

34: 072736

BR0343201



AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE
DE SÃO PAULO

**CORRELAÇÃO ANGULAR DIRECIONAL GAMA-GAMA
NO NÚCLEO DE ^{76}Se**

SONIA POMPEU DE CAMARGO

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

**Orientadora:
Dra. Cibele Bugno Zamboni**

**São Paulo
1998**

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

Autarquia Associada à Universidade de São Paulo

**CORRELAÇÃO ANGULAR DIRECIONAL GAMA-GAMA
NO NÚCLEO DE ^{76}Se**

SONIA POMPEU DE CAMARGO

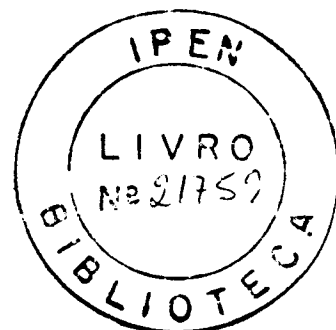
Tese apresentada como parte dos requisitos
para obtenção do grau de Doutor em
Ciências na Área de Tecnologia Nuclear.

Orientador:

Dra.: Cibele Bugno Zamboni

São Paulo

1998



*Dedico este trabalho
a minha mãe Wilma O. Braguetto de Camargo
e a Alexandre Loeb
pelo carinho e ajuda inestimável.*

Agradecimentos

Agradeço à todas as pessoas que tiveram, de alguma forma, uma participação especial na realização deste trabalho, em particular a:

Cibele B. Zamboni pela sua dedicada orientação, estímulo, paciência, amizade e principalmente pela oportunidade de trabalhar ao seu lado no campo da pesquisa científica, o que muito tem significado na minha carreira profissional

Dr. Tiago Freitas da Cruz, co-autor deste trabalho, pela ajuda na aquisição dos dados experimentais e proveitosas discussões.

Dr. Vito Roberto Vanin, co-autor deste trabalho, pelo auxílio no tratamento dos dados experimentais.

Agostinho, Fred, Ilka, Vania, Kátia, Mário, Berretta, Roberto e Cauê, pelo apoio e colaboração na elaboração de figuras e no trabalho de digitação.

Dra. Linda V. E. Caldas, Presidente da Comissão de Pós- Graduação no IPEN, pelo apoio técnico e científico, junto ao grupo de Estrutura Nuclear.

Instituto de Física da Universidade de São Paulo, pela oportunidade de realizar este trabalho nas instalações do Laboratório do Acelerador Linear.

Dra. Ingrid D. Taricano, Dr. Godofredo Genofre C. Netto, Prof. Francisco B. Hoffman e Prof. Mauro Takeda, pelo apoio e incentivo em desenvolver trabalhos de pesquisa junto à UNISA.

Amigos do LAL, IPEN e UNISA, sempre solidários.

Ana Maria pela cuidadosa revisão do texto.

Ana Cristina, Geralda e Eduardo pelo incentivo, amizade, coleguismo e apoio de sempre.

CNPQ e Universidade de Santo Amaro – UNISA, pelo suporte financeiro.

Elsa, Wilma, Francisca Paula, Vera, Denise, Guilherme, Claudio, Caco, Sonia, Angela e Claudia, pela constante presença.

CORRELAÇÃO ANGULAR DIRECIONAL GAMA-GAMA NO NÚCLEO DE ^{76}Se

Sonia Pompeu de Camargo

RESUMO

Foram realizadas medidas de correlação angular direcional $\gamma\gamma$ no núcleo de ^{76}Se acompanhando-se o decaimento β^- do ^{76}As , utilizando-se um espectrômetro $\gamma\gamma$ constituído de dois detetores de HPGe. Foram estudadas 52 cascatas $\gamma\gamma$, resultando na determinação da razão de mistura multipolar de 38 transições γ . Os resultados obtidos no presente estudo juntamente com os dados existentes na literatura possibilitaram confirmar e, em alguns casos, estabelecer o spin de todos os níveis envolvidos. Os dados experimentais obtidos foram discutidos por meio de uma comparação sistemática de algumas propriedades nucleares dos isótopos de Se com número de massa par, $A = 72-86$ e isótonos $N = 42$.

DIRECTIONAL GAMMA-GAMMA ANGULAR CORRELATION IN
 ^{76}Se

Sonia Pompeu de Camargo

ABSTRACT

The directional $\gamma\gamma$ angular correlations in ^{76}Se have been measured following the β^- decay of ^{76}As using HPGe-HPGe spectrometer. Measurements have been carried out for 52 γ -cascades resulting in the determination of multipole mixing ratios for 38 transitions. Present results together with the results of earlier studies also permitted definite assignments of spins to the levels involved in the present study. A comparison of some of the properties of even mass Se nuclei with $A = 72-86$ and isotones $N = 42$ has been made in order to illustrate the systematic variation of these properties with mass number.

SUMÁRIO

	Página
INTRODUÇÃO	1
1 Fundamentos Teóricos da Correlação Angular de Raios Gama	
1.1 Introdução	4
1.2 Correlação Angular Direcional $\gamma\gamma$	4
1.3 Função Correlação Angular $\gamma\gamma$	7
1.4 Correlação Angular Tripla	10
2 Técnicas Experimentais	
2.1 Produção das Amostras de ^{76}As	12
2.2 Instrumentação Nuclear	12
2.2.1 Espectrômetro $\gamma\gamma$	13
2.2.2 Eletrônica de Coincidência	14
2.3 Aquisição em Modo Biparamétrico	19
3 Procedimento Experimental	
3.1 Medidas de Coincidências $\gamma\gamma$	21
3.2 Análise dos Dados	22
3.3 Cálculo dos Coeficientes A_{kk}	25
3.4 Cálculo da Razão de Mistura Multipolar	26
3.5 Resultados	27
4 Análise dos Dados Experimentais	50
5 Estudo Sistemático dos Isótopos de Selênio e Isótonos $N = 42$, com A-par.	
5.1 Introdução	64

5.2 Níveis de Energia e Propriedades Nucleares	65
5.3 Estudo do Comportamento da Razão E_{4^-} / E_{2^-}	74
5.4 Estudo Sistemático do Comportamento da Banda ($\Delta J = 2$ e $\pi = +$) nos Isótopos de Selênio	77
6 Conclusão	81
Referências Bibliográficas	83

LISTA DE TABELAS

	Página
3.1 - Valores de A_{22} e A_{44} para as cascatas gama do ^{76}Se	30
3.2 - Valores das razões de mistura multipolar para as transições gama no ^{76}Se	34
4.1 - Estudo comparativo das medidas de correlação angular direcional $\gamma\gamma$ no núcleo de ^{76}Se	63
5.1 - Valores experimentais do momento de quadrupolo elétrico do estado 2_1^- , para os isótopos de Se e ^{74}Ge (isótono $N = 42$) considerados no presente estudo sistemático	68
5.2 - Razão de mistura multipolar $\delta(E2/M1)$ [32] associado as transições γ dos isótopos de Se e isótonos $N=42$ que compõem o presente estudo sistemático	69

LISTA DE FIGURAS

	Página
1.1 - Esquema típico de níveis de uma cascata $\gamma\gamma$	6
1.2 - Esquema simplificado do arranjo experimental	6
1.3 - Esquema típico de níveis de uma cascata gama tripla	11
2.1 - Esquema do espectrômetro $\gamma\gamma$	16
2.2 - Diagrama de blocos do sistema eletrônico de coincidências $\gamma\gamma$	17
2.3 - Resolução em tempo da eletrônica de coincidência $\gamma\gamma$	18
2.4 - Matriz de coincidência (2048 + 2048) canais X 4096 canais X contagens	20
3.1 - Espectros parciais de coincidências obtidos a partir da janela em energia efetuada nas transições gama de 575 keV e 1216 keV no ângulo de 90^0	24
3.2 - Função correlação angular ajustada (1.1) e os pontos experimentais da função para as cascatas γ estudadas no decaimento do ^{76}As (energia em keV)	38
3.3.a - Elipses de correlação angular e dados de A_{kk} obtidos dos ajustes referentes as cascatas: $I_i - 2 - 0$, com $I_i = 1,2,3$ e 4	47
3.3.b - Elipses de correlação angular e dados de A_{kk} obtidos dos ajustes referentes as cascatas: $I_i - 2 - 2$, com $I_i = 1,2,3$ e 4, para $\delta(657) = 4,13$	48
3.4 - Estudo do χ^2 em função de δ para a cascata (2110-559) keV, para a seqüência de spin $2^- - 2^+ - 0^+$	49
4.1 - Esquema de decaimento do núcleo de ^{76}As proposto pelo NDS [35]	61
4.2 - Reprodução de esquema de decaimento do núcleo de ^{76}As proposto em [7], com as previsões de I^π estabelecidas no presente estudo.	62

5.1 – Diagrama parcial dos níveis de energia dos isótopos do selênio par-par com $A = 72$ a $A = 86$. As energias dos níveis são dadas em keV	70
5.2 – Diagramas parciais dos níveis de energia dos isótonos $N = 42$. As energias dos níveis são dadas em keV	71
5.3 – Diagrama de níveis de energia do ^{76}Se do presente estudo e as previsões dos modelos vibracional e rotacional	72
5.4 - Gráfico de $\log(\delta^2/E_\gamma)$ versus número de massa, para as transições $2_2^+ \rightarrow 2_1^+$, considerando os isótopos de Se ($A = 72$ a 80) e isótonos $N = 42$ (Ge e Kr)	73
5.5 - Análise sistemática da razão E_{4^+}/E_{2^+} em função do número de massa para isótopos de Se e isótonos $N = 42$	75
5.6 - Variação de $2\zeta/\hbar^2$ versus $(\hbar\omega)^2$ para os isótopos de Selênio com $A=72$ a 78	79
5.7 - Variação de $\Delta E(E_{1,1-2})$ em função de J_{\min} para os isótopos de Selênio $A=72$ a 78	80

INTRODUÇÃO

Para a compreensão e a interpretação das características estruturais do núcleo faz-se necessário o conhecimento preciso de propriedades dos estados nucleares, tais como: spin, paridade, energia, momento de quadrupolo elétrico, meia vida e outras. Simultaneamente, a física teórica propõe-se a explicar os fatos observados experimentalmente através de modelos.

Os dados experimentais referentes à estrutura nuclear provém basicamente de informações sobre reações nucleares e decaimento radioativo. Este último considera o decaimento de núcleos radioativos, nos quais o núcleo pai freqüentemente se desintegra por emissão de partículas, deixando o núcleo filho em um estado excitado, sendo sua desexcitação, na maioria das vezes, por emissão de radiação eletromagnética.

As propriedades nucleares podem ser estudadas por meio de várias técnicas experimentais, possibilitando a obtenção de informações sobre a estrutura do núcleo. Entre as técnicas existentes temos a destacar, dentro do campo da espectroscopia nuclear, a técnica de correlação angular gama-gama [1,2,3]. Trata-se de uma técnica fundamentada em medidas de coincidência entre transições gama emitidas em cascata por um núcleo excitado, em função do ângulo formado entre as direções de emissão destas radiações [1,2,3]. A medida de correlação angular fornece informações sobre spin e momentos nucleares dos níveis excitados bem como dados para o cálculo da razão de mistura multipolar das transições γ . A comparação destes parâmetros com modelos nucleares possibilita a compreensão da estrutura nuclear bem como o desenvolvimento e ou aprimoramento de modelos.

O objetivo do presente estudo é realizar medidas de correlação angular direcional $\gamma\gamma$ no núcleo de ^{76}Se , visando obter informações a respeito do

spin e paridade dos níveis excitados, bem como a determinação do caráter multipolar das transições γ envolvidas. A escolha deste núcleo deveu-se ao particular interesse em suas propriedades nucleares, uma vez que existem, até o presente, poucos dados sobre a razão de mistura multipolar de suas transições γ , bem como divergências na proposição de spin e paridade de alguns níveis excitados sugeridos em trabalhos anteriores.

A determinação experimental de propriedades nucleares, na região de massa ~ 70 , compõe a sistemática de estudo realizada pelo grupo de Estrutura Nuclear do IPEN (LEN) em parceria com o Laboratório do Acelerador Linear do IFUSP. Dentro deste contexto, vários trabalhos envolvendo os núcleos de $^{61,69}\text{Ga}$, ^{72}Ge , $^{76,77}\text{Se}$, ^{84}Kr e $^{81,83}\text{Br}$ e as técnicas de espectroscopia beta e gama e correlação angular $\gamma\gamma$ [4,5,6,7,8,9,10, 11] foram realizados, fornecendo razoável quantidade de informações para esta região de massa, e gerando subsídios para a elaboração de modelos. Particularmente, a decisão de se aplicar a técnica de correlação angular direcional $\gamma\gamma$ no núcleo de ^{76}Se , tem por base dois estudos realizados pelo grupo, neste núcleo, a saber: estudo do decaimento do β^- no núcleo de ^{76}As [7] e correlação angular $\gamma\gamma$ no núcleo de ^{76}Se [8].

O estudo, que compreende medidas de espectroscopia γ e de coincidência $\gamma\gamma$, propõe várias modificações no esquema de níveis do ^{76}Se como observação de novas transições γ ; proposição de níveis de energia; posicionamento de transições γ ; além de questionar a existência de várias transições γ e de vários níveis de energia. No experimento de correlação angular [8] somente as cascatas $\gamma\gamma$ mais intensas foram medidas fornecendo poucos dados de razão de mistura multipolar. Isto significa que mais observáveis precisam ser obtidos para a correta interpretação do comportamento estrutural do núcleo de ^{76}Se .

O presente estudo foi realizado com o propósito de medir correlações angulares para o maior número de cascatas incluindo as que envolvem transições γ de mais baixa energia (< 500 keV) e baixa intensidade relativa, isto é, < 5 % (relativa pois refere-se a transição γ de 559 keV considerada 100 %).

As medidas foram realizadas no LEN-IFUSP que dispõe de uma infraestrutura que permite a aquisição de dados em modo biparamétrico. Foi utilizado um espectrômetro automático constituído por dois detetores de HPGe. Este aparato experimental permitiu o estudo de 52 cascatas γ , das quais 33 foram analisadas pela primeira vez.

A apresentação dessas medidas é abordada em 6 capítulos. O capítulo 1 apresenta, de forma sucinta, os aspectos teóricos relevantes sobre a teoria de correlação angular. O capítulo 2 contém uma descrição do arranjo experimental utilizado e dos métodos usados no tratamento de dados. O capítulo 3 apresenta a descrição do experimento e dispõe os dados experimentais obtidos em comparação com os resultados mais recentes da literatura. No capítulo 4 é apresentada a discussão dos resultados experimentais no que diz respeito a atribuição de spin e paridade para cada um dos níveis estudados. No capítulo 5 é apresentado um estudo sistemático envolvendo os isótopos de Selênio ($A = 72$ a 82) e isótonos $N = 42$. No capítulo 6 são apresentadas as conclusões do presente estudo. Na seqüência são listadas as referências em ordem de citação.

As expressões matemáticas, as tabelas e as figuras são numeradas para cada capítulo com o número do capítulo precedendo o número de ordem.

1 Fundamentos Teóricos da Correlação Angular de Raios Gama

1.1 Introdução

As bases teóricas da correlação angular foram inicialmente discutidas por DUNWORTH [12] e HAMILTON [13], na década de 40, mas os primeiros dados experimentais só foram obtidos depois, em 1947, por BRADY e DEUTSCH [14]. A teoria da correlação angular está bem estabelecida, como mostram os trabalhos de ROSE e BRINK [1], BIEDENHARN e ROSE [3], FRAUENFELDER e STEFFEN [2] e STEFFEN e ALDER [15]. Quanto a detalhes no que diz respeito ao experimento de correlação angular destacam-se os trabalhos elaborados por TWIN [16] e HAMILTON [17].

1.2 Correlação Angular Direcional $\gamma\gamma$

A técnica da Correlação Angular Direcional $\gamma\gamma$ tem por base princípios gerais de simetria que levam em consideração a conservação do momento angular e da paridade. Para dar uma idéia do processo que caracteriza a correlação angular direcional $\gamma\gamma$ tomemos como exemplo um núcleo excitado que decai por emissão sucessiva de dois raios γ , cujo esquema de decaimento pode ser observado na figura 1.1.

Quando um núcleo emite uma radiação gama, existe uma dependência angular entre a direção de emissão deste raio gama e o spin do nível envolvido. Entretanto, esta dependência não é observada em condições normais pois a distribuição ao acaso da orientação desses spins provoca isotropia angular. É necessário, então, que se selecione núcleos orientados em uma determinada direção, criando-se um padrão anisotrópico.

Uma das maneiras de se observar prováveis anisotropias consiste em detectar raios γ em coincidência, fixando um detetor na direção de emissão do raio γ_1 e detectar o raio γ_2 com um detetor móvel em diferentes ângulos em relação ao detetor de γ_1 . A figura 1.2 apresenta um esquema deste arranjo experimental.

Desta forma podemos obter a variação da taxa de coincidência entre raios γ (γ_1 e γ_2) nos diferentes ângulos (θ) formados entre os detetores (fixo e móvel).

A correlação angular direcional entre dois raios gama sucessivos, pode ser afetada se a orientação do spin do nível intermediário sofrer alterações durante o período que o núcleo permanece neste estado. Neste caso teremos a chamada correlação angular perturbada. No entanto, essas perturbações podem ser insignificantes se a vida média (τ) do nível intermediário for menor que 10^{-10} segundos.

Figura 1.1 - Esquema típico de níveis de uma cascata $\gamma\gamma$.

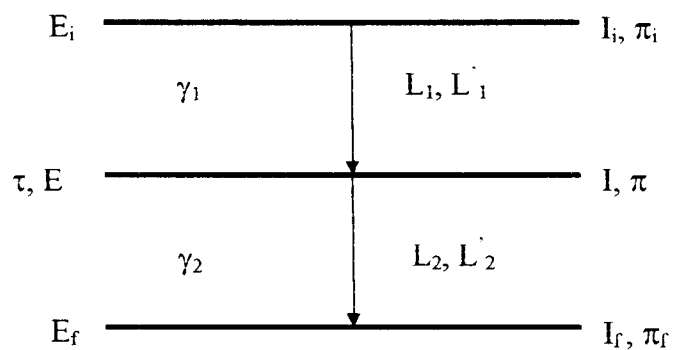
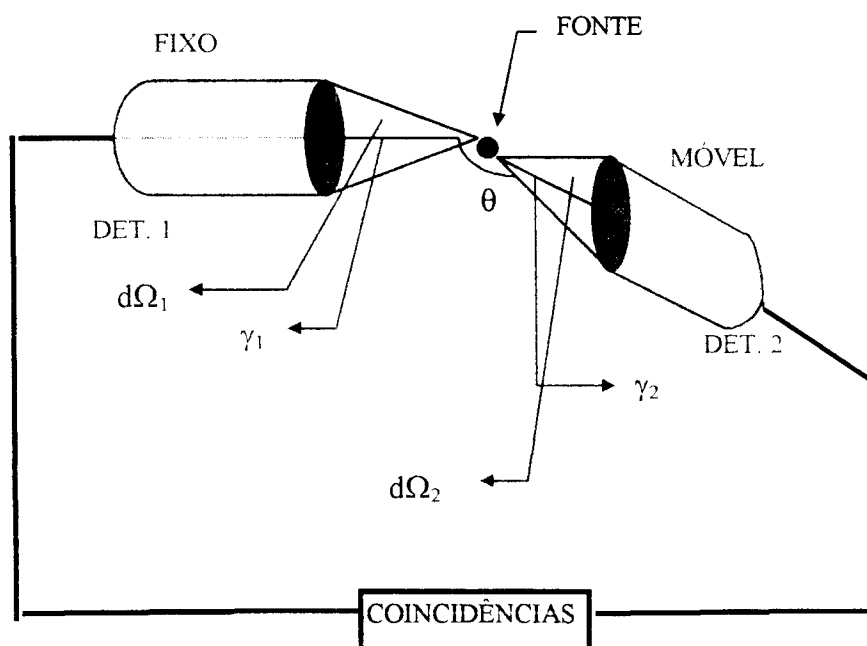


Figura 1.2 - Esquema simplificado do arranjo experimental.



1.3 Função Correlação Angular $\gamma\gamma$

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

$$w(\theta) = \sum_k A_{kk} P_k(\cos\theta) \quad k=0,2,4 \quad (1.1)$$

onde,

$w(\theta)$ = taxa de eventos adquiridos em função do ângulo (θ) entre os detetores

A_{kk} = coeficientes de correlação angular

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

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

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

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

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

onde,

$A_k(\gamma_1)$ é o coeficiente de orientação direcional e $A_k(\gamma_2)$ o coeficiente de distribuição direcional de γ_2 .

A descrição da correlação angular para cascata γ , onde existem transições de multipolaridade mista, pode ser expressa, segundo FALKOFF e LING [18], por:

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

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

onde

os coeficientes F_k dependem dos spins dos níveis e das multipolaridades das transições γ e podem ser calculados, explicitamente, da teoria. São definidos para estados inicial I_i , intermediário I e final I_f , como:

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

onde:

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

e

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

Estes coeficientes foram tabelados por FERENTZ e ROSENZWEIG [19].

Normalmente, $K_{\max} = 4$ pois as multipolaridades das transições γ (L_n e L_n') são, na maioria das vezes, do tipo dipolar ou quadrupolar.

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

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

onde:

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

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

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

As informações sobre os elementos de matriz podem ser obtidas através do cálculo das interações dos núcleos com o campo eletromagnético. Um estudo completo sobre esse tipo de interação é apresentado na referência [20].

Como, em geral, somente as componentes multipolares L_n e $L_n = L_{n+1}$, com $n=1,2$ são predominantes, a interpretação física da razão de mistura multipolar pode ser expressa por:

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

1.4 Correlação Angular Tripla

O tratamento quantitativo dado ao mecanismo da correlação angular considerou, até então, por questão de simplicidade, o caso de uma cascata simples. Entretanto, no processo de desexcitação nuclear pode-se ter mais de duas radiações emitidas em cascata, principalmente em núcleos com esquema de níveis mais complexos. A figura 1.3 representa uma cascata tripla com os parâmetros que a caracterizam, isto é, energia (E), spin (I) e paridade (π).

Quando há emissão de três raios gama em sucessão formando uma cascata tripla, obtém-se uma expressão para a função correlação angular entre a transição γ_1 e a transição γ_3 , sem a observação da transição γ_2 , introduzindo-se na equação (1.1) um fator multiplicativo $U_k(I_2 I_3)$, que é denominado coeficiente de distribuição angular da transição γ não observada [12, 21]. Este fator U_k é dado por:

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

onde:

os coeficientes $U_k(L_2 I_2 I_3)$ e $U_k(L_2' I_2 I_3)$ encontram-se tabelados na referência [1];

os L_2 e L_2' representam as menores ordens multipolares da transição γ_2 ;

δ_2 é a razão de mistura multipolar de γ_2 .

Desta maneira, a função correlação angular direcional tripla, sem a observação da transição intermediária, pode ser expressa da seguinte forma:

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

onde

$A_k(\gamma_n)$ é definido em (1.3).

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

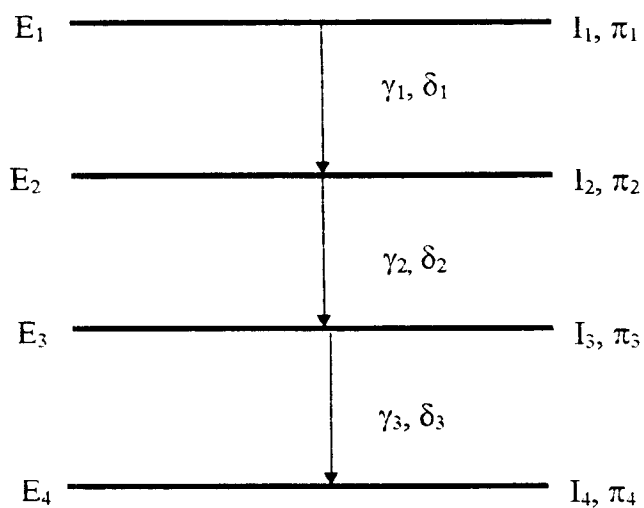
Desta forma teremos:

$$W(\theta)(\gamma_1, \gamma_3) = \sum_{k=2,4} A_k(\gamma_1) U_k(\gamma_2) \dots U_k(\gamma_{n-1}) A_k(\gamma_n) P_k(\cos\theta) \quad k = 2,4 \quad (1.11)$$

onde,

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

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



2 Técnicas Experimentais

Neste capítulo será descrita a metodologia utilizada na produção das amostras de ^{76}As e a instrumentação nuclear utilizada na medida de correlação angular direcional $\gamma\gamma$.

2.1 Produção das Amostras de ^{76}As

As fontes de ^{76}As ($T_{1/2} = 26$ h) foram obtidas por meio da reação $^{75}\text{As}(n,\gamma)^{76}\text{As}$, que por decaimento β^- popula os estados excitados do ^{76}Se . Para tanto, foram irradiados cerca de 10 mg de Arsênio metálico, quimicamente puro (99,999%), com nêutrons térmicos num fluxo de 10^{13} n/cm²s, no reator IEA-R1 do IPEN, por um período de 5 minutos.

No preparo das fontes de ^{76}As foram utilizadas quatro amostras de ^{75}As , irradiadas em rodízio, no intuito de se manter constante a atividade inicial de cada fonte. Foram produzidas um total de 70 fontes, sendo que cada uma delas foi utilizada durante um período de aproximadamente uma meia-vida.

2.2 Instrumentação Nuclear

Nesta etapa será descrito o espectrômetro $\gamma\gamma$ e o sistema eletrônico associado, bem como o sistema de aquisição de dados biparamétrico, utilizados na obtenção dos dados experimentais

2.2.1 Espectrômetro $\gamma\gamma$

O espectrômetro $\gamma\gamma$ consiste de uma base com eixo mecânico e duas mesas, uma móvel e outra fixa, que suportam os dois detetores (de γ_1 e γ_2). Um motor de passo, associado à mesa móvel e a um microcomputador, proporciona a mudança dos ângulos entre os detetores de forma automática. Um medidor analógico digital, com precisão de $0,01^\circ$, associado à mesa móvel proporciona a verificação instantânea de sua posição angular.

A mesa móvel gira em torno de um eixo de rotação posicionado exatamente no centro geométrico do arranjo onde é fixada a fonte radioativa.

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

Detetores de HPGe de 89 cm^3 (fixo) e 50 cm^3 (móvel) compõem o espectrômetro. Colimadores cônicos de chumbo envolvem estes detetores com a finalidade de impedir que fótons espalhados em um detetor sejam coletados no outro, provocando eventos de coincidências espúrias.

Este arranjo experimental pode ser observado da figura 2.1.

2.2.2 Eletrônica de Coincidência

O sistema eletrônico de coincidência utilizado é do tipo rápido-lento. A parte rápida desse sistema é responsável pela formação e amplificação dos sinais dos detetores, com boa caracterização em tempo. É a parte do sistema que permite selecionar, por meio da coincidência temporal, os raios γ emitidos por um mesmo núcleo. A parte lenta, por sua vez, processa os sinais tornando-os lineares e de maior duração, para análise de sua altura, que contém a informação de energia. O diagrama de blocos deste sistema é apresentado na figura 2.2.

Os detetores são alimentados por fontes de alta tensão (4800 V e 2500 V). De cada detetor são extraídos dois sinais, um para a parte rápida e outro para a parte lenta do sistema eletrônico. Na parte lenta os pulsos produzidos por cada detetor, devido a incidência da radiação γ , após serem pré-amplificados, entram nos amplificadores lineares (ORTEC 572). O amplificador de cada detetor processa os sinais recebidos e transmite três sinais: bipolar, unipolar e empilhamento. Os pulsos unipolares de cada amplificador, com altura de pulso proporcional à energia da radiação γ incidente, são transmitidos a conversores analógico-digitais (ORTEC 800 - CAD). Os pulsos bipolares são transmitidos a analisadores monocanal (ORTEC 551 - TSCA) que possuem a função de gerar um pulso lógico indicando a presença de um sinal no respectivo amplificador. Estes sinais seguem para duas unidades de coincidências (ORTEC 418 A), sendo que uma seleciona eventos totais e outra eventos acidentais. O sinal de empilhamento (pulso lógico) indica a sobreposição de sinais devido à elevada taxa de incidência de raios γ nos respectivos detetores. Os sinais de empilhamento, de cada amplificador são enviados às unidades de coincidências onde são analisados em anticoincidência com os demais sinais.

Na parte rápida da eletrônica os pulsos provenientes de cada pré-amplificador (correspondentes à segunda saída) são enviados a amplificadores rápidos (ORTEC 579 - FFA) produzindo, em cada saída, um pulso negativo proporcional à energia e bem marcado em tempo. Associados aos amplificadores rápidos estão dois discriminadores de fração constante (ORTEC 473 - CFD) que produzem sinais lógicos negativos rápidos, os quais são enviados a um conversor de tempo em altura de pulso (ORTEC 467 - TPHC). O sinal de saída de um dos discriminadores (start) dá partida na contagem em tempo no TPHC e o sinal correspondente a outra saída do discriminador (stop), após convenientemente atrasado, comanda a parada da contagem de tempo. A saída do conversor de tempo em altura de pulso gera um espectro de tempo apresentado na figura 2.3. Neste espectro, com auxílio de dois analisadores monocanais, um interno ao conversor de tempo (TPHC/SCA) e outro (ORTEC 551 - TSCA), são selecionadas duas regiões de mesma largura em tempo (~ 11 ns), uma sobre o pico de coincidências totais e a segunda, devidamente afastada da primeira, na região de coincidências acidentais.

O analisador monocanal acoplado ao TPHC seleciona a janela em tempo ao redor do pico (fig. 2.3), enviando um sinal lógico positivo a uma unidade de coincidência rápida. Esta janela é denominada de coincidências totais.

O analisador monocanal (ORTEC 551 - TSCA) que recebe o pulso do conversor de tempo seleciona uma janela, de mesma largura porém deslocada do pico de eventos totais (fig. 2.3), que corresponde à janela de eventos acidentais. O pulso lógico positivo resultante é, por sua vez, enviado a uma segunda unidade de coincidências.

Os sinais provenientes das unidades de coincidências, totais e acidentais, são enviados a um circuito sincronizador SINCBIP [22], que controla a operação dos conversores analógicos digitais (CAD) associados a cada detetor. O

SINCBIP [22] está conectado a um sistema CAMAC de aquisição de dados e ao computador PDP 11/84 por meio de um microprocessador MBD.

Quando existe uma coincidência a ser registrada, esse sistema transfere para o computador uma informação composta de 24 bits, sendo 12 de um dos conversores, 11 do outro e um bit que indica se a coincidência é total ou acidental. Os dados obtidos são armazenados em modo fila.

Figura 2.1 - Esquema do espectrômetro $\gamma\gamma$.

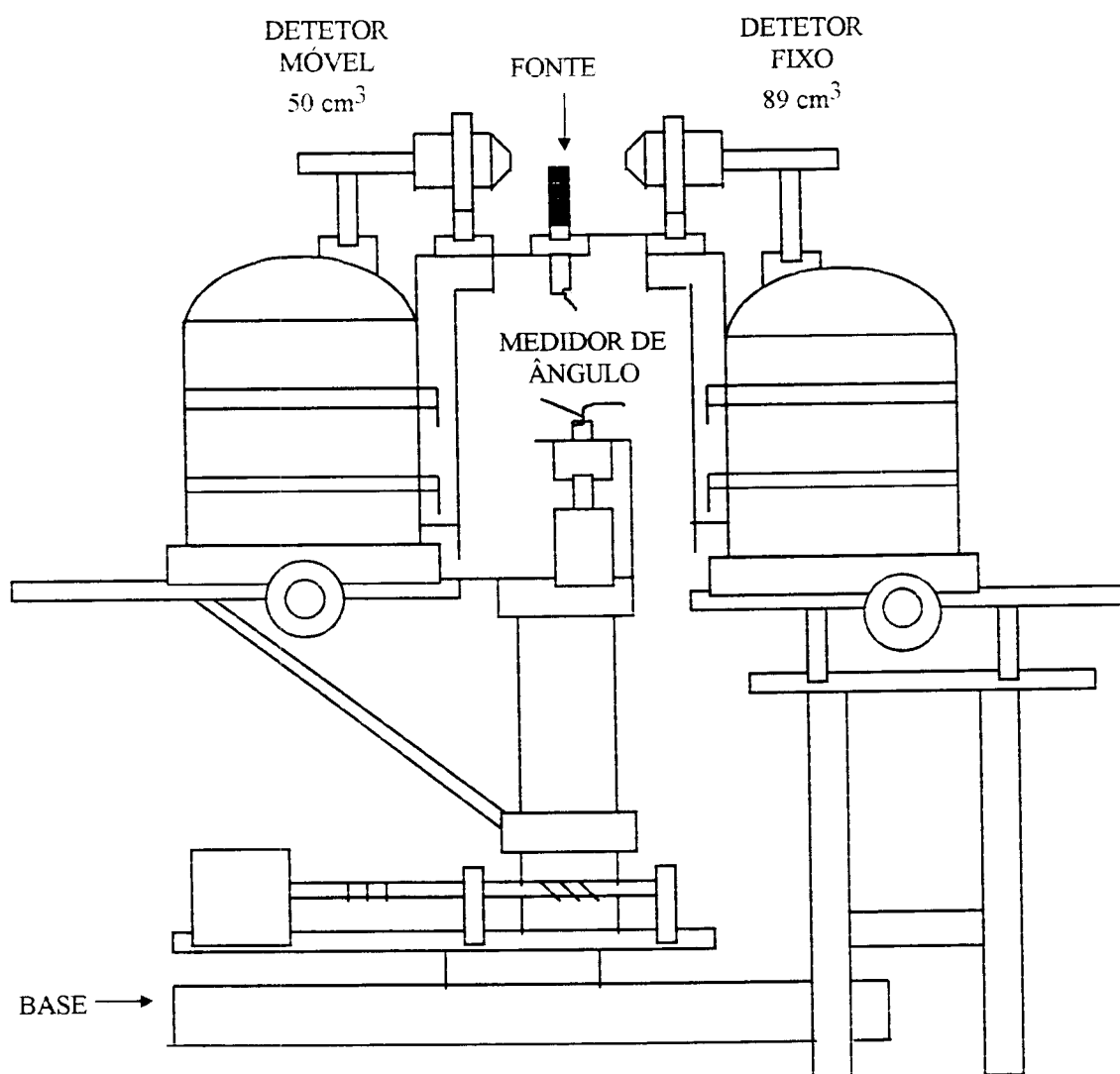


Figura 2.2 - Diagrama de blocos do sistema eletrônico de coincidências $\gamma\gamma$.

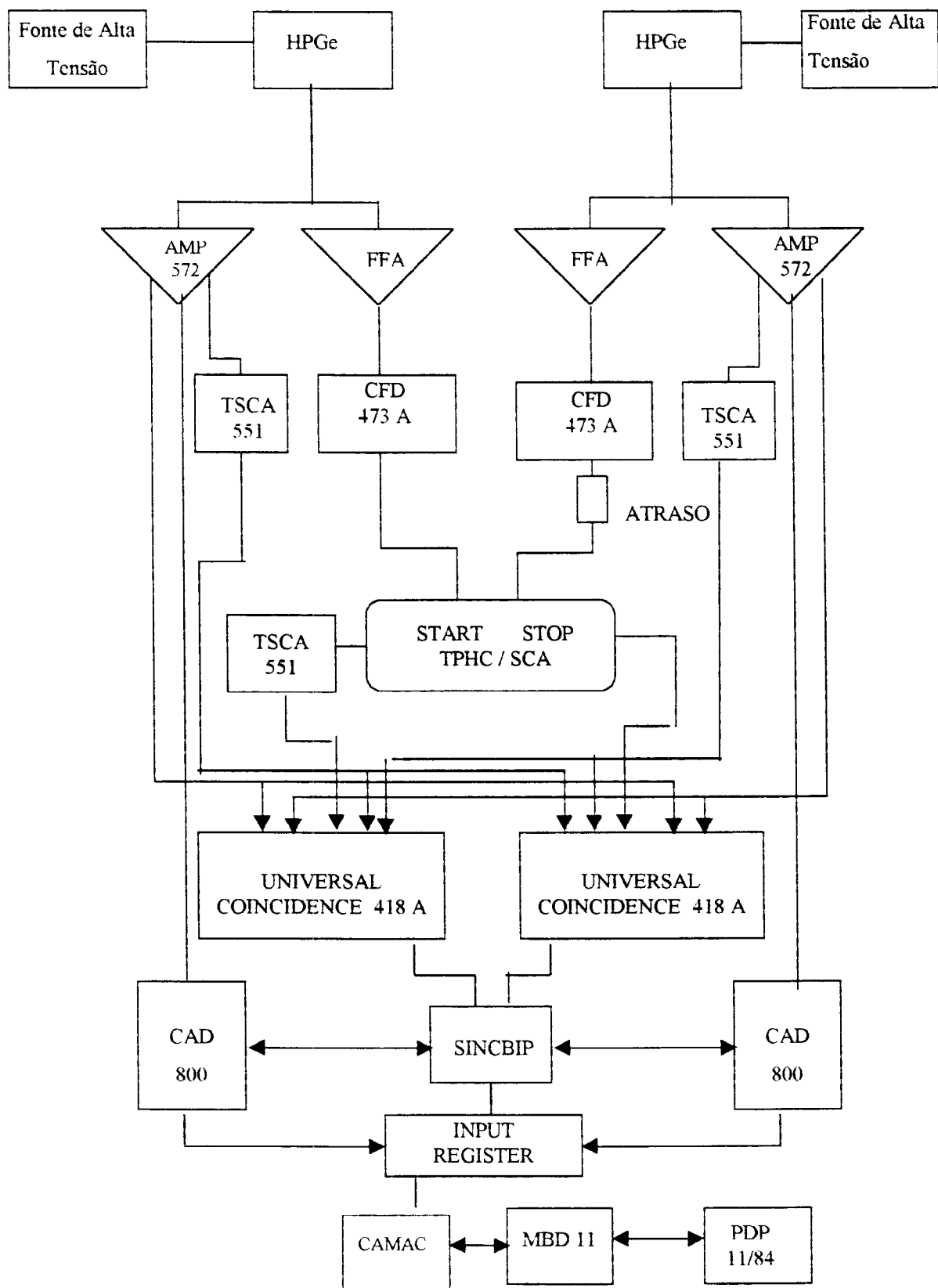
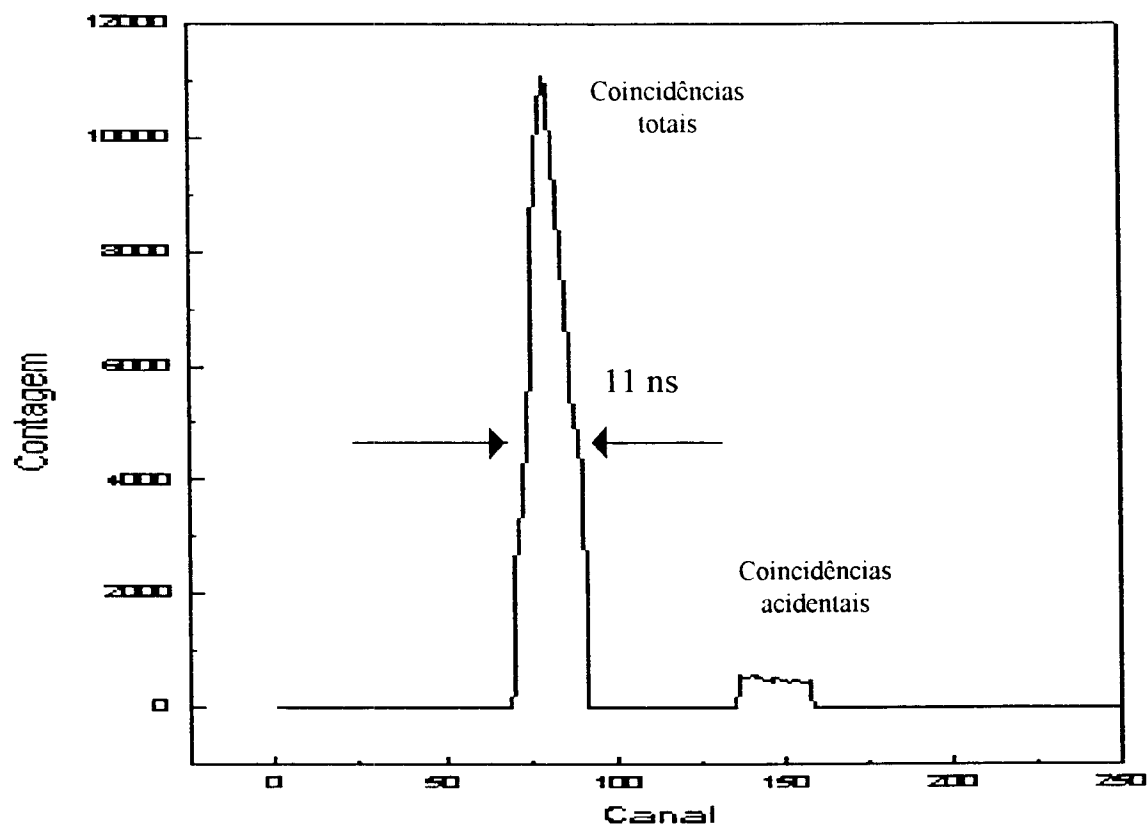


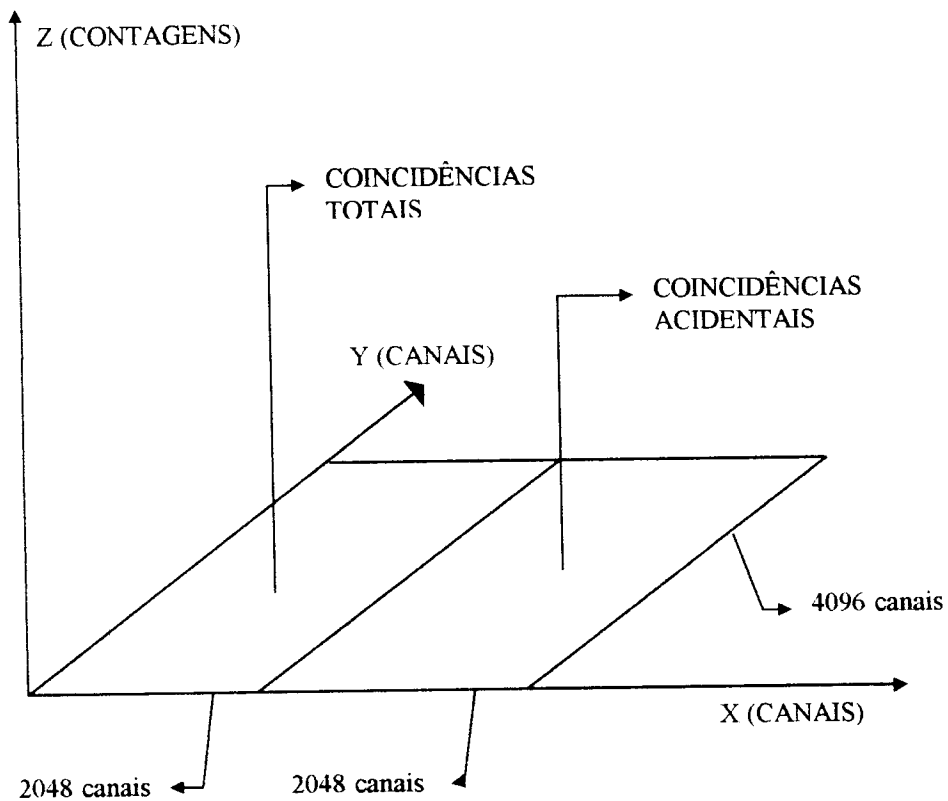
Figura 2.3 - Resolução em tempo da eletrônica de coincidência $\gamma\gamma$.

2.3 Aquisição em Modo Biparamétrico

Os eventos de coincidência dizem respeito à aquisição de transições γ em cascata provenientes do mesmo núcleo, tomadas por dois detetores simultaneamente. Na aquisição biparamétrica estes eventos são tomados em forma de uma tríade XYZ, como mostra a figura 2.4, onde o eixo X corresponde às transições γ tomadas por um dos detetores, no caso o detetor HPGe de 89 cm³, Y é o eixo correspondente à aquisição das transições γ adquiridas pelo outro detetor, o HPGe de 50cm³, que estão em coincidência com X. O eixo Z corresponde ao número de eventos de coincidência detectados durante o tempo de medida.

A aquisição em modo biparamétrico permite que os eventos de coincidências totais e acidentais sejam adquiridos simultaneamente. Os espectros biparamétricos são acumulados no computador VAX 6330 [23], onde é efetuada a histogramação dos dados obtidos. Para tanto foi utilizado o programa MBP [24] que possibilita a montagem da matriz XYZ (fig. 2.4).

Figura 2.4 - Matriz de coincidência (2048 + 2048) canais \times 4096 canais \times contagens.



3 Procedimento Experimental

Neste capítulo serão descritos a medida de correlação angular direcional $\gamma\gamma$ que constitui-se na aquisição de espectros biparamétricos de raios gama em cascata, em diferentes posições angulares, e o tratamento de dados experimentais, bem como serão apresentados os resultados obtidos no presente estudo juntamente com os dados mais recentes da literatura para comparação.

3.1 Medidas de Coincidências $\gamma\gamma$

A medida de correlação angular direcional $\gamma\gamma$ baseia-se na determinação do número de coincidências $\gamma\gamma$, ($W(\theta)$), observadas em função do ângulo (θ) entre os detetores (fig. 1.2). Torna-se, portanto, necessário a obtenção das áreas dos fotopicos dos raios γ pertencentes ao espectro de coincidências de cada transição γ que se deseja estudar, em cada ângulo onde foi efetuada a medida. Na obtenção destas áreas é necessário primeiramente descontar os eventos acidentais e de efeito Compton que são coletados pelos detetores provocando contribuições espúrias nas áreas dos fotopicos. A contribuição Compton trata-se de eventos provenientes de espalhamentos de raios γ que estão em coincidência com a transição γ em estudo, podendo provocar uma correlação indesejada. As coincidências acidentais são impulsos que chegam simultaneamente nas entradas dos módulos de coincidências mas não são transições γ pertencentes ao mesmo núcleo. Este efeito é estatístico e não varia em função do ângulo em que está sendo realizada a medida.

Portanto, para se estimar o número de coincidências verdadeiras, $W(\theta)$, deve-se considerar a ocorrência de efeitos acidentais, W_{ac} , bem como as

coincidências devido a contribuição Compton, $W_{co}(\theta)$, nas áreas das transições γ observadas, $W_i(\theta)$.

Assim, as coincidências verdadeiras podem ser expressas por:

$$W(\theta) = W_i(\theta) - W_{co}(\theta) - W_{ac} \quad (3.1)$$

No presente estudo, as medidas de correlação angular $\gamma\gamma$ foram realizadas no espectrômetro $\gamma\gamma$ descrito em (2.2). O registro dos dados em modo biparamétrico [23] foi feito em 4096 canais para o detetor de 50 cm³ e 2048 canais para o detetor de 89 cm³, abrangendo transições gama com energias entre 400 keV e 2700 keV. Os eventos de coincidências foram obtidos em quatro diferentes ângulos, a saber: 90^o, 120^o, 150^o e 180^o. Foram acumuladas um total de 229 horas de aquisição de eventos de coincidências por ângulo.

3.2 Análise dos Dados

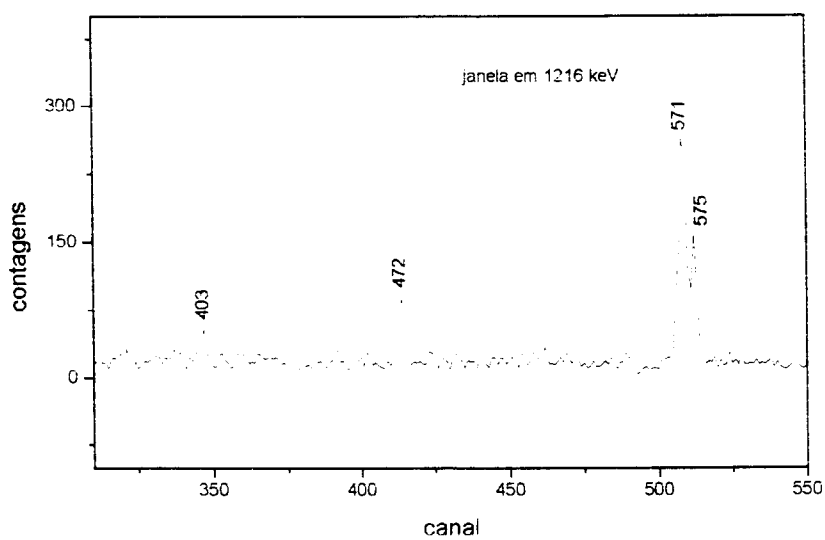
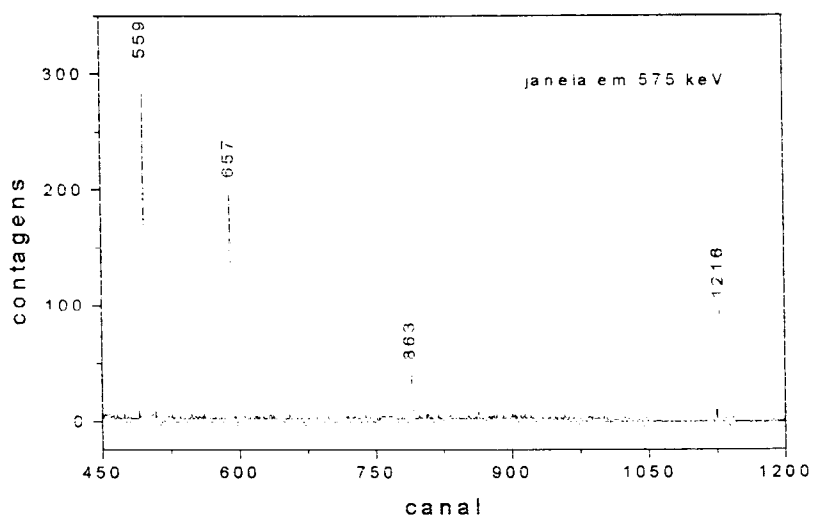
Os dados obtidos na medida de correlação angular direcional $\gamma\gamma$ foram histogramados, como definido em (2.3), com o auxílio do programa MBP [24], resultando em quatro matrizes (fig. 2.4) referentes aos ângulos de 90^o, 120^o, 150^o e 180^o.

Em seguida, com auxílio do programa Panoramix [25] foram efetuadas 34 janelas (em energia) em cada uma das matrizes, correspondendo a 34 transições γ que envolvem as cascatas que se deseja estudar. O programa Panoramix [25] permite discriminar cada transição γ individualmente (fatiar o espectro no eixo Y (fig. 2.4)), descontar eventos acidentais e efeito Compton e apresenta o espectro

de coincidências com a transição γ discriminada. Desta forma, foram gerados 136 espectros de coincidência. Para dar uma idéia, a figura 3.1 apresenta os espectros parciais de coincidências obtidos a partir da janela em energia efetuada nas transições gama de 575 keV e 1216 keV, no ângulo de 90° .

As áreas $W(\theta)$ das transições gama presentes nos 136 espectros de coincidências foram obtidas utilizando-se o programa Panoramix [25]. Para este cálculo foram fixados os parâmetros: posição e FWHM com o auxílio do programa Fitgos [26]. Foi também efetuada uma distribuição gaussiana dos valores de χ^2 dos ajustes efetuados pelo programa Panoramix, de cada transição γ nos 136 espectros de coincidência. Esta análise foi efetuada com auxílio do programa Anachi2 [26]. Os programas Fitgos e Anachi2 estão associados ao programa Panoramix. Desta forma, foram efetuados um total de 5576 ajustes (41 posições em 136 espectros).

Figura 3.1 - Espectros parciais de coincidências obtidos a partir da janela em energia efetuada nas transições gama de 575 keV e 1216 keV no ângulo de 90° .



3.3 Cálculo dos Coeficientes A_{kk}

A taxa de coincidências verdadeiras permite o cálculo dos coeficientes A_{kk} experimentalmente, (A_{22}^{exp} e A_{44}^{exp}), por meio do ajuste dos mínimos quadrados da função correlação angular [2], descrita em (1.1). Uma vez que as transições gama estudadas neste trabalho caracterizam-se principalmente por radiações dipolares e quadrupolares, esta função reduz-se ao polinômio:

$$w(\theta) = 1 + A_{22}P_2(\cos\theta) + A_{44}P_4(\cos\theta),$$

descrito em (1.3). Entretanto, os resultados de A_{kk} , assim obtidos, não podem ser comparados aos valores teóricos sem que sejam efetuadas as correções devido aos efeitos de geometria finita dos detetores e da dimensão da fonte. Nas condições experimentais do presente estudo, a dimensão da fonte radioativa pode ser considerada desprezível, então,

$$A_{kk} = A_{kk}^{exp} / Q_{kk} \quad (3.2)$$

com

$$Q_{kk} = Q_k(\gamma_1) \cdot Q_k(\gamma_2) \quad (3.3)$$

onde

os fatores Q_{kk} são funções da geometria dos detetores, do ângulo sólido entre o detetor e a fonte radioativa e das energias dos raios γ das cascatas em questão. Assim $Q_k(\gamma_1)$ e $Q_k(\gamma_2)$ expressam esta correção para os detetores individuais de γ_1 e γ_2 , conforme a figura 1.2 [27, 28].

3.4 Cálculo da Razão de Mistura Multipolar

Como já visto no capítulo 1 os valores de A_{22} e A_{44} , que podem ser obtidos experimentalmente, dependem do spin dos níveis envolvidos na cascata em estudo (I_i, I, I_f) e da razão de mistura multipolar das transições gama pertencentes a esta cascata, $\delta(\gamma_1)$ e $\delta(\gamma_2)$. Desta forma, somente com a obtenção dos coeficientes de correlação angular, A_{kk} , não é possível determinar todos estes parâmetros nucleares. Em muitos casos, algumas destas grandezas já estão estabelecidas em trabalhos realizados anteriormente. Nos casos em que já existem informações sobre spin de dois níveis e da razão de mistura multipolar de uma das transições gama, para uma cascata gama simples (fig. 1.1), o método da correlação angular direcional permite determinar o spin do terceiro nível e a razão de mistura multipolar da outra transição gama. Estes parâmetros são obtidos por meio do melhor ajuste de χ^2 em função da razão de mistura multipolar (δ) para uma seqüência de spins apropriada com base nas regras de seleção envolvidas nos decaimentos β e γ , sendo χ^2 em função de δ dado por:

$$\chi^2 = \sum_i \left[\frac{W^{\text{teo}}(\theta_i) - W^{\text{exp}}(\theta_i)}{\sigma(\theta_i)} \right]^2 \quad (3.4)$$

onde

$W^{\text{teo}}(\theta_i)$ é a função correlação angular teórica para uma dada seqüência de spin;

$W^{\text{exp}}(\theta_i)$ é a função correlação angular obtida experimentalmente;

$\sigma(\theta_i)$ é o desvio correspondente a $W^{\text{exp}}(\theta_i)$.

Desta forma, o valor mínimo de χ^2 fornece o valor de δ experimental, em acordo com FERGUSON [29] e JAMES et al. [30]. O ajuste desta função é feito

por meio de um programa de computador [31], onde são testados valores de delta variando de $-\infty < \delta < +\infty$.

Para se determinar spins duvidosos, os ajustes são efetuados para todas as seqüências de spins prováveis, com base nas informações sobre o decaimento β e γ , sendo a melhor estimativa aquela que apresentar menor valor de χ^2 .

A dependência dos coeficientes de correlação angular A_{kk} em função da razão de mistura multipolar das transições gama envolvidas, $\delta(\gamma_1)$ e $\delta(\gamma_2)$, gera num plano curvas paramétricas em forma de elipses (fig. 3.3), sendo que a forma destas elipses depende da seqüência de spins. É possível, em muitos casos, determinar uma seqüência de spins, acrescentando-se os coeficientes A_{kk} experimentais (A_{22}^{exp} e A_{44}^{exp}) em curvas paramétricas geradas a partir de valores teóricos de A_{kk} (A_{22}^{teo} e A_{44}^{teo}) (fig. 3.2). O ponto na curva onde ocorre a intersecção das barras de erros associadas aos valores experimentais define a seqüência de spins da cascata em estudo. Entretanto, em muitos casos podem ocorrer interseções em mais de uma curva paramétrica, não sendo possível a escolha de uma única seqüência de spins.

3.5 Resultados

Por meio das relações de coincidências obtidas a partir das 34 janelas em energia efetuadas em cada uma das matrizes de dados biparamétricos, descritos em (2.3), foi possível obter os coeficientes de correlação angular A_{kk} de 52 cascatas $\gamma\gamma$, sendo 43 simples e 9 triplas. Estes valores estão listados na tabela 3.1. Na primeira coluna desta tabela é descrito o nível inicial (I_i) que compõe a cascata em estudo. Na segunda coluna é apresentada a cascata γ em estudo, bem como a

seqüência de spin associada. A identificação da cascata é feita numericamente. Na terceira e quarta colunas, têm-se os valores A_{22} e A_{44} e erros associados, respectivamente.

A figura 3.2 apresenta a curva de correlação angular ajustada para o polinômio descrito na equação (1.2), para cada uma das cascatas estudadas.

Na figura 3.3 estão apresentadas as curvas paramétricas de A_{22} e A_{44} em função de $\arctg \delta$ para seqüências de spins selecionadas, onde estão assinalados os valores experimentais de A_{22} e A_{44} , com seus respectivos erros, obtidos no presente estudo.

A razão de mistura multipolar $\delta \left(\frac{L'_n}{L_n} \right)$ das transições gama, com as seqüências de spin mais consistentes com as medidas de correlação angular direcional e com outros resultados, tanto de decaimento beta e gama como de reações nucleares [32], foi obtida por meio do estudo de χ^2 em função de δ , equação 3.4. Como exemplo, a figura 3.4 apresenta o ajuste obtido para a cascata (2110-559) keV para a seqüência de spins ($2^- - 2^+ - 0^+$), com intuito de se obter a razão de mistura multipolar da transição gama de 2110 keV. A tabela 3.2 apresenta a razão de mistura multipolar das transições gama, pertencentes ao decaimento β^- do ^{76}As , obtidas no presente estudo. Na primeira e segunda coluna desta tabela estão listadas a energia e intensidade das transições gama, respectivamente, na terceira e quarta coluna os spins dos níveis e as cascatas gama associados à transição em estudo. Em seguida estão listadas as razões de mistura multipolar obtidas no presente trabalho.

Nas tabelas 3.1 e 3.2 os resultados de outros trabalhos foram incluídos para comparação. Particularmente, os dados de A_{kk} obtidos para a cascata (657-559) keV, que é a mais intensa do esquema de níveis do ^{76}Se , bem como a razão de

mistura multipolar da transição gama de 657 keV, quando comparados com os dados da literatura [8, 33] mostram o bom desempenho do espectrômetro utilizado.

Tabela 3.1 - Valores de A_{22} e A_{44} para as cascatas gama do ^{76}Se .

NÍVEL (keV)	CASCATA $\gamma\gamma$ (keV -keV) SEQÜÊNCIA DE SPIN	A_{22} A_{44} PRESENTE ESTUDO	A_{22} A_{44} [8]
1122	{1} 563 - 559 $0^+ - 2^+ - 0^+$	0,287(6) 1,073(9)	0,234(36) 1.108(78)
1216	{2} 657 - 559 $2^+ - 2^+ - 0^+$	-0,224(3)	-0,225(25)
		0,297(5)	0,309(38)
			-0,220(7) [33]
			0,275(10)
			-0,185(12) [34]
		0,305(2)	
		-0,188(12) [35]	
		0,211(14)	
		-0,195(20) [36]	
		0,304(17)	
1330	{3} 771 - 559 $4^+ - 2^+ - 0^+$	0,122(17) 0,020(27)	0,105(19) -0,014(30)
1689	{4} 472 - 657 $3^+ - 2^+ - 2^+$	-0,131(46)	-
		0,043(67)	-
	{5} 472 - 657 - 559 $3^+ - 2^+ - 2^+ - 0^+$	-0,212(46) -0,109(55)	- -
1787	{6} 1129 - 559 $3^+ - 2^+ - 0^+$	0,179(18)	0,240(19)
		-0,064(28)	0,057(32)
1787	{7} 456 - 771 $2^+ - 4^+ - 2^+$	0,183(33)	-
		0,097(49)	-
	{8} 456 - 771 - 559 $2^+ - 4^+ - 2^+ - 0^+$	0,085(33) 0,419(49)	- -
	{9} 571 - 657 $2^+ - 2^+ - 2^+$	-0,043(19) 0,015(29)	- -

continuação

1787	{10}	571-1216 $2^+ - 2^+ - 0^+$	-0,250(31) 0,057(45)	0,145(22) 0,048(35)
	{11}	665 - 563 $2^+ - 0^+ - 2^+$	0,118(9) -0,018(14)	- -
	{12}	665 - 563 - 559 $2^+ - 0^+ - 2^+ - 0^+$	-0,023(13) 0,023(19)	-0,013(6) 0,046(10)
	{13}	1228 - 559 $2^+ - 2^+ - 0^+$	0,471(6) 0,058(9)	0,471(7) 0,097(11)
	{14}	575 - 657 $2^+ - 2^+ - 2^+$	0,158(30) 0,280(46)	- -
1791	{15}	575 - 1216 $2^+ - 2^+ - 0^+$	0,291(49) 0,981(76)	- -
	{16}	1232 - 559 $2^+ - 2^+ - 0^+$	0,303(46) 0,276(73)	- -
2026	{17}	695 - 771 $4^+ - 4^+ - 2^+$	-0,212(65) -0,020(94)	- -
	{18}	809 - 657 $4^+ - 2^+ - 2^+$	0,131(53) -0,217(81)	- -
	{19}	809 - 657 - 559 $4^+ - 2^+ - 2^+ - 0^+$	-0,122(57) -0,035(84)	- -
	{20}	809 - 1216 $4^+ - 2^+ - 0^+$	0,168(80) -0,233(129)	- -
2170	{21}	1611 - 559 $0^+ - 2^+ - 0^+$	0,368(102) 0,793(166)	- -
2429	{22}	403 - 809 $3^- - 4^+ - 2^+$	-0,178(47) 0,026(69)	- -
	{23}	403 - 695 - 771 $3^- - 4^+ - 4^+ - 2^+$	-0,160(72) 0,105(104)	- -
	{24}	403 - 695 $3^- - 4^+ - 4^+$	0,009(70) 0,183(107)	- -

continuação

2429	{25}	740 - 1129 3 ⁻ - 3 ⁺ - 2 ⁺	0,384(24) -0,020(38)	- -
	{26}	740 - 472 3 ⁻ - 3 ⁺ - 2 ⁺	0,309(33) -0,003(51)	- -
	{27}	1212 - 1216 3 ⁻ - 2 ⁺ 0 ⁺	-0,090(11) 0,013(16)	-0,058(8) 0,013(13)
	{28}	1212 - 657 3 ⁻ - 2 ⁺ - 2 ⁺	-0,017(7) -0,018(10)	-0,011(8) 0,020(13)
	{29}	1212 - 657 - 559 3 ⁻ - 2 ⁺ - 2 ⁺ - 0 ⁺	0,024(7) -0,014(10)	-0,051(8) 0,081(12)
	{30}	1870 - 559 3 ⁻ - 2 ⁺ - 0 ⁺	0,111(44) -0,014(67)	0,050(40) 0,008(64)
2514	{31}	727 - 1228 2 ⁺ - 2 ⁺ - 2 ⁺	0,013(72) -0,038(108)	- -
	{32}	727 - 665 2 ⁺ - 2 ⁺ - 0 ⁺	-0,061(94) -0,001(139)	- -
	{33}	1956 - 559 2 ⁺ - 2 ⁺ - 0 ⁺	0,997(144) 0,452(208)	- -
2655	{34}	863 - 575 1 ⁻ - 2 - 2 ⁺	0,128(68) -0,082(10)	- -
	{35}	867 - 1228 1 ⁻ - 2 ⁺ - 2 ⁺	0,112(26) -0,049(41)	0,133(23) -0,003(38)
	{36}	867 - 665 1 ⁻ - 2 ⁺ - 0 ⁺	-0,272(39) -0,037(56)	- -
	{37}	867 - 1787 1 ⁻ - 2 ⁺ - 0 ⁺	-0,204(65) 0,043(94)	- -
	{38}	1439 - 1216 1 ⁻ - 2 ⁺ - 0 ⁺	-0,230(27) 0,005(39)	-0,237(39) 0,012(63)
	{39}	1439 - 657 1 ⁻ - 2 ⁺ - 2 ⁺	-0,065(17) -0,014(26)	- -

continuação

2655	{40} 1439 - 657 - 559 1 ⁻ - 2 ⁺ - 2 ⁺ - 0 ⁺	0,069(17) 0,002(26)	-0,028(19) 0,010(31)
	{41} 1533 - 563 1 ⁻ - 0 ⁺ - 2 ⁺	0,040(51) 0,141(79)	- -
	{42} 1533 - 563 - 559 1 ⁻ - 0 ⁺ - 2 ⁺ - 0 ⁺	-0,010(66) -0,051(70)	- -
	{43} 2096 - 559 1 ⁻ - 2 ⁺ - 0 ⁺	-0,256(12) -0,063(17)	-0,258(12) -0,034(19)
2669	{44} 882 - 571 2 ⁻ - 2 ⁺ - 2 ⁺	0,213(100) 0,096(156)	- -
	{45} 882 - 665 2 ⁻ - 2 ⁺ - 0 ⁺	0,112(58) 0,029(90)	- -
	{46} 882 - 1228 2 ⁻ - 2 ⁺ - 2 ⁺	-0,066(41) -0,032(61)	0,004(34) 0,002(55)
	{47} 980 - 472 2 ⁻ - 3 ⁺ - 2 ⁺	-0,194(65) -0,057(94)	- -
	{48} 980 - 1129 2 ⁻ - 3 ⁺ - 2 ⁺	-0,307(46) 0,028(64)	- -
	{49} 1453 - 1216 2 ⁻ - 2 ⁺ - 0 ⁺	0,180(43) 0,012(66)	0,223(41) -0,040(67)
	{50} 1453 - 657 2 ⁻ - 2 ⁺ - 2 ⁺	0,144(28) 0,024(43)	- -
	{51} 1453 - 657 - 559 2 ⁻ - 2 ⁺ - 2 ⁺ - 0 ⁺	-0,056(28) -0,023(41)	-0,046(35) -0,048(53)
	{52} 2110 - 559 2 ⁻ - 2 ⁺ - 0 ⁺	0,273(16) 0,007(24)	0,320(16) -0,047(26)

Tabela 3.2 - Valores das razões de mistura multipolar para as transições gama no ^{76}Se .

TRANSIÇÃO GAMA (keV)	INTENSIDADE (%) [17]	$I_i^\pi - I_f^\pi$	CASCATA $\gamma\text{-}\gamma$ (keV - keV)	RAZÃO DE MISTURA MULTIPOLAR (δ) PRESENTE ESTUDO	RAZÃO DE MISTURA MULTIPOLAR (δ) [8]
403	0,59(2)	$3^- - 4^+$	403 - 695	$0,19 \pm 0,03$	-
			403 - 809	$-0,046 \pm 0,008$	-
			403 - 695 - 771	$0,13 \pm 0,08$	-
456	0,081(2)	$2^+ - 4^+$	456 - 771	$0,064 \pm 0,007$	-
			456 - 771 - 559	$0,4^{+0,1} - 0,2$	-
472	0,113(3)	$3^+ - 2^+$	472 - 657	$-0,8^{+0,4} - 0,3,6$	$-0,01 < \delta < 0,73$ ou $2,5 \leq \delta \leq 6,7$ [37]
			740 - 472	$0,71 \pm 0,05$	-
			472 - 657 - 559	$0,9^{+1,6} - 0,6$	-
484	0,0148(5)	$1^- - 0^+$	-	E1	-
559	100	$2^+ - 0^+$	-	E2	-
563	2,71(6)	$0^+ - 2^+$	-	E2	-
571	0,311(7)	$2^+ - 2^+$	571 - 657	$0,54 \pm 0,15$	-
			571 - 1216	$0,86 \pm 0,08$	$-0,13 \pm 0,12$

Continuação

575	0,149(3)	2 ⁺ - 2 ⁺	575 - 657 575 - 1216	-0,86 ± 0,06 1,8 ^{+0,5} _{-0,7}	-
657	14,1(3)	2 ⁺ - 2 ⁺	657 - 559	4,13 ± 0,02	5,26 ^{+0,67} _{-0,56} 4,15 ± 0,20 [37] 5,2 ± 0,2 [38]
665	0,96(2)	2 ⁺ - 0 ⁺	-	E2	-
695	0,0193(8)	4 ⁺ - 4 ⁺	695 - 771	1,5 ^{+0,4} _{-0,5}	-
727	0,043(1)	2 ⁺ - 2 ⁺	727 - 665 727 - 1228	0,44 ± 0,02 0,3 ± 0,2	-0,10 < δ < 3,0 [37] -
740	0,267(6)	3 ⁺ - 3 ⁺	740 - 1129	-0,035 ± 0,006	-
771	0,263(6)	4 ⁺ - 2 ⁺	771 - 559	0,04 ± 0,01	0,01 ± 0,01
809	0,0410(9)	4 ⁺ - 2 ⁺	809 - 657 809 - 1216 809 - 657 - 559	0,6 ^{+0,6} _{-0,4} 0,3 ^{+0,1} _{-0,3} 0,57 ^{+0,48} _{-0,34}	- - -
863	0,0224(8)	1 ⁻ - 2 ⁺	863 - 575	-0,38 ± 0,04	-
867	0,293(6)	1 ⁻ - 2 ⁺	867 - 665 867 - 1228 867 - 1787	0,02 ± 0,02 0,22 ± 0,06 -0,05 ± 0,01	- 0,02 ± 0,03 -

Continuação

882	0,130(3)	2 ⁻ - 2 ⁺	882 - 571 882 - 665 882 - 1228	0,09 ± 0,02 0,16 ± 0,02 -0,11 ± 0,09	- - 0,34 ± 0,24
954	0,0021(3)	0 ⁺ - 2 ⁺	-	E2	-
980	0,089(2)	2 ⁻ - 3 ⁺	980 - 472 980 - 1129	-0,29 ± 0,01 0,011 ± 0,007	$\delta < 0,2$ ou $\delta > 16,4$ [37]
1129	0,0071(5)	3 ⁺ - 2 ⁺	1129 - 559	1,66 ± 0,02	1,08 ± 0,10
1212	3,12(4)	3 ⁻ - 2 ⁺	1212 - 657 1212 - 1216 1212 - 657 - 559	0,01 ± 0,02 -0,023 ± 0,004 0,08 ± 0,02	- 0,02 ± 0,02 0,03 ± 0,02
1216	7,48(9)	2 ⁺ - 0 ⁺	-	E2	-
1228	2,60(3)	2 ⁺ - 2 ⁺	1228 - 559	-0,454 ± 0,007	-0,54 ^{+0,12} -0,08 -0,53 ± 0,08 [37]
1232	0,0201(5)	2 ⁺ - 2 ⁺	1232 - 559	-1,5 ± 0,2	-
1439	0,593(5)	1 ⁻ - 2 ⁺	1439 - 657 1439 - 1216 1439 - 657 - 559	-0,03 ± 0,02 -0,022 ± 0,005 0,12 ± 0,02	- 0,01 ± 0,03 -

Continuação

1453	0,229(2)	2 ⁻ - 2 ⁺	1453 - 657 1453 - 1216 1453 - 657 - 559	-0,6 ± 0,3 0,11 ± 0,02 -0,12 ± 0,05	- 0,05 ± 0,02 -
1533	0,0518(7)	1 ⁻ - 0 ⁺	-	E1	-
1611	0,0150(2)	0 ⁺ - 2 ⁺	-	E2	-
1787	0,621(4)	2 ⁺ - 0 ⁺	-	E2	-
1870	0,115	3 ⁻ - 2 ⁺	1870 - 559	0,23 ± 0,03	0,17 ± 0,03
1956	0,0228(6)	2 ⁺ - 2 ⁺	1956 - 559	- 0,7 ^{+0,5} _{-0,8}	-
2096	1,222(9)	1 ⁻ - 2 ⁺	2096 - 559	0,01 ± 0,02	0,02 ± 0,06
2110	0,708(5)	2 ⁻ - 2 ⁺	2110 - 559	-0,026 ± 0,007	-0,09 ± 0,02
2127	0,0027(2)	2 ⁺ - 0 ⁺	-	E2	-
2429	0,0768(11)	3 ⁻ - 0 ⁺	fundamental	E3	-
2655	0,100(1)	1 ⁻ - 0 ⁺	fundamental	E1	-
2669	0,0007(1)	2 ⁻ - 0 ⁺	fundamental	M2	-

Figura 3.2 - Função correlação angular ajustada (1.1) e os pontos experimentais da função para as cascatas γ estudadas no decaimento do ^{76}As (energia em keV).

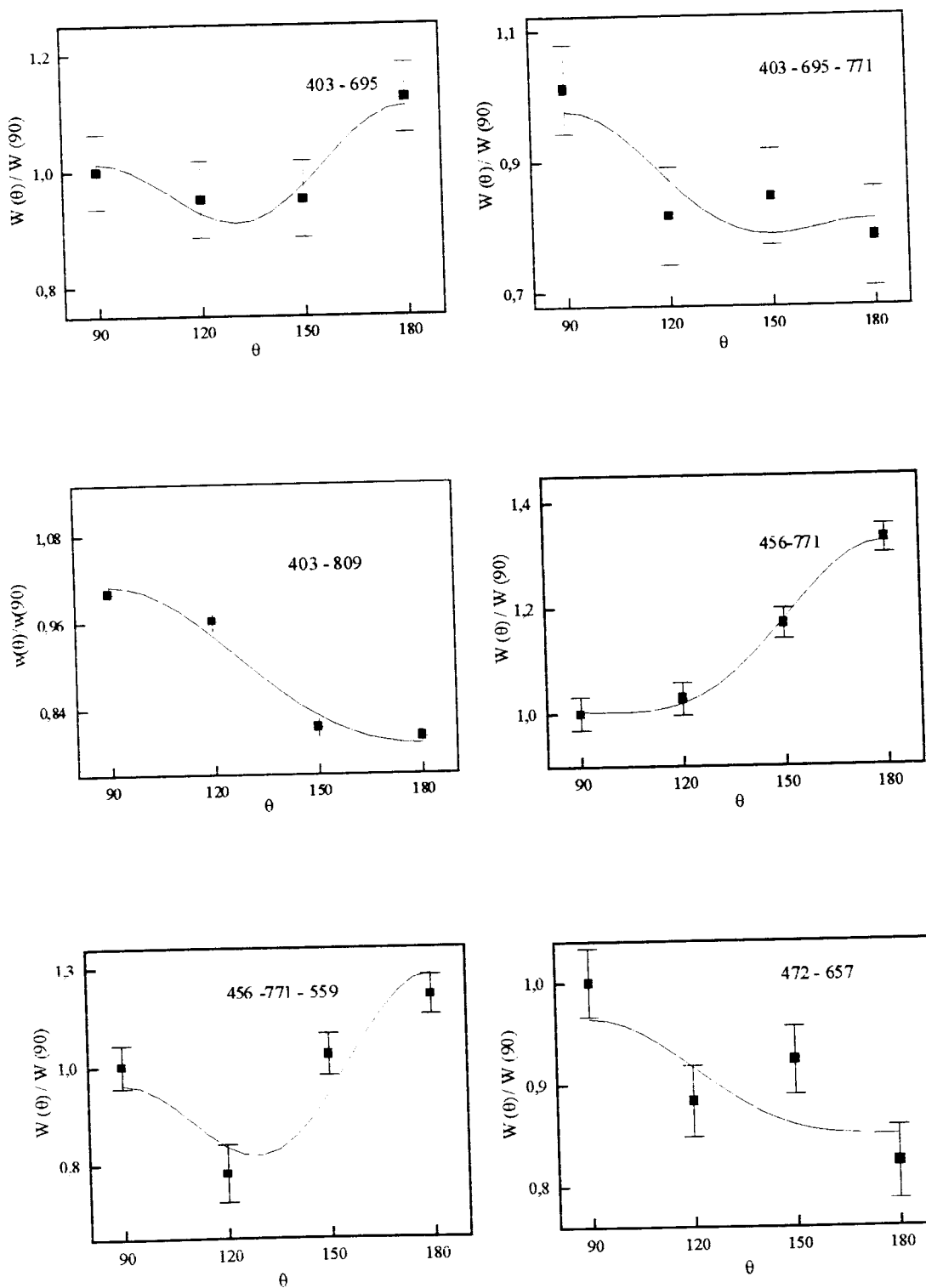


Figura 3.2 - continuação

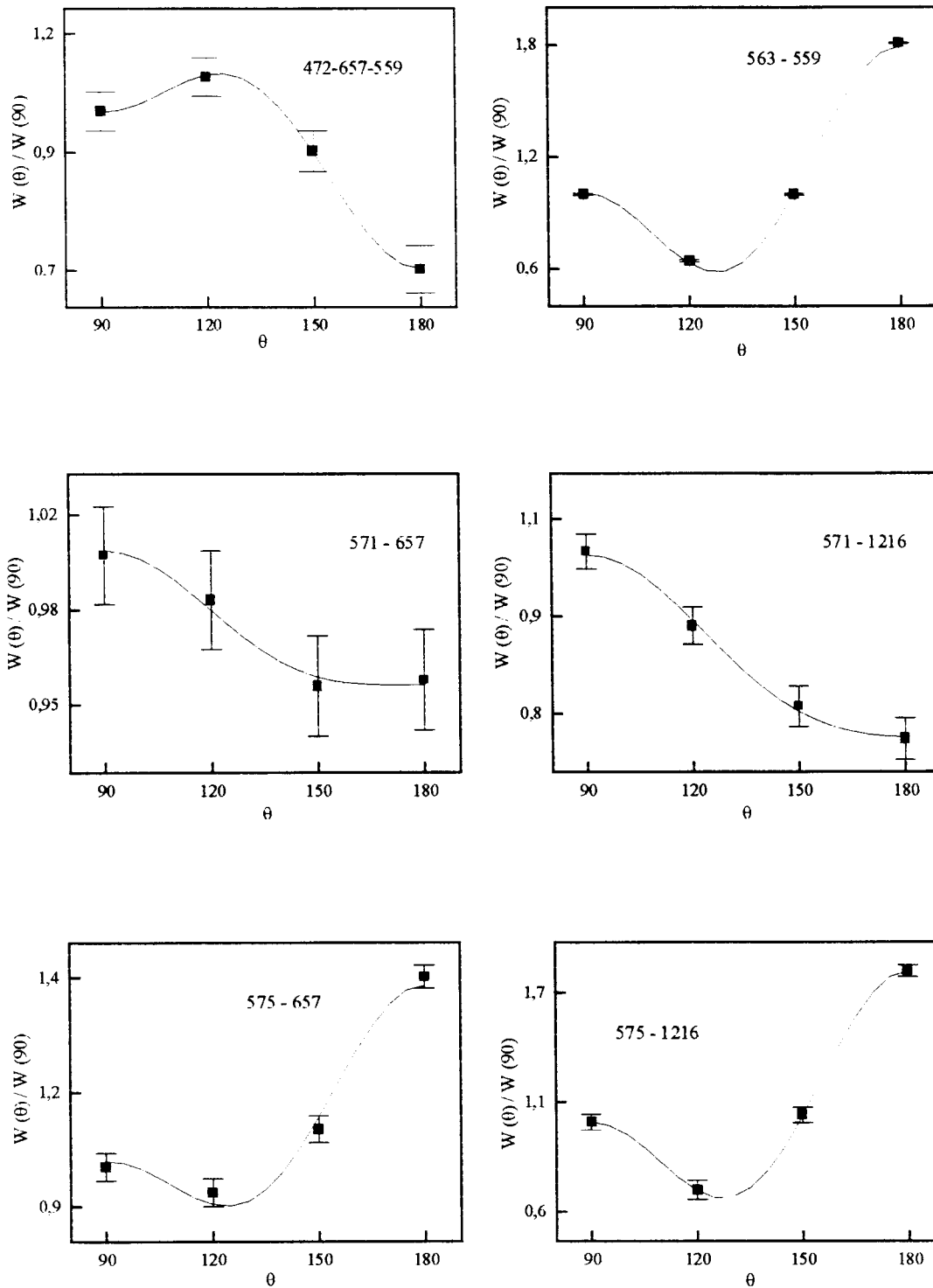


Figura 3.2 - continuação

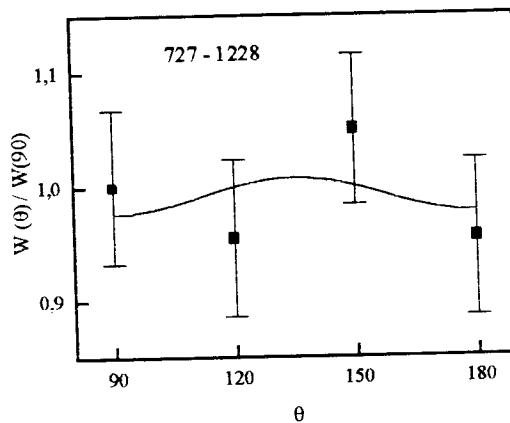
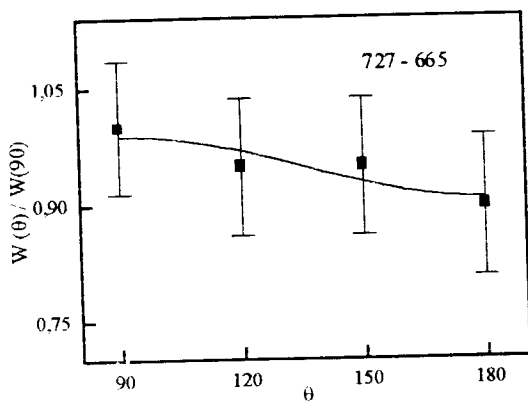
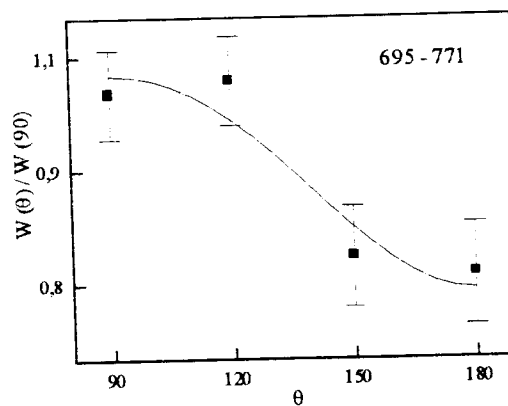
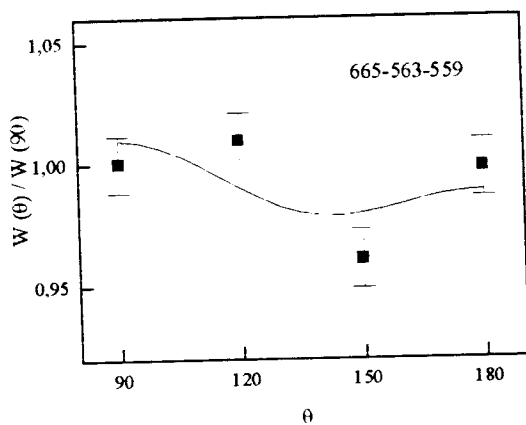
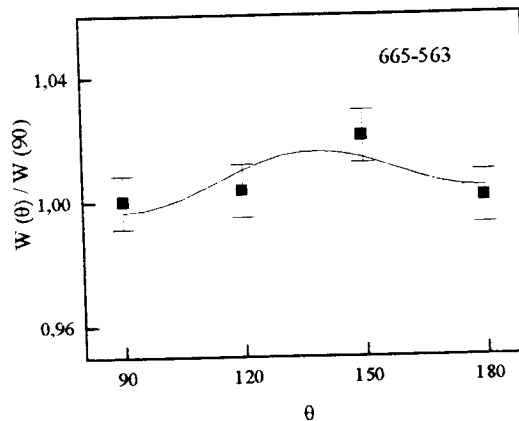
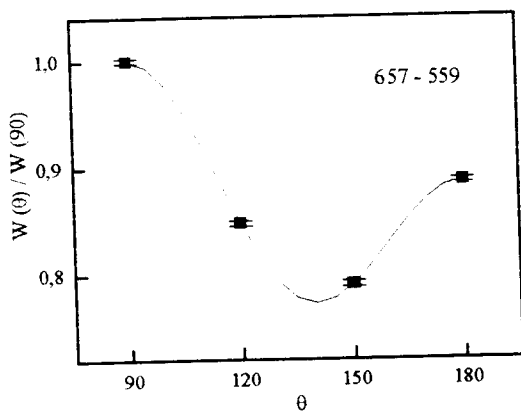


Figura 3.2 - continuação

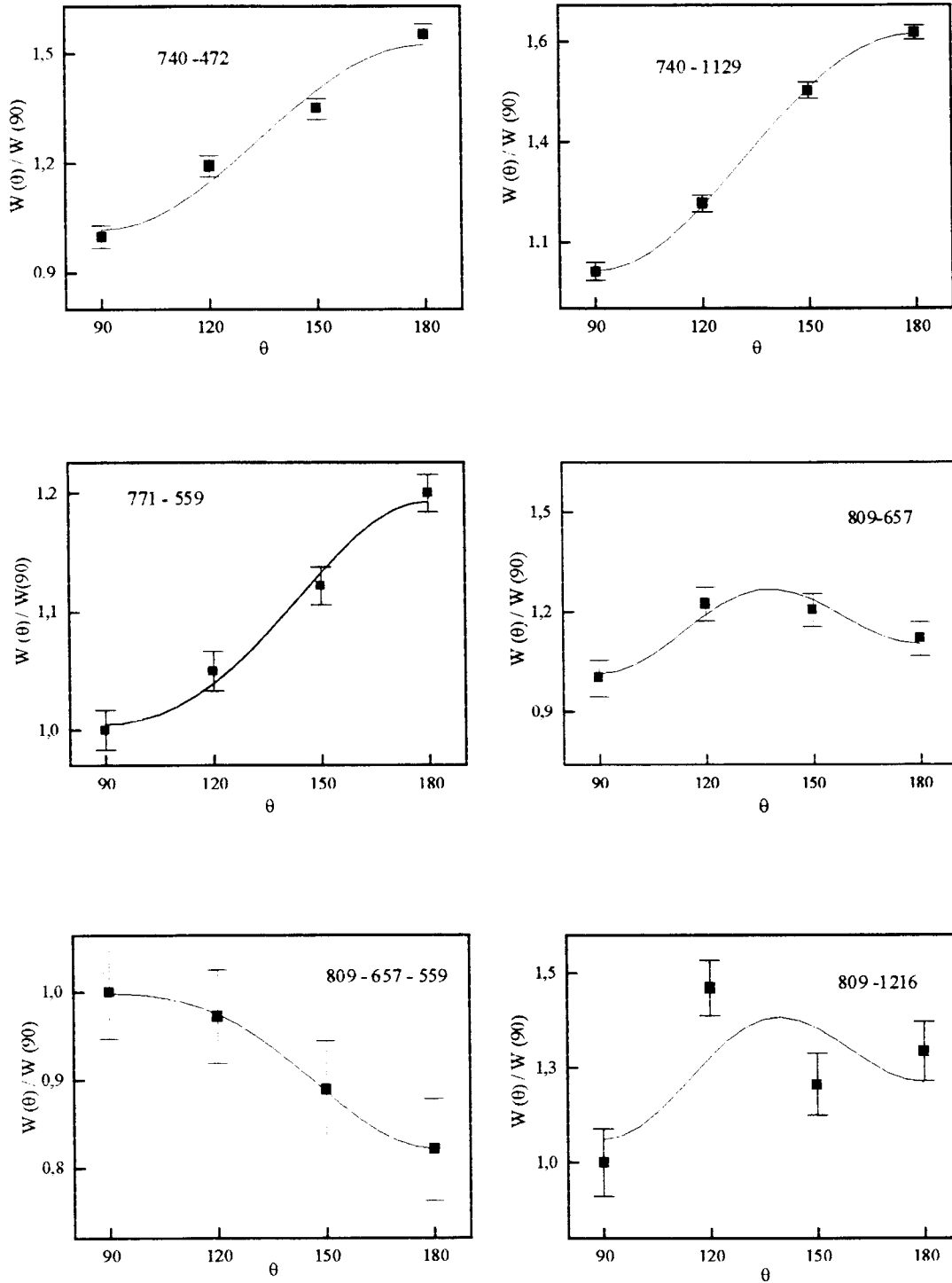


Figura 3.2 - continuação

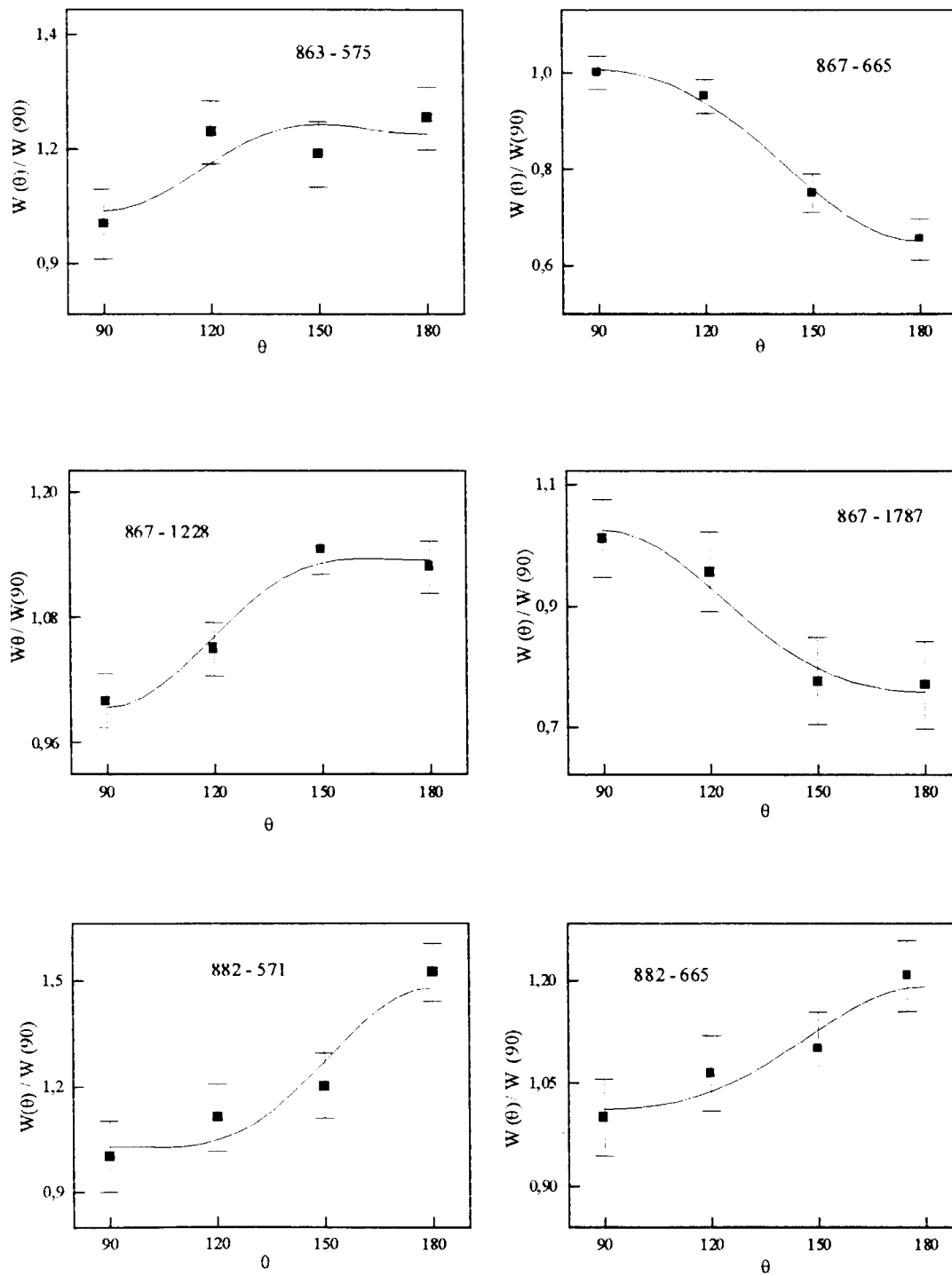


Figura 3.2 - continuação

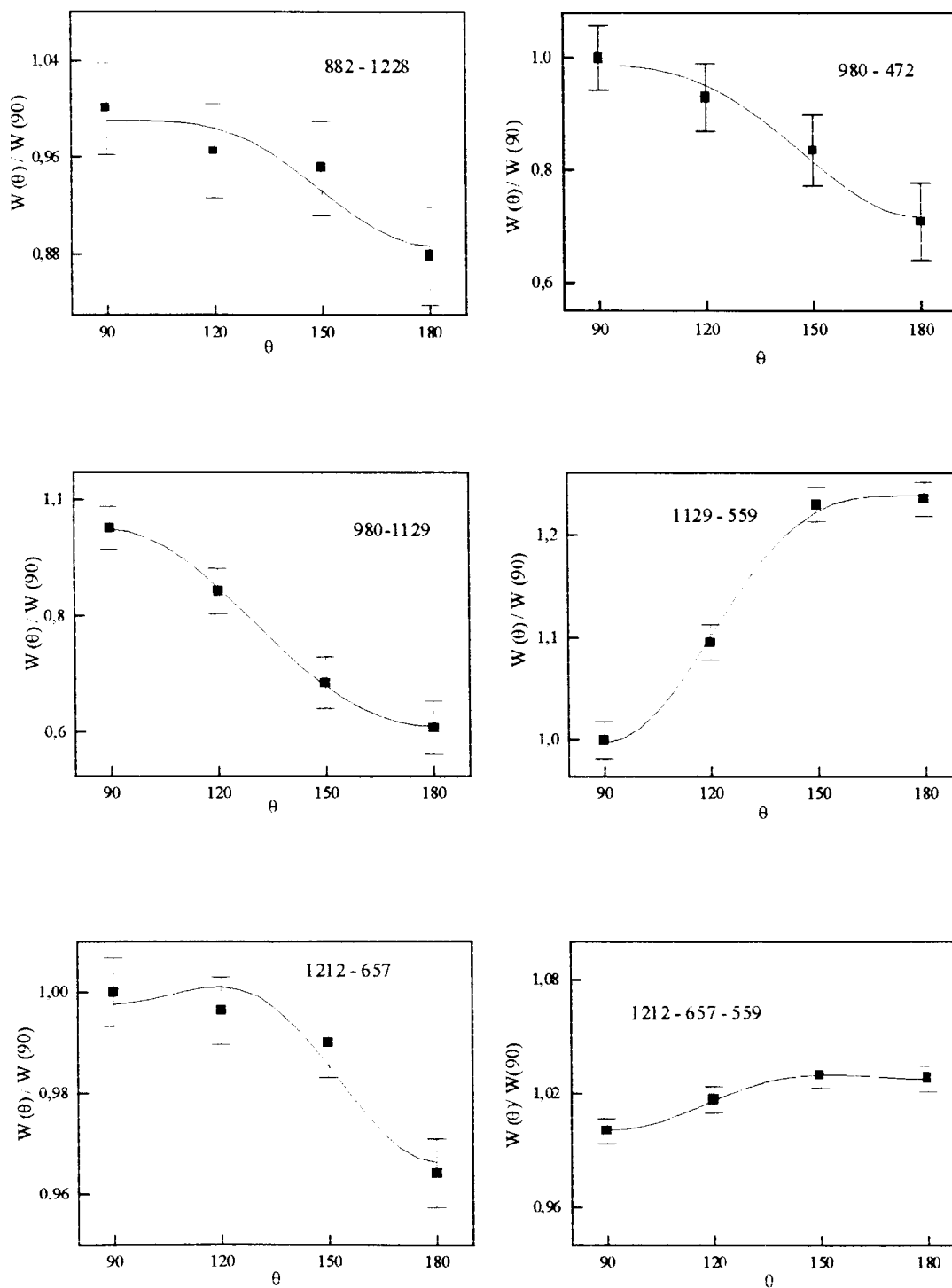


Figura 3.2 - continuação

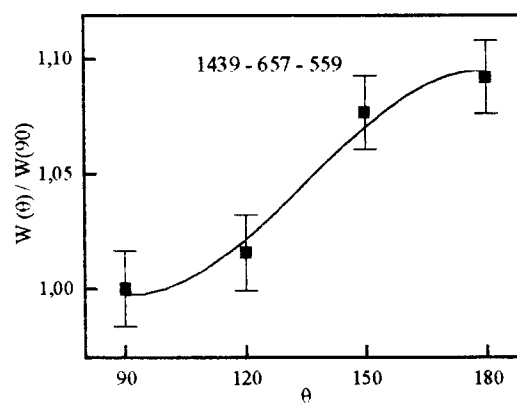
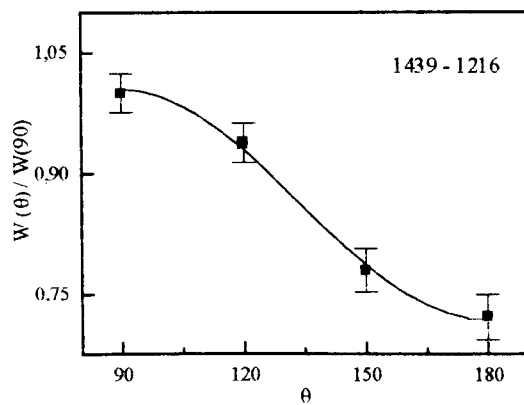
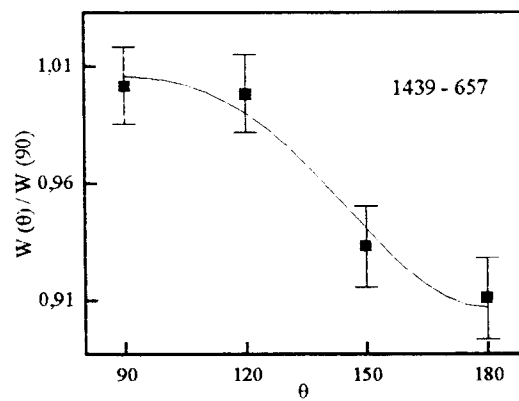
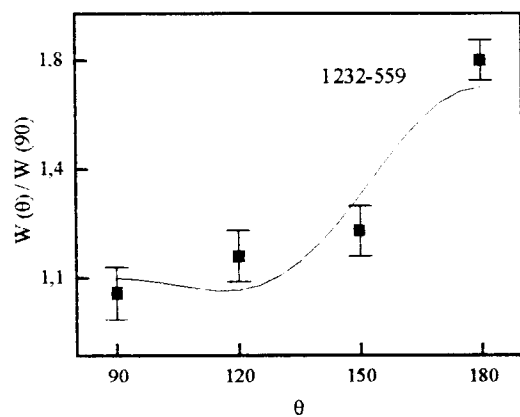
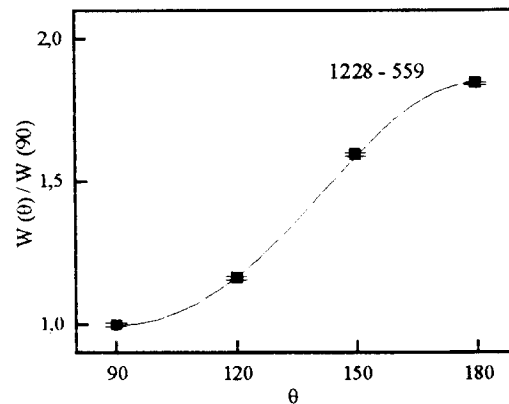
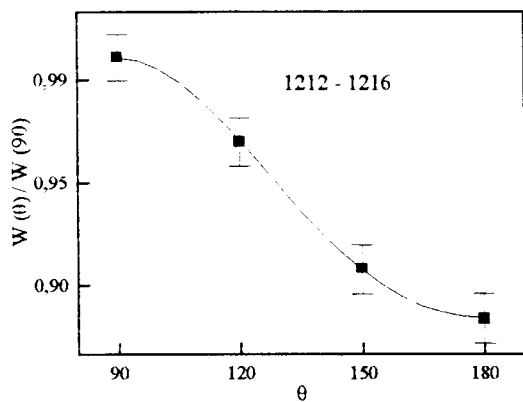


Figura 3.2 - continuação

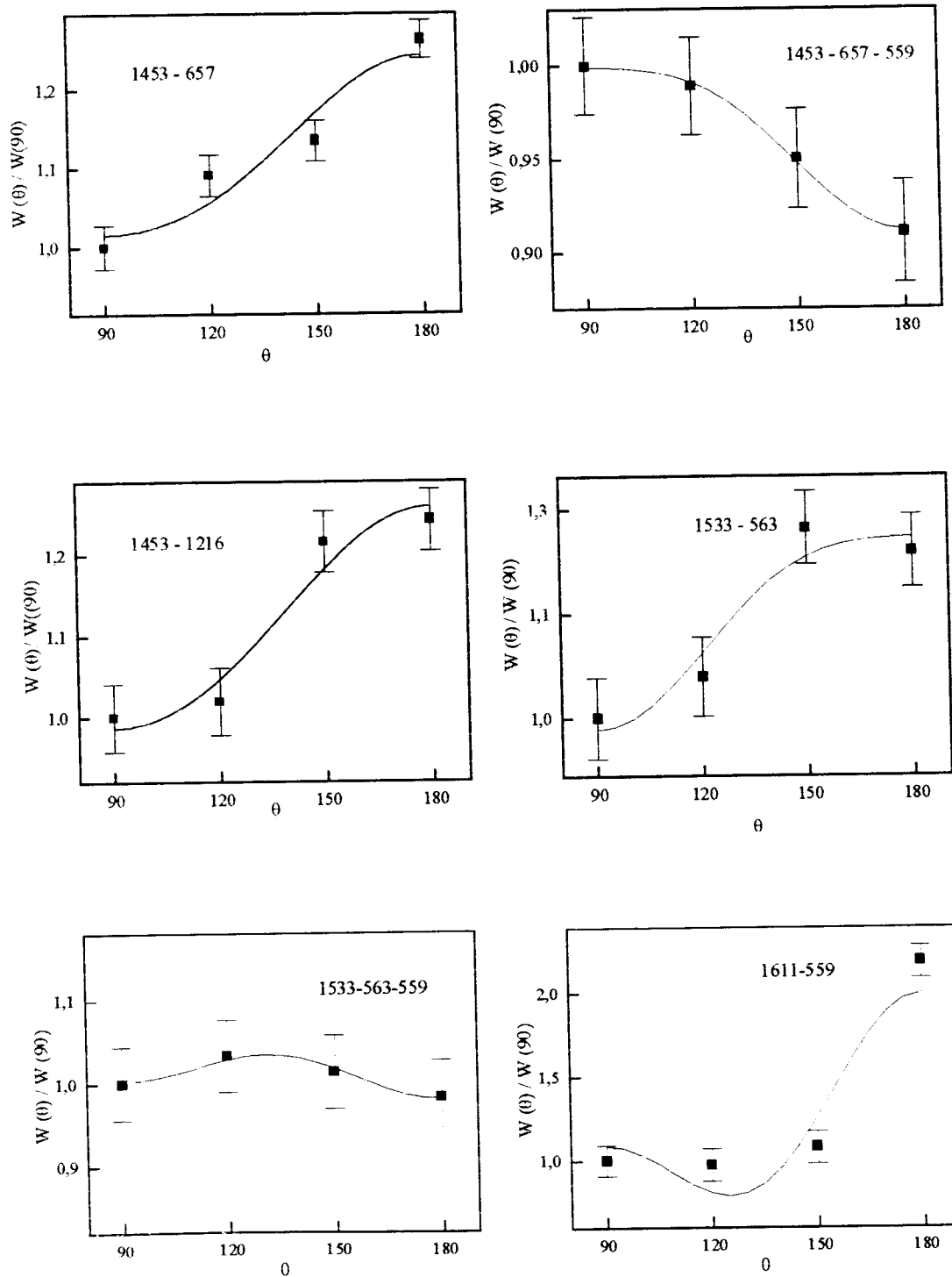


Figura 3.2 - continuação

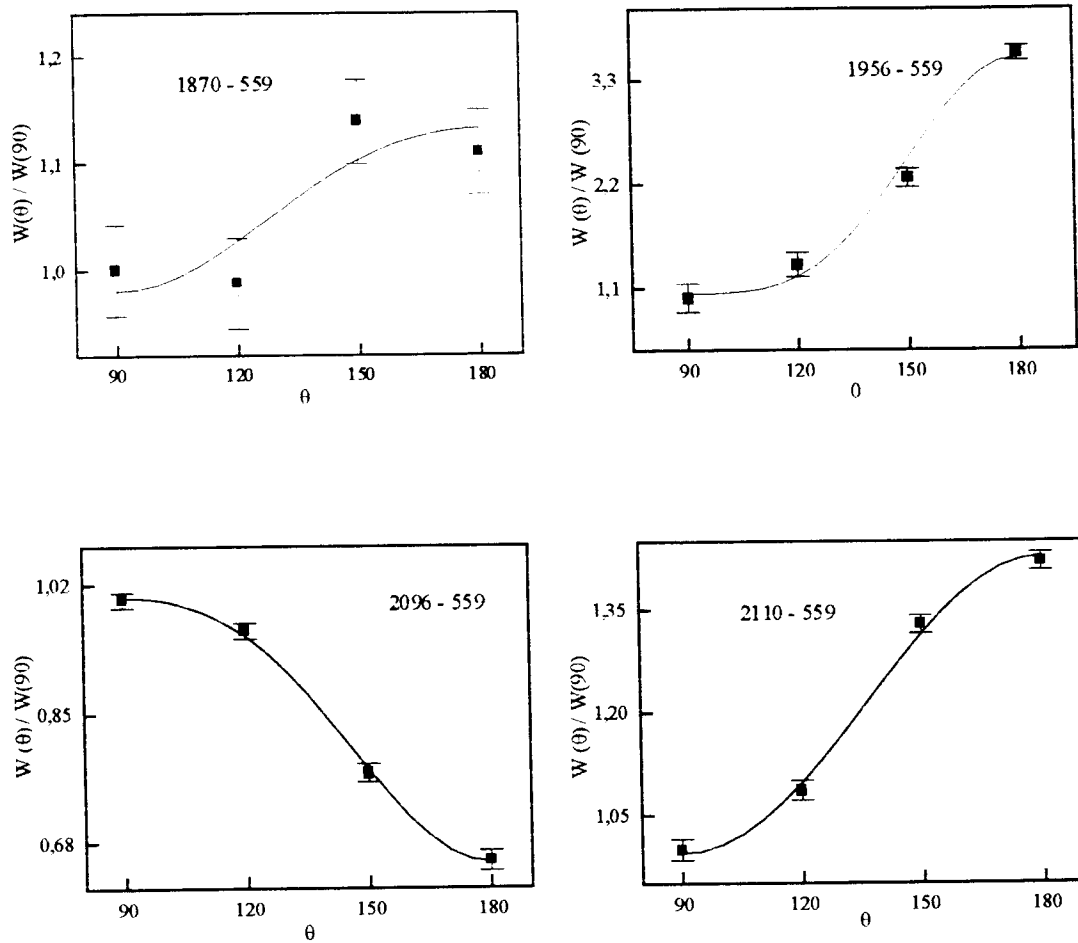


Figura 3.3.a - Elipses de correlação angular e dados de A_{kk} obtidos dos ajustes referentes as cascatas: $I_i - 2 - 0$, com $I_i = 1, 2, 3$ e 4.

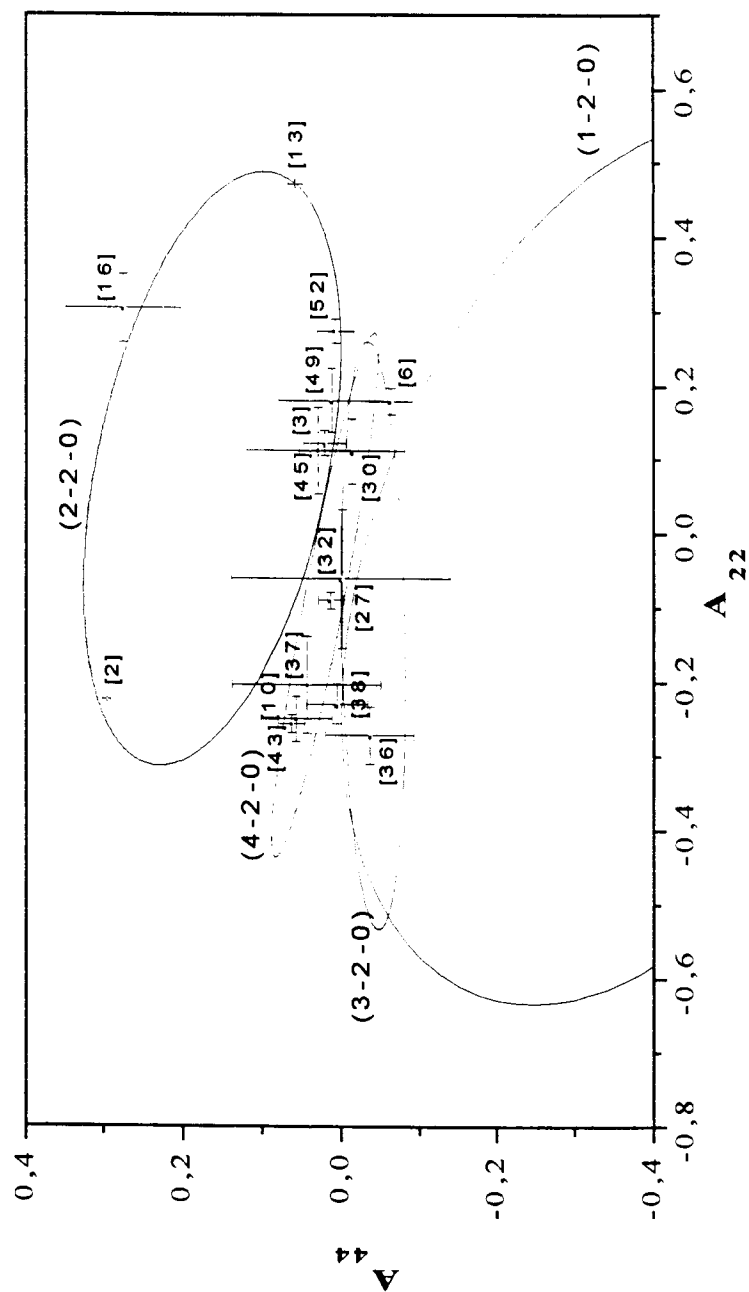


Figura 3.3.b - Elipses de correlação angular e dados de A_{kk} obtidos dos ajustes referentes as cascatas: $I_i = 2 - 2 - 2$, com $I_i = 1, 2, 3$ e 4, para $\delta(657) = 4, 13$.

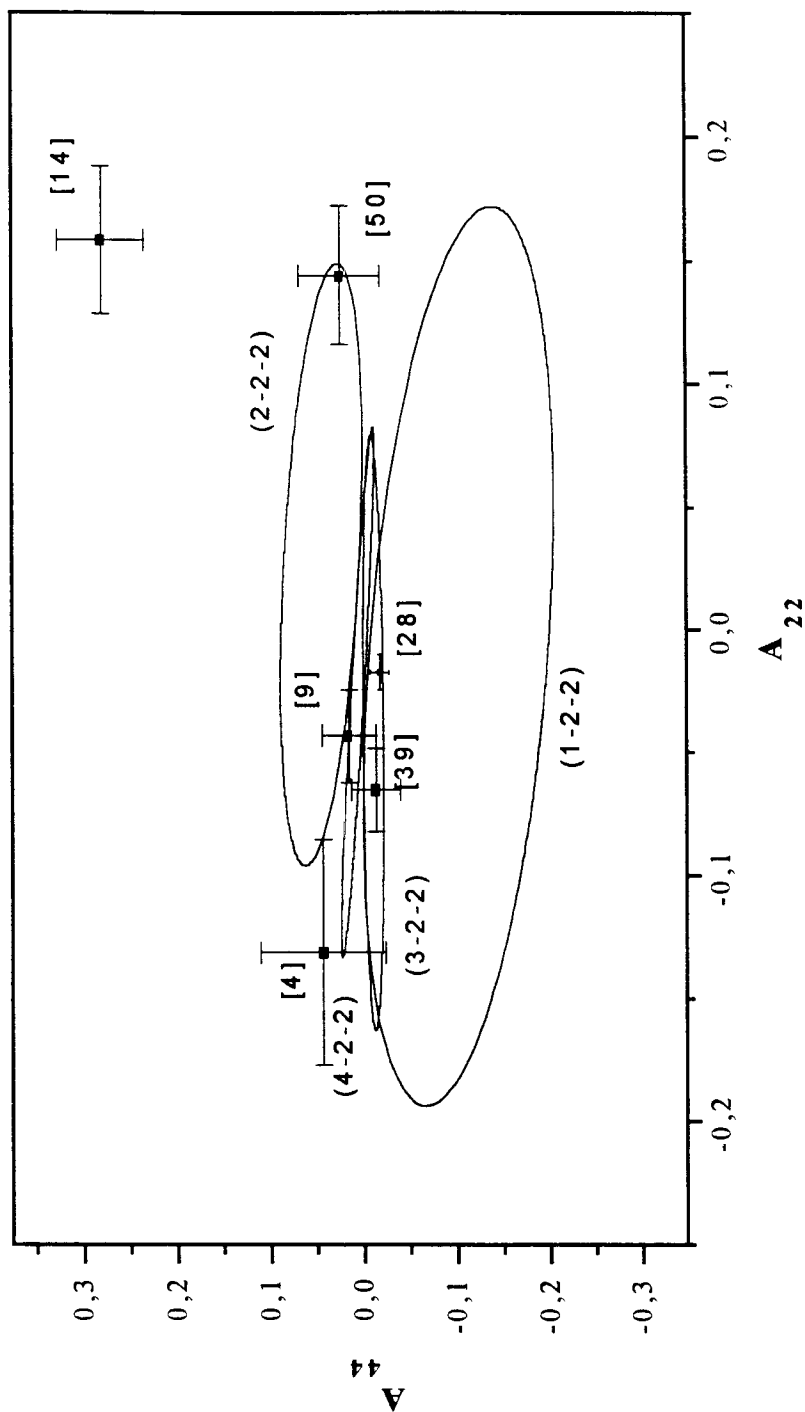
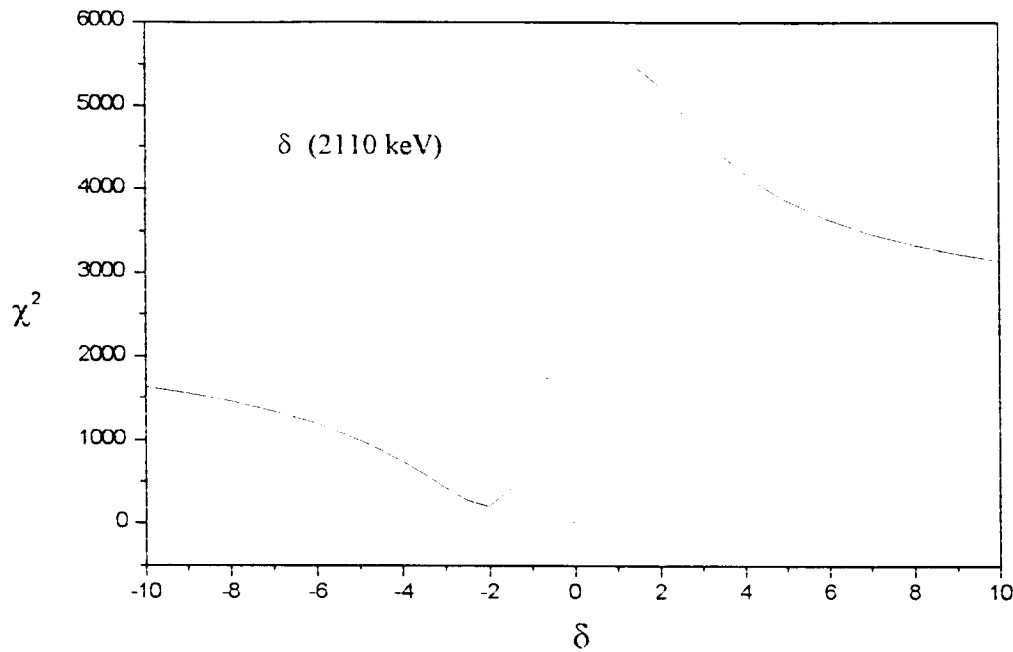


Figura 3.4 - Estudo do χ^2 em função de δ para a cascata (2110-559) keV, para a seqüência de spin $2^- - 2^+ - 0^+$.

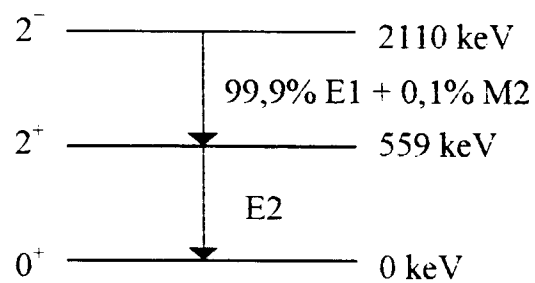


$2^- (E1 + M2) - 2^+ - (E2) - 0^+$

$\delta (2110 \text{ keV}) = -0,03 (7)$

L = 99,9 %

L+1 = 0,1 %



4 Análise dos Dados Experimentais

Neste capítulo é discutida a atribuição de spin e paridade para cada um dos níveis estudados com base nos resultados de correlação angular obtidos no presente estudo e demais informações disponíveis na literatura.

Para realização desta análise será consultado o esquema de decaimento β^- do ^{76}As (figura 4.1) apresentado na compilação de dados do Nuclear Data Sheets [35], bem como o esquema proposto no recente estudo envolvendo medidas de espectroscopia gama [7]. Além disso, para que se possa fazer esta apreciação, levando em consideração os estudos anteriores de correlação angular direcional [8, 33], é apresentado na tabela 4.1 um sumário das condições experimentais em que estes trabalhos foram realizados.

O spin e paridade do estado fundamental do ^{76}As foi, definitivamente, estabelecido como $I = 2^-$ a partir de estudos de decaimento β^- e γ [32]. Ao estado fundamental do ^{76}Se (núcleo par-par) é esperado $I^\pi = 0^+$. Isto leva à hipótese de que sejam associados aos níveis excitados de ^{76}Se spins mais baixos com valores de $\log ft$ característico de transições permitidas e, em alguns casos, de primeira proibida.

Nível a 559 keV:

Este nível foi estudado por meio das reações nucleares (γ, γ') [39], (α, α') [40], ($3\text{He}, d$) [41], (d, d') [42], ($p, p'\gamma$) [43], ($^{16}\text{O}, ^{14}\text{O}$) [44], (p, t) [45], (n, p) [46], (n, γ) [47], (p, p') [48], (n, n') [49], por excitação coulombiana [50], por meio do decaimento β^- do ^{76}As [7, 8, 33, 34, 51], por meio do decaimento β^+ do ^{76}Br [52] e em trabalhos de orientação nuclear [37, 38].

Este nível se desexcita por um único raio gama de 559 keV, cuja intensidade relativa é considerada 100%. Trata-se de um nível bem estabelecido com spin e paridade 2^- [32], o que atribui caráter de quadrupolo elétrico para a transição de 559 keV. Neste trabalho, este nível é o intermediário de 19 cascatas estudadas das quais 7 foram medidas pela primeira vez e discutidas a seguir.

Nível a 1122 keV

Este nível foi proposto com base na observação do raio gama de 563 keV em coincidência com o raio gama de 559 keV, por meio do decaimento β^- do ^{76}As [7, 8, 33, 34, 51] e pelo decaimento β^+/EC do ^{76}Br [52]. Foi também estudado pelas reações nucleares (d,d') [42], (p,p' γ) [43], (3He,d) [41], (p,t) [45], (n, γ) [47], (p,p') [48]. Os resultados obtidos por estes estudos estabelecem para o nível a 1122 keV spin e paridade 0^+ .

No presente estudo foi realizada a medida de correlação angular direcional $\gamma\gamma$ envolvendo a cascata (563-559) keV e o resultado obtido confirma o caráter de quadrupolo elétrico associado à transição de 563 keV.

Nível a 1216 keV:

Estudos realizados a partir do decaimento β^- do ^{76}As [7, 33, 34, 51] mostram por meio de medidas de coincidências $\gamma\gamma$ que este nível se desexcita pela emissão de dois raios γ , 657 keV e 1216 keV, para os níveis 559 keV (2^-) e o fundamental (0^+), respectivamente. Medidas de excitação coulombiana [53],

orientação nuclear [37, 38] e correlação angular direcional $\gamma\gamma$ [8] estabeleceram para este nível spin e paridade 2^+ . No presente estudo, por meio da cascata γ , (657-559) keV, determinou-se a razão de mistura multipolar para a transição de 657 keV, obtendo-se $\delta(657) = 4,13 \pm 0,02$. Este resultado está de acordo com os valores obtidos por correlação angular [8]: $\delta(657) = 5,26^{+0,67}_{-0,56}$ e por orientação nuclear [37]: $\delta(657) = 4,15 \pm 0,20$.

Nível a 1330 keV:

Medidas de espectroscopia γ realizadas a partir do decaimento β^- do ^{76}As [7, 33, 51] estabelecem que este nível se desexcita pela emissão da radiação γ de 771 keV e estudos envolvendo medidas de excitação coulombiana [53] e correlação angular [8] sugerem para este nível spin e paridade 4^+ .

No presente trabalho a medida de A_{kk} para a cascata γ (771-559) keV está de acordo com a seqüência de spin $4^+ \rightarrow 2^+ \rightarrow 0^+$, confirmando o caráter E2 atribuído as duas transições γ que compõem a cascata em estudo.

Nível a 1689 keV:

Este nível foi observado em estudos envolvendo reações nucleares [43, 47, 48], por meio de excitação coulombiana [50] e em medidas de espectroscopia γ acompanhando-se o decaimento β^- do ^{76}As [7, 33, 51]. Estes estudos propõem que este nível se desexcita por meio da emissão dos raios gama de 358 keV, 472 keV e 1129 keV.

No presente trabalho este nível foi estudado por meio de três cascatas, a saber: (1129-559) keV, (472-657) keV e (472-657-559) keV, sendo os resultados consistentes com o spin e paridade 3^+ .

Para a transição γ de 1129 keV já estudada por correlação angular [8] e orientação nuclear [37], o valor de delta obtido, $\delta(1129) = 1,66 \pm 0,02$ é compatível com estes estudos (tabela 3.2).

Por meio da cascata direta (472-657) keV e da cascata tripla (472-657-559) keV, medidas pela primeira vez, foi possível a obtenção da razão de mistura multipolar da transição γ de 472 keV. A partir do valor $\delta(657) = 4,13 \pm 0,02$, obtido por meio dos coeficientes A_{kk} da cascata γ (657-559) keV, determinou-se $\delta(472) = -0,8^{+0,4}_{-3,6}$, o que mostra substancial mistura de M1 + E2. A medida da correlação angular tripla, bem como a determinação de $\delta(472)$ via cascata (740-472) keV, confirmam o caráter de mistura atribuído ao raio γ de 472 keV.

Nível a 1787 keV:

Este nível foi estabelecido em função da observação da transição gama de 1787 keV para o estado fundamental [32] e pelos raios gama de 571 keV, 665 keV e 1228 keV [7, 51]. Medidas de correlação angular direcional $\gamma\gamma$ [8] sugerem spin e paridade 2^+ para este nível.

No presente trabalho foram efetuadas medidas de correlação angular direcional $\gamma\gamma$ envolvendo sete cascatas, a saber: (456-771) keV, (456-771-559) keV, (571-657) keV, (571-1216) keV, (665-563) keV, (665-563-559) keV e (1228-559) keV. Estas medidas possibilitam a obtenção da razão de mistura multipolar de

todas as transições gama envolvidas, confirmando o spin e paridade 2^+ para este nível, bem como do caráter E2 associado ao raios gama de 665 keV e de 1787 keV.

O valor da razão de mistura multipolar da transição gama de 571 keV foi obtido por meio das cascatas (571-657) keV e (571-1216) keV, sendo $\delta(571) = 0,54 \pm 0,15$ e $\delta(571) = 0,86 \pm 0,08$, respectivamente. Estes resultados não estão em acordo com $\delta(571) = -0,13 \pm 0,12$ obtido por ZAMBONI et al [8] por meio da cascata (571-1216) keV. Esta diferença se deve ao fato de terem sido feitas modificações no esquema de decaimento β^- do ^{76}As [7], que podem ser observadas comparando-se os esquemas de níveis apresentados nas figuras 4.1 e 4.2. Em função das modificações incorporadas ao esquema de decaimento, particularmente no que se refere ao posicionamento da transição de 575 keV no nível a 1791 keV, portanto coincidente com a transição 1216 keV (figura 3.1), e levando-se em consideração que a medida anterior de correlação angular [8] foi feita utilizando-se uma janela em energia > 15 keV, isto é, (559 + 563 + 571 + 575) keV (tabela 4.1) deduz-se que houve a interferência da energia 575 keV na medida da cascata de (571-1216) keV.

A razão de mistura multipolar da transição de 456 keV foi obtida pela primeira vez por meio do estudo das cascatas (456-772) keV e (456-772-559) keV, sendo $\delta(456) = 0,064 \pm 0,007$ e $\delta(456) = 0,4_{-0,2}^{+0,1}$, respectivamente, compatíveis com o caráter E2 associado ao raio γ de 456 keV.

A razão de mistura multipolar da transição gama de 1228 keV foi obtida por meio da cascata (1228-559) keV sendo $\delta(1228) = -0,454 \pm 0,007$, estando em bom acordo com os dados anteriores de correlação $\delta(1228) = -0,54_{-0,08}^{+0,12}$ [8] e de orientação nuclear $\delta(1228) = -0,53 \pm 0,08$ [37].

Nível a 1791 keV:

Este nível foi proposto em medidas de espectroscopia gama, acompanhando o decaimento β^- do ^{76}As [7], com base na observação da transição gama de 1232 keV em coincidência com a transição gama de 559 keV e nas relações de coincidências da transição gama de 575 keV com as transições 559 keV, 657 keV, 863 keV e 1216 keV. Desta forma, o raio gama de 575 keV teve seu posicionamento alterado do nível a 2362 keV [33, 51] para o nível a 1791 keV [7]. Essas alterações podem ser observadas comparando-se os esquemas de decaimentos do ^{76}As apresentados nas figuras 4.1 e 4.2.

No presente trabalho foram realizadas, pela primeira vez, medidas de correlação angular direcional $\gamma\gamma$ envolvendo as cascatas (575-657) keV, (575-1216) keV e (1232-559) keV, confirmando as relações de coincidências observadas na medida de espectroscopia γ [7].

Com os valores obtidos de A_{kk} , para as três cascatas estudadas, tentou-se definir o spin e paridade deste nível entre as três possibilidades de seqüências de spins prováveis, isto é: $1 - 2^+ - 0^+$, $2 - 2^+ - 0^+$ e $3 - 2^+ - 0^+$. A análise deste resultado tornou possível a escolha de $I^\pi = 2^+$.

Determinou-se a razão de mistura multipolar para as transições gama de 575 keV e 1232 keV. Em particular, a razão de mistura multipolar da transição gama de 575 keV foi obtida por meio de duas cascatas: (575-657) keV e (575-1216) keV, sendo $\delta(575) = -0,86 \pm 0,06$ e $\delta(575) = 1,8^{+0,5}_{-0,7}$ respectivamente. Os resultados são compatíveis com o caráter de mistura dipolo-quadrupolo.

Foi obtida a razão de mistura multipolar da transição gama de 1232 keV, recentemente incorporada ao esquema de decaimento do ^{76}As [7], sendo $\delta(1232) = -1,5 \pm 0,2$, também compatível com o caráter de mistura dipolo-quadrupolo.

Nível a 2026 keV:

O nível 2026 keV foi estudado pela primeira vez no presente trabalho por meio de medidas de correlação angular direcional $\gamma\gamma$ envolvendo as cascatas (695-771) keV, (809-657) keV, (809-657-559) keV e (809-1216) keV, sendo os resultados de A_{kk} consistentes com o spin e paridade 4^+ .

Determinou-se a razão de mistura multipolar da transição de 809 keV por meio das cascatas (809-657) keV e (809-657-559) keV, utilizando-se $\delta(657)$ estabelecido no presente estudo, bem como por meio da cascata (809-1216) keV considerando o caráter de quadrupolo elétrico associado ao raio γ de 1216 keV. Os resultados obtidos para $\delta(809)$ são apresentados na tabela 3.2 sendo consistentes entre si, isto é, concordantes com o caráter de quadruplo elétrico. Também a razão de mistura multipolar da transição de 695 keV foi obtida pela primeira vez. Sabendo que esta transição popula o estado de paridade positiva 4^+ (1330 keV) é esperado um caráter de mistura, M1 + E2, para este raio gama. A razão de mistura multipolar da transição gama de 695 keV obtida no presente estudo (tabela 3.2), é compatível com o caráter de mistura dipolo-quadrupolo.

Nível a 2170 keV

Este nível é estabelecido em medidas de espectroscopia gama acompanhando-se o decaimento β^- do ^{76}As [7, 33, 34, 51, 54, 55, 56, 57] em

função da observação da transição gama de 1611 keV em coincidência com a transição de 559 keV.

O presente estudo obteve pela primeira vez a correlação angular direcional $\gamma\gamma$ para a cascata (1611-559) keV, sugerindo spin e paridade 0^+ para esse nível bem como o caráter E2 para a transição de 1611 keV (tabela 3.2).

Nível a 2429

Este nível é bem estabelecido pela observação dos raios gama 301 keV, 403 keV, 740 keV, 1098 keV, 1212 keV, 1870 keV e 2429 keV em trabalhos de espectroscopia gama envolvendo o decaimento β^- do ^{76}As [7, 33, 34, 51, 54, 55, 56, 57].

Estudos envolvendo espalhamento inelástico de deutêrons [42] e medidas de correlação angular [8] sugerem spin e paridade 3^- .

No presente trabalho este nível foi estudado por meio de nove cascatas $\gamma\gamma$, a saber: (403-809) keV, (403-695) keV, (403-695-771) keV, (740-1129) keV, (740-472) keV, (1212-1216) keV, (1212-657) keV, (1212-657-559) keV e (1870-559) keV, o que possibilitou determinar, pela primeira vez, a razão de mistura multipolar das transições gama de 403 keV e 740 keV. Em particular, o valor de δ para a transição de 403 keV foi obtido por meio do estudo de três cascatas, a saber: (403-695) keV, (403-809) keV e (403-695-772) keV, sendo $\delta(403) = 0,19 \pm 0,03$, $\delta(403) = -0,046 \pm 0,008$ e $\delta(403) = 0,13 \pm 0,08$, respectivamente. Estes resultados são compatíveis com o caráter predominante de dipolo elétrico associado à transição γ de 403 keV.

A transição gama de 740 keV foi estudada por meio da cascata (740-1129) keV obtendo-se $\delta(740) = -0,035 \pm 0,006$, o que sugere um comportamento predominantemente E1. Considerando-se que as transições de 1212 e 1870 keV populam os estados de paridade positiva 2^+ (1216 keV) e 2^+ (559 keV), respectivamente, é esperado, também, um caráter E1 predominante para estas transições. Os resultados de δ , apresentados na tabela 3.2, concordam com a atribuição de dipolo elétrico.

Nível a 2514 keV

Este nível foi estabelecido em medidas envolvendo o decaimento β^+ do ^{76}As [7, 33, 34, 51]. Foi sugerido por NAGAHARA [34] spin e paridade 2^+ , 3^+ ou 4^+ . Posteriormente, medidas de orientação nuclear realizadas por SUBBER et al [37], envolvendo a transição γ de 727 keV, se mostraram inconsistentes com spin e paridade 4^+ .

No presente trabalho esse nível foi estudado por meio das cascatas $\gamma\gamma$ de (727-1228) keV, (727-665) keV e (1956-559) keV, sugerindo spin e paridade 2^+ .

Foram determinadas, pela primeira vez, as razões de mistura multipolar das transições gama de 727 keV e 1956 keV. A transição de 727 keV foi estudada por meio das cascatas (727-1228) keV e (727-665) keV, sendo $\delta(727) = 0,3 \pm 0,2$ e $\delta(727) = 0,44 \pm 0,02$, respectivamente, em acordo com a previsão feita por medidas de orientação nuclear, $-0,10 < \delta(727) < 3,0$ [37]. Considerando-se que a transição de 1956 keV popula o estado de paridade positiva 2^+ (559 keV) é esperado um caráter de mistura dipolo-quadrupolo. De fato, o valor de $\delta(1955) = -0,7_{-0,8}^{+0,5}$ obtido está de acordo com o previsto.

Nível a 2655

Este nível é estabelecido em medidas envolvendo o decaimento β^- do ^{76}As [7, 8, 33, 34, 51]. É observado no decaimento β^- do ^{76}Br [35] e nas reações nucleares (p,p',γ) [43], (p,p') [48], (n,γ) [47] e (p,t) [45]. Medidas com base no decaimento β e γ sugerem spin 1.

No presente trabalho esse nível foi estudado por meio de medidas de correlação angular envolvendo dez cascatas: (863-575) keV, (867-1228) keV, (867-665) keV, (867-1787) keV, (1439-1216) keV, (1439-657) keV, (1439-657-559) keV, (1553-563) keV, (1533-563-559) keV, (2096-559) keV, sendo seis pela primeira vez (tabela 3.1). Este estudo possibilitou a determinação da razão de mistura multipolar da transição gama de 863 keV, recentemente incorporada ao esquema de decaimento do ^{76}As , sendo $\delta(863) = -0,38 \pm 0,04$.

Foi possível determinar, pela primeira vez, o valor de δ dos raios γ de 867 keV, 1439 keV e 1533 keV por mais de uma via, tabela 3.2. Os resultados obtidos mostram-se consistentes com o caráter predominantemente E1. As demais cascatas medidas estão em bom acordo com a medida anterior de correlação angular [8]. Desta forma, o presente estudo confirma o spin 1 e sugere paridade negativa para esse nível além de estabelecer o caráter de dipolo elétrico às transições γ de 484 keV e 2655 keV.

Nível a 2669

Estudos envolvendo o decaimento β^- do ^{76}As [7, 33, 34, 51, 54], estabelecem este nível por meio da observação da transição gama de 2669 keV para o estado fundamental e das relações de coincidências envolvendo os raios gama de 882 keV, 980 keV, 1453 keV e 2110 keV. Com base no decaimento β e γ e em trabalhos envolvendo reações nucleares [35], é atribuído spin e paridade 2^- .

No presente trabalho este nível foi estudado por meio de nove cascatas γ , a saber: (882-571) keV, (882-665) keV, (882-1228) keV, (980-472) keV, (980-1129) keV, (1453-1216) keV, (1453-657) keV, (1453-657-559) keV, (2110-559) keV, sendo cinco medidas pela primeira vez (tabela 3.1). Estes resultados possibilitaram a determinação da razão de mistura multipolar de todas as transições gama envolvidas sendo que $\delta(980)$ foi obtido pela primeira vez.

A razão de mistura multipolar da transição gama de 980 keV foi determinada por meio de duas cascatas: (980-472) keV e (980-1129) keV, sendo $\delta(980) = -0,29 \pm 0,01$ e $\delta(980) = 0,011 \pm 0,007$, respectivamente. Estes resultados atribuem para este raio gama caráter predominante M1, em acordo com $I^\pi = 2^-$, sugerido para este nível.

Com base na análise realizada foi possível incorporar ao esquema de decaimento β^- do ^{76}As , proposto em medidas recentes de espectroscopia γ [7], spin e paridade para todos os níveis estudados (figura 4.2).

Figura 4.1 - Esquema de decaimento do núcleo ^{76}As proposto pelo NDS [35].

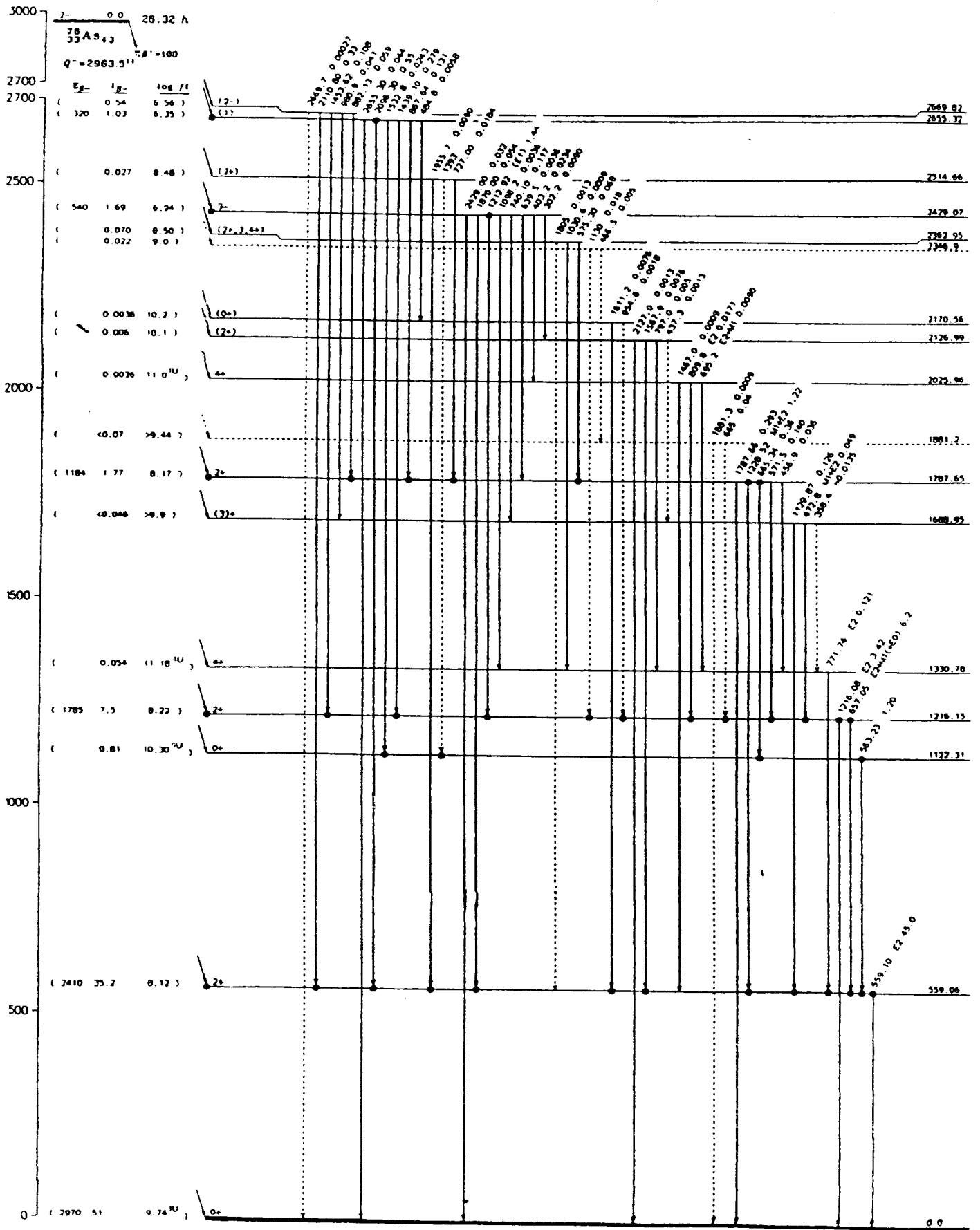


Figura 4.2 Reprodução de esquema de decaimento do núcleo de ⁷⁶As Proposto em [7], com as previsões de I⁻ estabelecidas no presente estudo.

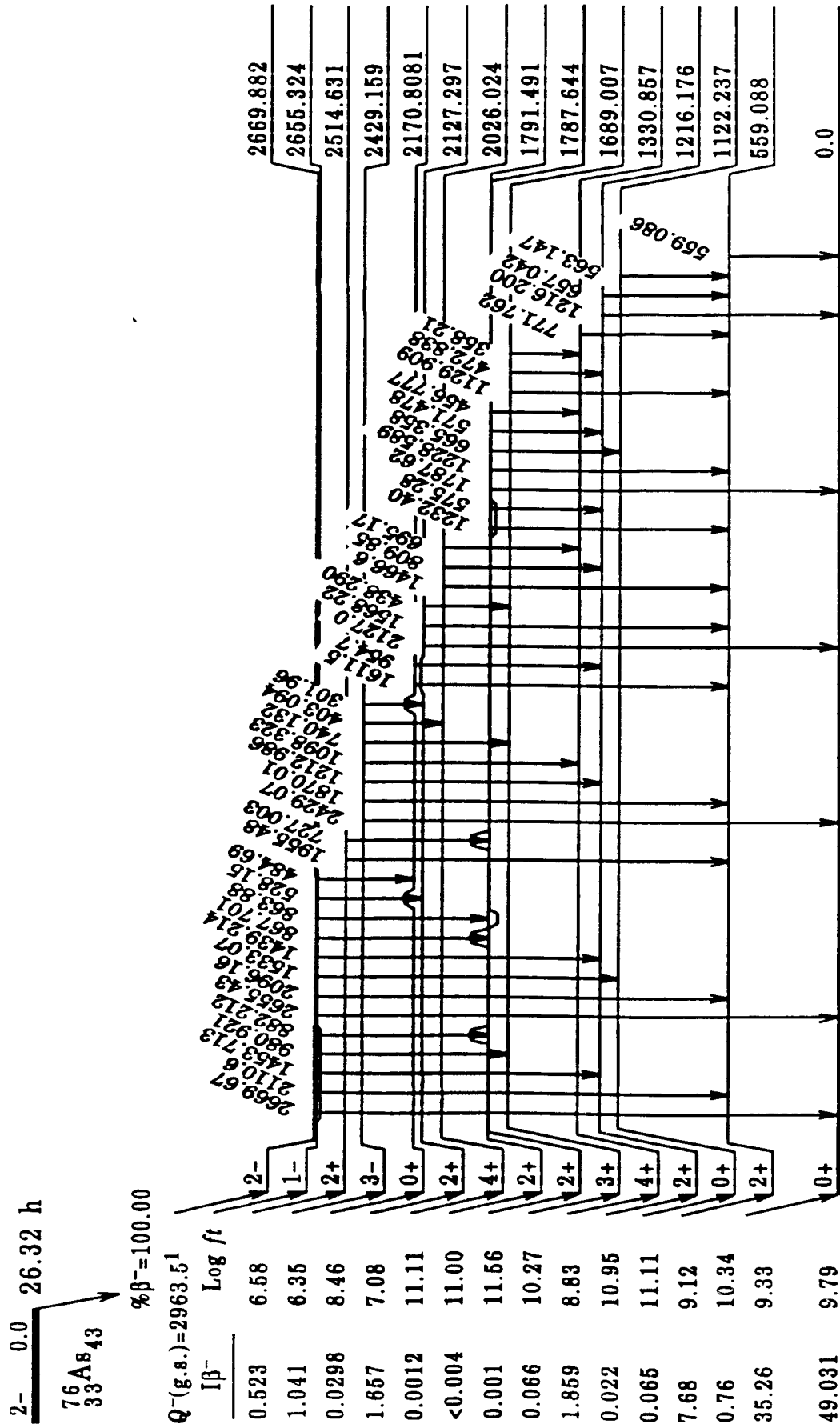


Tabela 4.1 - Estudo comparativo das medidas de correlação angular direcional $\gamma\gamma$ no núcleo de ^{76}Se .

REFERÊNCIAS	ESPECTRÔMETRO	NÚMERO DE JANELAS EM ENERGIA EFETUADAS	TEMPO DE AQUISIÇÃO (horas/ângulo)	NÚMERO DE CASCATAS ESTUDADAS
PRESENTE ESTUDO	$\gamma\gamma$ HPGe (89 cm ³) HPGe (50 cm ³) Fast-slow biparamétrico	34	229	53
ZAMBONI, C.B. et al. [8]	HPGe (115 cm ³) HPGe (89 cm ³) Fast-slow uniparamétrico	3 (1212 + 1216 + 1228) keV (559 + 563) keV (559 + 563 + 571 + 575) keV	100	24
KAUR, R. et al. [33]	Ge(Li) (64 cm ³) NaI(Tl) (3''x3'') Fast-slow uniparamétrico	2 (559 + 563) keV (1212 + 1216 + 1228) keV	-	7

5 Estudo Sistemático dos Isótopos de Selênio e Isótonos $N = 42$, com A-par.

5.1 Introdução

Os estados excitados de baixa energia dos núcleos par-par, na região de massa entre $60 < A < 150$, podem ser descritos em termos de vibrações ao redor de sua forma esférica de equilíbrio ou como rotações de um caroço levemente deformado. Estes modelos levam a diferentes previsões no que diz respeito à probabilidade de transição eletromagnética de um estado nuclear para outro, bem como no que diz respeito ao caráter multipolar associado à transição γ , pois trata-se de parâmetros sensíveis aos detalhes das funções de onda do modelo considerado. Desta forma, uma investigação em termos desses parâmetros nucleares é de fundamental importância para compreensão da estrutura nuclear.

O objetivo deste capítulo é procurar elucidar a estrutura nuclear do ^{76}Se e isótopos vizinhos par-par, em termos de modelos apropriados a esta região de massa, considerando os resultados obtidos neste e em outros estudos experimentais, bem como hipóteses teóricas associadas à sua estrutura nuclear. Para isto, foi elaborado um sumário com os dados experimentais, mais significativos e atualizados, que permitiu um estudo sistemático envolvendo isótopos de Selênio e isótonos $N = 42$ com A-par, através da comparação dos espectros de energia, spin e paridade de níveis, bem como dados a respeito das razões de mistura multipolar de transições γ , das razões de probabilidade de transição reduzida entre estados nucleares e de momento de quadrupolo de níveis excitados.

5.2 Níveis de Energia e Propriedades Nucleares

Para realização do estudo sistemático é importante situar o diagrama de níveis do núcleo de ^{76}Se dentro do contexto dos dados experimentais relacionados aos isótopos do Se e isótonos $N = 42$.

Nas figuras 5.1 e 5.2 têm-se a reprodução parcial dos níveis de energia dos isótopos par-par de Selênio ($A = 72$ a 86) e isótonos $N = 42$, respectivamente, a partir dos dados experimentais mais recentes da literatura [32].

Na sistemática que envolve os isótopos de Selênio pode-se observar um comportamento de estados vibracionais para $A = 72$ a 82 e a brusca alteração do espectro no número mágico $N = 50$ (^{84}Se).

Analisando-se quantitativamente o comportamento dos níveis de energia na figura 5.1 é possível acompanhar a evolução dos estados 2_1^+ , 0_2^+ , 2_2^+ , 4_1^+ e 3^- entre os isótopos vizinhos de ^{76}Se ($A = 74$ a 82), que sugere um comportamento predominantemente vibracional. De fato, tem-se dentro do contexto do modelo vibracional [58] que o primeiro estado excitado (2_1^+) pode ser considerado como o estado de um-fônon, e a presença do tripleto (0_2^+ , 2_2^+ e 4_1^+), não necessariamente nesta ordem, cuja energia é cerca de duas vezes a energia de excitação do primeiro estado excitado (2_1^+), caracteriza o estado de dois-fônon previsto pelo modelo. Para alguns isótopos pode-se observar também níveis relacionados ao quintupletto de três-fônon identificados pelos estados 3^+ , 2_3^+ e 4_2^+ . Além disso, a presença de um nível 3^- , localizado na região acima do tripleto, pode corresponder a um estado vibracional de um-fônon octupolar. Alguns trabalhos experimentais envolvendo os isótopos par-par de Se reforçam esta descrição. É o caso de medidas de excitação coulombiana realizadas por BYGRAVE e outros [59] e por MACGOWAN e

STELSON [53] bem como medidas com reações nucleares, particularmente o estudo de espalhamento inelástico de dêuterons realizados por LIN [42].

Por outro lado, ao analisarmos o espectro de ^{76}Se dentro do contexto de isótonos vizinhos - ^{72}Zn , ^{74}Ge , ^{78}Kr e ^{80}Sr (figura 5.2), nota-se que a continuidade das linhas que ligam os estados 0_2^+ e 3^- não é tão evidente. Além disso, nesta sistemática, pode-se observar a transição de espectros vibracionais para um comportamento rotacional típico (^{80}Sr).

Estas considerações permitem situar o ^{76}Se entre núcleos predominantemente vibracionais e rotacionais. Na figura 5.3 é apresentado o diagrama de níveis de energia experimental obtido no presente estudo e o previsto por modelos coletivos. Primeiramente é apresentada a previsão do modelo vibracional usando os estados 0,559 e 2,429 MeV como sendo respectivamente de um fônon de quadrupolo e octupolo para calcular os estados de dois e três fônons. Para o cálculo dos níveis de energia, dentro do contexto do modelo rotacional simétrico, o estado a 0,559 MeV foi adotado como o primeiro estado excitado da banda $K = 0$ ($I = 0$) para obtenção dos demais membros ($I = 2, 4, 6$). Analisando a figura 5.3, pode-se considerar que a descrição vibracional parece mais adequada.

Estudos envolvendo reações nucleares: $^{76}\text{Se} (n,n')$ [49], $^{76}\text{Ge} (\alpha,2n\gamma)$ [52], $^{76}\text{Se} (p,p')$ [48] e $^{71}\text{Ga} (^7\text{Li},2n\gamma)$ [60], revelam um forte caráter coletivo para os níveis de mais alta energia no núcleo de ^{76}Se . Este comportamento foi também sugerido em medidas de excitação coulombiana [50], realizadas para vários isótopos de Se ($A = 74$ a 82), onde as estimativas de $B(E2)$ para as transições do estado 2_2^+ são consideravelmente menores do que as estimativas previstas pelo modelo vibracional. Outro parâmetro nuclear relevante, dentro deste contexto, diz respeito ao momento de quadrupolo elétrico ($Q_{J\pi}$) de níveis excitados. Trata-se de um dado experimental de grande importância pois proporciona informações a

respeito das deformações do núcleo. Os dados apresentados na tabela 5.1, referem-se à medida de momento de quadrupolo elétrico do estado 2_1^+ para alguns isótopos de Se e para o isótono ($N = 42$) ^{74}Ge , sugerem para esses núcleos deformação do tipo oblate. Particularmente, para o estado 3^- , o cálculo de momento de quadrupolo em termos do modelo rotacional de assimetria (MRA) [48] fornece: $Q(^{76}\text{Se}) \sim 0,76$ e.b., $Q(^{78}\text{Se}) \sim 0,26$ e.b., $Q(^{80}\text{Se}) \sim 0,39$ e.b. e $Q(^{82}\text{Se}) \sim 0,00$ e.b., mostrando que a estimativa da deformação é significativa o que descarta a hipótese de caráter puramente vibracional deste estado (3^-) nesses isótopos. A previsão de $Q \sim 0$ para o ^{82}Se é esperada pois $N = 48$ está próximo da camada fechada de 50 nêutrons.

Com relação aos dados de razão de mistura multipolar, obtidos neste estudo (tabela 3.2) juntamente com os valores de $\delta(E2/M1)$ para as transições entre os primeiros estados excitados de núcleos par-par vizinhos (isótopos de Se e isótonos $N = 42$) [32], apresentados na tabela 5.2, é possível ressaltar alguns aspectos relevantes no que concerne à descrição desses núcleos. Como é sabido, para núcleos vibracionais os estados são descritos por fônons de quadrupolo o que impõe às transições eletromagnéticas um caráter predominantemente de quadrupolo elétrico. Isto é o que se observa para as transições $2_2^+ \rightarrow 2_1^+$ em todos os isótopos de Se bem como para ^{74}Ge , excetuando-se o ^{78}Kr cujo favorecimento de dipolo magnético é da ordem de 80 %.

Um modo de avaliar a tendência do caráter coletivo dos núcleos par-par, nesta região de massa ($A \sim 70$) diz respeito ao estudo sistemático envolvendo os dados experimentais $\delta(E2/M1)$ para as transições $2_2^+ \rightarrow 2_1^+$ em função do número

de massa. Na figura 5.4 é apresentado o gráfico de $\log \left\{ \frac{(\delta E2 / M1)^2}{E_\gamma} \right\}$ versus A ,

usando as estimativas de partícula única (PU) [61] e de DAVYDOV-FILLIPOV (DF) [62], calculadas de acordo com as equações (3.2) e (3.13) da referência [63] utilizando-se os valores médios de $\delta(E2/M1)$ propostos por LANGE, KUMAR e

HAMILTON [63]. Observando esta figura tem-se claro que o limite coletivo representa bem os dados experimentais pois as razões E2/M1 possuem magnitude 4 a 5 vezes maior em relação à estimativa de partícula única . Portanto os efeitos coletivos devem ser responsáveis pelos valores experimentais de $\delta(E2/M1)$ nestes núcleos. Entretanto, em função dos poucos dados experimentais, para razão de mistura multipolar nesta região de massa, é difícil uma avaliação mais precisa do comportamento estrutural desses núcleos. Por outro lado, quando se analisa os valores de razão de mistura multipolar obtidos no presente estudo (tabela 3.2), o que se observa é que grande número de transições γ tem considerável mistura de dipolo magnético, às quais são difíceis de explicar em termos do modelo vibracional puro. Portanto, cálculos utilizando modelos que levem em conta mistura de estados deformados e esféricos parecem viáveis para uma correta descrição da estrutura do ^{76}Se .

Tabela 5.1 - Valores experimentais do momento de quadrupolo elétrico do estado 2_1^+ [64], para os isótopos de Se e ^{74}Ge (isótono $N = 42$) considerados no presente estudo sistemático.

Núcleo	Energia Nível (keV)	Q (2_1^+) exp. - e.b.	Q teórico [32]
Se^{74}	634	—	-0.36
Ge^{74}	595	-0.25(6)	—
Se^{76}	559	-0.34(7)	—
Se^{78}	613	-0.26(9)	—
Se^{80}	666	-0.31(7)	—
Se^{82}	655	-0.22(7)	—

Tabela 5.2 - Razão de mistura multipolar $\delta(E2/M1)$ [32] associada às transições γ dos isótopos de Se e isótonos N=42 que compõem o presente estudo sistemático.

$I_i \rightarrow I_f$	^{72}Se (**)	^{74}Ge	^{74}Se	^{76}Se (*)	^{78}Se	^{78}Kr	^{80}Se
$2_2^+ \rightarrow 2_1^+$	4,6	3.4(4)	-5.6(16)	4.13(2)	3.5(5)	0.5(1)	-5_{-6}^{+2}
$3_1^+ \rightarrow 2_2^+$	$3,4_{-1,5}^{+0,6}$	1.3(4)	0.3(1)	0.71(5)	0.42(4)	–	–
$3_1^+ \rightarrow 2_1^+$		-0.34(5)	–	1.66(2)	-0.41_{-31}^{+13}	–	0.45(8)
$2_3^+ \rightarrow 2_2^+$	6,7 (3)	–	–	0.86(8)	-0.30(18)	–	–
$2_3^+ \rightarrow 2_1^+$	$2.2_{-0,2}^{+\infty}$	–	–	-0.457(7)	0.44(10)	–	–

(*) valores $\delta(E2/M1)$ obtidos no presente estudo (tabela 3.2)

(**) valores $\delta(E2/M1)$ propostos na referência [63]

Figura 5.1 - Diagrama parcial dos níveis de energia dos isótopos do selênio par-par com A=72 a A=86. As energias dos níveis são dadas em keV.

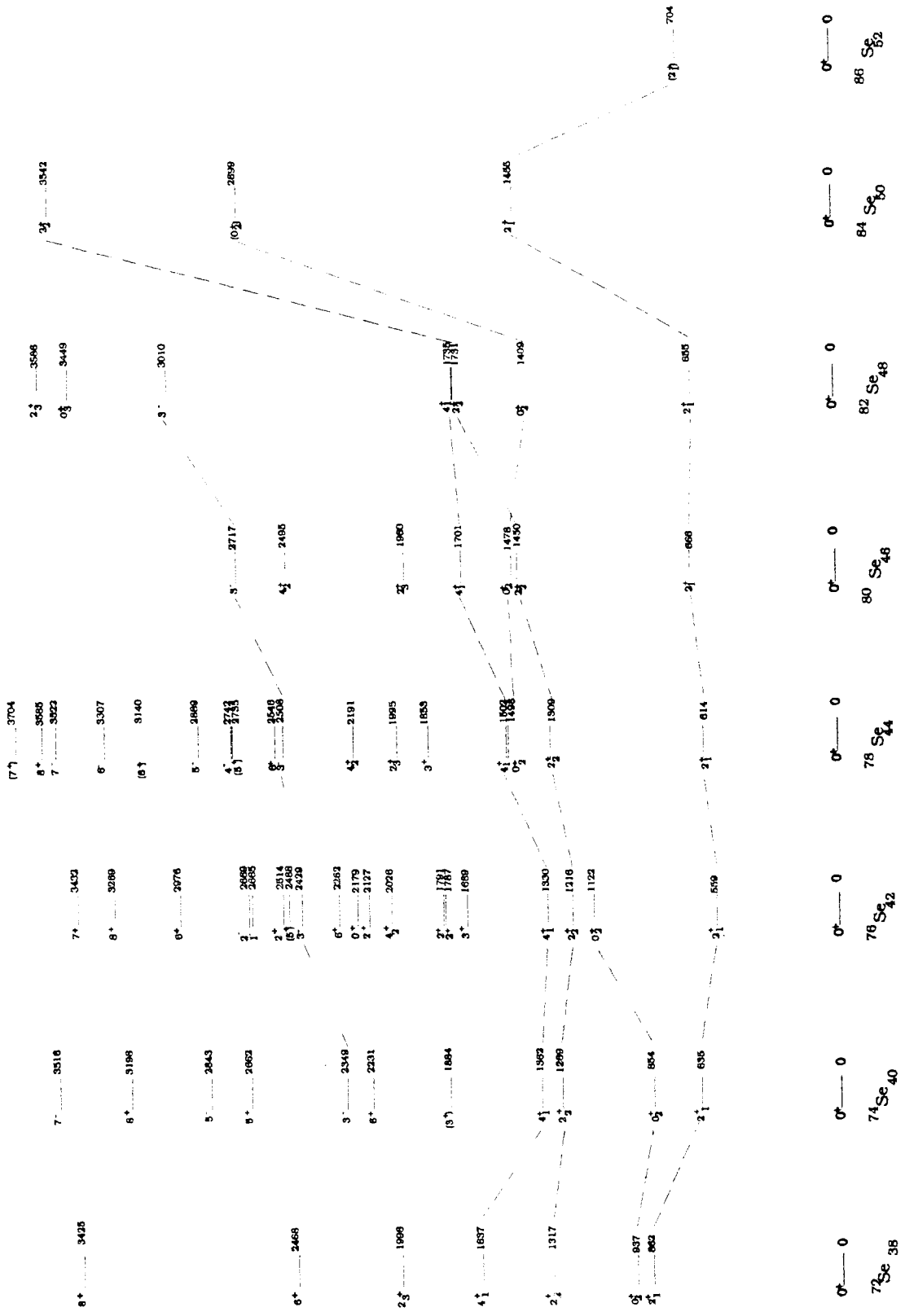


Figura 5.2 - Diagrama parcial dos níveis de energia dos isótonos N=42. Energia dos níveis dada em keV.

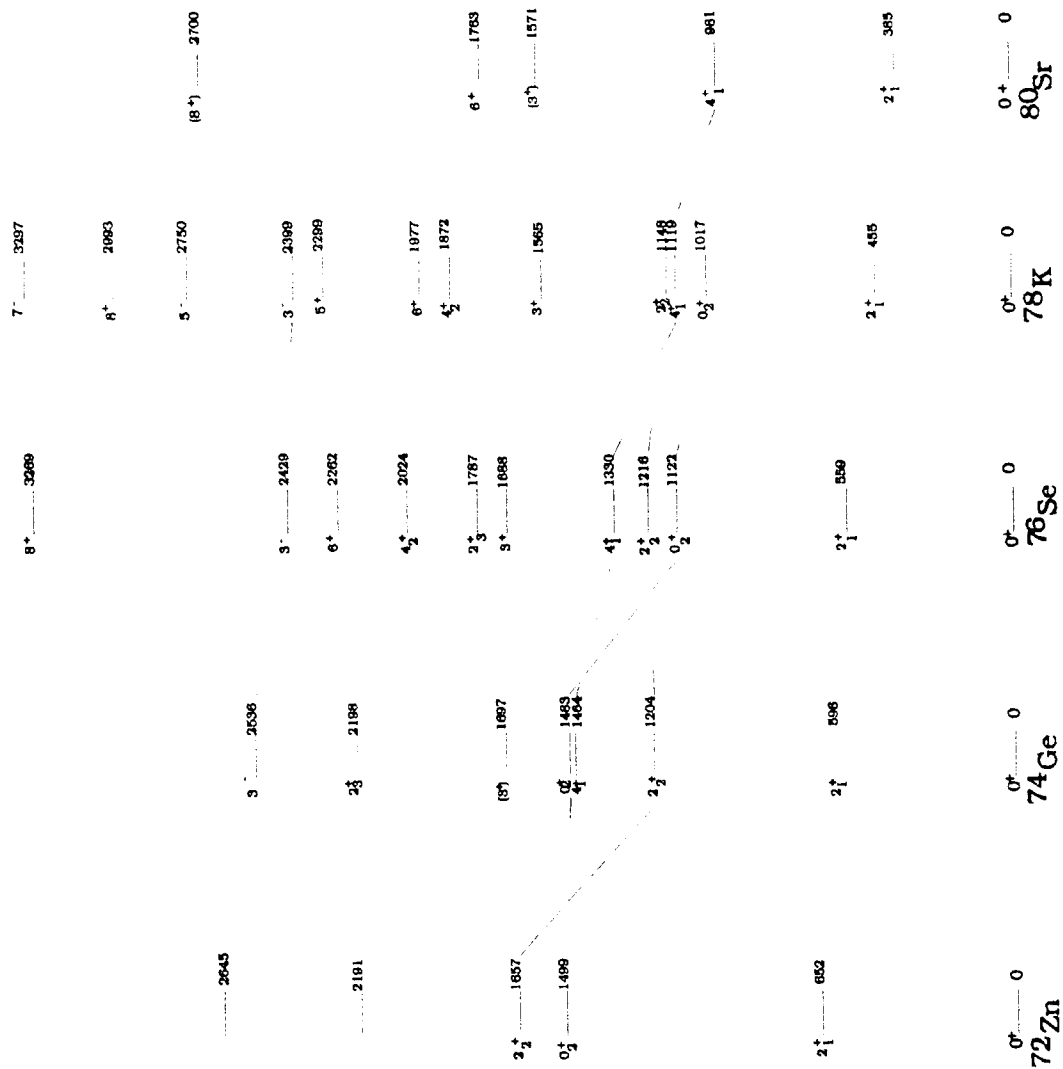


Figura 5.3 - Diagrama de níveis de energia do ^{76}Se do presente estudo e as previsões dos modelos vibracional e rotacional.

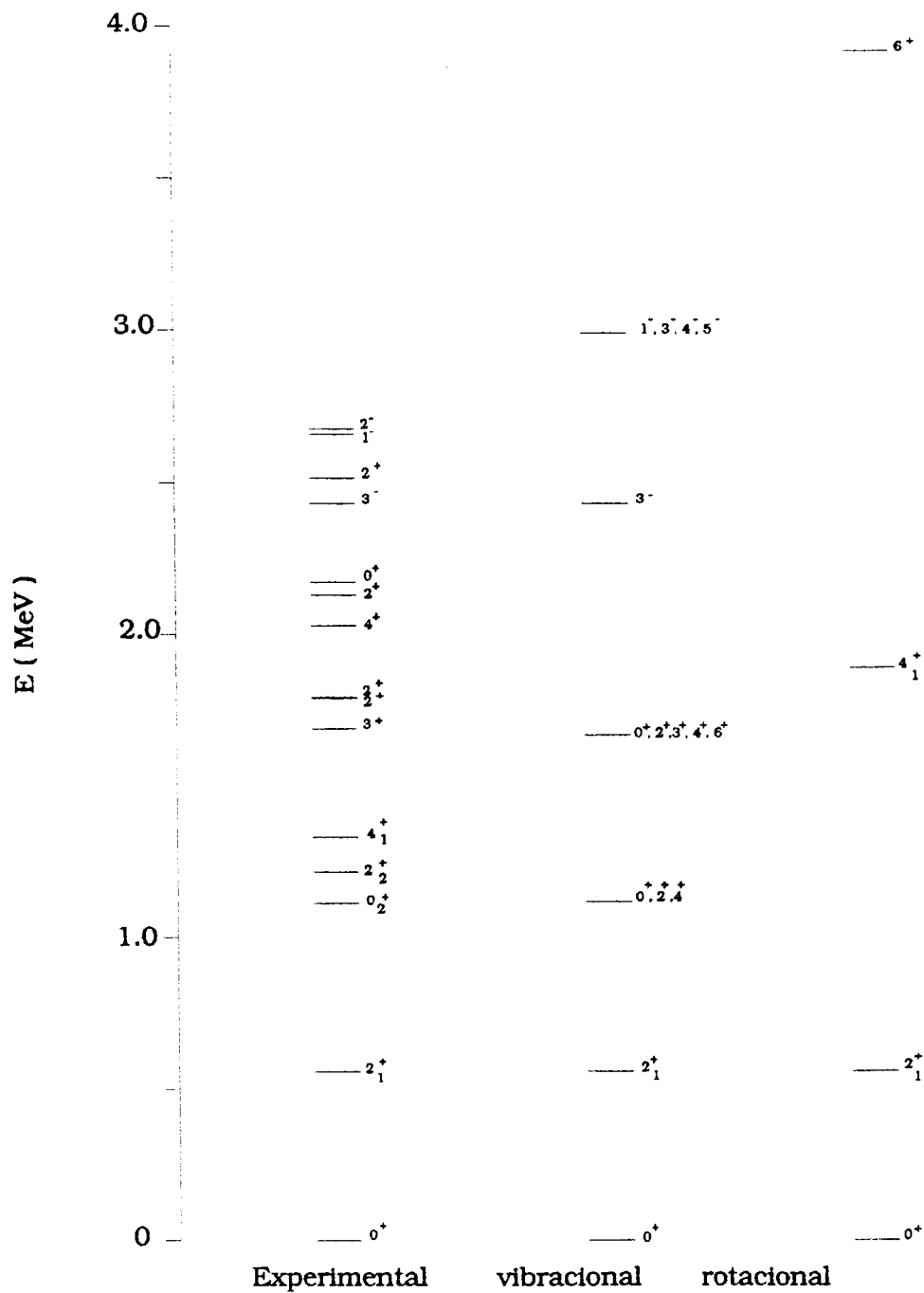
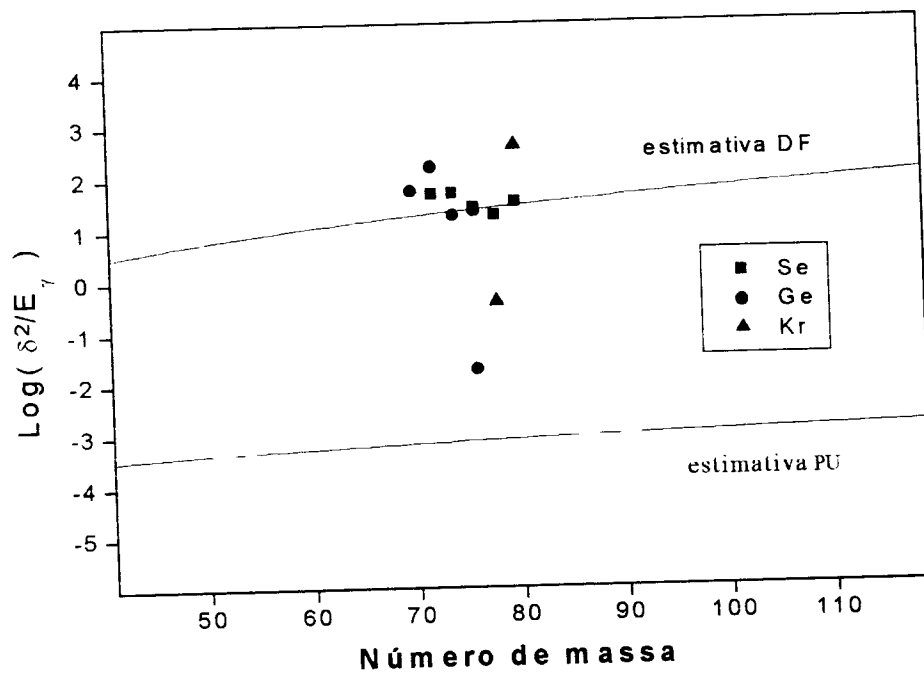


Figura 5.4 - Gráfico de $\log(\delta^2/E_\gamma)$ versus número de massa, para as transições $2_2^+ \rightarrow 2_1^+$, considerando os isótopos de $^{72,74,76,78,80}\text{Se}$, $^{70,76}\text{Ge}$ e $^{80,82}\text{Kr}$

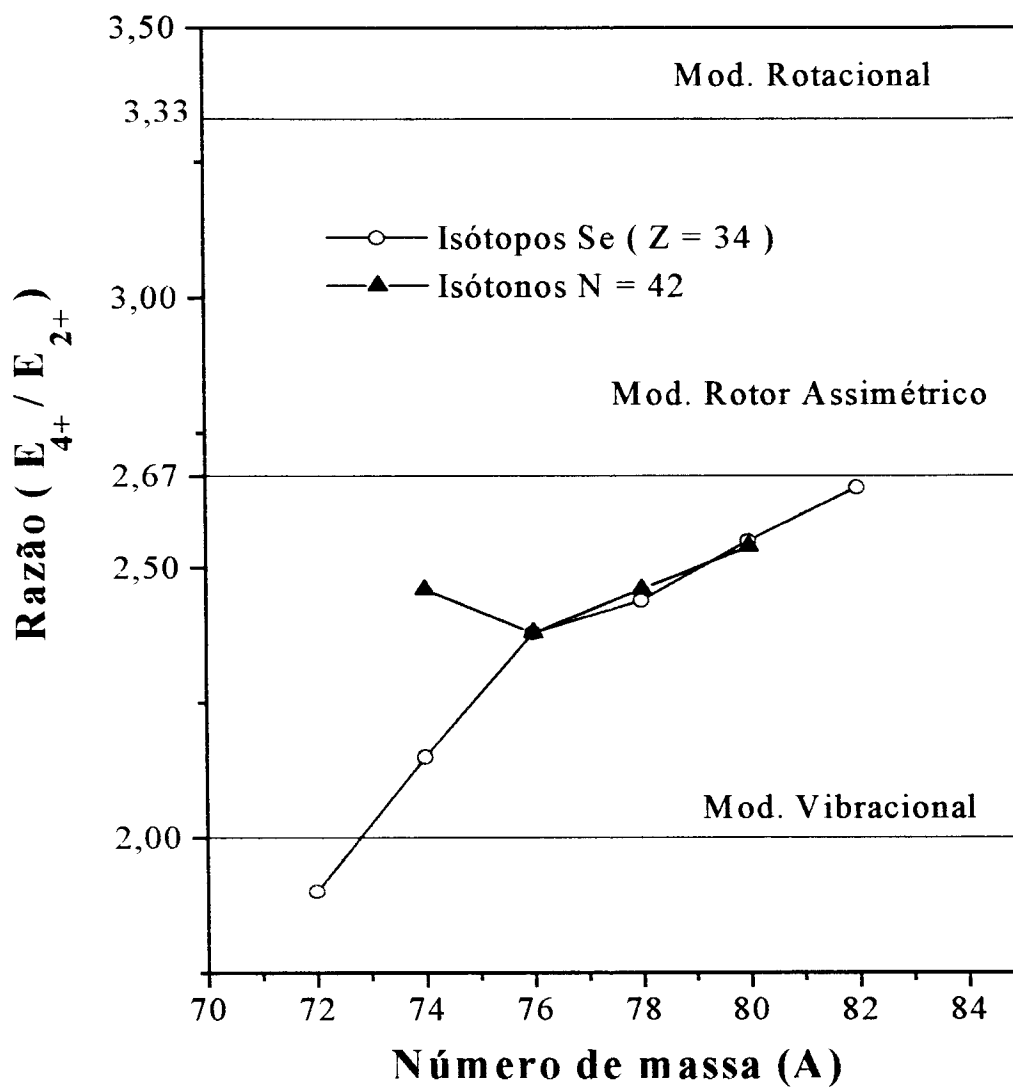


5.3 Estudo do Comportamento da Razão E_{4^+}/E_{2^+}

Uma importante indicação da deformação nuclear pode ser feita através da análise da razão E_{4^+}/E_{2^+} onde considera-se E_{4^+} pertencente ao tripleto de dois fônons e E_{2^+} como o estado de um fônon. Para o caso vibracional tem-se $E_{4^+}/E_{2^+} = 2,0$ [58, 65] e para estados rotacionais, onde são considerados graus de liberdade de deformação da superfície nuclear [66], tem-se $E_{4^+}/E_{2^+} = 3,33$. Outra estimativa proposta para esta razão é a prevista pelo modelo de rotor assimétrico (triaxial) [67], dada por $2,67 < E_{4^+}/E_{2^+} < 3,33$ que leva em conta em sua formulação aspectos de mistura “rotação-vibração”. Neste contexto, foi feita uma análise sistemática desta razão em função do número de massa, para os isótopos de Selênio e isótonos $N = 42$. Os dados obtidos são apresentados na figura 5.5.

Para os isótopos de Se esta razão varia entre 1,9 e 2,6. Particularmente, para os núcleos de ^{72}Se e ^{74}Se , cuja razão é dada por 1,9 e 2,1 respectivamente, tem-se um comportamento estrutural mais próximo da descrição vibracional (2,0). Para os isótonos $N = 42$ - ^{72}Zn , ^{74}Ge , ^{76}Se , ^{78}Kr e ^{80}Sr - esta razão é praticamente constante (2,4 a 2,5). Portanto, o que se observa na região de energia estudada são valores intermediários entre o que se espera para o caso vibracional e o caso rotacional. O valor de 2,4 obtido para o núcleo de ^{76}Se sugere a hipótese de que os 8 nêutrons que faltam para fechar a camada de 50 nucleons ($1g_{9/2}$) e os 6 prótons que sobram fora da camada de 28 nucleons ($1f_{5/2}$) podem induzir oscilações na superfície nuclear, e conseqüentemente, tanto as vibrações como as rotações podem ocorrer gerando bandas vibracionais e rotacionais no espectro de estados excitados.

Figura 5.5 - Análise sistemática da razão E_{4^+}/E_{2^+} em função do número de massa para isótopos de Se e isótonos $N = 42$.



Realmente, a existência de bandas foi proposta em medidas realizadas por meio das reações $^{74,76}\text{Ge}(\alpha, 2n\gamma)$ [68]. Particularmente, no núcleo de ^{76}Se , foram identificadas quatro bandas: banda fundamental onde o estado 4_1^+ do tripleto faz parte; banda γ -vibracional ($\Delta J = 1$) de paridade positiva, construída a partir do estado 2_2^+ (também membro do tripleto); banda vibracional octupolar ($\Delta J = 2$) e uma outra com $\Delta J = 2$, ambas com paridade negativa e localizadas na região de energia mais alta (acima de 2400 keV). Um estudo sistemático envolvendo os núcleos de ^{76}Se e ^{78}Se , realizado pelos autores, mostra que a banda de paridade positiva ($\Delta J = 1$) é composta praticamente de transições crossover E2, evidenciando o caráter coletivo desta banda nesses núcleos.

5.4 Estudo Sistemático do Comportamento da Banda de paridade positiva ($\Delta J = 2$) nos Isótopos de Selênio

Considerando a existência de bandas, com $\Delta J = 2$ e paridade positiva, para os isótopos par-par do Se ($A = 72$ a 78) [32] pode-se, através de gráficos de momento de inércia, $2\zeta/\hbar^2$ versus $(\hbar\omega)^2$, onde ζ representa o momento de inércia efetivo, identificar estados vibracionais e rotacionais, pois, para estados vibracionais, o gráfico gerado é dado por uma linha vertical, enquanto que para um rotor rígido tem-se uma linha horizontal.

Na figura 5.6 é apresentado o gráfico de $2\zeta/\hbar^2$ versus $(\hbar\omega)^2$ para os isótopos de Selênio ($A = 72$ a 78). Para obtenção das curvas foi utilizada a metodologia estabelecida por SORENSEN [69]. De acordo com esta figura pode-se observar para todos os isótopos a existência de estados com diferentes formas nucleares. Para os núcleos de ^{72}Se e ^{74}Se é possível associar aos estados de mais baixo spin características vibracionais e aos de mais alto spin características rotacionais. Em especial para o núcleo de ^{72}Se este comportamento é mais claro pois a transição da linha vertical (comportamento vibracional) para horizontal (comportamento rotacional) é acentuada. Para o núcleo de ^{78}Se esta hipótese também é plausível, entretanto observa-se a transição dos níveis rotacionais para vibracionais. Para o núcleo de ^{76}Se , a idéia de mistura de estados vibracionais e rotacionais é plausível.

Uma outra análise que permite obter informações sobre o comportamento estrutural desses isótopos, através dessas bandas, é obtida por meio do gráfico de $\Delta E(E_{1,1-2})$ versus J_{\min} , onde J_{\min} é dado considerando-se o mais baixo spin da cascata $\gamma\gamma$ envolvida.

De acordo com a expressão para energia do espectro rotacional [70], dada por: $E_{\text{rot}} = \frac{\hbar^2}{2\zeta} J(J+1)$, é esperado um comportamento monotônico de $\Delta E_{1,(1-2)}$ em função J_{min} , desde que não haja mudanças no comportamento estrutural dessas bandas (cruzamento de bandas). Entretanto, observando-se as curvas geradas, apresentadas no gráfico da figura 5.7, é nítida a presença de mudanças abruptas (saltos) para todos os isótopos, o que sugere o cruzamento de estruturas diferentes. Particularmente, para o núcleo de ^{76}Se pode-se supor que o cruzamento de bandas ocorra para $J = 6$. Novamente a hipótese de coexistência de estados vibracionais com estados rotacionais pode ser considerada.

O modelo de coexistência de forma tem sido utilizado com relativo sucesso para descrever os estados coletivos de alguns isótopos par-par de Selênio. Para o núcleo de ^{72}Se foi obtido por HAMILTON e outros [71] a reprodução da estrutura da banda de paridade positiva. Da mesma forma, RAMAYANA e outros [72] e LIEB e KOLTA [73] reproduziram com o modelo os níveis de mais baixa energia e alguns valores de $B(E2)$, neste núcleo.

O modelo de coexistência de forma nuclear também foi empregado na interpretação da estrutura nuclear do ^{74}Se [74, 75, 76]. Foram realizados cálculos dos valores de $B(E2)$ e a comparação com os dados obtidos mostrou-se consistente.

Para o ^{76}Se , apesar do modelo não ter sido empregado, o que se verifica é que todos os estudos realizados destinam-se a distinguir a aparente coexistência de estrutura dos níveis de energias mais baixa.

Figura 5.6 - Variação de $2\zeta/\hbar^2$ versus $(\hbar\omega)^2$ para os isótopos de Selênio com $A=72$ a 78 .

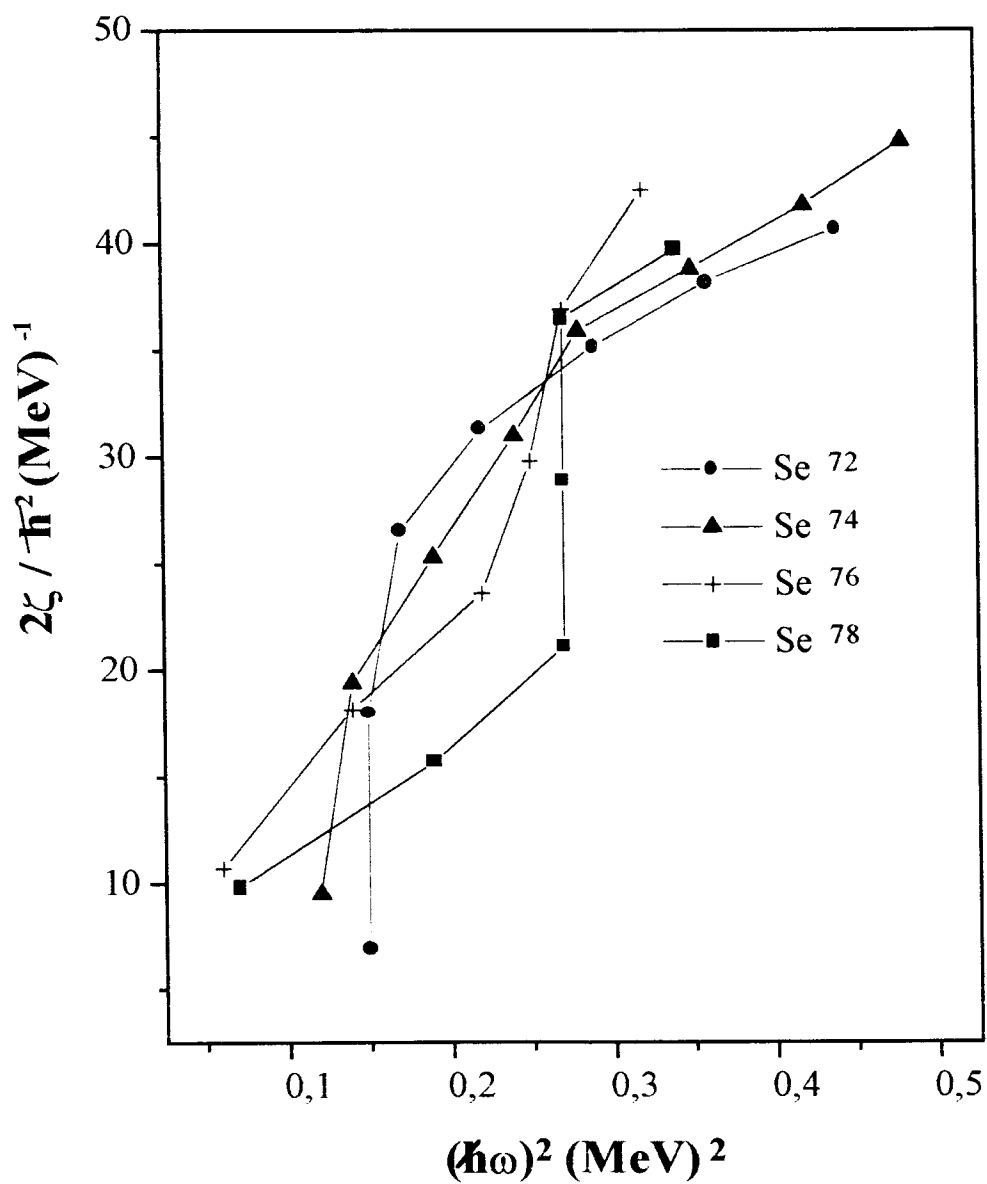
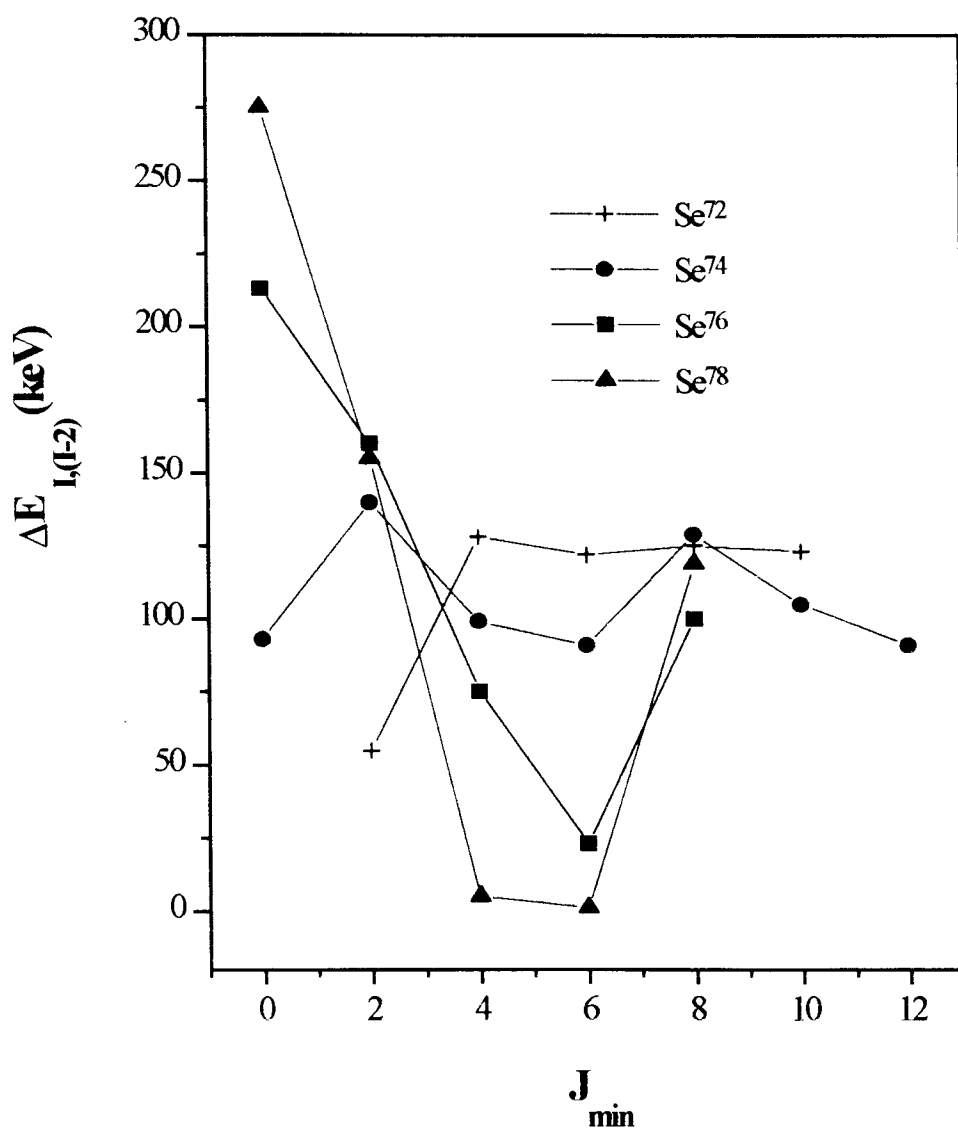


Figura 5.7 - Variação de ΔE ($E_{L,1-2}$) em função de J_{\min} para os isótopos de Selênio com $A=72$ a 78 .



6 Conclusão

No presente trabalho foram estudadas, experimentalmente, características nucleares dos níveis excitados e transições γ provenientes do decaimento β^- do núcleo de ^{76}As . Os estudos foram feitos por meio da aplicação da técnica de correlação angular direcional $\gamma\gamma$, sendo o equipamento utilizado, comparativamente aos estudos anteriores, tecnicamente aprimorado.

No núcleo de ^{76}Se foram estudadas 52 cascatas, sendo 33 medidas pela primeira vez. Os resultados experimentais obtidos permitiram confirmar e estabelecer definitivamente spin e paridade de 12 níveis excitados no ^{76}Se , até a energia de $\sim 2,7$ MeV. Além disso, estes resultados são compatíveis com as modificações sugeridas no recente estudo de espectroscopia gama [7].

A verificação do spin e paridade bem estabelecidos dos estados de 559 keV (2^+), 1122 keV (0^+), 1216 keV (2^+) e 1330 keV (4^+) serviram como referência para análise das demais medidas de correlação angular realizadas.

A determinação da razão de mistura multipolar da transição 657 keV, por meio da cascata (559 - 657) keV, que é a mais intensa do esquema de decaimento, apresenta valor de $\delta(E2/M1)$ compatível com as medidas anteriores tanto de correlação angular [8, 33] como por orientação nuclear [37, 38]. Este resultado mostra o bom desempenho do espectrômetro, além de fornecer subsídios para várias medidas de correlação angular tripla, onde a transição γ de 657 keV é tida como intermediária. A partir da medida das cascatas triplas sem a observação da transição γ de 657 keV foi possível confirmar o caráter multipolar associado às transições γ de 472 keV, 809 keV, 1212 keV, 1439 keV e 1453 keV obtidas por cascatas diretas. Outras cascatas triplas, envolvendo as transições intermediárias de 563 keV, 695 keV e 771 keV também foram medidas, sendo possível confirmar o

caráter multipolar das transições gama de 403 keV, 456 keV e 665 keV, obtidas por cascatas diretas.

A possibilidade de se estudar cada transição separadamente, além de confirmar as modificações sugeridas no recente estudo de espectroscopia simples [7] permitiu a obtenção da razão de mistura multipolar de praticamente todas as transições- γ envolvidas, cuja comparação, quando possível com outros trabalhos, mostra-se, na maioria dos casos, em bom acordo e, em muitos casos, com erros significativamente menores. O único valor em desacordo é atribuído à razão de mistura multipolar da transição γ de 571 keV. Esta diferença pode ser entendida quando se leva em conta as mudanças propostas no esquema de níveis, isto é, sua coincidência com a transição de 1216 keV (fig. 4.2) e portanto sua interferência na janela (559 + 563 + 571 + 575) keV utilizada nas medidas anteriores de correlação angular [8].

As razões de mistura multipolar das transições γ obtidas, além de fornecer subsídios para proposição dos spins nucleares, fornecem mais elementos para construção de um modelo teórico que possa melhor elucidar as propriedades nucleares do núcleo de ^{76}Se , uma vez que para este núcleo os dados de $\delta\left(\frac{L'_n}{L_n}\right)$ eram limitados a poucas transições γ .

A abordagem teórica, que envolve o estudo sistemático para núcleos par-par de Se, mostra que não é possível admitir que um único modelo seja adequado para descrição simultânea de todas as propriedades nucleares já estabelecidas. Particularmente, para o núcleo de ^{76}Se o que se conclui é que todos os estudos apontam para a hipótese de coexistência de forma no que diz respeito à estrutura de níveis de energia mais baixa, embora esses níveis tenham fortes características de vibrador.

Referências Bibliográficas

- [1] ROSE, H.J.; BRINK, D.M. Angular distributions of gamma-rays in terms of phase-defined reduced matrix elements. *Rev. Mod. Phys.*, v. 39, n. 2, p. 306-47, 1967.
- [2] FRAUENFELDER, H.; STEFFEN, R.M. Angular correlations. In: SIEGBAHN, K., ed. *Alpha, beta and gamma-ray spectroscopy*. Amsterdam, North-Holland, 1965.
- [3] BIEDERNHARN, L.C.; ROSE, M.E. Theory of angular correlation of nuclear radiations. *Rev. Mod. Phys.*, v. 25, p. 729-77, 1953.
- [4] NUEVO Jr., A.B. *Correlações angulares gama-gama nos núcleos ^{71}Ga e ^{69}Ga* . São Paulo: 1975 Dissertação (Mestrado) - Instituto de Física da Universidade de São Paulo.
- [5] LANDULFO, E.; SAXENA, R.N.; ZAMBONI, C.B.; LAPOLLI, A.L. Directional correlations of γ -transitions in ^{72}Ga . *Phys. Rev. C*, v. 50, p. 733-40, 1994.
- [6] MEDEIROS, J.A.G. *Níveis do ^{72}Ge populados pelo decaimento β^- do ^{72}Ga* . São Paulo: 1995. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares.
- [7] CAMARGO, S.P. Decaimento β^- do ^{76}As . *Applied Radiation and Isotopes*, v. 49, p. 997-1004, 1998.
- [8] ZAMBONI, C.B.; SAXENA, R.N. Gamma-gamma angular correlations in the decay of ^{76}As . *Phys. Rev. C*, v. 39, n. 6, p. 2379-84, 1989.
- [9] ZAMBONI, C.B.; SAXENA, R.N. g-Factor and half-life of 250 keV state in ^{77}Se . *J. Phys. G: Nucl. Phys.*, v. 10, p. 1571-7, 1984.
- [10] JAHNEL, L.C. *Correlações angulares gama-gama no núcleo ^{84}Kr* . São Paulo: 1979. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares.
- [11] MATHEUS, R. *Correlações angulares gama-gama nos núcleos ^{81}Br e ^{83}Br* . São Paulo; 1984. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares.
- [12] DUMWORTH, J.W. The application of the coincidence counting to experiments in nuclear physics. *Nucl. Instrum. Methods*, v. 11, p. 167-80, 1960.

- [13] HAMILTON, D.R. On directional correlation of successive quanta. *Phys. Rev.*, v. 58, p. 122-31, 1940.
- [14] BRADY, E.L.; DEUTSCH, M. Angular correlation of successive gamma-ray quanta. *Phys. Rev.*, v. 72, p. 870-1, 1947.
- [15] STEFFEN, R.M.; ALDER, K. Angular distribution and correlation of gamma-ray. In: HAMILTON, W. D., ed. *The electromagnetic interaction in nuclear spectroscopy*. Amsterdam, North-Holland, 1975, p. 505-82.
- [16] TWIN, P.J. Gamma-ray angular distribution and correlation measurement experimental methods following nuclear reactions. In: HAMILTON, W. D., ed. *The electromagnetic interaction in nuclear spectroscopy*. Amsterdam, North-Holland, 1975.
- [17] HAMILTON, W.D. Gamma-ray angular distribution and correlation measurements (I). Experimental methods using radioactive sources. In: HAMILTON, W.D., ed. *The electromagnetic interaction in nuclear spectroscopy*. Amsterdam, North-Holland, 1975, p. 645-700.
- [18] FALKOFF, D.L.; LING, D.S. Interference effects in gamma-gamma angular correlations. *Phys. Rev.*, v. 76, n. 11, p. 1639-48, 1949.
- [19] FERENTZ, M.; ROSENSWEIG, N. Table of angular correlation coefficients. In: SIEGBAIN, K., ed. *Alpha, beta and gamma-ray spectroscopy*. Amsterdam, North-Holland, 1965.
- [20] MOSZKOWSKI, S.A. Theory of multipole radiation. In: SIEGBAIN, K., ed. *Alpha, beta and gamma-ray spectroscopy*. Amsterdam, North-Holland, 1965.
- [21] GOERTZEL, G. Angular correlation of gamma-ray. *Phys. Rev.*, v. 70, p. 897-909, 1946.
- [22] VANIN, V.R. *Estudos dos decaimentos do ^{102m}Rh e do ^{101f}Rh e estrutura nuclear do ^{101}Ru* . São Paulo: 1984. Tese (Doutoramento) - Instituto de Física da Universidade de São Paulo.
- [23] COHENCA, J. M. Manual do programa de Aquisição Bidi, São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Física, Laboratório do Acelerador Linear, 1983.
- [24] KENCHIAN, G.; VANIN, V.R.; GOUFFON, P. MBP-Programa de construção de histograma bidimensional a partir de dados em modo fila bidimensional, São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Física, Laboratório do Acelerador Linear, 1992.

- [25] VANIN, V. Manual do Programa Panoramix, São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Física, Laboratório do Acelerador Linear, 1988.
- [26] VANIN, V.R; AÏCHE, M. Statistical Analysis of $\gamma\gamma$ coincidence matrices. *Nucl. Instrum Meth.*, v. A284, p. 452 – 458, 1989.
- [27] CAMP, D.C.; VAN LEHN, A.L. Finite solid-angle corrections for Ge(Li) detectors. *Nucl. Instrum. Meth.*, v. 76, p. 192-240, 1969.
- [28] RIBAS, R. Comunicação pessoal.
- [29] FERGUSON, A. J. *Angular correlation methods in gamma-ray spectroscopy*. Amsterdam, North-Holland, 1965.
- [30] JAMES, A.N.; TWIN, P.J.; BUTLER, P.A. The statistical analysis of gamma ray angular correlation experiments. *Nucl. Instrum. Methods*, v. 115, p. 105-13, 1974.
- [31] SOUZA, M.O.M.D. *Correlação angular gama-gama para transições nos núcleos de Te^{127} e Te^{129}* . São Paulo: 1984. Tese (Doutoramento) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares.
- [32] FIRESTONE, R.B.; SHIRLEY, V.S.(Eds.). *Table of isotopes*. 8 ed. New York, N.Y.: Wiley, 1996.
- [33] KAUR, R.; SHARMA, A.K.; SOOCH, S.S.; VERMA, H.R.; TREHAN, P.H. Level structure studies in Se^{76} . *J. Phys. Soc. Jpn.*, v. 49, p. 1214-21, 1980.
- [34] NAGAHARA, T. Energy levels in ^{76}Se from the decay of As^{76} . *J. Phys. Soc. Jpn.*, v. 34, p. 579-87, 1973.
- [35] NUCLEAR DATA SHEETS, v. 42, n. 3, 1984.
- [36] GRABOWSKI, Z.; GUSTAFSSON, S.; HARKAND, J. Angular correlation measurements on levels in Se^{76} and Fe^{56} . *Ark. Fys.*, v. 17, p. 411-9, 1960.
- [37] SUBBER, A.R.H.; ROBISON, S.J.; HUNGEFORD, P.; HAMILTON, W.D.; ISACKER, P. von; KUMAR, K.; PARK, P.; SCHERECKENBACH, K.; GOLVIN, G. The level structure of ^{76}Se and ^{78}Se and the systematics of selenium isotopes within the framework of the DDM. *J. Phys., G (London). Nucl. Phys.*, v. 13, p. 807-37, 1987.
- [38] BARCLAY, J.A.; ROSENBLUM, S.S.; STEYERT, W.A.; KRANE, K.S. Nuclear orientation of ^{76}As . *Phys. Rev.C*, v. 13, p. 1991-5, 1976.
- [39] PRUETT, R.J. Determination of the lifetime of Se^{76} using nuclear resonance fluorescence. *Phys. Rev.*, v. 129, p. 2583-90, 1963.

- [40] BERCAW, R.W.; VINCENT, J.S. Inelastic α -particle scattering studies of even-even Se isotopes. *Bull. Am. Phys. Soc.*, v. 10, n. 4, p. 540, 1965.
- [41] ARDOWIN, D.; TAMISIER, R.; VERGNES, M.; ROTBARD, G.; KALIFA, J.; BERRIER, G.; GRAMMATICOS, B. Systematics of the proton stripping reaction on $^{69,71}\text{Ga}$, ^{75}As , $^{79,81}\text{Br}$ isotopes and nuclear structure of the Ge-Se isotopes *Phys. Rev. C*, v. 12, p. 1745-61, 1975.
- [42] LIN, E.K. Inelastic scattering of deuterons from Zn and Se isotopes. *Nucl. Phys.*, v. 73, p. 613-24, 1965.
- [43] MULLER, H.; WOHLFARTH, D.; HENTSCHEL, E. Experimental results of spectroscopical investigation of the isotopes $^{76,78,80,82}\text{Se}$. Rossendorf, *Zentralinstitut fur Kernforschung*, v. 7FK, p. 273, 1974.
- [44] COBERN, M.E.; LEMAIRE, M.C.; LOW, K.S.; MERMAZ, M.C.; SZTARK, H.; HUDAGAWA, T.; TAMURA, T. Multistep processes in transfer reaction induced by 56 MeV ^{16}O beam on $^{72,74,76}\text{Ge}$ isotopes. *Phys. Rev. C*, v. 13, p. 1200-10, 1976.
- [45] BORSARU, M.; GEBBIE, D.W.; NURZYNSKI, J.; HOLLAS, C.L.; BARBOPOULOS, L.O.; QUINTON, A.R. A study of the $^{78,76}(\text{p,t})^{76,74}\text{Se}$ radiations at E=33 Mev. *Nucl. Phys. A*, v. 284, p. 39-98, 1977.
- [46] ANDERSSON, G.; ASGHAR, M.; EMSALLEN, A.; HAGBERG, E.; JONSON, B.; TIDEMAND-PERTESSON, P. Study of the reaction $^{76}\text{Br}(\text{n,p})^{76}\text{Se}$. *Phys. Scr.*, v. 18, p. 165-6, 1978.
- [47] TOKUNAGA, Y.; SEYFARTH, H.; SCHULT, O.W.B.; BORNER, H.G.; HOFMEYR, Ch.; BARREAU, G.; BRISSOT, R.; KAUP, U.; MONKEMEYER, Ch. The $^{75}\text{Se}(\text{n}, \gamma)^{76}\text{Se}$ reaction and low-lying level structure of ^{76}Se . *Nucl. Phys. A*, v. 411, p. 209-30, 1983.
- [48] DELAROCHE, J.P.; VARNER, R.C.; CLEGG, T.B.; ANDERSON, R.E.; BURKS, B.L.; LUDWIG, E.J.; WILKERSON, J.F. Structure of low-lying states of $^{76,78,80,82}\text{Se}$ deduced from [p (pol), p'] scattering at 16 MeV. *Nucl. Phys. A*, v. 414, p. 113-40, 1984.
- [49] KURUP, R.G.; FINLAY, R.W.; RAPPORT, J.; DELAROCHE, J.P. Strong coupling and isospin effects in neutron scattering from $^{76,80}\text{Se}$. *Nucl. Phys. A*, v. 240, p. 237-56, 1984.
- [50] BARRETTE, J.; BARRETTE, M.; LAMOREUX, G.; MONARO, S.; MARKIZA, S. Coulomb excitation of the even-mass selenium nuclei. *Nucl. Phys. A*, v. 235, p. 154-70, 1974.

- [51] PEIKUN, W.; FENGYING, L.; GUANJUN, Y.; SHENGGANG, L.; XIANE, L.; SHIPING, C. The decay ^{76}As . *Chin. J. Nucl. Phys.*, v. 4, p. 201-7, 1982.
- [52] LADENBAUER-BELLIS, J.M.; BAKHRU, H.; BAKHRU, R. Decay study of ^{76}Br . *Can. J. Phys.*, v. 49, p. 54-60, 1971.
- [53] MCGOWAN, F.K.; STELSON, PH. Coulomb excitation of second 2^+ states in $^{74,76}\text{Ge}$ and $^{76,78,80}\text{Se}$. *Phys. Rev.*, v. 126, p. 257-63, 1962.
- [54] FUNEL, G. Etude, par la methode de coincidence, de la desintegration de l'Arsenic 76. *C.R. Acad. Sci. Ser. B*, v. 274, p. 662-4, 1972.
- [55] ADERSSON, G.; MARSOL, C.; RAHMOUNT, O.; AGUER P. Etude du schema de desintegration de ^{76}As . *Nucl. Phys. A*, v. 79, p. 545-53, 1972.
- [56] IIZAWA, K.; KITAMURA, I.; KAWADE, K.; YAMAMOTO, H.; YOSHIKAWA, K.; SUSUMU, A.; KATOH, T. Gamma-ray spectroscopy of ^{76}As . *J. Phys. Soc. Jpn.*, v. 30, p. 901-9, 1970.
- [57] MCMILLAN, D.K.; PATE, B.D. Levels in ^{76}Se populated in the β decay of ^{76}As . *Nucl. Phys. A*, v. 174, p. 604-16, 1971.
- [58] PRESTON, M.A. *Physics of the nucleus. reading, mass.* Addison-Wesley, 1962.
- [59] BYGRAVE, W.; ECCLESHALL, D.; YATES, J.L. The coulomb excitation of Se^{76} and Se^{78} using oxigens ions. *Nucl. Phys.*, v. 53, p. 385-96, 1964.
- [60] WELLS, J.C.; ROBINSON, R.L.; KIM, H.J.; SAYER, R.O.; PEIRCEY, R.B.; RAMAYYA, A.V.; HAMILTON, J.H.; MAGUIRE, C.F. High-spin states and band structure in Se^{76} . *Phys. Rev. C*, v. 22, p. 1126-37, 1980.
- [61] BLATT, J.M.; WEISSKOPF, V.F. *Theoretical Nuclear Physics*. New York, Wiley, 1952.
- [62] DAVYDOV, A.S.; FILIPPOV, G.F. Rotational states in even atomic nuclei. *Nucl. Phys.* v.8, p. 237, 1958.
- [63] LANGE, J.; KUMAR, K.; HAMILTON, J.H. E0-E2-M1 multipole admixtures of transitions in even-even nuclei. *Rev. Mod. Phys.* v. 4, n. 1, p. 119-94, 1982.
- [64] LECOMTE, R.; PARADIS, P.; BARRETE, J.; BARRETE, M.; LAMOREUX, G.; MONARO, S. Measurement of the static quadrupole moments of the first 2^+ states in ^{76}Se , ^{78}Se , ^{80}Se and ^{82}Se . *Nucl. Phys. A*, v. 284, p. 123-34, 1977.

- [65] HORNYAK, W.F. *Nuclear Structure*. Academic Press, 1975.
- [66] BOHR, A.; MOTTELSON, B.R. *Nuclear structure*, v. 2. W. A. Benjamin, Reading, 1975.
- [67] MARISCOTTI, M.A.J.; SCHARFF-GOLDHABER, G.; BUCK, B. Phenomenological analyses of ground-state bands in even-even nuclei. *Phys. Rev.*, v. 178, p. 1964, 1969.
- [68] MATSUZAKI, T.; TAKETANI, N. Band structures of ^{76}Se and ^{78}Se . *Nucl. Phys. A*, v. 390, p. 413-48, 1982.
- [69] SORENSEN, R.A. Nuclear moment of inertia at high spin. *Rev. Mod. Phys.*, v 45, p. 353, 1973.
- [70] EISEMBERG, J.M.; GREINER, W. *Nuclear theory*, v. 1 Nuclear models, 3. Ed., North-Holland, 1987.
- [71] HAMILTON, J.H.; RAMAYYA, A.V.; PINKSTON, W.T.; RONNINGEN, R.M.; GARCIA-BERMUDEZ, G.; CARTER, H.K.; ROBINSON, R.L.; KIM, H.J.; SAYER, R.O. Evidence for coexistence of spherical and deformed in ^{72}Se . *Phys. Rev. Lett.*, v. 32, p. 239, 1974.
- [72] RAMAYYA, A.V.; RONNINGEN, R.M.; HAMILTON, J.H.; PINKSTON, W.T.; GARCIA-BERMUDEZ, G.; ROBINSON, R.L.; KIM, H.J.; CARTER, H.K.; COLLINS, W.E. Mean life and collective effects on the 937 keV 0^- state in ^{72}Se : Evidence for nuclear coexistence. *Phys. Rev. C*, v.12, p. 1360, 1975.
- [73] LIEB, K.P.; KOLATA, J.J. Ground-state band in ^{72}Se . *Phys. Rev. C*, v. 15, p. 939, 1977.
- [74] RONNINGEN, R.M.; RAMAYYA, A.V.; HAMILTON, J.H.; LOURENS, W.; LANGE, J.; CARTER, H.K.; SAYER, R.O. Mean life of the 854 keV 0_2^- state in ^{74}Se and the coexistence model. *Nucl. Phys. A*, v. 261, p. 439, 1976.
- [75] PIERCEY, R.B.; RAMAYYA, A.V.; RONNINGEN, R.M.; HAMILTON, J.H.; MARUHN-REZWANI, V.; ROBINSON, R.L.; KIM, H.J. In-beam gamma-ray spectroscopy of ^{74}Se following the $^{60}\text{Ni}(^{16}\text{O},2p)$, $^{64}\text{Ni}(^{12}\text{C},2n)$ and $^{65}\text{Cu}(^{11}\text{B},2n)$ reactions. *Phys. Rev. C*, v. 19, p. 1344, 1979.
- [76] COTTLE, P.D.; HOLCOMB, J.W.; JOHNSON, T.D.; STUCKEY, K.A.; TABOR, S.L.; WOMBLE, P.C.; BUCCINO, S.G.; DURHAM, F.E. Shape coexistence and octupole vibrations in ^{74}Se . *Phys. Rev. C*, v. 42, p. 1254, 1990.



M21759



comissão nacional de energia nuclear
instituto de pesquisas energéticas e nucleares

Travessa "R" nº 400 - Cidade Universitária - CEP 05508-900

SÃO PAULO - São Paulo - Brasil

Fone (011) 816-9000 - Fax (011) 212-3546

O Ipen é uma autarquia vinculada à Secretaria de Ciência, Tecnologia e Desenvolvimento Econômico do Estado de São Paulo, gerida técnica, administrativa e financeiramente pela Comissão Nacional de Energia Nuclear, órgão da Secretaria de Assuntos Estratégicos da Presidência da República e associada à Universidade de São Paulo para fins de ensino de pós-graduação.