correlação Angular

As primeiras pesquisas, que mostraram evidências sobre a existência de uma correlação angular entre as direções de emissão de radiações nucleares sucessivas foram feitas por Dunworth em 1940.<sup>19</sup> Neste ano, houve também o primeiro trabalho teórico sobre correlação angular feito por Hamilton.<sup>29</sup> Várias tentativas experimentais foram realizadas nos anos seguintes, com a finalidade de verificar esta correlação. Em 1946, Goertzel<sup>27</sup> investigou teoricamente a influência de campos extranucleares na correlação angular direcional, como tentativa de explicar os resultados negativos de várias experiências. Em 1947, Brady e Deutsch mostraram que as primeiras falhas nas experiências sobre correlação angular eram devidas à inadequação das técnicas experimentais utilizadas.<sup>7</sup>

As experiências iniciais realizadas por Brady e Deutsch, eram feitas com contadores Geiger. Com a introdução dos detectores de cintilação, houve um grande desenvolvimento nas técnicas de correlação angular a partir de 1948, como mos-

tram os trabalhos de Brady e Deutsch<sup>8,9</sup> e Metzger e Deutsch.<sup>17A2</sup>

A técnica de correlação angular direcional é hoje, bastante utilizada, em diversas áreas da Física e bem estabelecida teoricamente como discutida nos artigos de Rose e Brink,<sup>58</sup> Frauenfelder e Steffen,<sup>23</sup> Biedenbarn e Rose,<sup>4</sup> Steffen e Alder<sup>64</sup> e Gill.<sup>26</sup> Os trabalhos de Hamilton<sup>30</sup> e Twin<sup>66</sup> discutem aspectos experimentais das técnicas envolvidas nas medidas de correlação angular.

Com a utilização de detectores de alta resolução em energia, é possível hoje, estudar núcleos com complicados espectros de energia, através da técnica de correlação angular. As seções que seguem exploram um pouco este assunto teoricamente e experimentalmente.

### 2.2.1 Correlação Angular Gama-Gama Direcional

A emissão de radiação gama por uma amostra radioativa, em condições normais, é isotrópica, pois os núcleos desta amostra são orientados aleatoriamente no espaço. Como em geral a probabilidade de emissão de uma partícula ou fóton de radiação por um núcleo radioativo, depende do ângulo entre a direção de emissão e o eixo do spin nuclear, é possível obter um conjunto de núcleos que não são aleatoriamente orientados, e portanto, um padrão anisotrópico de radiação emitida. Havendo anisotropia na emissão de radiação, será possível observar uma correlação angular anisotrópica entre esta emissão.

A obtenção de um conjunto de núcleos com spins, ordenadamente orientados, pode ser feita pela colocação da amostra em local com temperatura muito baixa e com aplicação de um forte campo magnético ou gradiente de campo elétrico. Desta forma, os spins nucleares são alinhados em relação ao campo aplicado.

poê-se então medir a distribuição angular da radiação emitida em torno da direção de alinhamento.

Outro método para obtenção de distribuição angular anisotrópica da radiação emitida por uma fonte, possível apenas quando há emissão sucessiva de duas radiações, consiste na fixação da direção de emissão de uma das radiações. A observação da distribuição angular da outra radiação em relação à primeira mostra a existência de anisotropia e há uma correlação angular entre estas radiações. Isto é chamado correlação angular direcional. A teoria de correlação angular baseia-se em muitos princípios gerais de simetria, que levam à conservação do momento angular e paridade.

A emissão sucessiva de duas ou mais radiações gama é denominada cascata gama, ilustrada na figura 2, onde estão assinalados os parâmetros que caracterizam os níveis de energia (energia  $E$ , spin  $I$  e paridade  $\pi$ ) e as transições gama (multipolaridade  $L$ ). A próxima seção mostra como é possível, por in-

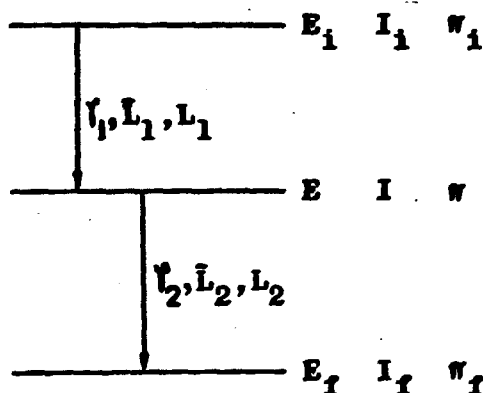


Figura 2. Representação de uma cascata gama.

termédio dos resultados das medidas de correlação angular, obter informações sobre os valores dos spins dos níveis e as

razões de misturas multipolares destas transições. Apenas com as medidas de correlação angular direcional não é possível obter informações sobre a paridade dos níveis nucleares; é necessário observar-se também a polarização (linear ou circular) das radiações emitidas, e o método denomina-se Correlação Angular com Polarização.

Existem algumas interferências que podem ser observadas na correlação angular direcional de dois raios gama, quando são emitidos em cascata. Estas interferências podem ocorrer, se a orientação do spin do estado intermediário (com valor  $I$  na figura 2) alterar-se durante o tempo em que o núcleo permanecer neste estado. Estas mudanças na orientação do spin podem ser induzidas por campos elétricos ou magnéticos internos, com origem atômica ou molecular, ou ainda, produzidas por campos externos que interagem com os momentos nucleares. Estas perturbações não são em geral significativas, desde que a vida média do nível intermediário não seja maior que aproximadamente  $10^{-10}$  segundos, e dependendo também da forma física da amostra. As fontes radioativas líquidas ou soluções diluídas apresentam interferências por perturbações desprezíveis, o mesmo fato ocorre para os cristais sólidos que apresentam uma rede cristalina cúbica.

Outro fato que deve ser observado, é quanto à veracidade da correlação angular medida. Na figura 3 está esquematizado um arranjo para a medida de correlação angular, onde  $\theta$  é o ângulo entre os detectores e pode ser variado. No entanto, as radiações emitidas pela fonte, que apresenta um tamanho finito, atingem os detectores 1 e 2 dentro de um ângulo sólido  $d\Omega_1$  e  $d\Omega_2$ , respectivamente. Portanto, o número de raios gama coincidentes medidos para um dado ângulo  $\theta$  entre os detectores, deve ser corrigido para a geometria de detecção, e para o ta-

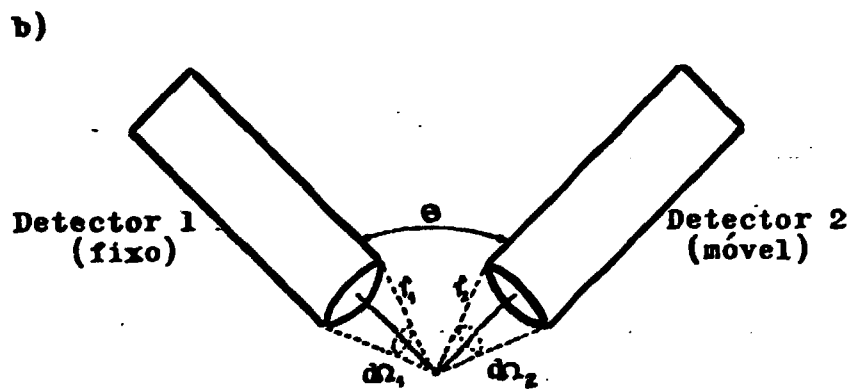
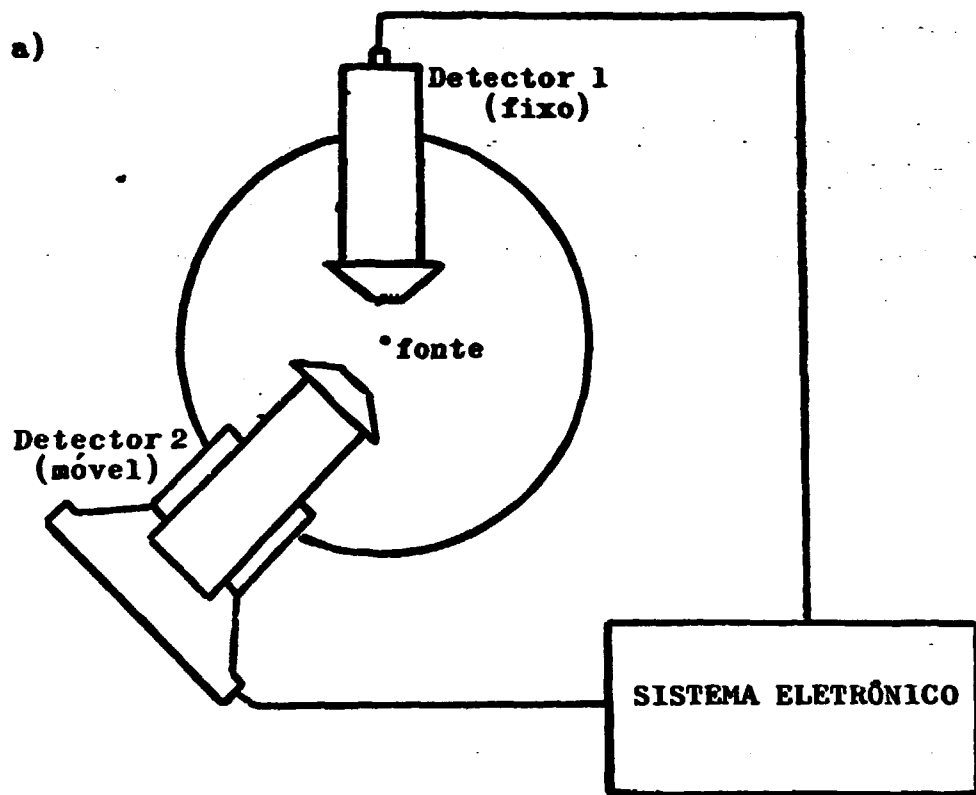


Figura 3. a)Esquema do espectrômetro para correlação angular; b)Geometria de detecção para as medidas de correlação angular.



manho finito da fonte, obtendo-se assim a correlação angular verdadeira. 5,11,33,67

### 2.2.2 Função Correlação Angular

A emissão das duas radiações gama esquematizadas na figura 2.  $\hat{I}_1$  e  $\hat{I}_2$ , é feita nas direções  $\hat{k}_1$  e  $\hat{k}_2$ , que formam entre si o ângulo  $\theta$ , e em que são posicionados os detectores (figura 3). A expressão matemática que representa a taxa de coincidências, entre as duas radiações como função do ângulo  $\theta$  e as direções de emissão, é chamada Função Correlação Angular, e é representada por  $W(\theta)$ , sendo uma expansão em polinômios de Legendre:

$$W(\theta) = \sum_k A_{kk} P_k(\cos \theta) \quad (4)$$

Quando uma distribuição angular é expressa como uma expansão em polinômios de Legendre sobre todas ordens  $k$  permitidas, pode-se ver o seguinte:

- i) a anisotropia é estabelecida pela ocorrência de ordens  $k$  maiores do que zero;
- ii) a simetria é estabelecida pela ocorrência de somente ordens pares  $k = 0, 2, 4, \dots$ , e o valor máximo para  $k$  é dado por considerações de momento angular e multipolaridades pela regra

$$k_{\max} = \text{valor mínimo entre } (2I, 2L_1, 2L_2)$$

- iii) a magnitude é essencialmente determinada pelo coeficiente de ordem zero,  $A_{00}$ , e como  $P_0 = 1$ , é usual normalizar a função  $W(\theta)$  em relação ao coeficiente  $A_{00}$ , de forma a obter a expressão:

$$W(\theta) = 1 + \sum_k A_{kk} P_k(\cos \theta), \quad k = 2, 4, \dots, k_{\max} \quad (5)$$

Em geral,  $k_{\max} = 4$  e então:

$$W(\theta) = 1 + A_{22} P_2(\cos \theta) + A_{44} P_4(\cos \theta) \quad (6)$$

Os coeficientes  $A_{kk}$  são conhecidos como coeficientes

de correlação angular, e dependem dos spins dos níveis envolvidos e das multipolaridades das transições, e podem ser escritos como:

$$A_{kk} = A_k(\tau_1) \cdot A_k(\tau_2) \quad (7)$$

onde cada coeficiente  $A_k(\tau_1)$  e  $A_k(\tau_2)$  depende somente de uma das transições e são escritos como:

$$A_k(\tau_1) = \frac{F_k(II_1 \bar{L}_1 \bar{L}_1) + (-1)^{\bar{L}_1 - L_1} 2\delta_1 F_k(II_1 \bar{L}_1 L_1) + \delta_1^2 F_k(II_1 L_1 L_1)}{(1 + \delta_1^2)} \quad (8)$$

$$A_k(\tau_2) = \frac{F_k(II_f \bar{L}_2 \bar{L}_2) + 2\delta_2 F_k(II_f \bar{L}_2 L_2) + \delta_2^2 F_k(II_f L_2 L_2)}{(1 + \delta_2^2)} \quad (9)$$

onde  $\bar{L}_1 = L_1 - 1$  e  $\bar{L}_2 = L_2 - 1$ .

Os coeficientes  $F_k$  são funções dos spins dos níveis e das multipolaridades das transições e são tabelados por Ferentz e Rosenzweig.<sup>21</sup> Os parâmetros  $\delta_1$  e  $\delta_2$  são as razões de mistura multipolar para cada transição  $\tau_1$  e  $\tau_2$  e são definidos como:

$$\delta_1 = \delta(\tau_1) = \frac{\langle I \parallel T_{L_1}^{(n)} \parallel I_1 \rangle / (2L_1 + 1)^{1/2}}{\langle I \parallel T_{\bar{L}_1}^{(n)} \parallel I_1 \rangle / (2\bar{L}_1 + 1)^{1/2}} \quad (10)$$

$$\delta_2 = \delta(\tau_2) = \frac{\langle I_f \parallel T_{L_2}^{(n)} \parallel I \rangle / (2L_2 + 1)^{1/2}}{\langle I_f \parallel T_{\bar{L}_2}^{(n)} \parallel I \rangle / (2\bar{L}_2 + 1)^{1/2}} \quad (11)$$

onde os produtos escalares são elementos de matriz reduzidos e representam as funções de onda do estado inicial (subíndice "i") e final (subíndice "f") do núcleo e  $T_L^{(n)}$  são operadores de interação multipolar, sendo que:  $\langle n \rangle = 0$  representa interação elétrica e  $\langle n \rangle = 1$  representa interação magnética,  $\bar{L}_{1,2}$  e  $\langle \bar{n} \rangle$  representam a ocorrência de multipolaridade de menor ordem nas transições  $I_1 \rightarrow I$  ou  $I \rightarrow I_f$ . Fisicamente a razão de mistura multipolar é interpretada como sendo a razão entre a intensidade

da transição de multipolaridade maior, pela intensidade da transição de multipolaridade menor:

$$\delta^2 = \frac{\text{intensidade da transição com multipolaridade } L_n}{\text{intensidade da transição com multipolaridade } \bar{L}_n} \quad (12)$$

A razão de mistura multipolar  $\delta$  pode ter seu valor com sinal positivo ou negativo. Este sinal depende da definição de fase dos elementos de matriz reduzidos. A convenção de fase adotada no cálculo dos valores de  $\delta$ , neste trabalho, corresponde àquela de Krane e Steffen.<sup>37</sup>

### 2.2.3 Correlação Angular Tripla

Quando há emissão de três raios gama em sucessão, formando uma cascata tripla, é possível obter uma relação que fornece a correlação angular entre a primeira e terceira transições da cascata. A figura 4 ilustra uma cascata tripla com os parâmetros que caracterizam os níveis nucleares e as transições gama. A transição  $\gamma_2$  não é observada pelo detector e a

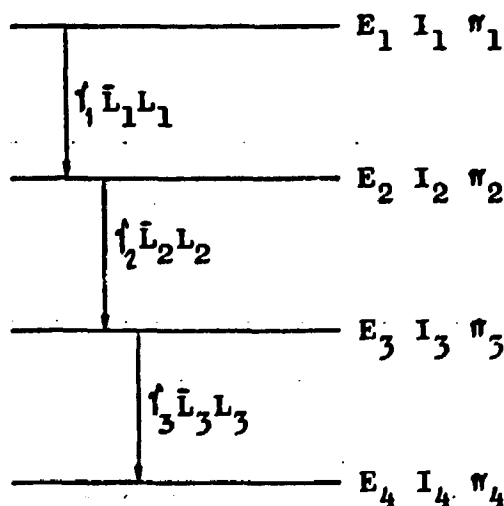


Figura 4. Representação de uma cascata tripla.

medida de correlação angular é feita para o ângulo  $\Theta$ , variável, entre as direções de emissão de  $\gamma_1$  e  $\gamma_3$ . É necessário in

Introduzir um fator na expressão da função correlação angular, que represente a distribuição angular da transição não observada, que escreve-se como  $U_k(I_2, I_3)$ :

$$U_k(I_2, I_3) = \frac{U_k(\bar{L}_2 I_2 I_3) + \sigma_{L_2}^2 U_k(L_2 I_2 I_3)}{(1 + \sigma_{L_2}^2)} \quad (13)$$

onde:  $\bar{L}$  e  $L$  representam as menores ordens multipolares ( $\bar{L}=L-1$ ) e os coeficientes:  $U_k(L_2 I_2 I_3)$ , são tabelados no artigo de Rose e Brink.<sup>58</sup> Estes coeficientes  $U_k(L_2 I_2 I_3)$  apresentam algumas propriedades, tais como:  $U_0(L_2 I_2 I_3) = 1$  e  $U_k(L_2 I_2 I_3) = U_k(L_2 I_3 I_2)$ . Desta forma, o fator de distribuição angular da transição não observada,  $U_k(I_2 I_3)$ , para  $k = 0$ , torna-se unitário, e assim, a sua introdução na função correlação angular normalizada (equação 6) torna-se facilitada:

$$W(\theta) = 1 + \sum_k A_k(\hat{r}_1) U_k(I_2 I_3) A_k(\hat{r}_3) P_k(\cos \theta), \quad k=2,4 \quad (14)$$

onde o coeficiente  $A_k$  foi escrito como na relação (7).

Esta expressão para a correlação angular numa cascata tripla, pode ser generalizada para o caso do  $i$ -ésimo raio gama não observado de uma cascata  $n$ -upla, pela simples introdução dos coeficientes  $U_k(I_1 I_{i+1})$  na equação (14) para cada raio gama não observado na cascata.

### **3** INSTRUMENTAÇÃO E ANÁLISE DE DADOS

#### **3.1 Instrumentação**

Para a realização das medidas de correlação angular nos núcleos do  $^{81}\text{Br}$  e  $^{83}\text{Br}$ , foi utilizado o espectrômetro para correlação angular composto por detectores e por um arranjo eletrônico. Nas seções que seguem, são descritas estas partes que compõem o arranjo experimental e é dada uma visão do procedimento experimental para a medida de correlação angular. Esta técnica utiliza o método de coincidências gama-gama e dois detectores de radiação compõem o espectrômetro: um móvel e outro fixo. São medidas as contagens de coincidências de raios gama de interesse para diversos ângulos entre os detectores ajustados no espectrômetro.

##### **3.1.1 Detectores**

Os detectores por cintilação de cristais de  $\text{NaI(Tl)}$  eram os únicos utilizados em medidas de correlação angular, até há algum tempo atrás. Estes detectores apresentam uma alta eficiência em contagens, porém baixa resolução em energia. Com o surgimento dos detectores semicondutores de  $\text{Ge(Li)}$  e mais recentemente os detectores de germânio intrínseco ( $\text{Ge}$  hiperpuro ou  $\text{HPGe}$ ), detectores que apresentam uma alta resolução em energia, as medidas de correlação angular passaram a utilizar combinações diferentes de detectores, não só com dois eficientes cristais de  $\text{NaI(Tl)}$ , como combinações de  $\text{NaI(Tl)}$  com  $\text{Ge(Li)}$  ou dois  $\text{Ge(Li)}$  (ou  $\text{HPGe}$ ). Estes detectores semicondutores permitiram um novo campo de pesquisas, possibilitando medidas em regiões de espectros de energia com alta densidade de picos de transições gama.

Existe porém uma desvantagem na utilização de detectores semicondutores de germânio: eles apresentam uma eficiência de detecção gama baixa, em relação aos detectores NaI(Tl). Por isso, deve-se fazer um compromisso entre a taxa de contagens e a resolução em energia, nas medidas que se deseja fazer. É muito importante ter uma alta contagem nas coincidências para os diversos ângulos de medidas, pois somente assim é possível uma boa definição da correlação angular. Porém, este alto número de contagens deve ser somente de coincidências verdadeiras, e não devidas a interferências pela baixa resolução em energia de detectores utilizados. Assim, quando se tem espectros de energia em que os fotopicos de interesse são bem isolados, livres de interferências, deve-se usar combinações de detectores de NaI(Tl) ou NaI(Tl) - Ge(Li), obtendo-se eficiências de contagens boas. Quando os fotopicos de interesse estão misturados com outros fotopicos, em intervalos menores do que a resolução dos detectores de NaI(Tl), devem ser utilizadas combinações de detectores de Ge(Li) ( ou HPGe), e para contornar a baixa eficiência de contagens, o período de medidas deve ser prolongado.

Tendo em vista estas considerações, as medidas realizadas utilizaram duas combinações de detectores, formando o espectrômetro automático e o espectrômetro manual. O espectrômetro automático é composto por um detector de Ge(Li) coaxial com  $45 \text{ cm}^3$  de volume (ORTEC), e um detector de NaI(Tl) de  $7,6 \text{ cm} \times 7,6 \text{ cm}$  (Harshaw). O espectrômetro manual é composto pelo detector de Ge(Li) coaxial de  $45 \text{ cm}^3$  de volume (ORTEC) e por um detector HPGe de  $88,8 \text{ cm}^3$  de volume (ORTEC).

A resolução dos detectores de germânio ( Ge(Li) e HPGe) foi em torno de 2,5 keV na energia de 1332 keV do  $^{60}\text{Co}$  e de aproximadamente 7% para o detector de NaI(Tl).

### 3.1.2 Espectrômetros para Correlação Angular

#### Direcional

Os espectrômetros formados pelas combinações de detectores descritas na seção anterior são montados de forma apropriada para as medidas. O espectrômetro automático<sup>60</sup> é montado sobre uma mesa circular de aço, sendo que o detector de Ge(Li) é mantido fixo numa posição desta mesa e o detector de NaI(Tl) é montado sobre uma base móvel, permitindo formar qualquer ângulo entre 90° e 270° em relação ao detector de Ge(Li), como ilustrado na figura 5. A movimentação do detector de NaI(Tl) é feita por dispositivo com motor e trava elétricos, acionados por um circuito temporizador, com intervalos de tempo programáveis de permanência em cada posição angular e por circuito de controle da mesa automática. As posições angulares do detector de NaI(Tl) utilizadas nestas medidas foram 90°, 120°, 150° e 180°. Estas posições são programáveis e um arranjo eletromecânico garante este posicionamento durante toda a experiência.

A outra combinação de detectores formando o espectrômetro manual apresenta o detector de Ge(Li) fixo na posição da mesa circular de aço e o detector de HPGe é montado de forma a ser possível a sua movimentação em relação ao detector fixo. Esta movimentação foi feita manualmente, para as posições angulares de 90° e 180°. A figura 6 ilustra o arranjo do espectrômetro manual.

O detector de Ge(Li) foi sempre utilizado para a análise, ou seja, para detectar os espectros em coincidência com a região de energia (janela) ajustada eletronicamente no detector de NaI(Tl) (espectrômetro automático) ou no detector de HPGe (espectrômetro manual). A fonte radioativa é suportada no centro da mesa circular de aço por um pino metálico que gira

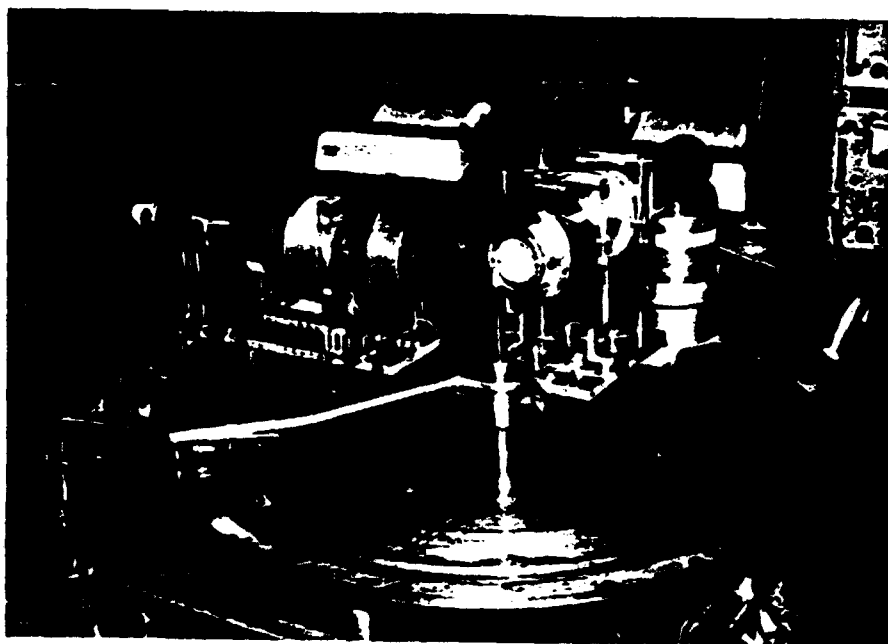


Figura 5. Espectrômetro Automático: o detector de NaI(Tl) é visto à esquerda sobre a base móvel formando  $90^\circ$  com o detector de Ge(Li). No centro da mesa está o pino que suporta a amostra radioativa.

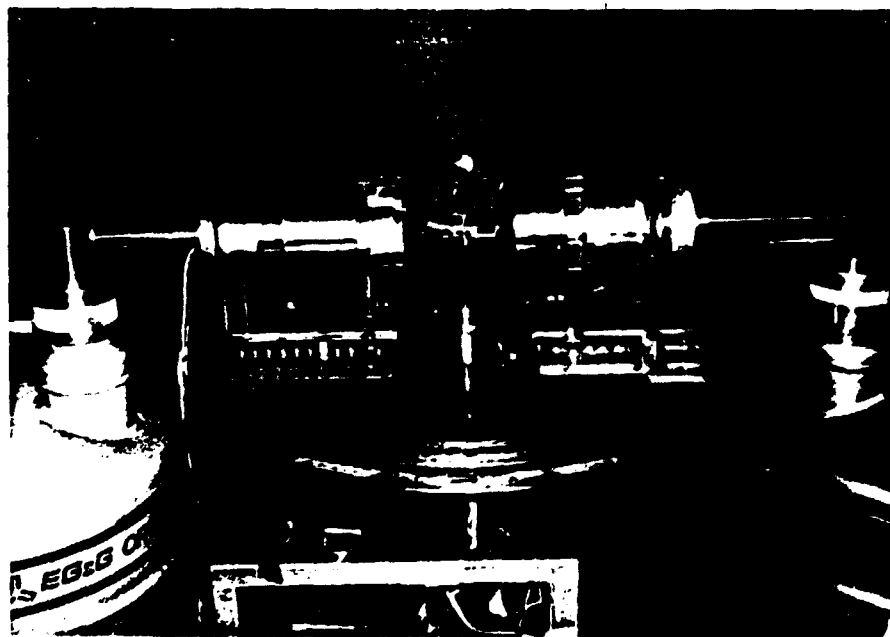


Figura 6. Espectrômetro Manual: o detector de Ge(Li) (direita) é mantido fixo e o detector de HPGe (esquerda) pode ser movimentado em torno da mesa.



em aproximadamente 4 rpm; esta rotação tem por finalidade minimizar possíveis irregularidades na distribuição de massa da fonte radioativa dentro do porta amostras, possibilitando assim uma melhor centralização da amostra radioativa em relação aos detectores. A posição da amostra é ajustável, bem como a posição dos detectores em relação à amostra. Os detectores de germânio (Ge(Li) e HPGe) são posicionados em uma distância de 7 cm da fonte e o detector de NaI(Tl) é posicionado em 10 cm da fonte; estas distâncias são adequadas para a correção devido à geometria de detecção.<sup>5,11,67</sup> Para evitar a detecção de fótons espalhados foram utilizados colimadores cônicos de chumbo em torno dos detectores e para eliminar as coincidências beta-gama foram colocados absorvedores de alumínio de um centímetro de espessura nas faces dos detectores.

### 3.1.3 Sistema Eletrônico

Para obter a informação dos pulsos produzidos nos detectores é necessário o seu processamento adequado. Inicialmente estes pulsos são processados de forma a obterem boa característica em tempo, ou seja, pulsos bem definidos e com amplitude limitada a uma faixa que normalmente é de 0 a 10 volts. Desta maneira, os pulsos de cada detector são primeiramente pré-amplificados como forma para entrarem nos amplificadores sem suas características serem alteradas. Na sequência estes pulsos são amplificados por amplificadores (ORTEC mod.572) com características especiais, que lhes fornecem boa característica em tempo. Estes amplificadores possuem saídas unipolares e bipolares para os pulsos. Os pulsos bipolares provenientes dos amplificadores são injetados diretamente em analisadores monocanais em tempo (ORTEC mod.420) para os detectores de germânio, ou passam por um estabilizador analógico (CANBERRA mod.2050)

antes de entrarem no analisador monocanal em tempo no caso do detector de NaI(Tl). Este estabilizador analógico é necessário para controlar o ganho do amplificador, cujo fator de amplificação varia com a intensidade da fonte radioativa para estes detectores, e isto para amostras com meia-vida curta é um fator a ser observado cuidadosamente.

O analisador monocanal em tempo é um módulo eletrônico que possui dupla função. Com ele é possível ajustar uma determinada faixa de amplitudes de pulsos, rejeitando pulsos menores ou maiores daquele intervalo (janela). Esta função é conhecida como discriminação diferencial. Como saída estes circuitos de discriminação fornecem um pulso lógico para cada pulso analógico que entre naquela faixa ajustada. A outra função do analisador monocanal em tempo é permitir a saída deste pulso lógico sincronizado com o cruzamento em zero do pulso bipolar. Desta forma é possível o ajuste eletrônico de regiões de energia nos detectores adequados; para o detector de análise de Ge(Li) (ver seção 3.1.2) este ajuste foi mantido aberto, ou seja, todas as amplitudes de pulsos permitidas, enquanto que para os detectores de NaI(Tl) ou HPGe foram ajustadas janelas de energia, selecionando o fotopico de interesse.

Os pulsos procedentes dos analisadores monocanais de cada detector são introduzidos em uma unidade de coincidências rápidas (ORTEC mod.414A), que fornece um pulso lógico para cada par coincidente daqueles pulsos lógicos originados pelos detectores. Esta unidade de coincidências rápidas aceita os pares de pulsos que são coincidentes dentro de uma faixa de resolução, que foi selecionada em 100 nseg. O pulso resultante na unidade de coincidências é chamado pulso de coincidências.

Para obtenção dos espectros de coincidências foi utilizado um analisador multicanal (AMC) de 4096 canais (ORTEC -

mod.6240B ), que permite apenas o registro dos pulsos analógicos provenientes do amplificador (saída unipolar) do detector de análise ( Ge(Li) ) que são simultâneos com o pulso de coincidências, que é introduzido no analisador multicanal em sua entrada para coincidências (gate). Os espectros de coincidências assim obtidos são armazenados em memórias de 1024 canais no analisador multicanal. Assim, haviam reservadas 4 memórias de 1024 canais, permitindo o armazenamento dos espectros de coincidências para até 4 ângulos entre os detectores. No caso do espectrômetro automático, estas memórias são endereçadas pela interface de comando da mesa respectivamente para cada posição do detector móvel.

Para as medidas de cada ângulo é registrado em contadores de pulsos próprios, as contagens de pulsos (saídas dos analisadores monocanais) do detector de análise e dos detectores para as janelas de energia e também as contagens dos pulsos de coincidências. Estas contagens são impressas para cada ângulo e reiniciados no próximo ângulo, e foram utilizadas na normalização das coincidências; esta normalização é necessária para corrigir a alteração da taxa das coincidências devido a fatores geométricos relacionados com a mudança de ângulo, e principalmente devido ao decaimento das amostras radioativas. A figura 7 mostra um diagrama do sistema eletrônico.

### 3.2 Análise dos Dados Experimentais

O conjunto de dados obtidos em cada medida realizada é composto por espectros de coincidências para cada ângulo. Estes espectros são convenientemente analisados de forma a se obterem os números de coincidências como função do ângulo para uma dada cascata, o que corresponde à função correlação angular experimental para aquela cascata.

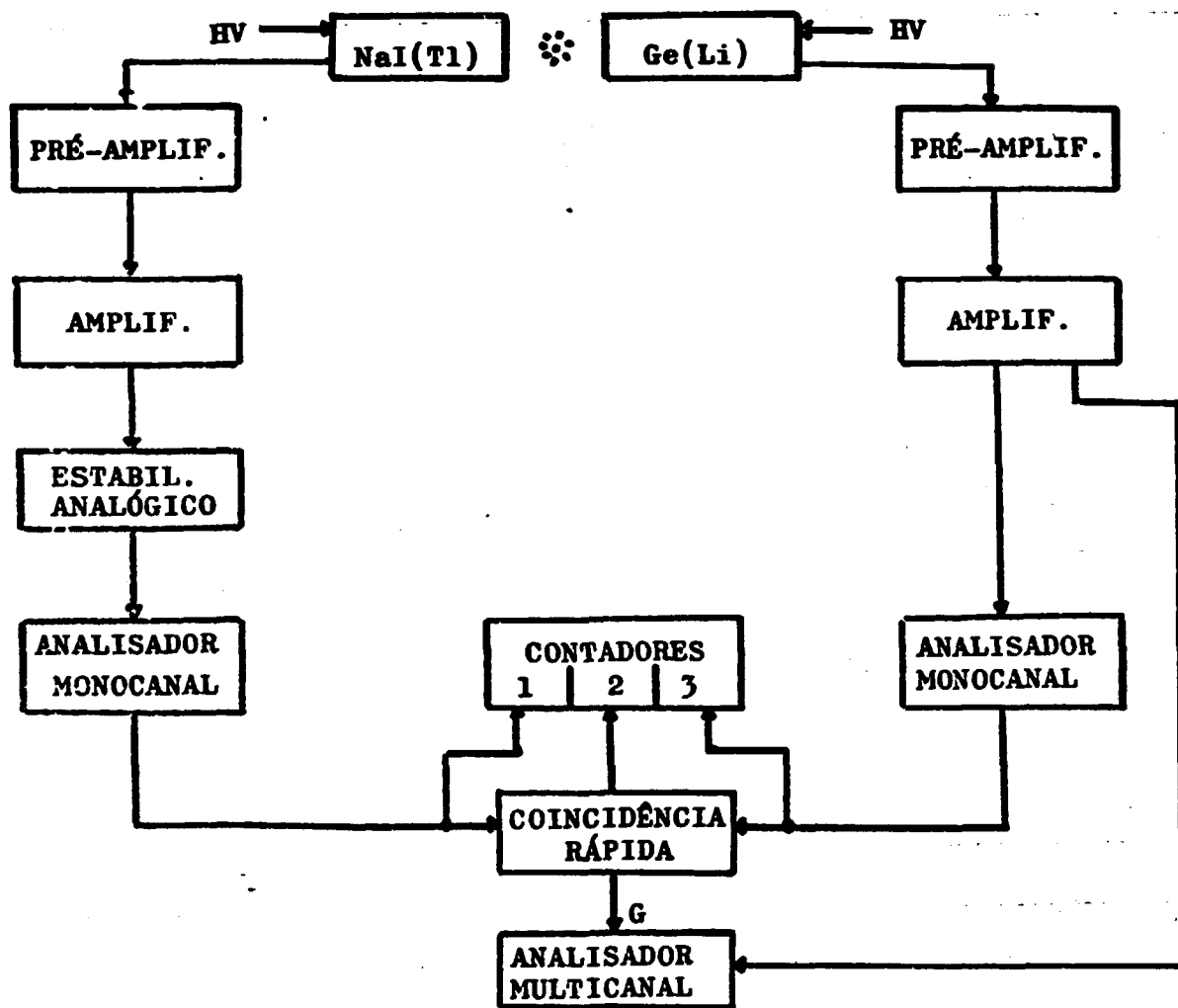


Figura 7. Diagrama do sistema eletrônico para medi-  
 das de coincidências com os detectores de Ge(Li) -  
 NaI(Tl).

### 3.2.1 Espectros de Coincidências

Nas medidas de correlação angular realizadas para os núcleos do  $^{81}\text{Br}$  e  $^{83}\text{Br}$ , foram obtidos conjuntos de espectros de coincidências para diversas janelas de energia ajustadas em fotopicos de interesse. Além destes espectros de coincidência, obteve-se outros com janelas de energia em regiões adjacentes aos fotopicos de interesse, com o objetivo de medir os espectros de coincidência, devido ao efeito Compton de raios gama em coincidência, de energia mais alta daquele fotopico de interesse. Foram obtidos também espectros de coincidências acidentais para cada janela de energia selecionada, introduzindo-se um atraso de um  $\mu\text{seg.}$  nos pulsos de um dos detectores antes da unidade de coincidências rápidas.

Os espectros foram analisados manualmente, ou seja, os fotopicos foram integrados pela soma dos canais dos picos e foram subtraídas as contagens de fundo, calculado como a média das contagens dos canais nos dois lados dos picos. Das contagens totais obtidas para cada fotopico nos espectros de coincidência foram subtraídas, quando necessário, as contagens de cada fotopico correspondente nos espectros de coincidências acidentais e nos espectros das coincidências por eventos Compton. As contagens verdadeiras foram finalmente obtidas para cada fotopico e cada ângulo, nas diversas janelas de energia medidas, como sendo:

$$W_v(\theta) = W_m(\theta) - W_{ac}(\theta) - W_{co}(\theta) \quad (15)$$

onde:

$W_v(\theta)$ : são as coincidências verdadeiras no ângulo ;

$W_m(\theta)$ : área do fotopico no espectro de coincidências sem o fundo;

$W_{ac}(\theta)$ : área do fotopico no espectro de coincidências acidentais sem o fundo;

$W_{co}(\Theta)$ : área do fotopico no espectro de coincidências Compton sem o fundo.

Todas as medidas de coincidências foram realizadas para várias amostras e os espectros de cada medida foram somados aos espectros da medida anterior, e isto foi feito até ser obtido um número razoável de contagens de coincidências para os diversos fotopicos. As medidas de coincidências acidentais e coincidências Compton foram normalizadas em relação às coincidências do fotopico, antes de serem subtraídas da área do fotopico ( $W_m(\Theta)$ ). Supondo que foram feitas  $n$  medidas numa dada janela de energia, em cada ângulo há:

$$W_t(\Theta) = \sum_{i=1}^n W_{v_i}(\Theta) \quad (16)$$

sendo  $W_t(\Theta)$  as coincidências totais no ângulo  $\Theta$  para o fotopico de energia  $E$ . A normalização destas coincidências totais em relação ao decaimento da fonte radioativa, foi feita considerando-se as contagens simples (obtidas diretamente na saída dos analisadores monocanais conforme a seção 3.1.3) das janelas de energia dos fotopicos de interesse, ou em alguma janela de energia auxiliar em fotopicos livres de qualquer interferência por parte de raios gama de outros núcleos, presentes em pequena quantidade na amostra, que não interferiam nos espectros de coincidências. Obtem-se para estas contagens simples das janelas de energia ( $C_s(\Theta)$ ) o seguinte:

$$C_{st}(\Theta) = \sum_{i=1}^n C_{si}(\Theta) \quad (17)$$

sendo  $C_{st}(\Theta)$  as contagens simples totais para o ângulo  $\Theta$ . Assim, a normalização para as contagens de coincidências totais em relação às menores contagens  $C_{st}(\Theta)$  que correspondam nestas medidas ao  $C_{st}(180^\circ)$ , é dado por:

$$W_{exp}(\Theta) = W_t(\Theta) \cdot \frac{C_{st}(180^\circ)}{C_{st}(\Theta)} \quad (18)$$

onde  $W_{\text{exp}}(\Theta)$  representa as contagens de coincidências experimentais finais para o ângulo  $\Theta$  do fotopico de energia E. O erro de  $W_{\text{exp}}(\Theta)$  é o erro estatístico dado pela raiz quadrada das contagens. Este erro pode ser reduzido à seguinte expressão:

$$\epsilon(\Theta) = \sqrt{W_{\text{exp}}(\Theta) + C_f(\Theta)} \quad (19)$$

onde  $C_f(\Theta)$  são as contagens devido ao fundo.

### 3.2.2 Cálculo dos Coeficientes de Correlação Angular e Misturas Multipolares

Os valores  $W_{\text{exp}}(\Theta)$  representam a função correlação angular para a cascata gama e podem então ser ajustados à função  $W(\Theta)$  dada pela equação 6:

$$W(\Theta) = 1 + A_{22}P_2(\cos \Theta) + A_{44}P_4(\cos \Theta) \quad (20)$$

Este ajuste é feito utilizando-se a razão  $W_{\text{exp}}(\Theta)/W_{\text{exp}}(90^\circ)$  para o  $W(\Theta)$  experimental. O ajuste é somente possível, quando há quatro ou mais ângulos medidos. Neste caso, é obtido um conjunto de equações, e um ajuste por mínimos quadrados fornece os valores dos parâmetros  $A_{22}$  e  $A_{44}$  com os respectivos erros.

No caso em que há apenas dois ângulos de medida ( $90^\circ$  e  $180^\circ$ ), pode-se calcular unicamente o parâmetro  $A_{22}$  por meio da equação:

$$A_{22} = \frac{2 (W_{\text{exp}}(90^\circ) - W_{\text{exp}}(180^\circ))}{2W_{\text{exp}}(90^\circ) + W_{\text{exp}}(180^\circ)} \quad (21)$$

Estes coeficientes  $A_{kk}$  devem ser corrigidos devido aos efeitos da geometria finita dos detectores (conforme a seção 2.2.1) segundo a relação:

$$A_{kk} = \frac{A_{kk}^{\text{exp}}}{Q_{kk}} \quad (22)$$

onde  $Q_{kk} = Q_k(1) \cdot Q_k(2)$ , sendo que  $Q_k(1)$  e  $Q_k(2)$  são os fato-

res de correção para os detectores 1 e 2 respectivamente. Estes fatores de correção são tabelados em função do tipo de detector, da energia e da distância na referência<sup>67</sup> para os detectores de NaI(Tl), e nas referências<sup>5,11</sup> para os detectores de Ge(Li) e HPGe.

Com os valores de  $A_{22}$  e  $A_{44}$  pode-se calcular as razões de mistura multipolar  $\delta$ , por meio das seguintes expressões vistas na seção 2.2.2 (equações 8 e 9):

$$A_k(\tau_1) = \frac{F_k(I I_1 \bar{L}_1 \bar{L}_1) + (-1)^{\bar{L}_1 - L_1} 2d_1 F_k(I I_1 \bar{L}_1 L_1) + \delta_1^2 F_k(I I_1 L_1 L_1)}{(1 + \delta_1^2)} \quad (23)$$

$$A_k(\tau_2) = \frac{F_k(I I_2 \bar{L}_2 \bar{L}_2) + 2d_2 F_k(I I_2 \bar{L}_2 L_2) + \delta_2^2 F_k(I I_2 L_2 L_2)}{(1 + \delta_2^2)} \quad (24)$$

$$e \quad A_{kk} = A_k(\tau_1) \cdot A_k(\tau_2) \quad (25)$$

para uma cascata simples,  $\tau_1$  e  $\tau_2$  representando a primeira e segunda transições da cascata. Para uma cascata tripla este cálculo é feito utilizando a relação (ver seção 2.2.3):

$$A_{kk} = A_k(\tau_1) \cdot U_k(I_2 I_3) \cdot A_k(\tau_3) \quad (26)$$

e os coeficientes  $U_k$  propiciam o cálculo dos  $A_{kk}$  para cascatas triplas, quádruplas, etc, e são tabelados, conforme discutido na seção 2.2.3.

Os coeficientes  $F_k$  também são tabelados (ver seção 2.2.2) e dependem dos spins e das multipolaridades das transições. Supondo estes spins conhecidos, as únicas incógnitas nas equações 20 e 21 são as razões de mistura multipolar  $\delta_1$  e  $\delta_2$ .

O cálculo destas razões de mistura multipolar pode ser simples, desde que se conheça  $\delta_1$  ou  $\delta_2$  e baseie-se num algoritmo de substituição e teste que compõe um programa de computador. Seja  $\delta_2$  o valor conhecido; então é possível calcular o coeficiente  $A_k(\tau_2)$  (equação 24). Com este coeficiente substituído na relação (25), juntamente com a expressão para  $A_k(\tau_1)$  (equação 23), pode-se variar  $\delta_1$  no intervalo  $[-10^{30}, 10^{30}]$  (in-



tervalo discreto com um total de 75 valores) e para cada valor de  $A_{kk}^{teo}$  obtido, pode-se calcular por meio da equação 20, o valor da função correlação angular  $w^{teo}(\Theta)$  e assim obter o valor de  $\chi^2$ , definido como:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^m \left[ \frac{w^{teo}(\Theta_i) - w^{exp}(\Theta_i)}{\Gamma(\Theta_i)} \right]^2 \quad (27)$$

onde  $m$  é o número de ângulos utilizados. O valor ( ou par de valores ) de  $\delta_1$  que fornecer o menor  $\chi^2$  corresponde ao valor procurado.

No caso de serem desconhecidos ambos os valores  $\delta_1$  e  $\delta_2$ , o algoritmo prolonga-se, repetindo o procedimento de substituição para os dois valores de  $\delta$ , no intervalo discreto  $(-10^{30}, 10^{30})$ . É dado um valor inicial para  $\delta_1$  e varia-se  $\delta_2$  em todo intervalo de valores, calculando-se em cada passo os valores da função correlação angular teórica e do  $\chi^2$ ; atribui-se então um novo valor para  $\delta_1$  e repete-se a variação para  $\delta_2$ . Para cada passo de  $\delta_1$ , determina-se o valor mínimo de  $\chi^2$  e o correspondente valor de  $\delta_2$  (ou valores de  $\delta_2$ ). Ao final de toda variação em  $\delta_1$ , uma inspeção nos valores de  $\chi^2$  mostra o valor mínimo e o correspondente valor de  $\delta_2$ . O inverso deste procedimento também é realizado, com a variação primária em  $\delta_2$  e variação secundária em  $\delta_1$ , e os resultados finais de ambos procedimentos são comparados e obtidos os valores em melhor acordo entre si.

Nos casos em que há apenas o coeficiente  $A_{22}$  e um dos valores de  $\delta$  conhecidos, as expressões 23 e 24 para  $k = 2$  se reduzem a uma equação do segundo grau em  $\delta$  e dois valores de  $\delta$  são obtidos. Aqui foi suposto o coeficiente  $A_{44}$  como sendo nulo.

### 3.2.3 Testes Experimentais

Antes do início das medidas foram verificados o funcionamento do espectrômetro e do sistema eletrônico por meio de uma experiência cujos resultados são bem conhecidos. Foi escolhido o núcleo do  $^{60}\text{Ni}$  e medida a correlação angular da cascata gama 1173-1332 keV deste núcleo.<sup>39</sup> Os spins dos níveis e as multipolaridades das transições são bem conhecidos teoricamente, e portanto, têm-se os valores  $A_{kk}$  teóricos que são:

$$A_{22} = 0,102 \quad \text{e} \quad A_{44} = 0,009$$

Os resultados do teste experimental para o espectrômetro automático são:

$$A_{22} = 0,107 \pm 0,007$$

$$A_{44} = 0,010 \pm 0,012$$

que estão em concordância com os valores teóricos. Na figura 8 está o gráfico da função correlação angular para esta cascata, com os pontos experimentais e a curva ajustada. Para o espectrômetro manual com os detectores de Ge(Li) e HPGe, os testes também foram satisfatórios.

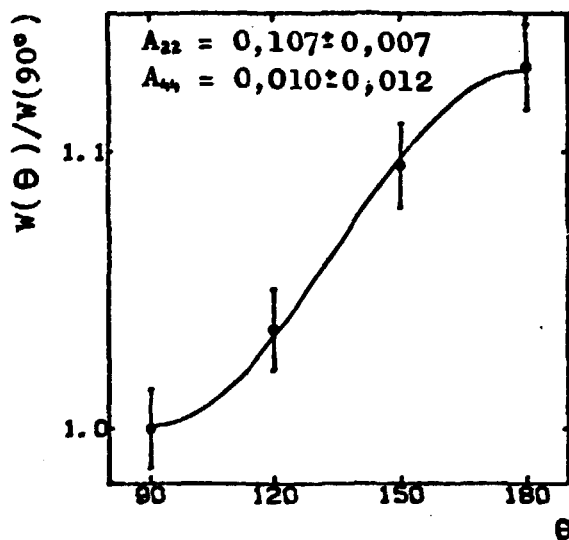


Figura 8. Curva de correlação angular ajustada, com os pontos experimentais, para a cascata gama 1173-1332 keV do  $^{60}\text{Co}$ .

## **4** RESULTADOS

### 4.1 Núcleo do $^{81}\text{Br}$

Diversas técnicas experimentais e alguns estudos envolvendo modelos nucleares têm sido dedicados ao estudo dos níveis do  $^{81}\text{Br}$ . As técnicas experimentais envolvem estudos de decaimento radioativo de isômeros do  $^{81}\text{Se}$  e trabalhos utilizando reações nucleares que populam níveis do  $^{81}\text{Br}$ , destacando-se a excitação coulombiana e transferência de partículas.

Os estudos de decaimento radioativo que populam níveis do  $^{81}\text{Br}$  foram feitos por Prawirosoehardjo,<sup>53</sup> Ythier et al.,<sup>68</sup> Rao e Fink,<sup>54</sup> Zoller e Walters<sup>69</sup> e Dorikens et al.,<sup>18</sup> Medidas de coeficiente de conversão eletrônica no decaimento de núcleos de  $^{81}\text{Se}$  foram feitas por Nainan.<sup>48</sup> Arya<sup>2</sup> realizou medidas de correlação angular gama-gama, para a cascata 290 - 276 keV do  $^{81}\text{Br}$  e Muminov et al.<sup>47</sup> também realizaram medidas de correlação angular gama-gama, para as cascatas 290-276 keV e 552-276 keV do  $^{81}\text{Br}$ . Christiansen et al.<sup>14</sup> realizaram medidas de fator g de estados isoméricos do  $^{81}\text{Br}$ .

Entre as investigações utilizando reações nucleares, Goodman e Schardt<sup>28</sup> estudaram estados metaestáveis no  $^{81}\text{Br}$  por meio da reação ( $p, \uparrow$ ). Um estudo dos níveis de energia do  $^{81}\text{Br}$  foi feito por Barnard et al.<sup>3</sup>, utilizando a reação ( $n, n' \uparrow$ ) em amostras de bromo natural. Medidas de excitação coulombiana para o  $^{81}\text{Br}$  foram feitas por Andreev et al.,<sup>1</sup> Salomon e Hojvat,<sup>59</sup> Robinson et al.<sup>57</sup> e Cottrell.<sup>15</sup> A reação de transferência de partículas ( $^3\text{He}, d$ ) alimentando níveis do  $^{81}\text{Br}$  foi utilizada por Evans e Selove<sup>20</sup> e por Zumbro et al..<sup>70</sup> A correlação angular tripla em reações nucleares foi utilizada por Robinson et al.<sup>57</sup> e Chirt et al.,<sup>12</sup> no núcleo do  $^{81}\text{Br}$ . Nesta técnica, o feixe de partículas é um dos três eventos, e os

outros dois são raios gama de uma cascata ou partícula e raio gama.<sup>55</sup>

Os estudos teóricos para este núcleo e nesta região de massa têm sido feitos por diversos autores como Scholz e Malik,<sup>61</sup> Stewart e Castel,<sup>65</sup> Houdayer et al.,<sup>32</sup> Mitroshin et al.,<sup>44</sup> Chopra,<sup>13</sup> Mitroshin e Nemashkalo<sup>43</sup> e Funke et al..<sup>25</sup>

Estes estudos compreendem os mais recentes trabalhos dirigidos ao núcleo do  $^{81}\text{Br}$ . A seguir será descrita a preparação das amostras, as medidas realizadas e os resultados obtidos para o núcleo do  $^{81}\text{Br}$ .

#### 4.1.1 Preparação das Amostras

A população de estados excitados do  $^{81}\text{Br}$  foi feita pelo núcleo do  $^{81}\text{Se}$  radioativo, que por decaimento beta alimenta aqueles estados. A meia-vida do  $^{81}\text{Se}$  é  $T_{1/2} = 18,6$  min. e o  $^{81}\text{Br}$  é estável. A obtenção de fontes de  $^{81}\text{Se}$  foi através de reação  $(n, \gamma)$  no isótopo  $^{80}\text{Se}$  (o material utilizado nas irradiações foi selênio natural cuja proporção isotópica para o  $^{80}\text{Se}$  é de cerca de 50%). Foi utilizado um fluxo de aproximadamente  $10^{13}$  n/cm<sup>2</sup>s do reator IEA-R1 (2 MW, tipo piscina) do IPEN.

O selênio é um elemento típico, semi-metal e possui uma estrutura cristalina hexagonal em cadeia. Esta estrutura cristalina não é propícia para medidas de correlação angular, devido às interferências que podem ser introduzidas (ver seção 2.2.1). Mas como a meia-vida da maioria dos estados excitados é menor que  $10^{-10}$  s (com exceção do nível a 536 keV) estas interferências não são significativas.

As irradiações das amostras de selênio foram feitas com aproximadamente 10 mg de selênio metálico, empacotado em um envólucro de polietileno, por um período de 10 minutos. Após o período de irradiação, eram aguardados cerca de 10 minu

tos. A seguir o selênio radioativo era transferido do envólucro de polietileno para um porta amostras especial de lucite, e levado para o espectrômetro de medidas de correlação angular. O selênio radioativo após ter sido usado nas medidas de correlação angular, não era utilizado novamente e era preparada nova amostra.

#### 4.1.2 Medidas de Correlação Angular Gama-Gama Direcional

As medidas de correlação angular foram realizadas com os espectrômetros descritos na seção 3.1.2 que são: o espectrômetro automático ( composto pelos detectores de Ge(Li) e NaI(Tl) ) e o espectrômetro manual ( composto pelos detectores de Ge(Li) e HPGe ). Estas medidas compreenderam uma única janela de energia em ambos os espectrômetros. Esta janela foi ajustada em 276 keV e foram obtidas as coincidências gamas para duas cascatas gama no espectrômetro automático ( medidas feitas em 4 ângulos ):

552 - 276 keV e 290 - 276 keV

e três cascatas gama no espectrômetro manual ( medidas feitas em 2 ângulos):

552 - 276 keV, 290 - 276 keV e 260 - 276 keV.

Cada amostra de selênio era medida por cerca de 40 a 60 minutos, com a mudança da posição angular dos detectores em cada 5 minutos. Foram feitas em média três amostras por dia e os espectros de coincidências obtidos de cada amostra eram acumulados na memória do analisador multicanal e diariamente impressos. As contagens simples para a normalização de cada amostra foram também adquiridos para a análise posterior.

#### 4.1.3 Resultados Experimentais

Com base nos trabalhos de Zoller e Walters,<sup>69</sup> Dori kens et al.<sup>18</sup> e Lederer,<sup>39</sup> a figura 9 mostra o esquema de ní - veis de energia do  $^{81}\text{Br}$ , incluindo valores de energia, spin e paridade dos níveis, logft das transições beta e intensidades das transições gama. Nesta figura, estão assinalados os pos síveis valores de spin e paridade baseados nos estudos de de - caimento beta.

A figura 10 mostra o espectro direto obtido com o de tector de Ge(Li) e a figura 11 mostra o espectro direto obtido com o detector de NaI(Tl). O espectro de coincidências obtido para a janela de 276 keV no espectrômetro automático está na figura 12 e no espectrômetro manual está na figura 13.

Os dados de coincidência obtidos, que representam a correlação angular, foram ajustados para a função correlação angular ( expressão 20 da seção 3.2.1):

$$W(\Theta) = 1 + A_{22}P_2(\cos \Theta) + A_{44}P_4(\cos \Theta)$$

para obter os coeficientes  $A_{22}$  e  $A_{44}$  para o espectrômetro auto mático e na expressão 21 (seção 3.2.1) para calcular o valor de  $A_{22}$  para medidas realizadas com o espectrômetro manual:

$$A_{22} = \frac{2 \{ W_{\text{exp}}(90^\circ) - W_{\text{exp}}(180^\circ) \}}{2W_{\text{exp}}(90^\circ) + W_{\text{exp}}(180^\circ)}$$

A tabela 2 apresenta estes coeficientes para as cas - catas gama e a figura 14 mostra as curvas ajustadas da função correlação angular  $W(\Theta)$  com os pontos experimentais. A tabela 2 apresenta também os resultados para os coeficientes  $A_{22}$  e  $A_{44}$  obtidos por outros autores.

A análise dos coeficientes  $A_{kk}$  em termos da razão de misturas multipolares  $\delta(E2/M1)$  para as transições com as se - quências de spin mais prováveis, permitiu algumas afirmações. A tabela 3 apresenta estes resultados para cada cascata, com a sequência de spin , transição misturada e valor do  $\delta(E2/M1)$  pa

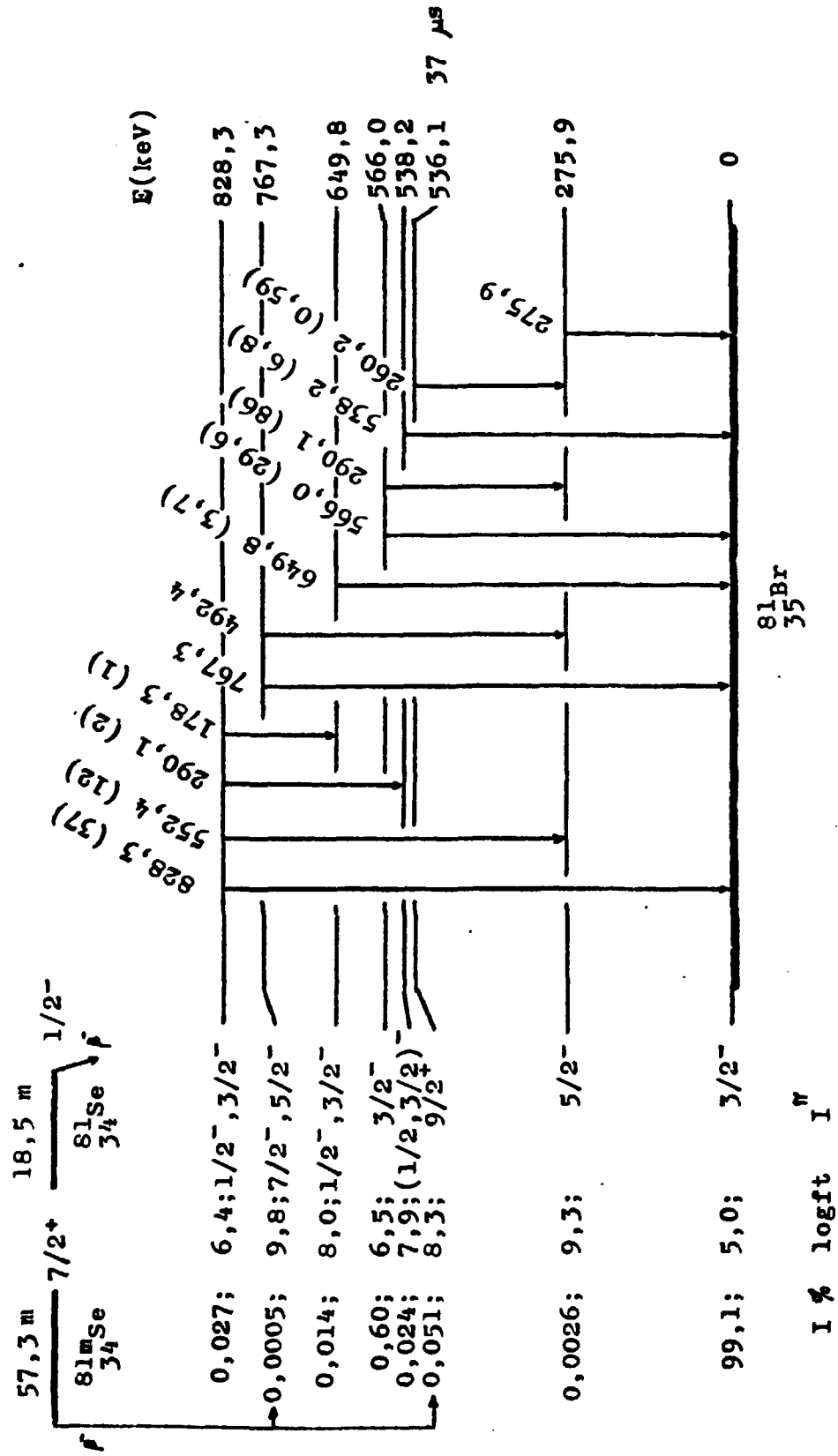


Figura 9. Esquema de níveis de energia do  $^{81}\text{Br}$ . 59, 69

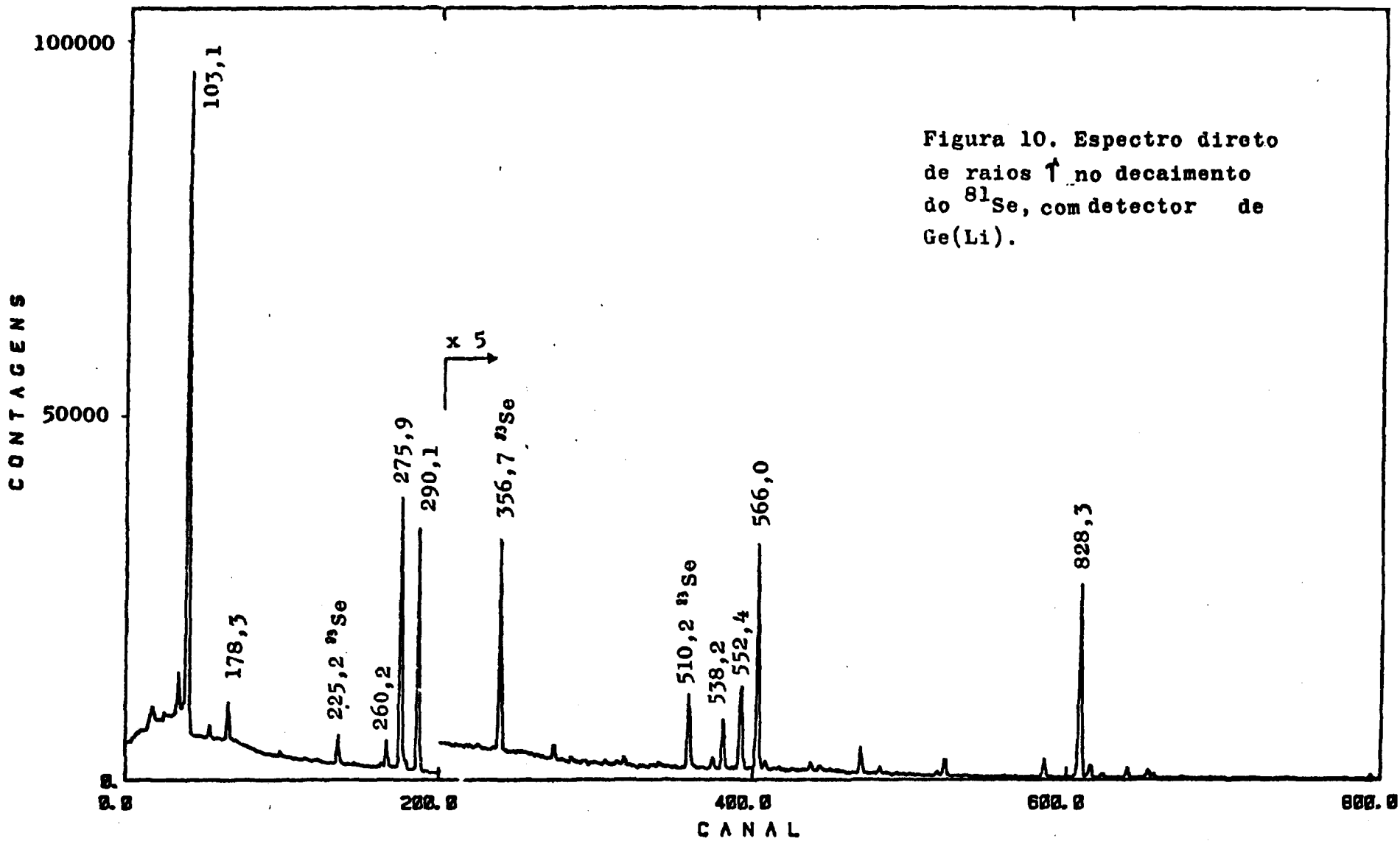


Figura 10. Espectro direto de raios  $\gamma$  no decaimento do  $^{81}\text{Se}$ , com detector de Ge(Li).



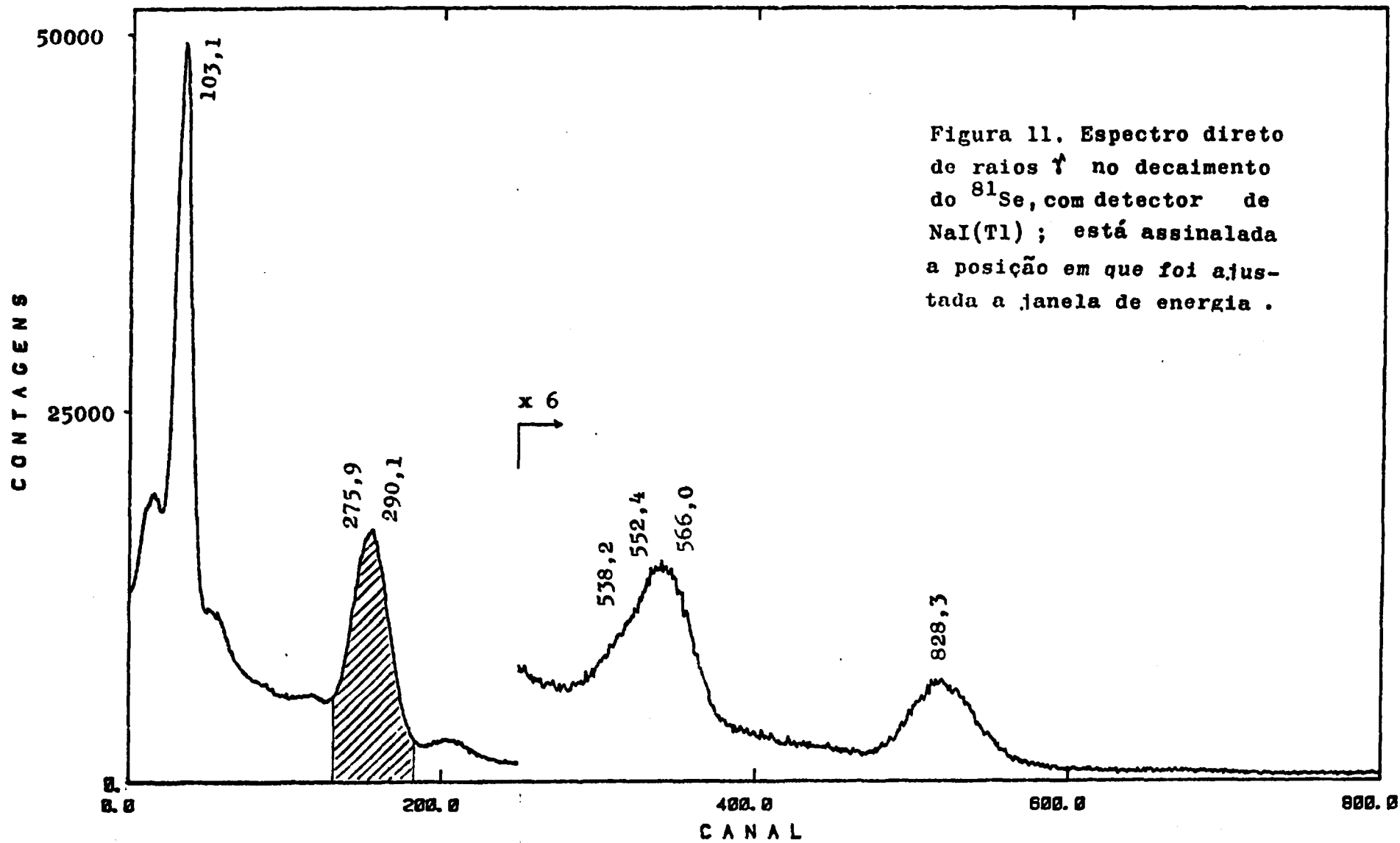


Figura 11. Espectro direto de raios  $\gamma$  no decaimento do  $^{81}\text{Se}$ , com detector de NaI(Tl); está assinalada a posição em que foi ajustada a janela de energia.

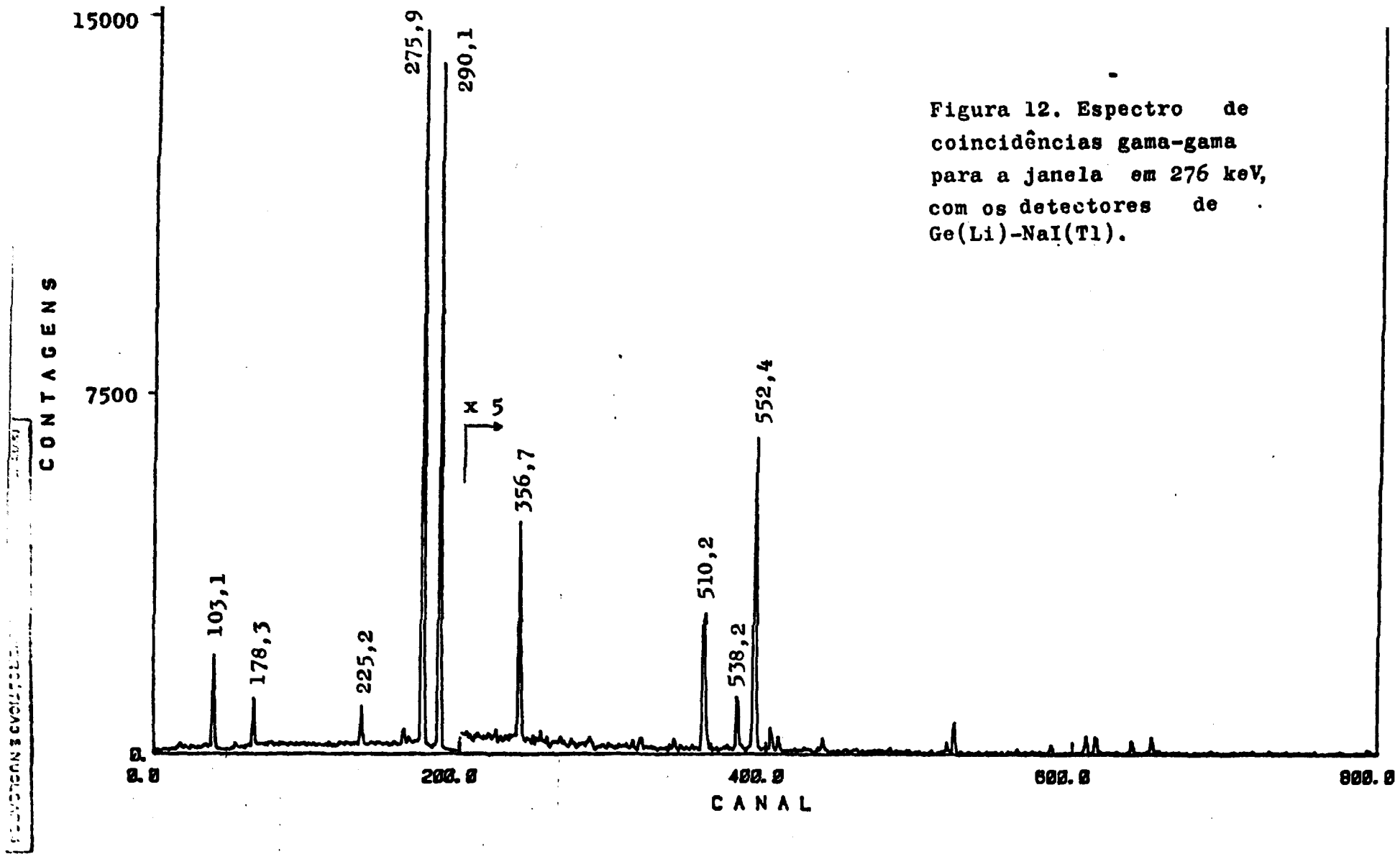


Figura 12. Espectro de coincidências gama-gama para a janela em 276 keV, com os detectores de Ge(Li)-NaI(Tl).

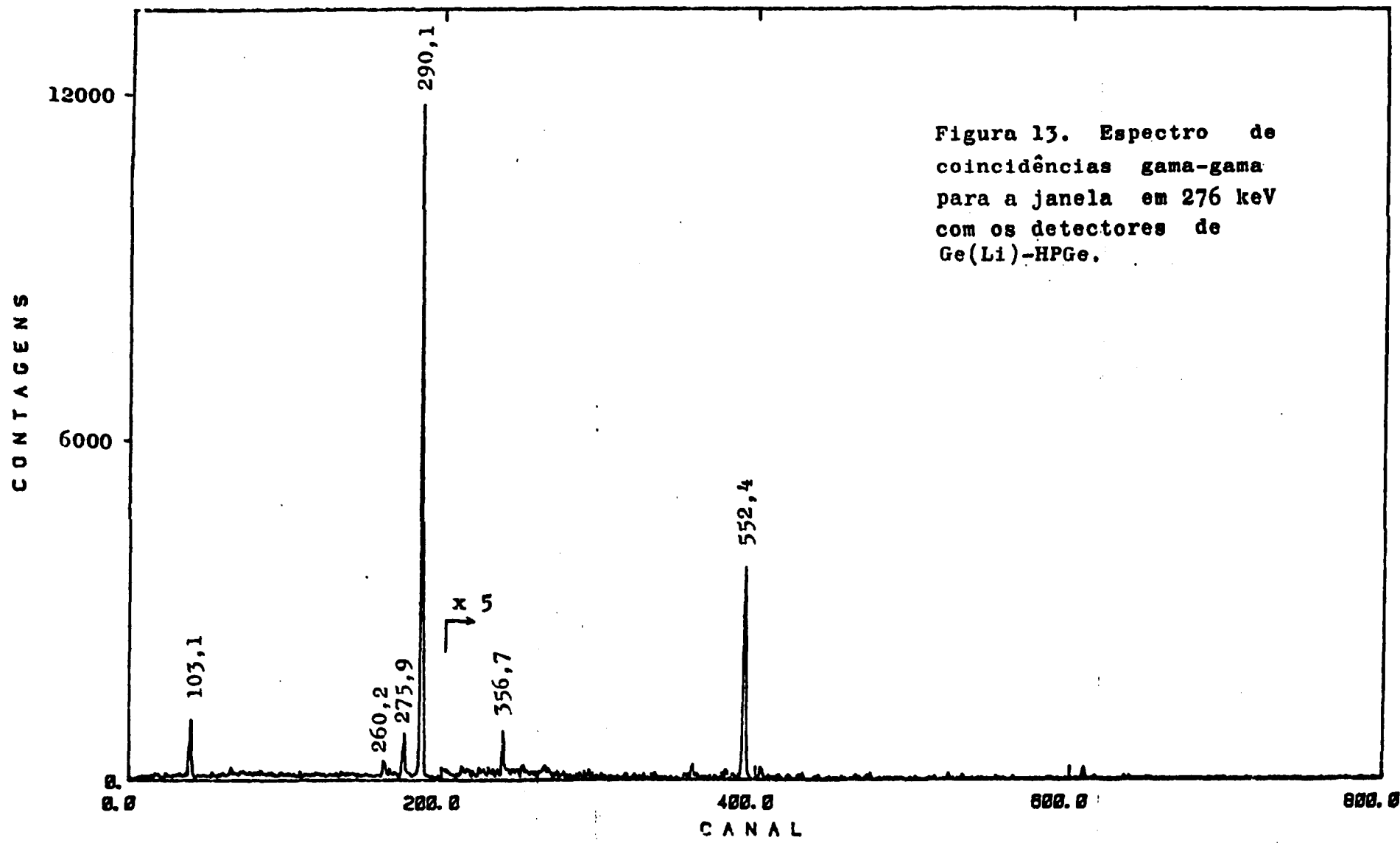


Figura 13. Espectro de coincidências gama-gama para a janela em 276 keV com os detectores de Ge(Li)-HPGe.

Cascata Gama (keV)	$A_{22}$	$A_{44}$
260-276	$0,032 \pm 0,049^a$	
290-276	$0,015 \pm 0,010$ $0,005 \pm 0,009^a$ $0,050 \pm 0,035^b$ $0,060 \pm 0,009^c$	$-0,019 \pm 0,014$ $0,031 \pm 0,005^b$ $0,014 \pm 0,014^c$
552-276	$0,012 \pm 0,034$ $0,064 \pm 0,029^a$ $-0,182 \pm 0,027^c$	$-0,040 \pm 0,055$ $-0,02 \pm 0,05^c$

Tabela 2. Coeficientes de Correlação Angular para o núcleo do  $^{81}\text{Br}$ ; a. medidas realizadas em dois ângulos; b. referência<sup>2</sup>; c. referência<sup>47</sup>.

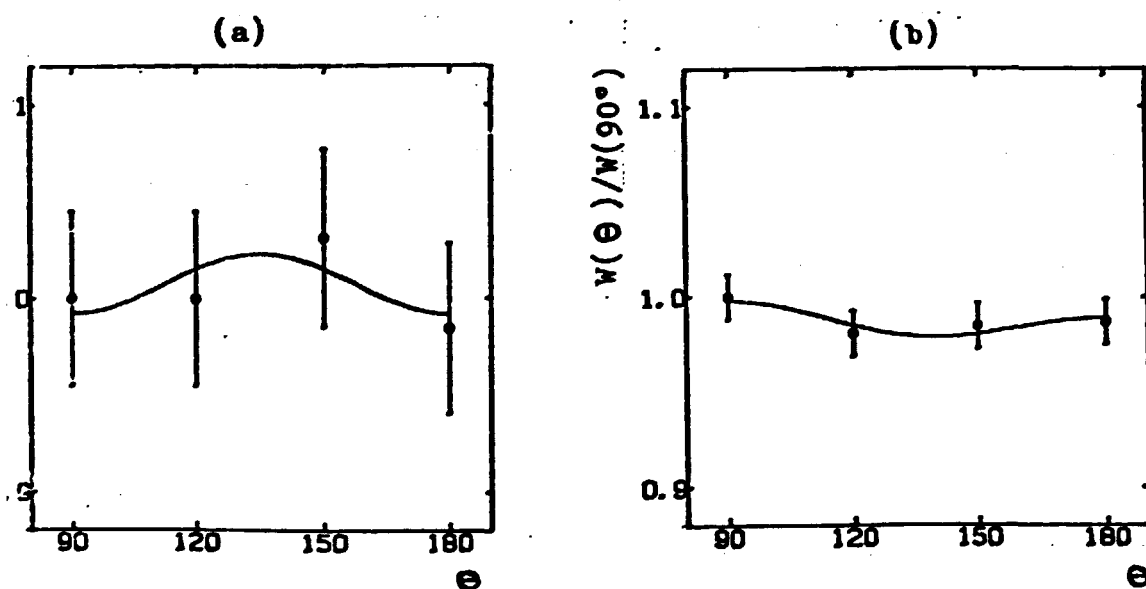


Figura 14. Curvas de correlação angular ajustadas, com os pontos experimentais, para cascatas do  $^{81}\text{Br}$ . (a) Cascata 276-290 keV; (b) Cascata 552-276 keV.

ra cada transição gama e também valores obtidos por outros autores. A figura 15 mostra um esquema de níveis do  $^{81}\text{Br}$  onde aparecem apenas os níveis e transições estudados, com o valor de spin dos níveis, conforme este estudo indicou. Nesta análise, foram utilizados os resultados que foram obtidos com o espectrômetro de 4 ângulos (excessão para a cascata 260-276 keV). A seguir está analisado, individualmente, cada nível excitado estudado.

Nível Fundamental. O spin e paridade do estado fundamental do  $^{81}\text{Br}$  é  $3/2^-$ . Isto é observado para o spin e paridade do nível fundamental dos núcleos do bromo vizinhos com A-impar ( $^{75,77,79}\text{Br}$ ) que também é  $3/2^-$ . É um nível fortemente alimentado pelo decaimento  $\beta^-$  do  $^{81}\text{Se}$ , com  $\log ft = 5,0$ ,<sup>69</sup> valor consistente com a indicação  $I^\pi = 3/2^-$  para este nível.

Nível a 276 keV. Este nível é fracamente alimentado pelo decaimento  $\beta^-$  do nível fundamental do  $^{81}\text{Se}$  ( $I^\pi = 1/2^-$ ), com  $\log ft \geq 9,3$ <sup>69</sup> que é consistente com  $I^\pi = 5/2^-$  do nível. As cascatas gama 290-276 keV, 552-276 keV e 260-276 keV proporcionaram medidas de correlação angular e foi possível calcular a razão de mistura multipolar para a transição gama 276 keV. Apesar dos dados de correlação angular permitirem mais do que um valor para o  $\delta(E2/M1)$  nesta transição, uma comparação com os dados de coeficiente de conversão eletrônica obtidos por Nainan<sup>48</sup> e excitação coulombiana obtidos por Robinson et al.<sup>57</sup> mostram que para a transição 276 keV há um caráter predominante de dipolo magnético (M1) e inspecionando a tabela 3, obtêm-se o valor (médio) de  $\delta(276) = 0,226 \pm 0,009$ . A tabela 3 mostra ainda o valor de  $\delta(276)$  obtido por Arya.<sup>2</sup>

Nível a 536 keV. Este nível é alimentado no decaimento  $\beta^-$  do nível a 103,1 keV do  $^{81}\text{Se}$  ( $I^\pi = 7/2^+$ ) tendo  $\log ft = 8,3$ <sup>69</sup> que possibilita os seguintes valores de  $I^\pi$  para este nível:  $5/2^+$ ,  $7/2^+$  ou  $9/2^+$ . Pelo fato deste ser um nível com meia

Cascata(keV)	Sequência de Spin	Trans. Mist.	$\delta$ (E2/M1)
260-276	$9/2(2)5/2(1,2)3/2$	276	$0,29 \pm 0,14$
290-276	$3/2(1,2)5/2(1,2)3/2$	276	$-5,79 \pm 0,50$ ou $0,220 \pm 0,010$ $\pm 1,732^a$ $\pm (0,44 \pm 0,14)^b$ $0,085 \pm 0,022^c$ ou $-4,8 \pm 0,5^c$
		290	$-0,250 \pm 0,012$ ou $1,24 \pm 0,50$ $0,274 \pm 0,021^a$ $\pm (1,4 \pm 0,4)^b$ $-0,07 \pm 0,09^c$ ou $(4,5 \pm 3,3)^c$ $\pm (0,27 \pm 0,01)^d$ $0,85 \pm 0,30^e$
552-276	$3/2(1,2)5/2(1,2)3/2$	276	$-9,8 \pm 1,5$ ou $0,205 \pm 0,054$
		552	$0,0014 \pm 0,15$ ou $-0,205 \pm 0,054$ $\pm (2,53 \pm 0,50)^d$ $0,32 \pm 0,20^e$ ou $1,6 \pm 0,5^e$

Tabela 3. Valores das razões de mistura multipolar para transições gama do  $^{81}\text{Br}$ ; a: referência<sup>2</sup>; b: referência<sup>48</sup>; c: referência<sup>57</sup>; d: referência<sup>47</sup>; e: referência<sup>12</sup>.

vida relativamente longa ( $T_{1/2} = 37 \mu\text{s}$ ), e como são observados níveis semelhantes em isótopos vizinhos do bromo, é favorecido o valor  $I^\pi = 9/2^+$ .<sup>69</sup> Desta forma, a transição gama 260 keV para o nível  $5/2^-$  a 276 keV apresenta um caráter quadrupolo magnético (M2) puro. A correlação angular observada na cascata 260-276 keV forneceu um par de valores para a razão de mistura multipolar da transição gama a 276 keV, que também contribuíram para a indicação do valor de  $\delta(276)$ , como já discutido.

Nível a 566 keV. Este é um nível alimentado pelo decaimento  $\beta^-$  do estado fundamental do  $^{81}\text{Se}$  ( $I^\pi = 1/2^-$ ) com valor de  $\log ft = 6,5$ ,<sup>69</sup> que é consistente com os seguintes valores de spin e paridade para o nível:  $1/2^-$  ou  $3/2^-$ . As medidas de correlação angular na cascata gama 290-276 keV permitiram calcular os valores  $\delta(E2/M1)$  para a transição gama 290 keV. A possibilidade  $I^\pi = 1/2^-$  para este nível foi rejeitada, devido à porcentagem alta ( $\sim 10\%$ ) de octupolo magnético (M3) com quadrupolo elétrico (E2), que daria para a transição 290 keV que é inadmissível. Com o valor de  $I^\pi = 3/2^-$ , somente o valor de  $\delta(290) = 1,24 \pm 0,50$  é compatível com os resultados de Nainan,<sup>48</sup> Robinson et al.<sup>57</sup> e de Chirt et al..<sup>12</sup>

Nível a 828 keV. Este também é um nível alimentado pelo decaimento  $\beta^-$  do estado fundamental do  $^{81}\text{Se}$  ( $I^\pi = 1/2^-$ ) tendo  $\log ft = 6,8$ ,<sup>69</sup> que é consistente com uma transição permitida.<sup>69</sup> Este nível pode assumir então  $I^\pi = 1/2^-$  ou  $3/2^-$ . A cascata 552-276 keV, que inicia neste nível, apresenta então duas seqüências de spin possíveis:  $1/2^- - 5/2^- - 3/2^-$  e  $3/2^- - 5/2^- - 3/2^-$ . A primeira seqüência fornece porcentagem alta ( $\sim 10\%$ ) de octupolo magnético (M3), com quadrupolo elétrico (E2), para a transição gama 552 keV, que não é admissível. Assim, o valor  $I^\pi = 3/2^-$  para este nível é favorecido e os resultados de  $\delta(E2/M1)$  obtidos estão na tabela 3, não havendo maneira para escolher um entre aqueles valores de  $\delta(552)$ .

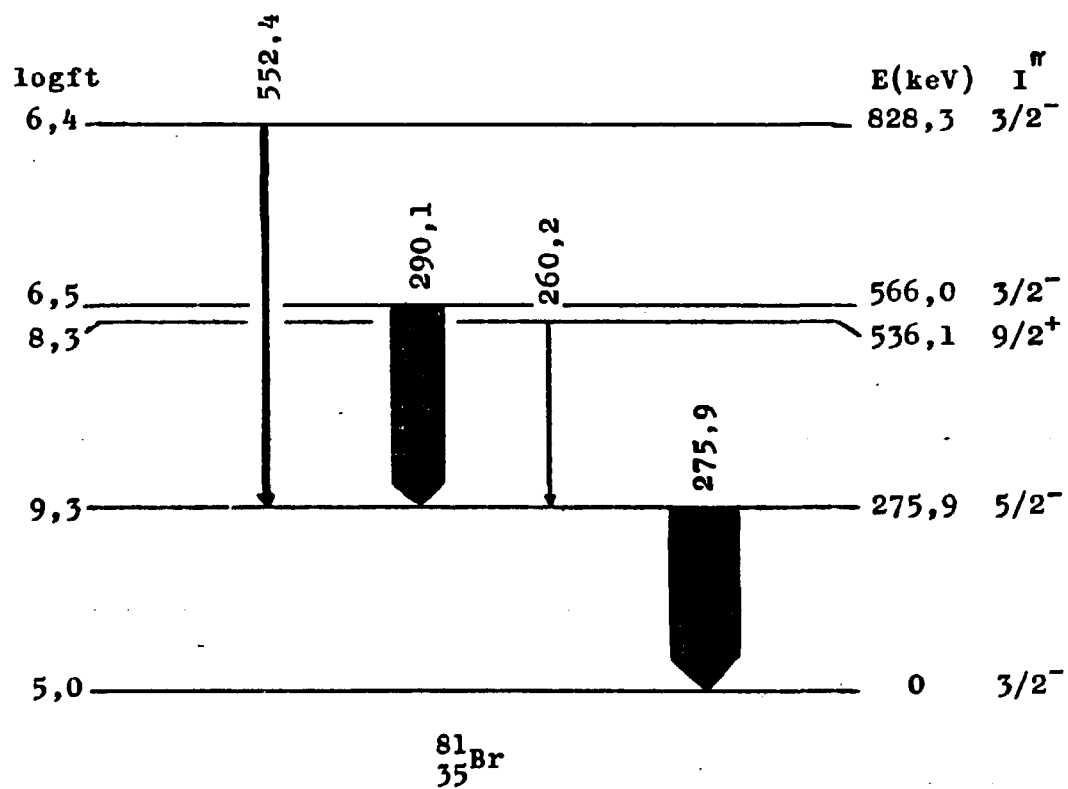
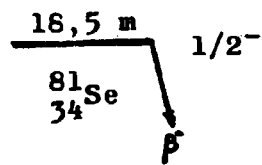


Figura 15. Esquema de níveis parcial do  $81\text{Br}$ .  
 Estão assinalados apenas os níveis e transi-  
 ções de interesse, com os valores de spin e  
 paridade consistentes com os presentes resul-  
 tados.



## 4.2 Núcleo do $^{83}\text{Br}$

A maioria das informações referentes à estrutura de níveis do  $^{83}\text{Br}$  vêm do decaimento radioativo de isômeros do  $^{83}\text{Se}$ . Marlow e Waggoner,<sup>41</sup> Schussler,<sup>62</sup> Fettweis e Sadasivan<sup>22</sup> e Kracíkova et al.<sup>35,36</sup> realizaram estudos de decaimento radioativo no  $^{83}\text{Se}$ , estabelecendo o esquema de níveis para o  $^{83}\text{Br}$ . Medidas de correlação angular realizadas por Muminov et al.<sup>46</sup> nas cascatas 718-225 keV, 225-510 keV e 510-356 keV utilizando detectores de NaI(Tl), não apresentam muita confiabilidade, devido à baixa resolução em energia dos detectores utilizados e à complexidade do espectro do  $^{83}\text{Br}$ .

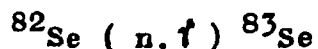
A população de níveis do  $^{83}\text{Br}$  por reações nucleares também foi realizado. Bucurescu et al.<sup>10</sup> utilizaram a reação  $(\alpha, p)$  e Zumbro et al.<sup>70</sup> utilizaram a reação  $(^3\text{He}, d)$  em diversos núcleos do bromo, incluindo o  $^{83}\text{Br}$ .

Os estudos teóricos de estados excitados do  $^{83}\text{Br}$  foram realizados por Scholz e Malik,<sup>61</sup> Houdayer et al.<sup>32</sup> e por Mitroshin et al..<sup>44</sup>

A seguir, é apresentado o procedimento de preparação das amostras, as medidas realizadas e os resultados para o núcleo de  $^{83}\text{Br}$ .

### 4.2.1 Preparação das Amostras

A obtenção dos níveis excitados do  $^{83}\text{Br}$  foi feita pelo decaimento  $\beta^-$  do  $^{83}\text{Se}$ , que tem  $T_{1/2} = 22,6$  minutos. As fontes de  $^{83}\text{Se}$  foram obtidas através da reação:



A irradiação com neutrons foi feita no fluxo de  $\sim 10^{13} \text{ n/cm}^2 \text{ s}$  do reator IEA-R1, e o material utilizado para ser irradiado, foi selênio metálico, enriquecido em  $\sim 90\%$  no isótopo  $^{82}\text{Se}$ . As características estruturais do elemento selênio já foram discutidas na seção 4.1.1. O núcleo do  $^{83}\text{Br}$  não é estável, tendo  $T_{1/2}$

2,4 horas.

As amostras de selênio utilizadas, foram lacradas num tubo de sílica, com a massa de 4 mg de selênio em cada tubo (foram preparadas quatro amostras desta maneira). As irradiações de cada amostra foram feitas num período de 25 minutos, e eram aguardados cerca de 20 minutos antes de ser levada ao espectrômetro para correlação angular. As medidas foram efetuadas, com estas amostras lacradas nos tubos de sílica, e foram reutilizadas, ou seja, foi feito um ciclo, com as quatro amostras disponíveis, de forma que ao ser irradiada a quarta amostra, a próxima irradiação seria com a primeira amostra, e assim por diante.

#### 4.2.2 Medidas de Correlação Angular Gama-Gama Direcional

Os espectrômetros automático e manual foram utilizados nas medidas de correlação angular no núcleo do  $^{83}\text{Br}$ . Estas medidas foram feitas com o espectrômetro automático, em três janelas de energia, nos fotopicos de 356 keV, 718 keV e 1895 keV. Devido à complexidade do espectro deste núcleo, possuindo muitos fotopicos próximos entre si, não foi possível, em alguns casos, fazer as correções, através do detector de NaI(Tl), necessárias nos espectros, devido às coincidências Compton. Assim, foram aproveitados apenas os dados de alguns fotopicos, em que a contribuição de coincidências Compton era mínima ou inexistia. Estes dados correspondem às seguintes cascatas:

para a janela 356 keV-: 1064-356 keV

para a janela 718 keV-: 718-(225)-866 keV

836-718 keV

883-718 keV

e para a janela 1895 keV-: 1895-799 keV.

Para o espectrômetro manual, as medidas foram realizadas, para as janelas de energia de 356 keV e 718 keV. Com a

alta resolução do detector de HPGe (em que eram ajustadas as janelas), foi possível fazer as devidas correções nas coincidências, e foram aproveitadas as seguintes cascatas:

para a janela 356 keV-: 510-356 keV

225-(510)-356 keV

718-(225)-(510)-356 keV

572-(510)-356 keV

1064-356 keV

e para a janela 718 keV-: 718-(225)-510 keV

718-225 keV

836-718 keV

883-718 keV

Foram medidas no total onze cascatas diferentes.

As amostras, após irradiadas, eram medidas por cerca de 2 a 3 meias-vidas do  $^{83}\text{Se}$  (aproximadamente 40 a 60 minutos). Os detectores móveis permaneciam por 5 minutos, em cada posição angular. Em média foram irradiadas 3 amostras por dia. Os espectros de coincidências, acumulados nas memórias do analisador multicanal, eram impressos ao final de cada dia e guardados para a análise, juntamente com as contagens simples para a normalização. A quantidade total de irradiações foi em torno de 250, parte medidas no espectrômetro automático, e parte medidas no espectrômetro manual.

#### 4.2.3 Resultados Experimentais

Serão discutidos os resultados experimentais para o núcleo do  $^{83}\text{Br}$ , em termos dos spins dos níveis, e razões de mistura multipolar das transições gama. A figura 16 mostra o esquema de níveis de energia, com base nos estudos de Fettweis e Sadasivan<sup>22</sup> e Kracíkova et al.,<sup>35</sup> e estão assinaladas as energias, spins e paridades dos níveis, valores de  $\log ft$  e energias e intensidades das transições gama.

A figura 17 mostra o espectro direto do  $^{83}\text{Br}$ , obtido



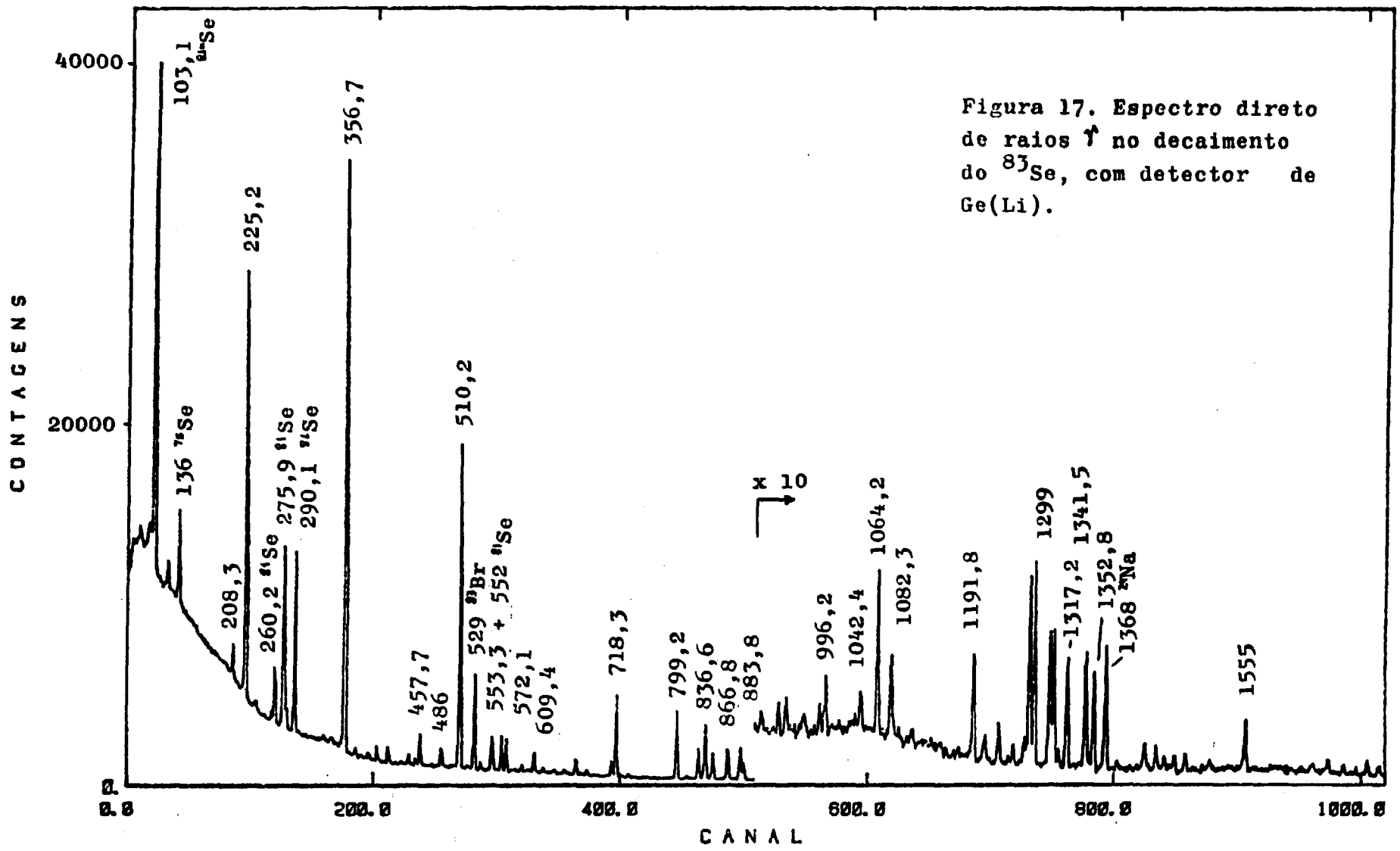


Figura 17. Espectro direto de raios  $\gamma$  no decaimento do  $^{83}\text{Se}$ , com detector de Ge(Li).

com o detector de Ge(Li), e a figura 18 mostra o espectro direto, obtido com o detector de NaI(Tl). Os espectros de coincidências, obtidos com os detectores de Ge(Li)-NaI(Tl), para as janelas de 356 keV, 718 keV e 1895 keV, estão nas figuras 19, 20 e 21, respectivamente, e os espectros de coincidências, obtidos com os detectores de Ge(Li)-HPGe, para as janelas de 356 keV e 718 keV, estão nas figuras 22 e 23, respectivamente.

A tabela 4, mostra os coeficientes de correlação angular determinados para as medidas realizadas, com o espectrômetro automático e manual. A figura 24, mostra as curvas ajustadas da função correlação angular  $W(\Theta)$ , para as medidas realizadas com 4 ângulos nas diversas cascatas gama. As tabelas 5 e 6, mostram as cascatas gama, com as respectivas sequências de spin prováveis, e  $\delta(E2/M1)$  para as medidas efetuadas com o espectrômetro manual e espectrômetro automático, respectivamente. Deve ser feita uma consideração sobre os resultados destas tabelas. Como foi visto na seção 3.2.2, medidas realizadas com 4 ângulos, possibilitam a obtenção dos coeficientes  $A_{22}$  e  $A_{44}$ , enquanto que medidas com 2 ângulos, permitem apenas obter o coeficiente  $A_{22}$ . Como nestas medidas do  $^{83}\text{Br}$ , existem diversas cascatas gama obtidas com 2 ângulos (espectrômetro manual) e várias transições gama são comuns em cascatas obtidas no espectrômetro automático, os cálculos das razões de mistura multipolar, não podem ser feitos separadamente para os dois conjuntos de dados. Como foi visto, estes cálculos de  $\delta(E2/M1)$  são feitos de maneiras diferentes, levando em conta a existência ou não do coeficiente  $A_{44}$ . Na verdade, foi considerado nulo o coeficiente  $A_{44}$ , para o caso das medidas de dois ângulos e esta aproximação foi bastante razoável, pois alguns resultados se mostraram como esperado com os critérios de escolha de melhor ajuste aos dados de correlação angular e de admissibilidade de misturas multipolares.

O procedimento para cálculo dos valores de  $\delta(E2/M1)$  obedeceu uma certa ordem, para se poder obter o maior número

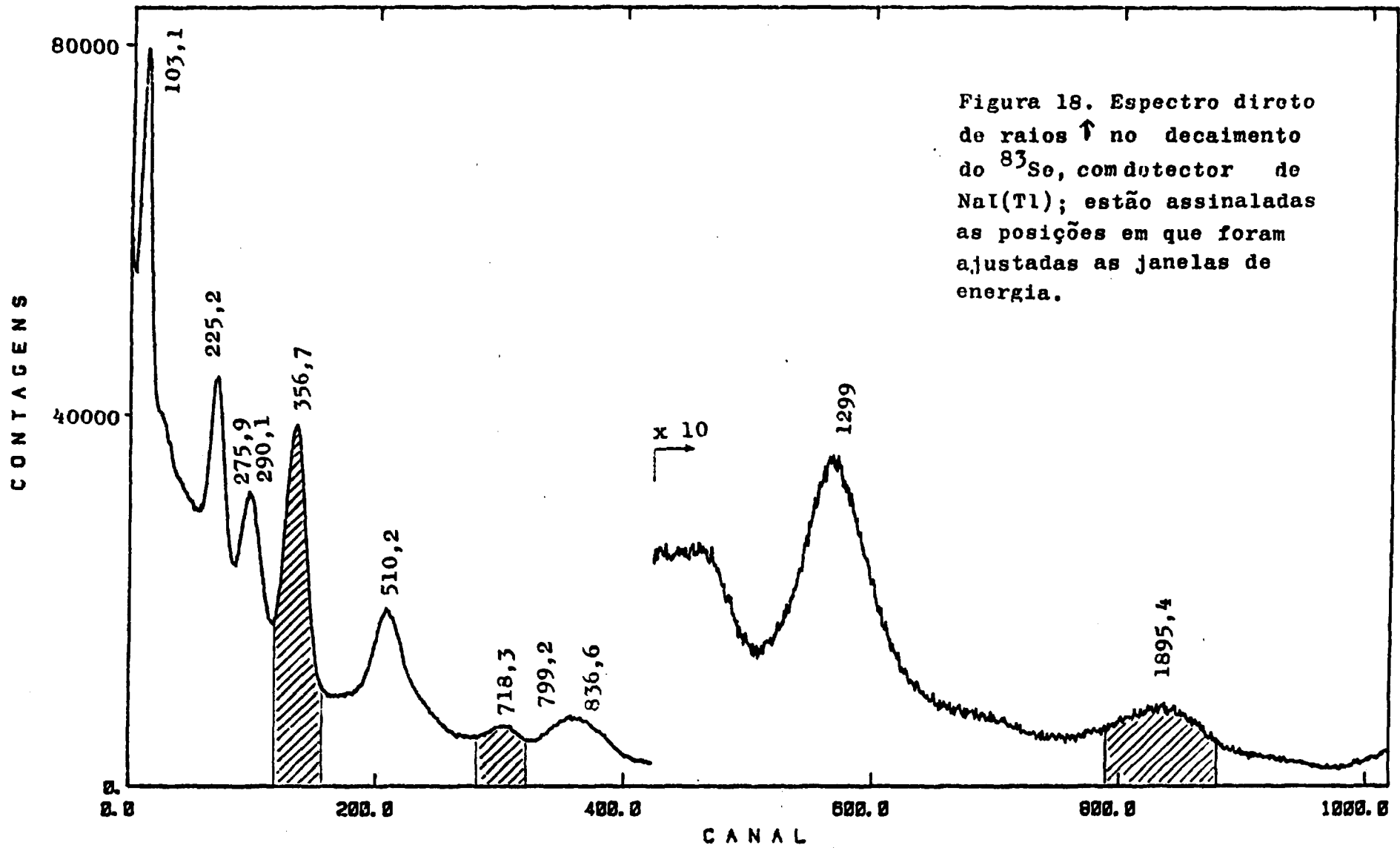


Figura 18. Espectro direto de raios  $\gamma$  no decaimento do  $^{83}\text{Se}$ , com detector de NaI(Tl); estão assinaladas as posições em que foram ajustadas as janelas de energia.

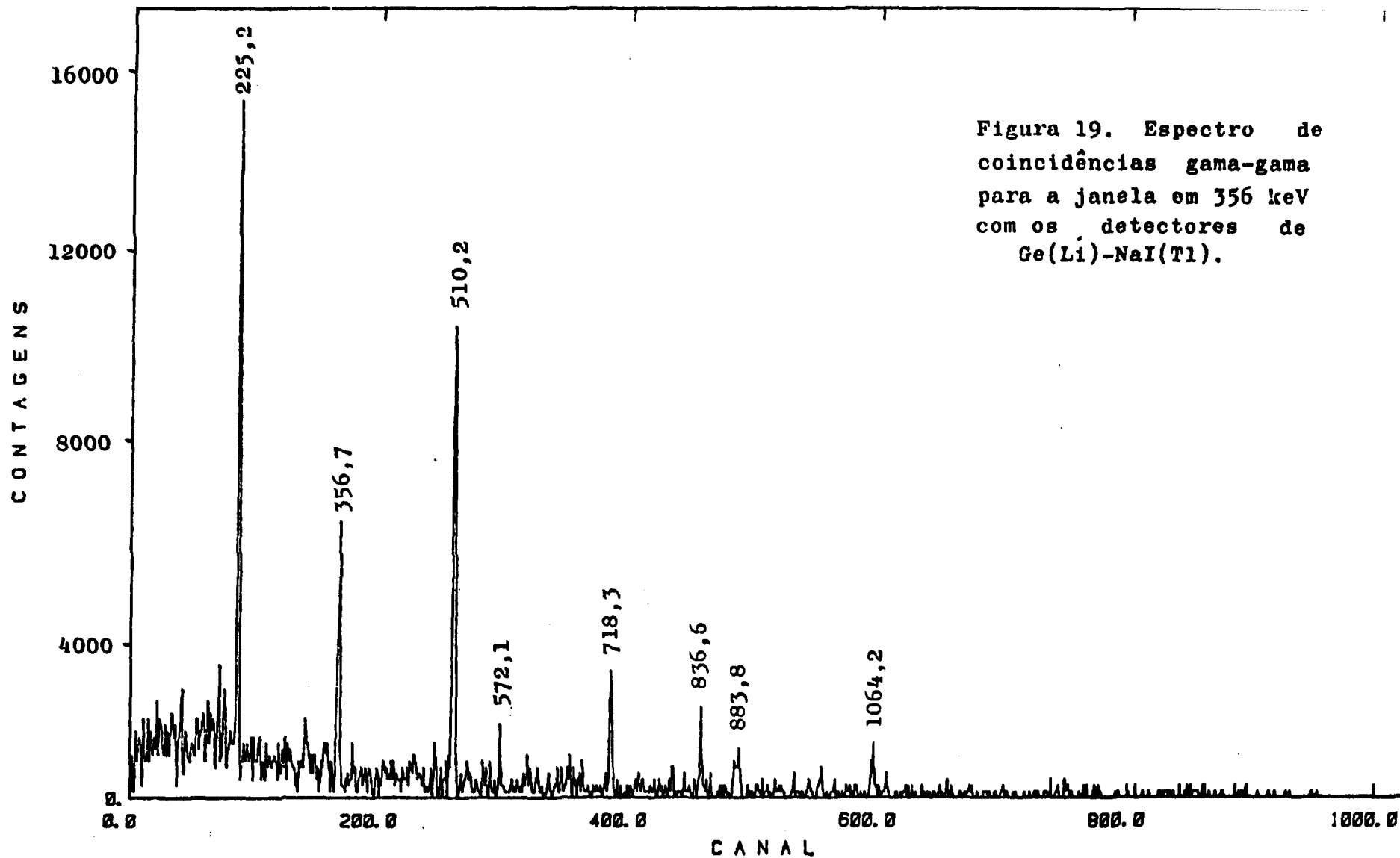


Figura 19. Espectro de coincidências gama-gama para a janela em 356 keV com os detectores de Ge(Li)-NaI(Tl).



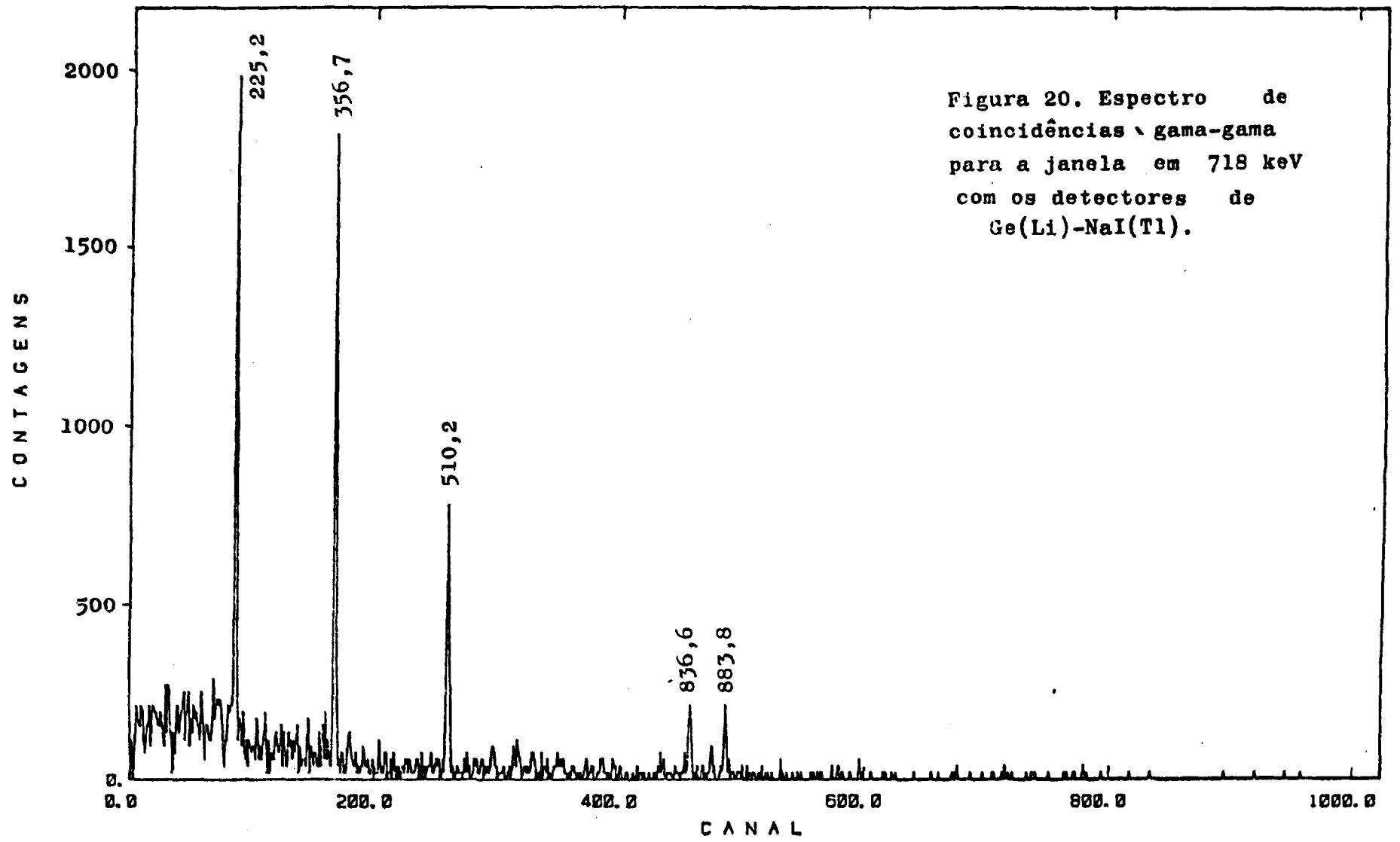


Figura 20. Espectro de coincidências \ gama-gama para a janela em 718 keV com os detectores de Ge(Li)-NaI(Tl).

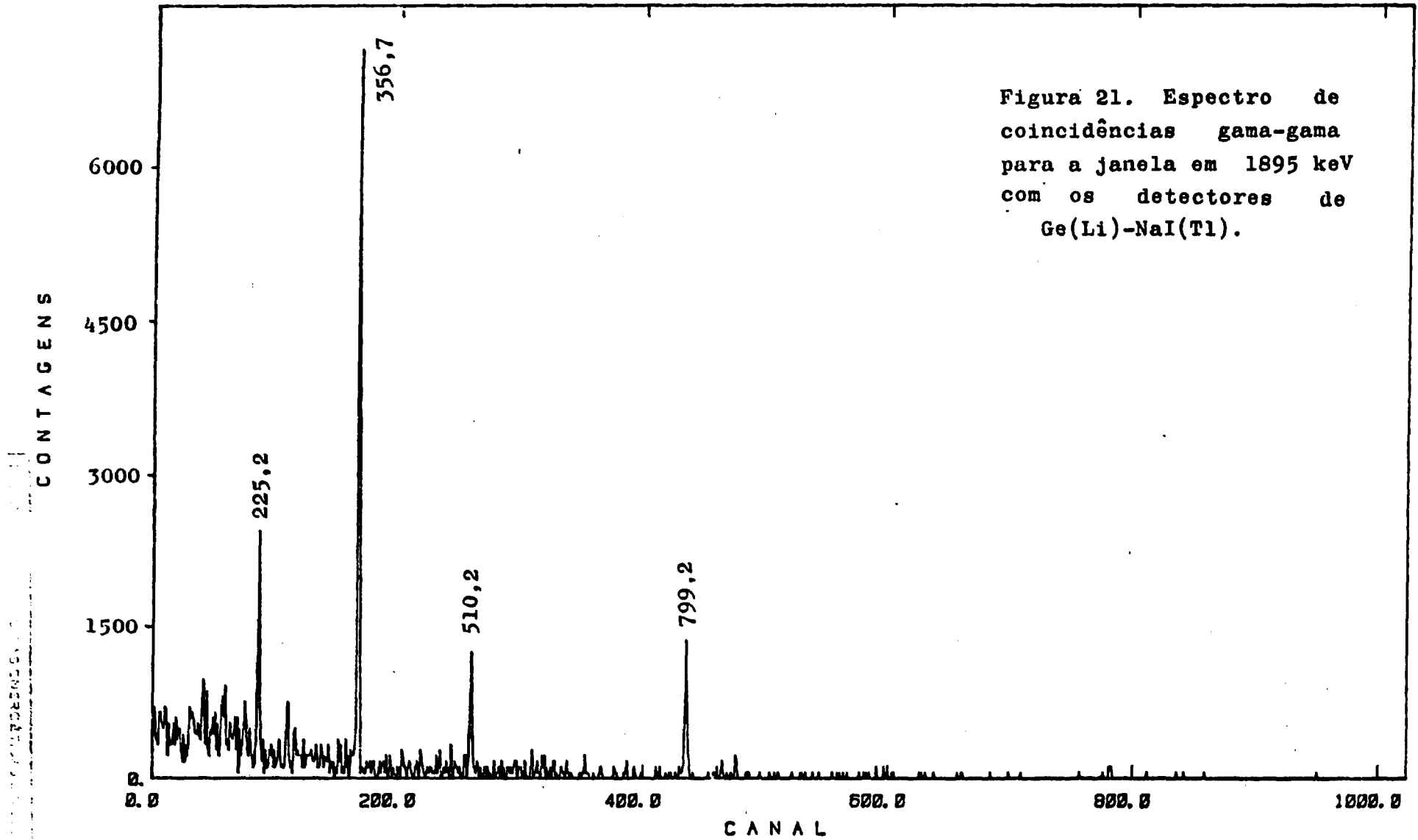


Figura 21. Espectro de coincidências gama-gama para a janela em 1895 keV com os detectores de Ge(Li)-NaI(Tl).

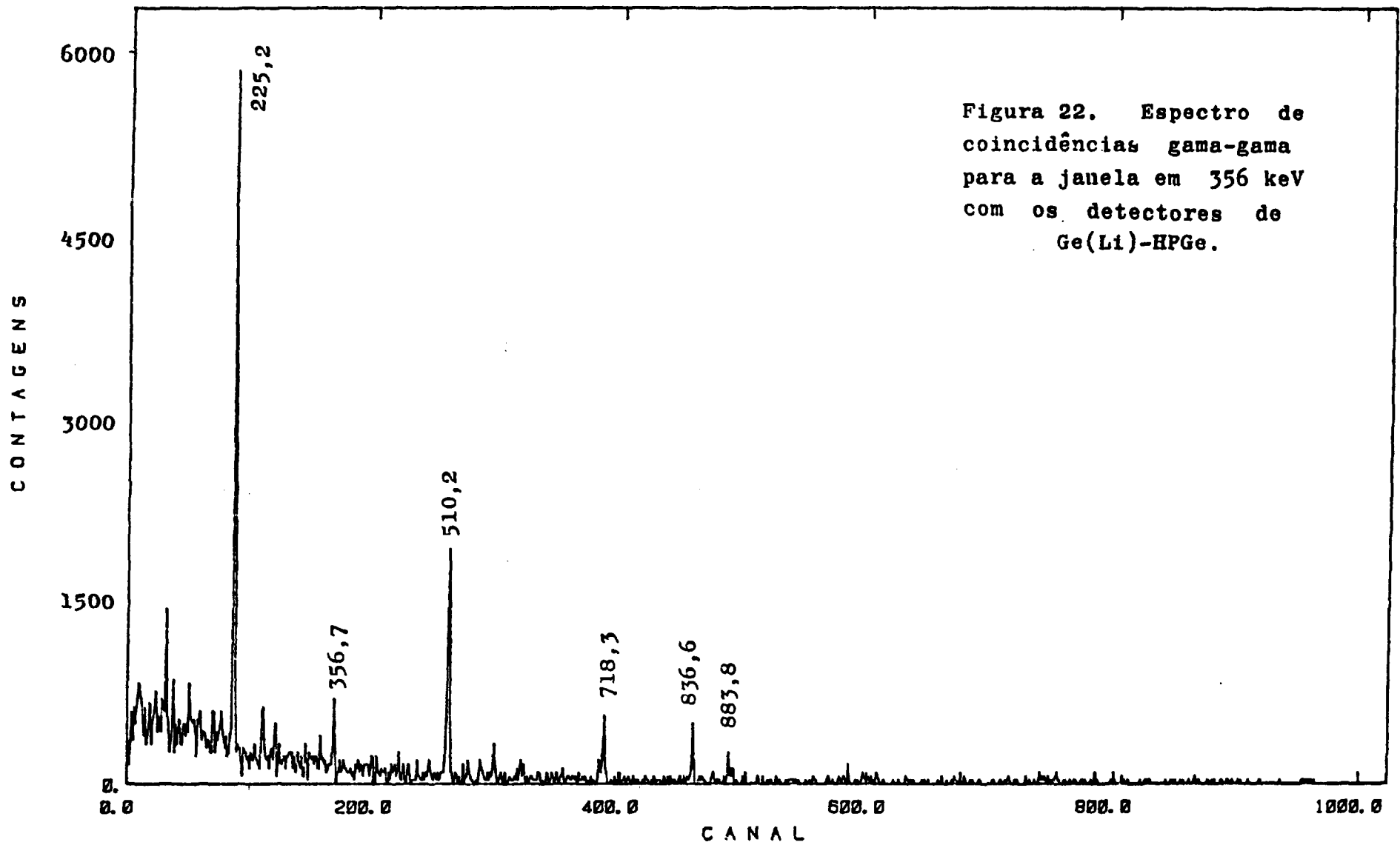
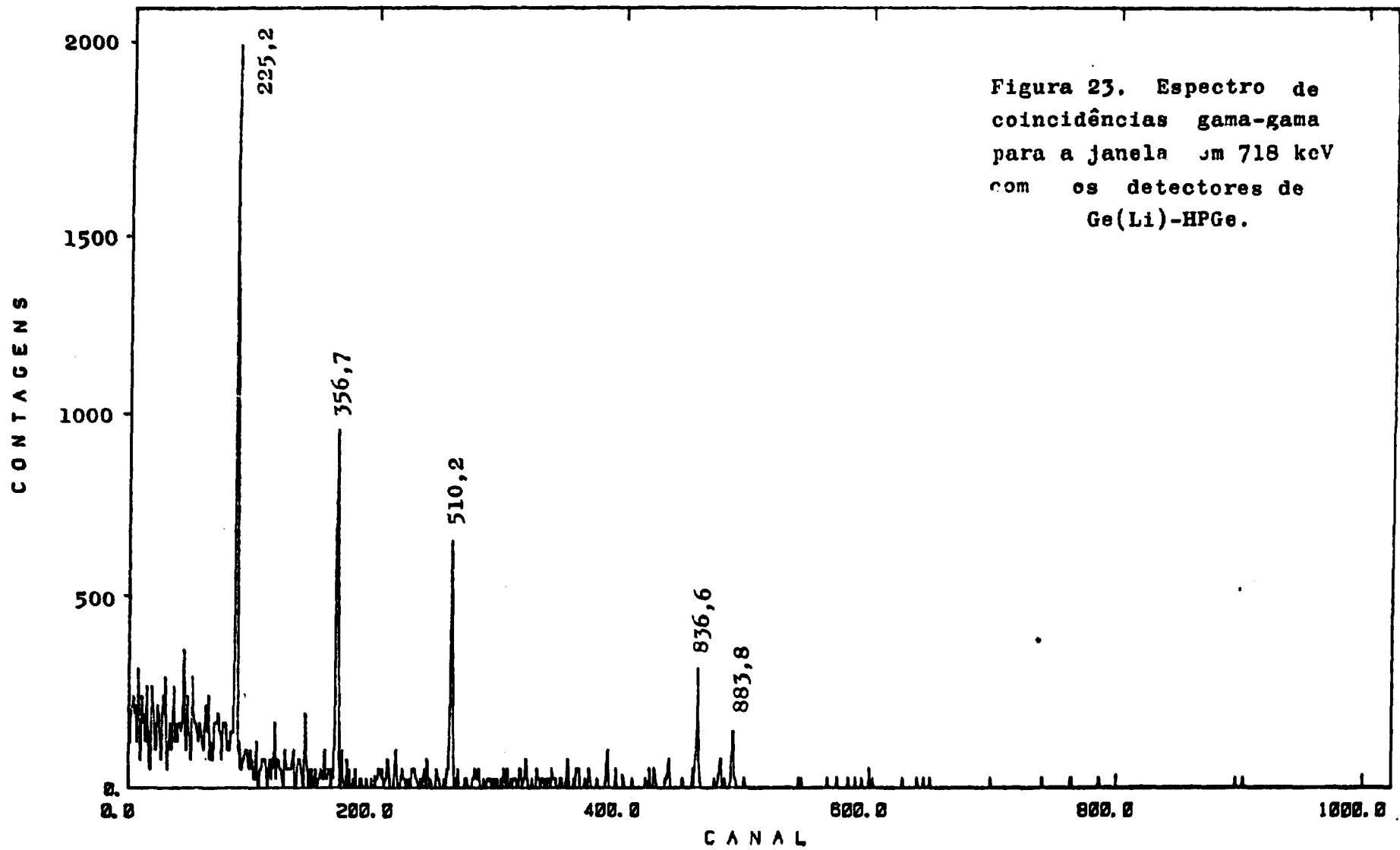


Figura 22. Espectro de coincidências gama-gama para a janela em 356 keV com os detectores de Ge(Li)-HPGe.



Cascata Gama (keV)	$A_{22}$	$A_{44}$
510-356	0,004 0,014	
225(510)356	-0,031 0,012	
718(225)510	0,034 0,034	
718-225	-0,017 0,021	
718(225)(510)356	-0,047 0,026	
572(510)356	-0,022 0,046	
836-718	0,133 0,030 <sup>a</sup>	0,003 0,050 <sup>a</sup>
	0,109 0,054	
883-718	0,121 0,038 <sup>a</sup>	-0,041 0,063 <sup>a</sup>
	0,060 0,068	
1064-356	0,111 0,048 <sup>a</sup>	0,040 0,080 <sup>a</sup>
	0,158 0,060	
718(225)866	0,246 0,043 <sup>a</sup>	-0,047 0,071 <sup>a</sup>
1895-799	0,169 0,029 <sup>a</sup>	-0,094 0,049 <sup>a</sup>

Tabela 4. Coeficientes de Correlação Angular para cascatas gama do núcleo de  $^{83}\text{Br}$ ; a: medidas realizadas com quatro ângulos.

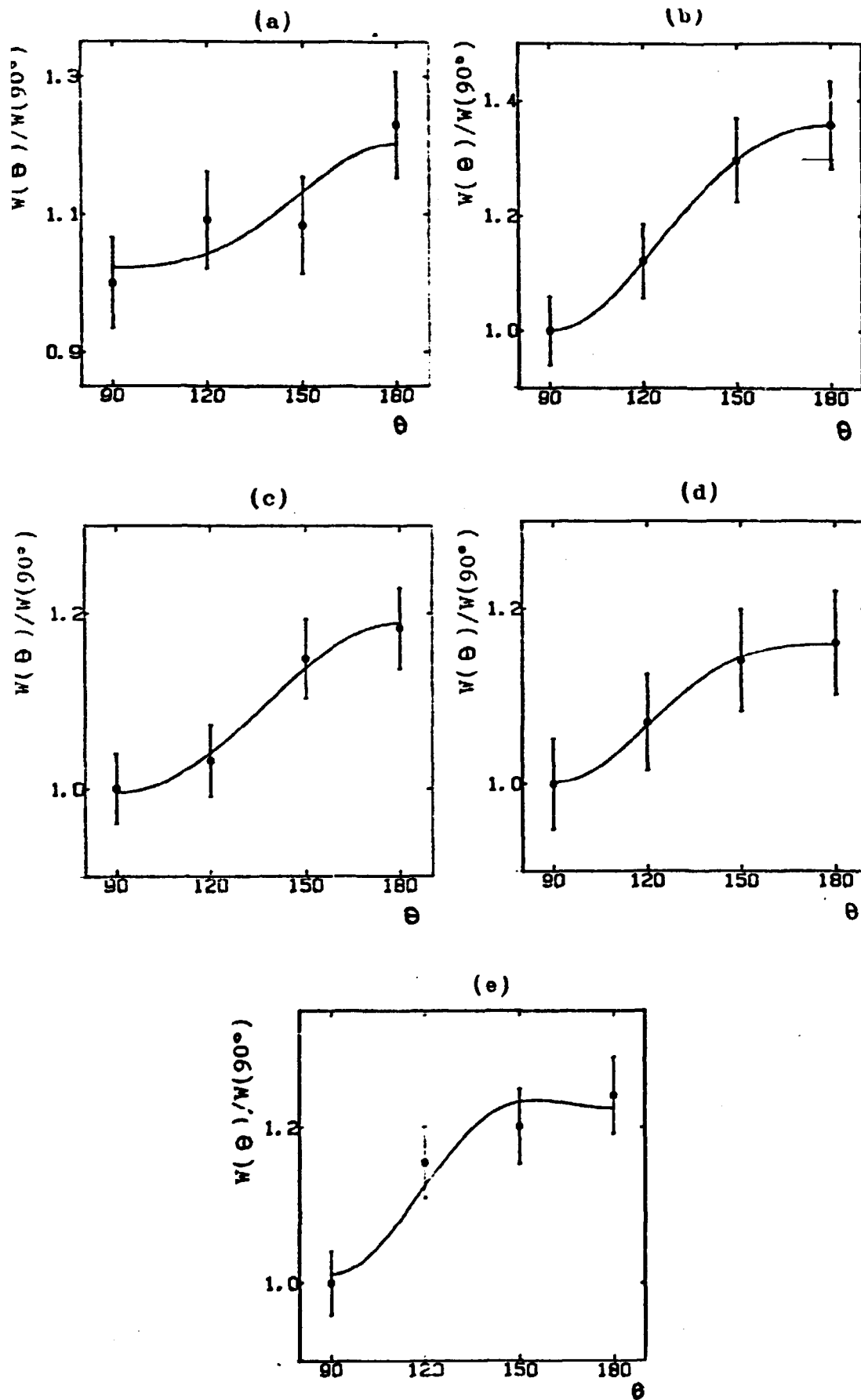


Figura 24. Curvas de correlação angular ajustadas, com os pontos experimentais, para cascatas gama do  $^{83}\text{Br}$ .  
 (a) Cascata 1064-356 keV; (b) Cascata 718-(225)-866 keV;  
 (c) Cascata 836-718 keV; (d) Cascata 883-718 keV; (e) Cas\_  
 cata 1895-799 keV.

Cascata (keV)	Sequência de Spin	Trans. Mist.	$\delta$ (E <sup>2</sup> /M1)
510-356	$7/2(1,2)5/2(1,2)3/2$	510	$27,27 \pm 0,26$
225(510)356	$9/2(1,2)7/2(1,2)5/2(1,2)3/2$	225	$-0,0013 \pm 0,041$
718(225)510	$7/2(1,2)9/2(1)7/2(1,2)5/2$	718	$-7,8 \pm 2,6$
718-225	$7/2(1,2)9/2(1)7/2$	718	$-51 \pm 31$
718(225)(510) 356	$7/2(1,2)9/2(1)7/2(1,2)5/2(1,2)$ $-3/2$	718	$-0,026 \pm 0,074$ ou $7 \pm 4$
572(510)356	$5/2(1,2)7/2(1,2)5/2(1,2)3/2$	572	$-0,114 \pm 0,018$ ou $10,2 \pm 1,8$
	$7/2(1,2)7/2(1,2)5/2(1,2)3/2$	572	$0,645 \pm 0,084$ ou $-6,1 \pm 1,4$
	$9/2(1,2)7/2(1,2)5/2(1,2)3/2$	572	$7,9 \pm 1,5$ ou $0,029 \pm 0,024$

Tabela 5. Valores das razões de mistura multipolar de transições gama do  $^{83}\text{Br}$ , nas medidas realizadas em dois ângulos.

Cascata (keV)	Sequência de Spin	Trans. Mist.	$\delta$ (E2/M1)
1064-356	$5/2(1,2)5/2(1,2)3/2$	1064	$-0,045 \pm 0,095$
		356	$0,368 \pm 0,035$
	$7/2(1,2)5/2(1,2)3/2$	1064	$2,29 \pm 0,23$
		356	$0,494 \pm 0,070$
718(225)866	$7/2(1,2)9/2(1)7/2(1,2)5/2$	718	$-8,1 \pm 2,6$
		866	$0,31 \pm 0,30$
836-718	$7/2(1,2)7/2(1,2)9/2$	718	$-8,1 \pm 2,6$
		836	$2 \begin{matrix} \pm 8 \\ -1 \end{matrix}$
	$9/2(1,2)7/2(1,2)9/2$	718	$-8,1 \pm 2,6$
		836	$-1,09 \pm 0,30$
883-718	$7/2(1,2)7/2(1,2)9/2$	718	$-8,1 \pm 2,6$
		883	$2 \begin{matrix} \pm 6 \\ -1 \end{matrix}$
1895-799	$7/2(1,2)5/2(1,2)3/2$	1895	$-8,6 \begin{matrix} \pm 2,7 \\ -7,0 \end{matrix}$ ou $-0,259 \pm 0,056$
		799	$-0,004 \pm 0,029$

Tabela 6. Valores das razões de mistura multipolar de transições gama do  $^{83}\text{Br}$ , nas medidas realizadas em quatro ângulos.



de informações. Em algumas cascatas, onde se desconheciam os valores de  $\delta$  das transições envolvidas e eram medidas com 4 ângulos, foram analisados os  $\delta$ 's, simultaneamente para as transições, conforme apresentado na seção 3.2.2. Quando se conhecia um valor  $\delta$  de uma transição, procedente do cálculo em outra cascata, então se utilizou este valor para o cálculo dos  $\delta$ 's desconhecidos, quer fossem medidas com 4 ângulos, ou medidas com 2 ângulos.

Algumas dificuldades existentes para esta análise, foram devidas à escassez de dados comparativos. Uma medida de correlação angular realizada por Muminov et al.,<sup>46</sup> não apresenta confiabilidade, pois, estes autores utilizaram uma combinação de dois detectores de NaI(Tl), tendo, portanto, baixa resolução em energia, e uma probabilidade muito grande da ocorrência de interferências por outros fotopicos vizinhos, e por coincidências Compton, não havendo condições com estes detectores de serem feitas as correções necessárias.

Alguns parâmetros conhecidos derivaram de comparações sistemáticas e afirmações com base teórica, como é o caso do estado fundamental com  $I^\pi = 3/2^-$ , predito pelo modelo de camadas e observado em núcleos vizinhos.<sup>22,35,39</sup> Outro parâmetro conhecido é o spin e paridade do primeiro nível excitado a 356 keV com valor  $I^\pi = 5/2^-$ , pois, são observados níveis semelhantes com  $I^\pi = 5/2^-$  nos núcleos do  $^{79}\text{Br}$  e  $^{81}\text{Br}$ . Outro nível, cujo  $I^\pi$  é conhecido está a 1092 keV, que é um nível com 3,65 ns de meia-vida,<sup>35</sup> e são observados em outros isótopos do bromo ( $^{77}\text{Br}$ ,  $^{79}\text{Br}$  e  $^{81}\text{Br}$ ) níveis com  $I^\pi = 9/2^+$ , que apresentam meia-vida relativamente longa.

Todos outros níveis apresentavam os possíveis valores dos spins e paridades, com base unicamente no decaimento beta, e nas transições gama existentes. A figura 25, mostra um esquema de níveis do  $^{83}\text{Br}$ , onde estão apresentados, apenas os níveis

e transições gama estudados, e estão assinalados os valores de  $I^{\pi}$  determinados por este estudo.

A seguir, são analisados, individualmente, cada nível observado.

Nível Fundamental. O nível fundamental do  $^{83}\text{Br}$  não é alimentado pelo decaimento beta do  $^{83g}\text{Se}$ . Como já foi dito, considerações do modelo de camadas indicam seu spin e paridade como  $3/2^{-}$ , valor igual ao dos isótopos vizinhos.

Nível a 356 keV. O 1º estado excitado do  $^{83}\text{Br}$  é alimentado pelo decaimento  $\beta^{-}$  do estado fundamental do  $^{83}\text{Se}$  ( $I^{\pi} = 9/2^{+}$ ), tendo  $\log ft \geq 7,4$ ,<sup>35</sup> sendo consistente com o valor  $I^{\pi} = 5/2^{-}$  para o nível, e como já foi dito, este valor é favorecido pela existência de níveis semelhantes nos núcleos do  $^{81}\text{Br}$  e  $^{79}\text{Br}$ . A medida de correlação angular na cascata gama 1064 - 356 keV permitiu o cálculo dos  $\delta$ 's para estas transições. Esta cascata, tem origem no nível a 1420 keV, o qual tem possibilidades de  $I^{\pi} = 5/2^{-}$  e  $7/2^{-}$  (figura 16) como será visto adiante. O cálculo dos  $\delta$ 's, para as duas sequências de spin possíveis, forneceu valores comuns para a transição gama 356 keV (tabela 6). O valor médio desta razão de mistura multipolar é  $\delta(356) = 0,43 \pm 0,05$ , valor utilizado nos outros cálculos.

Nível a 799 keV. Este nível é alimentado pelo decaimento  $\beta^{-}$  do  $^{83m}\text{Se}$  ( $\log ft \geq 8,5$ )<sup>35</sup> e  $^{83g}\text{Se}$  ( $\log ft > 7,8$ )<sup>35</sup> e é considerada, como uma possível transição primeira proibida única no decaimento do  $^{83m}\text{Se}$ , com o valor de  $I^{\pi} = 5/2^{+}$  para o nível, que é consistente com o  $\log ft$  no decaimento do  $^{83g}\text{Se}$ .<sup>22</sup> A medida de correlação angular na cascata gama 1895-799 keV permitiu cálculos de  $\delta$ 's, que permitiram a confirmação de que a transição gama 799 keV tem caráter de dipolo elétrico puro (E1) como era esperado.

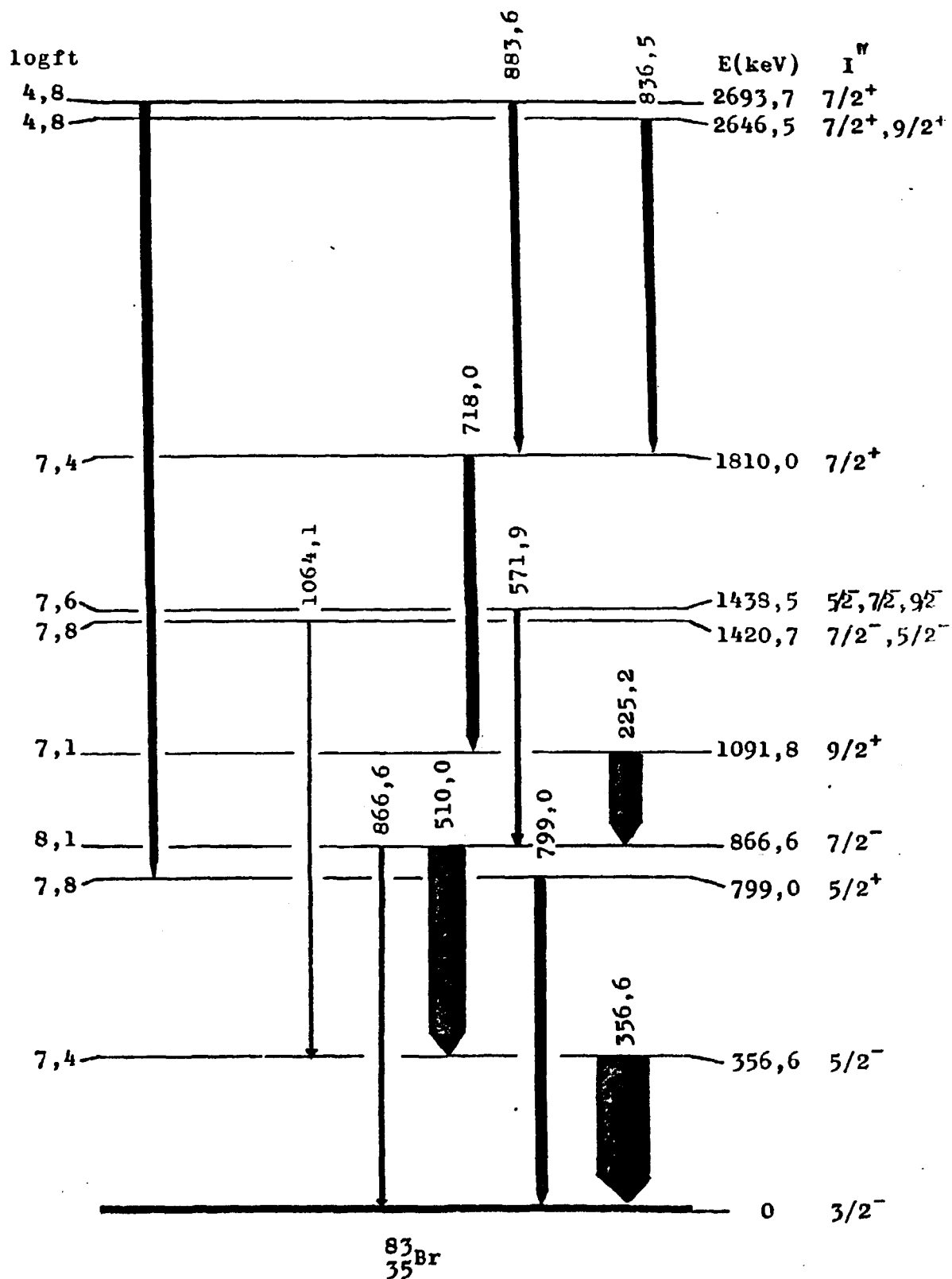
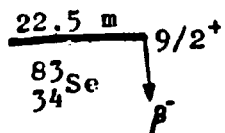


Figura 25. Esquema de níveis parcial do  $^{83}\text{Br}$ .  
 Estão assinalados apenas os níveis e transições de interesse, com os valores de spin e paridade consistentes com os presentes resultados.

Nível a 866 keV. Este nível, também é alimentado pelo decaimento  $\beta^-$  do estado fundamental do  $^{83}\text{Se}$  com  $\log ft > 8,1$  <sup>35</sup> e o nível pode apresentar os valores de  $I^\pi = 5/2^-, 7/2^-$  e  $9/2^-$ . A transição gama a 866 keV para o estado fundamental restringe a somente os valores  $5/2^-$  e  $7/2^-$ . As medidas de correlação angular, nas cascatas gama 510-356 keV, e 225-(510)-356 keV, permitiram cálculos, sendo que, a possibilidade mais favorável consistente com os resultados experimentais destas cascatas, permanece com o valor  $I^\pi = 7/2^-$  para este nível. O valor  $I^\pi = 5/2^-$  forneceu uma porcentagem em torno de 6% de mistura de octupolo elétrico (E3) com quadrupolo magnético (M2), para a transição 225 keV. Com a medida de correlação angular, na cascata 718-(225)-866 keV, foi possível calcular o valor de  $\delta$  (866) e esta transição gama deve apresentar um caráter quadrupolar elétrico (E2), e o valor que consta na tabela 6 é consistente com esta afirmativa.

Nível a 1092 keV. Este é um nível com  $T_{1/2} = 3,65$  ns alimentado no decaimento  $\beta^-$  do  $^{83}\text{Se}$ , com  $\log ft = 7,1$ . <sup>35</sup> Níveis semelhantes são observados em isótopos do bromo vizinhos como no  $^{79}\text{Br}$  (210 keV) e  $^{81}\text{Br}$  (538 keV), todos possuindo  $I^\pi = 9/2^+$ , valor consistente com o  $\log ft$  e com as medidas de correlação angular realizadas.

Nível a 1420 keV. Este nível é alimentado pelo decaimento  $\beta^-$  do  $^{83}\text{Se}$ , com  $\log ft > 7,8$ . <sup>35</sup> Este valor de  $\log ft$  é consistente com os possíveis valores  $I^\pi = 7/2^-$  e  $5/2^-$ . A transição gama 1064 keV, para o nível  $5/2^-$  a 356 keV e a existência de uma transição gama 1420 keV, para o estado fundamental restringe a estes valores de  $I^\pi$ . A medida de correlação angular, na cascata 1064-356 keV, não permitiu eliminar um destes valores.

Nível a 1439 keV. Nível alimentado pelo decaimento  $\beta^-$  do  $^{83}\text{Se}$ , com  $\log ft > 7,6$ , <sup>35</sup> que é consistente com os valores de  $I^\pi$ , para o nível de  $5/2^-$ ,  $7/2^-$  e  $9/2^-$ . A medida de correlação angular, na cascata gama 572-(510)-356 keV, permitiu o cálculo do  $\delta$  (572), para as três possibilidades de spin deste nível e não foi possível escolher um, entre estes valores de razões de mistura multipolar, que estão na tabela 5.

Nível a 1810 keV. Este nível, apresenta um valor de  $\log ft \geq 7,4$ , <sup>35</sup> no decaimento  $\beta^-$  do  $^{83}\text{Se}$ . Este  $\log ft$  é consistente com  $I^\pi = 7/2^\pm$ ,  $9/2^-$  ou  $11/2^\pm$ , para o nível. As cascatas 718-225 keV, 718-(225)-510 keV e 718-(225)-866 keV proporcionam medidas de correlação angular. Estes resultados analisados e os valores de  $\delta$  calculados, favorecem o  $I = 7/2$  e uma inspeção nas tabelas 5 e 6, indica um caráter de quadrupolo elétrico predominante para a transição gama 718 keV ( $\delta$  (718) =  $-8,1 \pm 2,6$ ), com o nível apresentando paridade positiva ( $7/2^+$ ).

Nível a 2647 keV. Este nível é fortemente alimentado pelo decaimento  $\beta^-$  do  $^{83}\text{Se}$ , e apresenta o valor  $\log ft = 4,8$ , <sup>35</sup> e é uma possível transição permitida, <sup>22</sup> com os valores de  $I^\pi$  para o nível de  $7/2^+$ ,  $9/2^+$  ou  $11/2^+$ . A transição gama 2290 keV para o nível  $5/2^-$  a 356 keV, restringe aos valores de  $I^\pi = 7/2^+$  e  $9/2^+$ . A cascata gama 836-718 keV, proporcionou medidas de correlação angular e foi possível calcular os valores de  $\delta$ , para a transição gama 836 keV, para os dois valores de spins possíveis, não sendo possível eliminar um deles. Existe um favoritismo ao valor  $I^\pi = 7/2^+$ , dada a semelhança com o nível a 2694 keV, que está analisado a seguir.

Nível a 2694 keV. Este nível, também é fortemente alimentado pelo decaimento  $\beta^-$  do  $^{83}\text{Se}$ , com  $\log ft = 4,8$ . <sup>35</sup> É uma possível transição permitida <sup>22</sup> consistente com os valores de  $I^\pi = 7/2^+$ ,  $9/2^+$  ou  $11/2^+$ . A transição gama 1895 keV, para o nível  $5/2^+$  a 799 keV, restringe a somente  $I^\pi = 7/2^+$  ou  $9/2^+$ .

As cascatas gama 883-718 keV e 1895-799 keV, forneceram dados de correlação angular. No caso da medida da cascata 1895-799 keV, os valores de razão de mistura multipolar  $\delta$  (E2/M1) possibilitaram indicar o valor  $I^\pi = 7/2^+$ , pois, com o valor  $9/2^+$  daria para a transição gama 1895 keV, alta porcentagem (~15%) de octupolo magnético (M3), com quadrupolo elétrico (E2), não sendo admissível. Com a medida de correlação angular, na cascata 883-718 keV, foi possível calcular o  $\delta$  (883), que consta na tabela 6.

## 5 DISCUSSÃO

### 5.1 Introdução

Os núcleos de A-ímpar na região de massa  $60 \leq A \leq 150$ , apresentam uma complexidade em sua estrutura de níveis, o que dificulta a compreensão de suas propriedades. Estes núcleos, possuem em geral muitos níveis excitados, que não mostram um comportamento quantitativamente previsível. Há necessidade de modelos nucleares complexos, para descrever estes núcleos com Z-ímpar. A estrutura de níveis complicada é supostamente um resultado da presença de alguns estados de partícula única, com energias comparáveis à energia do primeiro estado  $2^+$ , do núcleo vizinho de A-par. As regularidades, nas propriedades destes dois tipos de estados, são obscurecidas pela mistura entre eles.

A compreensão das propriedades dos núcleos, desta região de massa, é limitada a modelos fenomenológicos, onde um núcleo de massa ímpar é tratado como uma partícula única, acoplada a um caroço par-par. Estes núcleos, exibem um momento de quadrupolo para o estado fundamental grande, apesar de que os números de nucleons fora da camada fechada, são poucos para torná-los deformados permanentemente. Os núcleos par-par, nesta região de massa, mostram um espectro vibracional.

Algumas tentativas teóricas, para explorar a estrutura de níveis, nestes núcleos, foram feitas com base no modelo de Kisslinger e Sorensen,<sup>34</sup> que utiliza a força de emparelhamento mais quadrupolo. Este modelo, não teve muito sucesso, nesta região de massa. Os modelos com acoplamento intermediário, têm sido utilizados por vários autores,<sup>32,44,65</sup> com sucesso, para explicação de estados de paridade negativa em baixas energias nos isótopos de bromo com A-ímpar. Os espectros de energia e probabilidades de transição  $B(E2)$  concordam bem com os resulta-

dos experimentais.

Os cálculos para níveis de baixa energia para isótopos de Ga, As, Br e Rb, com A-ímpar foram feitos por Scholz e Malik,<sup>61</sup> com base no modelo de acoplamento de Coriolis, incluindo uma interação residual do tipo emparelhamento. O primeiro estado excitado  $2^+$ , nos núcleos vizinhos par-par, foi tratado como estado rotacional nestes cálculos.

Chopra,<sup>13</sup> calculou os estados de baixa energia com paridade negativa em  $^{79}\text{Br}$  e  $^{81}\text{Br}$ , utilizando o modelo de excitação do caroço de De-Shalit,<sup>16</sup> explicando bem as probabilidades de transição  $B(E2)$  e  $B(M1)$ , além dos momentos estáticos para estados fundamentais.

A estrutura dos níveis de baixa energia com paridade negativa nos isótopos de  $^{79}\text{Br}$  e  $^{81}\text{Br}$ , está, razoavelmente, compreendida. Estes dois isótopos estáveis, têm recebido maior atenção nos estudos experimentais. Isto não acontece, para o núcleo de  $^{83}\text{Br}$ , que tem sido pouco estudado, até recentemente, e sua estrutura de níveis não é muito bem estabelecida. Este fato, também tem contribuído para poucos estudos teóricos, neste núcleo.

Apesar desta dificuldade, será feita na próxima seção uma comparação sistemática das características dos níveis, em baixa energia, nos núcleos de  $^{79}\text{Br}$ ,  $^{81}\text{Br}$  e  $^{83}\text{Br}$ , com o intuito de mostrar variações sistemáticas das propriedades nucleares, nos isótopos vizinhos.

## 5.2 Sistemática nos Núcleos de $^{79}\text{Br}$ , $^{81}\text{Br}$ e $^{83}\text{Br}$

Os núcleos de  $^{79}\text{Br}$ ,  $^{81}\text{Br}$  e  $^{83}\text{Br}$  apresentam diversas similaridades. O estado fundamental para todos tem  $I^\pi = 3/2^-$ . O núcleo do bromo ( $Z=35$ ) tem 7 prótons fora da camada fechada ( $Z=28$ ) distribuídos nos orbitais  $2p_{3/2}$  e  $1f_{5/2}$ . O estado fundamental foi observado fortemente na reação de  $(^3\text{He}, d)^{70}$  para to



dos estes isótopos do bromo com distribuição angular caracte -  
rística de  $l_p = 1$ . Este fato indica uma partícula/buraco único,  
na órbita  $2p_{3/2}$  para o bromo.

O primeiro estado excitado destes núcleos também é  
considerado de partícula única. Nas medidas de Zumbro et al.,<sup>70</sup>  
estes níveis no  $^{79}\text{Br}$  (210,4 keV),  $^{81}\text{Br}$  (276,9 keV) e  $^{83}\text{Br}$  (356  
keV) apresentam  $l_p = 3$ , e correspondem a estados de partícula  
única  $1f_{5/2}$ , estando de acordo com a indicação de  $I^\pi = 5/2^-$  pa-  
ra estes níveis. Este fato é ainda confirmado com a comparação  
aos núcleos de  $^{83}\text{Rb}$  e  $^{85}\text{Rb}$ , que possuem dois prótons a mais do  
que o bromo, e têm um estado fundamental com  $I^\pi = 5/2^-$ .

São observados, nestes núcleos, um conjunto de ní-  
veis com spin e paridade  $1/2^-$ ,  $3/2^-$ ,  $5/2^-$  e  $7/2^-$  (identificado  
nos núcleos de  $^{79}\text{Br}$  e  $^{81}\text{Br}$ , mas não definitivamente no  $^{83}\text{Br}$ ).  
Estes níveis, mostram algumas similaridades, por exemplo, na  
reação de excitação coulombiana nos núcleos de  $^{79}\text{Br}$  e  $^{81}\text{Br}$ , so-  
mente um estado com spin  $7/2^-$  é excitado fortemente, e valores  
de  $B(E2)$  para excitação de todos estes estados são similares  
ao  $B(E2)$  para excitação do primeiro estado  $2^+$  do núcleo par -  
par vizinho.

Com base nestes fatos, estes níveis foram explicados  
como formados através do acoplamento de um próton no estado  
 $p_{3/2}$ , com o primeiro estado  $2^+$  do núcleo par-par vizinho. Es-  
tas observações, foram utilizadas por Chopra<sup>13</sup> que através do  
modelo de excitação do caroço de De-Shalit,<sup>16</sup> calculou algumas  
propriedades de níveis do  $^{79}\text{Br}$  e  $^{81}\text{Br}$ . Este modelo não especi-  
fica, qual caroço par-par deve ser utilizado, e assim, os nú-  
cleos de  $^{79}\text{Br}$  e  $^{81}\text{Br}$  podem ser descritos pelo acoplamento de  
um próton aos núcleos de  $^{78}\text{Se}$  e  $^{80}\text{Se}$ , ou um buraco aos núcleos  
de  $^{80}\text{Kr}$  e  $^{82}\text{Kr}$ , respectivamente. No modelo de De-Shalit<sup>16</sup> é u-  
tilizado o acoplamento fraco e um próton  $2p_{3/2}$  acoplado ao pri-  
meiro nível  $2^+$  do caroço, resultando num multiplete de 4 ní-  
veis:  $1/2^-$ ,  $3/2^-$ ,  $5/2^-$  e  $7/2^-$ . Para o  $^{79}\text{Br}$  os membros deste

multiplete são: 307 keV ( $1/2^-$ ), 606 keV ( $3/2^-$ ), 523 keV ( $5/2^-$ ) e 761 keV ( $7/2^-$ ). O "centro-de-gravidade"<sup>38</sup> destes quatro níveis é 613 keV, em bom acordo com as energias 614 keV para o primeiro estado excitado  $2^+$  no  $^{78}\text{Se}$ , e 618 keV para o primeiro nível  $2^+$  do  $^{80}\text{Kr}$ . Para o  $^{81}\text{Br}$ , este acoplamento fornece como membros do multiplete os níveis: 538 keV ( $1/2^-$ ), 829 keV ( $3/2^-$ ), 767 keV ( $5/2^-$ ) e 837 keV ( $7/2^-$ ), e o "centro-de-gravidade"<sup>38</sup> está em 784 keV, em melhor acordo com o primeiro nível  $2^+$  (777 keV) do  $^{82}\text{Kr}$ , do que 662 keV do  $^{80}\text{Se}$ . O sinal positivo do momento de quadrupolo do estado fundamental para o  $^{79}\text{Br}$  e  $^{81}\text{Br}$ ,<sup>24</sup> sugere que este é um estado de buraco,  $(p_{3/2})^3(f_{5/2})^4$ . Isto pode suportar a afirmação de que estes isótopos, do bromo, são melhor descritos no modelo em que um buraco é fracamente acoplado ao caroço de Kr.

A tabela 7, mostra a probabilidade de transição  $B(E2)$  experimentais obtidos por Robinson et al.,<sup>56</sup> para o núcleo do  $^{79}\text{Br}$ , e a tabela 8, mostra os valores de  $B(E2)$  para o  $^{81}\text{Br}$  obtidos por Robinson et al..<sup>57</sup> A soma dos valores de  $B(E2)$ , que compõem o multiplete deve ser similar ao valor de  $B(E2, 2^+ \rightarrow 0^+)$ , do vizinho par-par. Para o  $^{79}\text{Br}$ , o valor da probabilidade de transição do caroço  $^{78}\text{Se}$  é  $B(E2, 2^+ \rightarrow 0^+) = (671 \pm 200)e^2\text{fm}^4$  (referência<sup>50</sup>) e do  $^{80}\text{Kr}$  é  $B(E2, 2^+ \rightarrow 0^+) = (739 \pm 62)e^2\text{fm}^4$  (referência<sup>51</sup>), e a soma dos valores de  $B(E2)$ , dos membros do multiplete é  $B(E2) = 1845 e^2\text{fm}^4$ , estando de acordo com a ordem de grandeza. No caso do  $^{81}\text{Br}$ , esta soma dos valores de  $B(E2)$ , dos membros do multiplete, fornece  $B(E2) = 730 e^2\text{fm}^4$  que está de acordo com a probabilidade de transição  $2^+ \rightarrow 0^+$  do  $^{80}\text{Se}$ , que é  $B(E2, 2^+ \rightarrow 0^+) = 509 \pm 21 e^2\text{fm}^4$  e o valor para o  $^{82}\text{Kr}$  que é  $B(E2, 2^+ \rightarrow 0^+) = 408 \pm 72 e^2\text{fm}^4$  (obtido com o valor da probabilidade de transição  $B(E2, 2^+ \rightarrow 0^+) = 340 \pm 60 e^2\text{fm}^4$  do  $^{84}\text{Kr}$ )<sup>49</sup> normalizado de acordo com a referência<sup>31</sup>. Para o  $^{83}\text{Br}$  não são conhecidos valores de  $B(E2)$ .

A utilização de modelo de acoplamento intermediário

Nível (keV)	$I_i^{\pi}$	$I_f^{\pi}$	Transição (keV)	$B(E2) e^2 fm^4$
307	$1/2^-$	$3/2^-$	307	$422 \pm 36$
523	$5/2^-$	$3/2^-$	523	$630 \pm 60$
606	$3/2^-$	$3/2^-$	606	$153 \pm 23$
761	$7/2^-$	$3/2^-$	761	$640 \pm 110$

Tabela 7. Valores experimentais de  $B(E2)$  para transições do  $^{79}\text{Br}$ , obtidos por Robinson et al..<sup>56</sup>

Nível (keV)	$I_i^{\pi}$	$I_f^{\pi}$	Transição (keV)	$B(E2) e^2 fm^4$
538	$1/2^-$	$3/2^-$	538	$170 \pm 10$
767	$5/2^-$	$3/2^-$	767	$201 \pm 11$
829	$3/2^-$	$3/2^-$	829	$87 \pm 10$
837	$7/2^-$	$3/2^-$	837	$276 \pm 22$

Tabela 8. Valores experimentais de  $B(E2)$  para transições do  $^{81}\text{Br}$ , obtidos por Robinson et al..<sup>57</sup>

por Mitroshin et al.,<sup>44</sup> onde foi acoplado um buraco ao caroço de Kr com propriedades anarmônicas, descreve estados de paridade negativa e positiva em baixa energia. Outro estudo que utilizou o modelo de acoplamento intermediário, restringindo-se aos estados de paridade negativa, dos núcleos do  $^{79}\text{Br}$  e  $^{81}\text{Br}$ , foi feito por Stewart e Castel.<sup>65</sup> Neste cálculo, o último próton no estado de partícula  $2p_{3/2}$  ou  $1f_{5/2}$ , ou num segundo estado  $3/2^-$ , formado da configuração  $(1f_{5/2})^3$  de senioridade 3, é acoplado ao caroço vibracional. Neste estudo, é dada atenção ao estado fundamental  $3/2^-$  e aos quatro níveis do multipletto do acoplamento  $3/2^- \otimes 2^+$ . O caroço utilizado por Stewart e Castel,<sup>65</sup> apresenta propriedades anarmônicas do tripleto de 2 fonons vibracionais pela remoção da degenerescência de energia destes estados. Os resultados obtidos de energias dos níveis e

das probabilidades de transição B(E2), ajustam bem com os dados experimentais.

As propriedades eletromagnéticas de vários núcleos de Z-ímpar, nesta região de massa, incluindo o  $^{79}\text{Br}$ , foram estudadas por Parado lis e Hontzeas.<sup>52</sup> No modelo utilizado, cada núcleo consiste de um caroço par-par vibracional e uma quasipartícula com os estados  $2p_{3/2}$ ,  $1f_{5/2}$ ,  $2p_{1/2}$  e  $1g_{9/2}$  disponíveis para a quasipartícula.

Outra característica observada nos três núcleos do bromo, é a presença de um duplete de estados com spin e paridade  $9/2^+$ ,  $5/2^+$ , previsto no modelo de acoplamento de Coriolis utilizado por Scholz e Malik.<sup>61</sup> Este modelo dá atenção para alguns fatos, como os spins e paridades dos estados fundamentais, o grande número de estados de paridade negativa com spins  $7/2$  a baixo de 1 MeV de energia, e a ocorrência de níveis com paridade positiva em baixa energia, formando o duplete ( $9/2^+$ ,  $5/2^+$ ). Um estado com  $I^\pi = 9/2^+$  é observado nos núcleos de  $^{79}\text{Br}$  (210 keV),  $^{81}\text{Br}$  (538 keV) e  $^{83}\text{Br}$  (1092 keV) e de acordo com as medidas de Zumbro et al.,<sup>70</sup> todos estes níveis apresentando  $l_p = 4$ , constituindo estados com menores energias de paridade positiva, consistentes com a população do orbital de partícula única  $1g_{9/2}$ , e de acordo com a indicação  $I^\pi = 9/2^+$  para estes níveis. Outro nível de paridade positiva, que é observado na população pela reação ( $^3\text{He}, d$ ),<sup>70</sup> com os isótopos de  $^{78,80,82}\text{Se}$ , para os três núcleos de  $^{79}\text{Br}$  (383,6 keV),  $^{81}\text{Br}$  (792,5 keV) e  $^{83}\text{Br}$  (1355,6 keV) respectivamente, todos com  $l_p = 2$ . Estes estados são consistentes com a observação de níveis com  $I^\pi = 5/2^+$ , (formando o duplete  $9/2^+$ ,  $5/2^+$ ) preditos por Scholz e Malik.<sup>61</sup> Este membro do duplete com  $I^\pi = 5/2^+$ , deve ter origem no acoplamento  $9/2^+ @ 2^+$ , e deve ter contribuição do estado de partícula única  $2d_{5/2}$ , consistentes com a observação de  $l_p = 2$ .<sup>70</sup>

Este duplete de paridade positiva ( $9/2^+$ ,  $5/2^+$ ), pode

ser explicado de maneira interessante no modelo de acoplamento de Coriolis, utilizado por Scholz e Malik.<sup>61</sup> Este modelo, prevê a ocorrência deste duplete, em todos núcleos para deformação prolata, nesta região de massa. Estes níveis de paridade positiva são originados das bandas excitadas, da camada  $lg_{9/2}$ , e aparecem em baixa energia de excitação, apesar de esperados em altas energias. Este deslocamento é causado em parte pela deformação que força estados da camada  $lg_{9/2}$  penetrarem na região da camada  $lf-2p$ , e também pela interação de Coriolis que desloca para baixo, os estados de alto spin, por mais do que 1 MeV de suas posições não perturbadas.

Para uma deformação prolata, o desacoplamento da banda  $K = 1/2^+$ , junto com a forte interação de Coriolis, entre bandas baseadas em estados com  $lg_{9/2}$ , produz estados  $9/2^+$  e  $5/2^+$  como mais baixos estados de paridade positiva. Este resultado é similar à situação encontrada na camada  $lf_{7/2}$ , onde o desacoplamento da banda  $K = 1/2^-$  é responsável pelo par de níveis  $7/2^-$  e  $3/2^-$ ,<sup>40</sup> e pode ser um resultado de validade geral, para todos núcleos com deformação prolata, com um nucleon de semparelhado na camada  $lg_{9/2}$ . A posição exata destes estados de paridade positiva, variam de núcleo para núcleo, e depende da deformação de cada núcleo.<sup>61</sup>

A figura 26, mostra os espectros de níveis de energia para os núcleos do  $^{79}\text{Br}$ ,  $^{81}\text{Br}$  e  $^{83}\text{Br}$ . O espectro de níveis excitados, dos isótopos do bromo, podem, simultaneamente, apresentar estados que são mais facilmente interpretados como estados de um multiplete vibracional, com bandas rotacionais de estados de paridade positiva, e bandas rotacionais constituídas por vários estados de paridade negativa. As probabilidades de transição gama, de estados de um multiplete vibracional, ajustam-se bem ao modelo de acoplamento fraco. O decaimento de estados de alta energia, ocorre através de muitos canais com apro

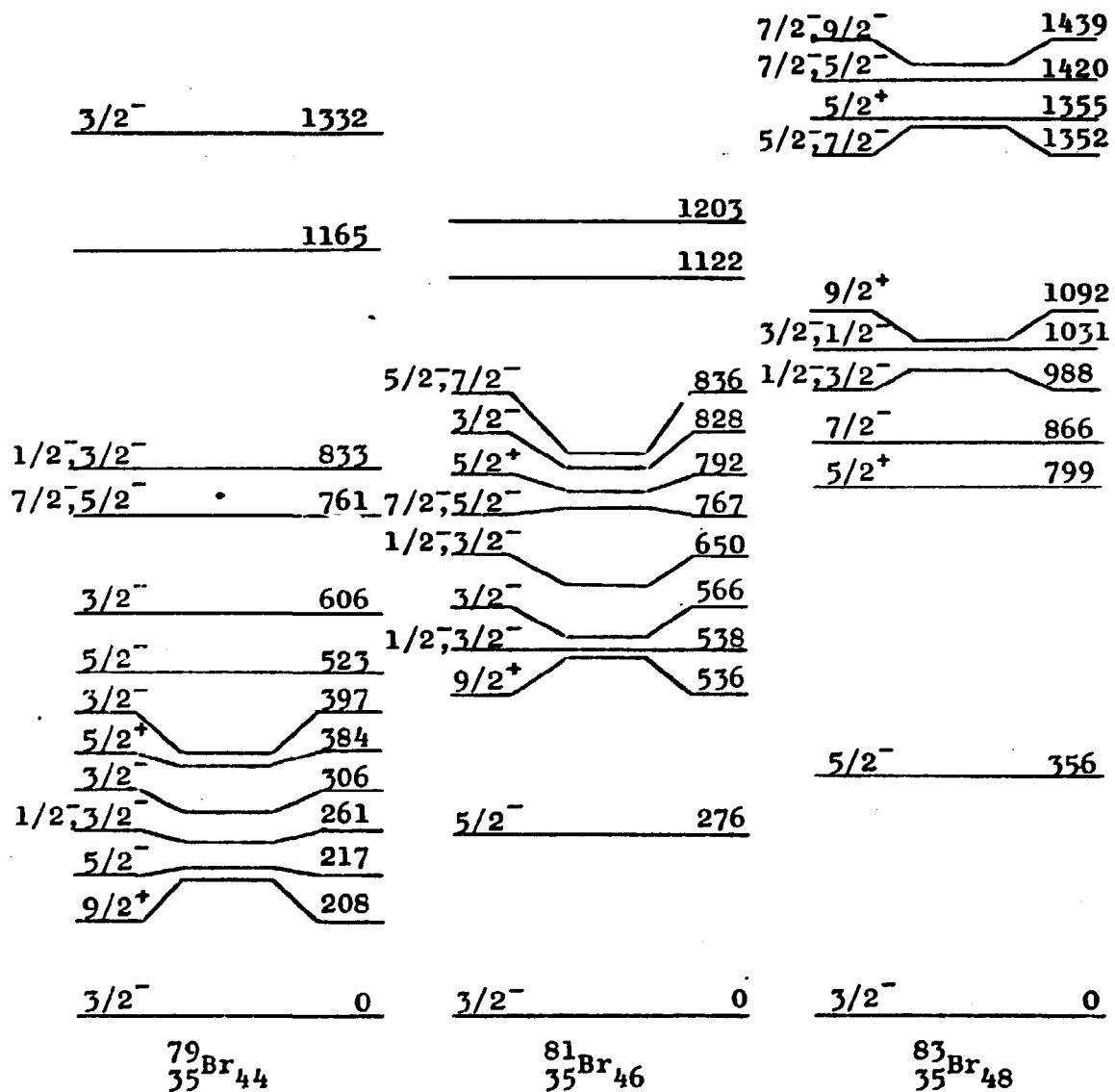


Figura 26. Comparação de níveis de baixa energia entre os núcleos de  $^{79}\text{Br}$ ,  $^{81}\text{Br}$  e  $^{83}\text{Br}$ . Os níveis com  $I^\pi = 5/2^+$  em 384 keV ( $^{79}\text{Br}$ ), 792 keV ( $^{81}\text{Br}$ ) e 1355 keV ( $^{83}\text{Br}$ ), são observados na reação  $(^3\text{He}, d)$ .<sup>70</sup>

ximadamente a mesma probabilidade nestes núcleos, com o crescimento na energia. Este fato, torna difícil a isolação de bandas rotacionais, de estados de paridade negativa, que são acoplados com outros estados por intensas transições gama.

## 6 CONCLUSÃO

As medidas de correlação angular gama-gama, nos núcleos do  $^{81}\text{Br}$  e  $^{83}\text{Br}$ , representam um acréscimo nas informações existentes sobre estes núcleos e para esta região de massa, principalmente, para o núcleo do  $^{83}\text{Br}$ , onde são poucos os trabalhos experimentais realizados. Este conjunto de resultados, possibilitou algumas confirmações de outros estudos, com indicação de prováveis valores de spins e paridades e a apresentação dos valores de razão de mistura multipolar das transições gama envolvidas neste estudo em ambos os núcleos.

A comparação sistemática entre os núcleos do  $^{79}\text{Br}$ ,  $^{81}\text{Br}$  e  $^{83}\text{Br}$ , permitiu apontar as similaridades existentes, como os estados de partícula única, os multipletos do acoplamento fraco com o caroço par-par vizinho e estados de paridade positiva em baixa energia, formando um duplete ( $9/2^+$ ,  $5/2^+$ ). A formação deste duplete é discutida em termos de um acoplamento de Coriolis.

Somente no caso do núcleo do  $^{83}\text{Br}$ , a estrutura de níveis não está claramente definida, pois em baixa energia há uma mistura de estados, com origens diferentes e não é possível distinguí-los, sem um estudo mais detalhado, envolvendo cálculos teóricos com modelos. Os resultados apresentados são elementos que permitem novos estudos, como o emprego de modelos nucleares e a utilização destes resultados para melhor delinear estes modelos.

Em termos experimentais estes estudos podem ser realizados de maneira muito mais eficiente, com a utilização de variantes da técnica empregada. A realização das medidas de correlação angular gama-gama no caso do núcleo do  $^{83}\text{Br}$ , deve ser feita apenas no espectrômetro composto pela combinação de de



tectores Ge(Li) - Ge(Li) em 4 ou mais ângulos, obtendo-se grande resolução em energia, permitindo serem feitas as correções necessárias nas coincidências, e com informação completa para o ajuste dos dados na função correlação angular. A introdução, neste arranjo, do modo biparamétrico, com o auxílio de computador acoplado ao sistema de aquisição de dados, permitiria uma coleta de dados muito eficiente e a pesquisa simultânea de todas as coincidências entre raios gama do espectro complexo do núcleo  $^{83}\text{Br}$ . Isto tudo, permitiria a indicação de muitos valores de spin e paridade, e cálculos de razões de misturas multipolares para muitas transições gama. Um cálculo teórico, utilizando os modelos nucleares, juntamente com todos resultados experimentais que seriam obtidos, permitiria uma boa discussão da estrutura de níveis para o  $^{83}\text{Br}$ .

Assim, os resultados obtidos, neste, e em outros trabalhos, e as discussões envolvendo os núcleos, compõem um passo para melhorar a compreensão da complicada estrutura de níveis excitados dos isótopos de A-ímpar do bromo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - ANDREEV, D.S.; GAL'PERIN, L.N.; IL'YASOV, A.Z.; LEMBERG, I.Kh.; CHUGUNOV, I.N.: Coulomb Excitation of  $^{77}\text{Se}$ ,  $^{79}\text{Br}$ ,  $^{81}\text{Br}$  and  $^{85}\text{Br}$ . Bull.Acad.Sci.USSR (Phys.Ser.) 32, 205(1968).
  - 2 - ARYA, A.P.: Investigation of 282 to 282 keV gamma cascade in  $^{81}\text{Br}$ . Bull.Am.Phys.Soc. 8, 86(1963).
  - 3 - BARNARD, E.; DE VILLIERS, J.A.M.; COETZEE, N.; REITMANN, D.; VAN DER MERWE, P.: The Energy Levels of  $^{79}\text{Br}$  and  $^{81}\text{Br}$ . Z.Physik 246, 424(1971).
  - 4 - BIEDENHARN, L.C. & ROSE, M.E.: Theory of angular correlation of nuclear radiations. Rev.Mod.Phys. 25, 729(1953).
  - 5 - BLACK, J.L. & GRUHLE, W.: Calculations of angular correlation attenuation factors and efficiencies for lithium drifted germanium detectors. Nucl.Instrum.Meth. 46, 213(1969).
  - 6 - BLATT, J.M. & WEISSKOPF, V.F.: Theoretical Nuclear Physics. N.York, J.Wiley e Sons., 1954
  - 7 - BRADY, E.L. & DEUTSCH, M.: Angular correlation of successive gamma-ray quanta. Phys.Rev. 72, 870(1947).
  - 8 - BRADY, E.L. & DEUTSCH, M.: Angular correlation of successive gamma-ray quanta. Phys.Rev. 74, 1541(1948).
  - 9 - BRADY, E.L. & DEUTSCH, M.: Angular correlation of successive gamma-rays. Phys.Rev. 78, 558(1950).
  - 10- BUCURESCU, D.; DRAGULESCU, E.; DUMA, M.; IRASCU, M.; POPESCU, D.; SEMENESCU, G.: Levels of  $^{83}\text{Br}$  from the ( $\alpha, p$ ) reaction. Rev.Roum.Phys. 18, 359(1973).
  - 11- CAMP, D.C. & VAN LEHN, A.L.: Finite Solid-angle correction for Ge(Li) detectors. Nucl.Instrum.Meth. 78, 192(1969).
  - 12- CHIRT, V.K.; NEMASHKALO, B.A.; EKHCHEV, O.I.; KRIVONOSOV, G.A. STORIZHKO, V.E.; POPOV, A.I.: Triple angular correlations in the  $^{78,80}\text{Se}(p, f)^{79,81}\text{Br}$  reactions. In: Proceedings of 27.
-

Conference on nuclear spectroscopy and nuclear structure.

Tashkent, USSR. 22-25.Mar.1977, p.32.

- 13- CHOPRA, R.C.: Core Excitation in  $^{79}\text{Br}$  and  $^{81}\text{Br}$ . Z.Physik 260, 315(1973).
- 14 -CHRISTIANSEN, J.; HEUBES, P.; INGWERSEN, H.; JOHANN, H.G.; KLINGER, W.; KREISCHE, W.; LAMPERT, W.; LOEFFLER, W.; SCHATZ, G.; WITTHUHN, W.: Magnetic Moments of isomeric states in  $^{66}\text{Ga}$ ,  $^{78}\text{Br}$  and  $^{81}\text{Br}$ . Rev.Roum.Phys.17(6), 751(1972).
- 15 -COTTRELL, C.W.: Transitions to the isomeric levels in  $^{79,81}\text{Br}$  produced indirectly by Coulomb excitation. J.Phys.A7, 100(1974)
- 16- DE-SHALIT, A.: Core Excitation in Nondeformed, Odd-A, Nuclei. Phys.Rev. 122, 1530(1961).
- 17- DEUTSCH, M. & METZGER, F.: Correlation between Direction and Polarization of Successive Gamma-ray Quanta. Phys.Rev. 74, 1542(1948).
- 18- DORIKENS, M.; DEMUYNCK, J.; DORIKENS-VANPRAET, L.: Experimental Study of Decay of  $^{81g}\text{Se}$  and  $^{81m}\text{Se}$ . Z.Physik 244, 321(1971).
- 19- DUNWORTH, J.W.: The application of the coincidence counting to experiments in nuclear physics. Nucl.Instrum.Meth. 11, 167 (1940).
- 20- EVANS, K.R. & AJZENBERG-SELOVE, F.: Excited States of  $^{81}\text{Br}$ . Nucl.Phys. A102, 237(1967).
- 21- FERENTZ, M. & ROSENZWEIG, N.: Table of angular correlation coefficients. In: Siegbahn, K. editor. Alpha, beta and gamma-ray spectroscopy. Amsterdam, North-Holland, 1965, p.1687.
- 22- FETTWEIS, P. & SADASIVAN, S.: The Decay of  $^{83g}\text{Se}$  and  $^{83m}\text{Se}$ . Z.Physik 263, 99(1973).
- 23- FRAUENFELDER, H. & STEFFEN, R.M.: Angular Correlations. In: Siegbahn, K. editor. Alpha, beta and gamma-ray spectroscopy v.2, Amsterdam, North-Holland, 1965 p.997.
- 24- FULLER, G.H. & COHEN, V.M.: Nuclear Data A5, 433(1969).

- 25- FUNKE, L.; DORING, J.; KEMNITZ, P.; WILL, E.; WINTER, G.; HILDINGSSON, L.; JOHNSON, A.; LINDBLAD, Th.: Three quasiparticle excitations in  $^{81}\text{Kr}$  and  $^{81}\text{Br}$ . In: Proceedings of 31. Conference on nuclear spectroscopy and nuclear structure, Samarkand, USSR.14-16.Apr.1981, p.68.
- 26- GILL, R.D.: Gamma-ray Angular Correlations. Londres, Academic Press, 1975.
- 27- GOERTZEL, G.: Angular correlation of gamma-ray. Phys.Rev.70, 897(1946).
- 28- GOODMAN, A. & SCHARDT, A.W.: Metastable States in  $^{77}\text{Br}$ ,  $^{79}\text{Br}$  and  $^{81}\text{Br}$ . Bull.Am.Phys.Soc. 4, 56(1959).
- 29- HAMILTON, D.R.: On directional correlation of successive quanta. Phys.Rev. 58, 122(1940).
- 30- HAMILTON, W.D.: Gamma-ray angular distribution and correlation measurements (I).Experimental methods using radioactive sources In: Hamilton, W.D. editor; The electromagnetic interactions in nuclear spectroscopy. Amsterdam, North-Holland, 1975, p.645.
- 31- HEYDENBURG, N.P.; PIEPER, G.F.; ANDERSON, C.E.: Coulomb Excitation of Krypton. Phys.Rev. 108, 106(1957).
- 32- HOUDAYER, A.; MARK, S.K.; KITCHING, J.A.; PARADELLIS, T.: Levels of  $^{77}\text{Br}$  populated in the decay of  $^{77}\text{Kr}$  and a unified model description of  $^{77,79,81,83}\text{Br}$  isotopes. Phys.Fenn. 9, 85(1974).
- 33- HOURANY, E.: Correction Geometrique des Coefficients de Correlation Angulaire. Nucl.Instrum.Meth. 94, 401(1971).
- 34- KISSLINGER, L.S. & SORENSEN, R.A.: Spherical Nuclei with simple residual forces. Rev.Mod.Phys. 35, 853(1963).
- 35- KRACÍKOVÁ, T.I.; PROCHÁZKA, I.; FRÁNA, J.; FISER, M.; JURSIK, J.; MASTALKA, A.: The Decay of 22.1 min  $^{83g}\text{Se}$  and 69.2 sec  $^{83m}\text{Se}$  to the levels of  $^{83}\text{Br}$ . Czech.J.Phys. B24, 852(1974).

- 36- KRACÍKOVÁ, T.I.; PROCHÁZKA, I.; FRÁNA, J.; FISER, M.; JURSIK, J.; MASTALKA, A.: Verification of the  $^{83m}\text{Se}$  ( $T_{1/2} = 69.2$  s) decay scheme. Bull.Acad.Sci.USSR (Phys.Ser) 40(10), 2129(1976)
- 37- KRANE, K.S. & JEFFEN, R.M.: Determination of the  $\delta(E2/M1)$  multipole mixing ratios of the gamma transitions in  $^{110}\text{Cd}$ . Phys.Rev. C2, 724(1970).
- 38- LAMSON, R.D. & URETSKI, J.L.: Center-of-gravity Theorem in nuclear spectroscopy. Phys.Rev. 108, 1300(1957).
- 39- LEDERER, C.M. & SHIRLEY, V.S.: Table of Isotopes (1978).
- 40- MALIK, F.B. & SCHOLZ, W.: Level Spectra of Odd-Even  $1f_{7/2}^-$  shell nuclei in the Coriolis Coupling Model. Phys.Rev. 150, 919(1966).
- 41- MARLOW, K.W. & WAGGONER, M.A.: Radioactive Decay of  $^{83}\text{Se}$ . Phys.Rev. 163, 1098(1967).
- 42- METZGER, F. & DEUTSCH, M.: A Study of the Polarization - Direction Correlation of Successive Gamma-ray Quanta. Phys.Rev. 78, 551(1950).
- 43- MITROSHIN, V.E. & NEMASHKALO, B.A.: Excited State structure of  $^{79,81}\text{Br}$  isotopes. In: Proceedings of 31. Conference on nuclear spectroscopy and nuclear structure. Samarkand, USSR 14-16.Apr.1981, p213.
- 44- MITROSHIN, V.E.; NEMASHKALO, B.A.; CHIRT, V.K.: Structure of the Excited States of the odd isotopes of bromine  $^{75,77,79}\text{Br}$   $^{81,83}\text{Br}$ . Bull.Acad.Sci.USSR(Phys.Ser) 46(5), 877(1982).
- 45- MOSZKOWSKI, S.A.: Theory of multipole radiation. In: Siegbahn, K. editor. Alpha, beta and gamma-ray spectroscopy, Amsterdam North-Holland, 1965, v.2
- 46- MUMINOV, A.I.; YULDASHEV, U.; IBRAGINOV, B.: On some properties of  $^{83}\text{Br}$  nucleus excited states. In: Proceedings of 27. Conference on nuclear spectroscopy and nuclear structure. Tashkent, USSR, 22-25.Mar.1977, p.35.

- 47- MUMINOV, A.I.; IBRAGIMOV, B.; KUL'DZHANOV, I.K.; RAZHABBAEV, R.; ABUBAKIROV, R.Kh.: Gamma-gamma angular correlations in  $^{81}\text{Br}$ . In: Proceedings of 30. Conference on nuclear spectroscopy and nuclear structure. Leningrad, USSR, 18-21.Mar.1980, p.68.
- 48- NAINAN, T.D.: Conversion Coefficients of Low-Energy Gamma Radiation following the Decay of  $^{81}\text{Se}$  and  $^{81m}\text{Se}$ . Phys.Rev. 4C 1680(1971).
- 49- Nuclear Data Sheets, 27, n° 3, 1979, p.365.
- 50- Nuclear Data Sheets, 33, n° 2, 1981, p.241.
- 51- Nuclear Data Sheets, 36, n° 2, 1982, p.168.
- 52- PARADELLIS, T. & HONTZEAS, S.: Some Odd Z nuclei in the  $63 \leq A \leq 89$  Mass Region in the Framework of the Intermediate Coupling Model. Can.J.Phys. 49, 1750(1971).
- 53- PRAWIROSOEHARDJO, S.S.: Energy Levels of  $^{81}\text{Br}$  Populated by the Decay of  $^{81m}\text{Se}$  and  $^{81}\text{Se}$ . Phys.Rev. 157, 995(1967).
- 54- RAO, P.V. & FINK, R.W.: Gamma Decay of the  $^{73m,g}\text{Se}$  and  $^{81m,g}\text{Se}$  Isomeric Pairs. Phys.Rev. 154, 1028(1967).
- 55- ROBINSON, R.L.: Triple angular correlation. In: Proc.Internatl. Conf. Radioactivity in Nuclear Structure, Nashville(1969); Ed: J.H.Hamilton, J.C.Manthuruthil, Gordon and Breach Sci.Pub.NY(1972) p.549
- 56- ROBINSON, R.L.; MCGOWAN, F.K.; STELSON, P.H.; MILNER, W.T.: Low-lying levels of  $^{79}\text{Br}$ . Nucl.Phys. A96, 6(1967).
- 57- ROBINSON, R.L.; MCGOWAN, F.K.; MILNER, W.T.; STELSON, P.H.: Coulomb Excitation of  $^{81}\text{Br}$ . Nucl.Phys. A193, 14(1972).
- 58- ROSE, H.J. & BRINK, D.M.: Angular distributions of gamma rays in terms of phase-defined reduced matrix elements. Rev.Mod.Phys. 39(2), 306(1967).
- 59- SALOMON, M. & HOJVAT, C.: Low lying levels in  $^{81}\text{Br}$ . C.J.Phys. 47, 2255(1969).

- 60- SAXENA, R.N.; MONTEIRO, N.T.S.; BAIRRIO NUEVO Jr., A.:  
Espectrômetro Automático para Correlação Angular gama-gama.  
Publicação IEA nº 359 (outubro 1974).
- 61- SCHOLZ, W. & MALIK, F.B.: Level Spectra of Odd Isotopes of  
Ga, As, Br and Rb in the Coriolis Coupling Model with a  
residual interaction of pairing type. Phys.Rev. 176(4),  
1355(1968).
- 62- SCHUSSLER, F.: Study of the Decay of  $^{83m}\text{Se}$  (69 s) by means  
of a Magnetic Multichannel beta spectrometer. J.Phys.(Paris),  
29, 385(1968).
- 63- SEGRÈ, E.: Nuclei and particles. N.York, Benjamin Co., 1965.
- 64- STEFFEN, R.M. & ALDER, K.: Angular distribution and  
correlation of gamma-rays. In: Hamilton, W.D., editor. The  
electromagnetic interaction in nuclear spectroscopy. Amsterdam  
North-Holland, 1975, p.505.
- 65- STEWART, K.W. & CASTEL, B.: An intermediate coupling model  
for Br isotopes. J.Phys. A3, 390(1970).
- 66- TWIN, P.J.: Gamma-ray angular distribution and correlation  
measurement (II) Experimental methods following nuclear  
reactions. In: Hamilton, W.D. editor. The electromagnetic  
interaction in nuclear spectroscopy. Amsterdam, North-Holland  
1975.
- 67- YATES, M.J.L.: Finite solid angle corrections. In: Karlson, E.  
Mathias, E.; Siegbahn, K. editores. Perturbed angular  
correlations. Proceedings on..., Uppsala, May 27-30, 1963.  
Amsterdam, North-Holland, 1964, p.453.
- 68- YTHIER, C.; MEYER, J.C.; KONIJN, J.; VAN LIESHOUT, R.: Sur  
la Désintégration de  $^{81}\text{Se}$ . Physica 34, 559(1967).
- 69- ZOLLER, W.H. & WALTERS, W.B.: Decay of 18.6 min  $^{81g}\text{Se}$  and  
57.3 min  $^{81m}\text{Se}$ . Phys.Rev. 185, 1541(1969).
-

70- ZUMBRO, J.D.; TARARA, E.W.; BROWNE, C.P.: Study of the levels of  $^{77,79,81,83}\text{Br}$  with the  $^{76,78,80,82}\text{Se}(\text{}^3\text{He},\text{d})$  reaction.

Nucl.Phys. A393, 15(1983).



ERRATA

página

- 7 7ª linha: onde está escrito "E é a energia...", leia-se "E<sub>γ</sub> é a energia...".
- 29 Figura 8, escala de W(θ)/W(90°): onde está escrito "1.1" leia-se "1.13".
- 39 Figura 14, legenda: onde está escrito (a), leia-se (b) e vice-versa.
- 56 Tabela 4: faltaram os sinais "±" entre o valor e seu erro (0,004±0,014...)
- 62 Figura 25: O valor da energia da transição gama entre os níveis de energia de 2693,7 keV e 799 keV é 1894,8 keV.
- 71 2º parágrafo, 6ª linha: onde está escrito "spins 7/2", leia-se "spins ≤ 7/2".

OBSERVAÇÕES

1. Na Figura 9, esquema de níveis de energia do <sup>81</sup>Br, os valores entre parênteses após a energia de cada transição gama, representam as intensidades de cada transição, sendo que a transição 275,9 keV é considerada com intensidade de 100, e as transições 767,3 keV e 492,4 keV são muito fracas.
2. Na Figura 16, esquema de níveis de energia do <sup>83</sup>Br, os valores entre parênteses após a energia das transições, não representam a intensidade das transições, e sim a porcentagem das transições gama em cada nível de energia.
3. Nas Figuras 15 e 15, esquemas parciais de energia do <sup>81</sup>Br e <sup>83</sup>Br, respectivamente, há indicação das intensidades das transições de interesse neste estudo, através da largura das linhas representativas das transições gama.