

ESTUDO DA COEXISTÊNCIA DE FORMA NOS ISÓTOPOS PARES DO SELÊNIO

Camargo, S.P.(1), Zamboni, C.B.(2), Medeiros, J.A.G. (1,2), Medeiros, I.M.M.A (2)

(1) Universidade de Santo Amaro

(2) Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares

Aspecto

1/2

Uma comparação sistemática de algumas propriedades nucleares dos isótopos par-par de Se, na região de massa de $A = 72$ a 86 , foi realizada objetivando a compreensão e a interpretação de sua estrutura nuclear.

Palavras chave: selênio, isótopos, propriedade nucleares.

A comparison of some nuclear properties of even mass Se nuclei with $A = 72-86$ has been made in order to illustrate the systematic variation of these properties with mass number.

Keywords: selênio, isótopos, propriedade nucleares.

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 tratam-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 a compreensão da estrutura nuclear.

O objetivo deste trabalho é elucidar a estrutura nuclear dos isótopos par-par de Selênio considerando os dados experimentais já existentes na literatura, e as hipóteses teóricas associadas à estrutura nuclear. Para isto, foi elaborado um sumário com os parâmetros experimentais mais significativos e atualizados, que permitiu uma comparação sistemática dos espectros de energia, spin e paridade de níveis, bem como de dados a respeito das razões de mistura multipolar de transições γ e das razões de probabilidade de transição reduzida entre estados nucleares.

Níveis de Energia e Propriedades Nucleares

Para realização deste estudo é importante elaborar o diagrama de níveis dos núcleos de Selênio dentro do contexto dos dados experimentais mais recentes da

literatura [Firestone *et al* 1996]. Na figura 1 têm-se a reprodução parcial dos níveis de energia dos isótopos par-par de Selênio ($A = 72$ a 86). De acordo com esta sistemática 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 nesta figura é possível acompanhar a evolução dos estados 2_1^+ , 0_2^+ , 2_2^+ , 4_1^+ e 3^- entre os isótopos $A = 74$ a 82 , que sugere um comportamento predominantemente vibracional. De fato, tem-se dentro do contexto do modelo vibracional que o primeiro estado excitado (2_1^+) pode ser considerado como o estado de um-fônon, e o tripleto (0_2^+ , 2_2^+ e 4_1^+), não necessariamente nesta ordem, com energia aproximadamente o dobro da energia de excitação do primeiro estado excitado (2_1^+), caracteriza o estado de dois-fônons previsto pelo modelo. Para alguns isótopos pode-se observar também alguns dos níveis relacionados ao quintupeto de três-fônons identificados pelos estados 3^+ , 2_3^+ e 4_2^+ . Além disso, o 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 [Bygrave *et al*, 1964], bem como medidas com reações nucleares [Mcgowan *et al*, 1962], particularmente o estudo de espalhamento inelástico de dêuterons [Lin, 1965].

Estudos envolvendo reações nucleares e medidas de excitação coulombiana [Barrete *et al*, 1974], realizadas para vários isótopos de Se ($A = 74$ a 82) revelam um

forte caráter coletivo, onde as estimativas de B(E2) para as transições do estado 2_2^+ são consideravelmente menores do que as previsões do modelo vibracional. Outro parâmetro nuclear relevante, dentro deste contexto, diz respeito ao momento de quadrupolo elétrico 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 I referem-se às medidas de momento de quadrupolo

elétrico do estado 2_1^+ para alguns isótopos de Se e sugerem para esses núcleos deformação do tipo oblato. Particularmente, para o estado 3^- , o cálculo de momento de quadrupolo pelo modelo rotacional de assimetria (MRA) [Delaroche *et al*, 1984] fornece: $Q(^{76}\text{Se}) \sim 0,76$ eb, $Q(^{78}\text{Se}) \sim 0,26$ eb, $Q(^{80}\text{Se}) \sim 0,39$ eb, e $Q(^{82}\text{Se}) \sim 0,00$ eb, mostrando que a estimativa da deformação é significativa o que descarta a hipótese de caráter puramente vibracional deste estado (3^-) nesses isótopos.

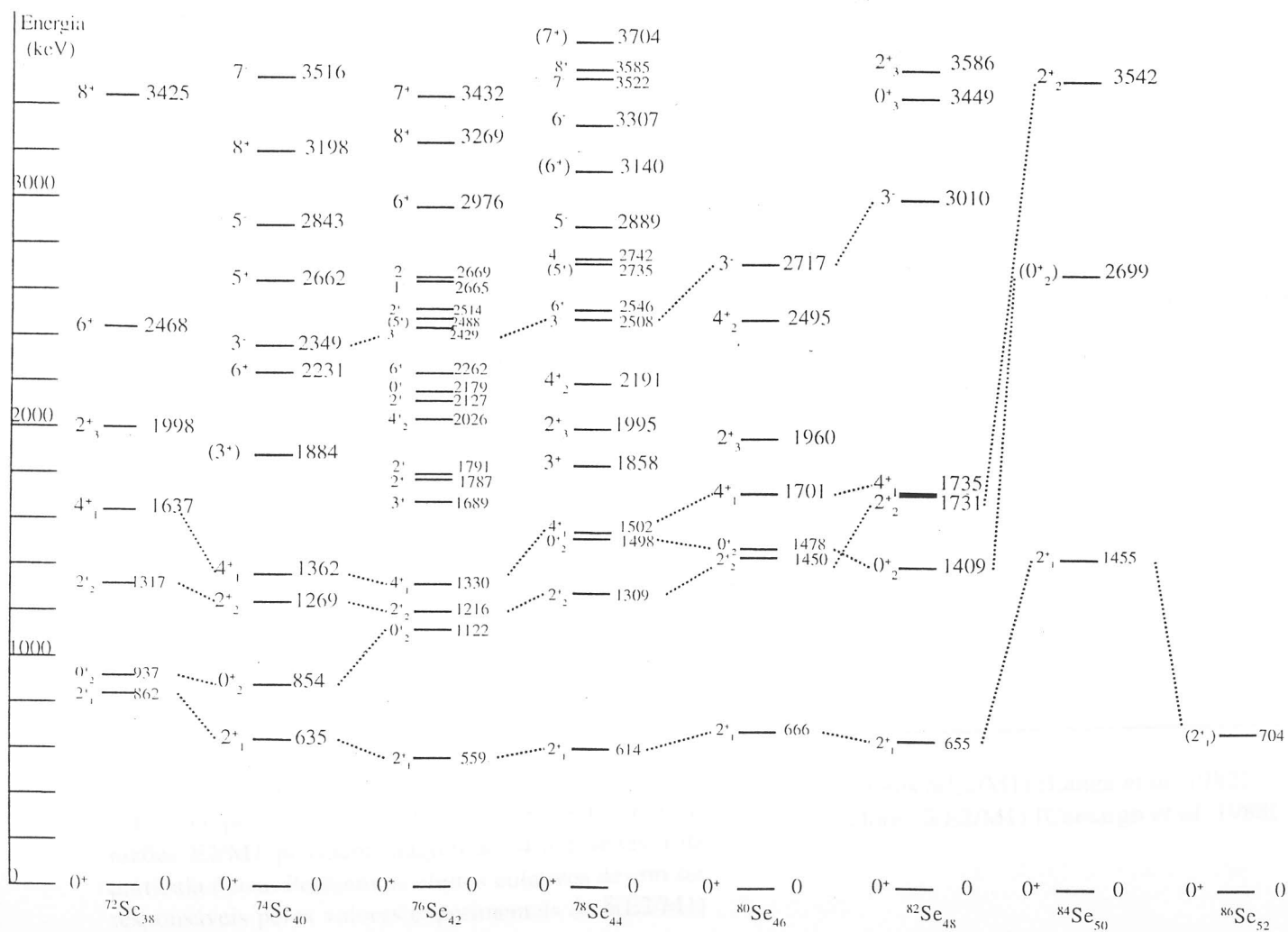


Figura 1: Diagrama parcial dos níveis dos isótopos par-par de Selênio (A = 72 a 86).

Com relação ao dados de razão de mistura multipolar, $\delta(E2/M1)$, para as transições entre os primeiros estados excitados [Firestone *et al*, 1996], apresentados na tabela 1, 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.

Um modo de avaliar a tendência da coletividade dos núcleos par-par nesta região de massa ($A \sim 70$) envolve o estudo sistemático dos valores experimentais de $\delta(E2/M1)$ para as transições em função do número de massa. Na figura 2 é apresentado o gráfico de $\log \{(\delta(E2/M1))^2/E\gamma\}$ versus A , usando as estimativas de partícula única (PU) [Blatt *et al*, 1952] e de DAVYDOV-FILLIPOV (DF) [Davydov *et al*, 1958], calculadas de acordo com as equações [Lange *et al*, 1982]:

$$|\delta_w(E2/M1)| = 1,521 \times 10^{-3} E \gamma (\text{MeV}) A^{2/3} \quad e$$

$$|\delta_w(E2/M1; 2_1 \rightarrow 2_2)| = 3,56 \times 10^{-3} E \gamma (\text{MeV}) A^{5/3}$$

utilizando-se os valores médios de $\delta(E2/M1)$ [Lange *et al*, 1982].

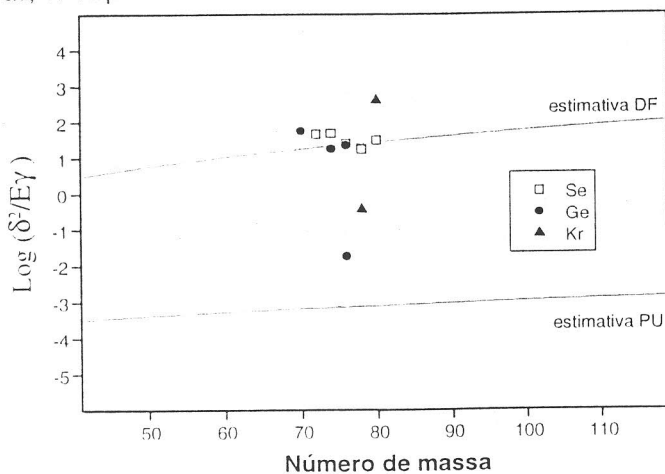


Figura 2 - Gráfico de $\log(\delta^2/E\gamma)$ versus número de massa, para as transições, considerando os isótopos de $^{72,74,76,78,80}\text{Se}$, $^{70,76}\text{Ge}$ e $^{80,82}\text{Kr}$.

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 a 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 recentemente para o núcleo de ^{76}Se [Camargo *et al*, 1998], o que se observa é que grande número de transições γ tem considerável mistura de dipolo magnético, as 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 necessários para uma correta descrição da estrutura destes núcleos.

Tabela.1 - Valores experimentais do momento de quadrupolo elétrico do estado [Lecomte *et al*, 1977], para os isótopos de Se considerados no presente estudo sistemático.

Núcleo	Energia Nível (keV)	Q (2_1^+) exp. - e.b.	Q teórico [Firestone <i>et al</i> , 1996]
Se^{74}	634	-	-0.36
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 2 - Razão de mistura multipolar $\delta(E2/M1)$ [Firestone *et al*, 1996] associada às transições γ dos isótopos de Se que compõem o presente estudo sistemático.

$I_i \rightarrow I_f$	^{72}Se (*)	^{74}Se	^{76}Se (**)	^{78}Se	^{80}Se
$2_2^+ \rightarrow 2_1^+$	4,6	-5.6(16)	4.13(2)	3.5(5)	-5_{-6}^{+2}
$3_1^+ \rightarrow 2_2^+$	$3,4_{-1.5}^{+0.6}$	0.3(1)	0.71(5)	0.42(4)	-
$3_1^+ \rightarrow 2_1^+$	-	-	1.66(2)	-0.41_{-31}^{+13}	0.45(8)
$2_3^+ \rightarrow 2_2^+$	6,7(3)	-	0.86(8)	-0.30(18)	-
$2_3^+ \rightarrow 2_1^+$	$2,2_{-0.2}^{+0.0}$	-	-0.457(7)	0.44(10)	-

(*) valores $\delta(E2/M1)$ [Lange *et al*, 1982]

(**) valores $\delta(E2/M1)$ [Camargo *et al*, 1988]

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

Uma importante indicação da deformação nuclear pode ser obtida da análise da razão E_{4+}/E_{2+} onde utilizando os primeiros níveis 4^+ e 2^+ . Para o caso vibracional tem-se $E_{4+}/E_{2+} = 2,0$ [Preston, 1962, Hornyak, 1975] e para estados rotacionais, onde são considerados graus de liberdade de deformação da superfície nuclear [Mariscotti *et al*, 1969], tem-se $E_{4+}/E_{2+} = 3,33$. Outra estimativa proposta para esta razão é a prevista pelo modelo de rotor assimétrico (triaxial) [Bohr *et al*, 1975], 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 núcleos de selênio. Os dados obtidos são apresentados na figura 3. Para estes isótopos pode-se observar que 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) já, para os demais isótopos esta razão aumenta. 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 aumento da razão, para $A=76$ a 82 , sugere que os nêutrons que faltam para fechar a camada de 50 nucleons ($1g_{9/2}$) e os prótons que sobram fora da camada de 28 nucleons ($1f_{5/2}$) podem induzir oscilações da superfície nuclear e, conseqüentemente, as vibrações coexistem com as rotações.

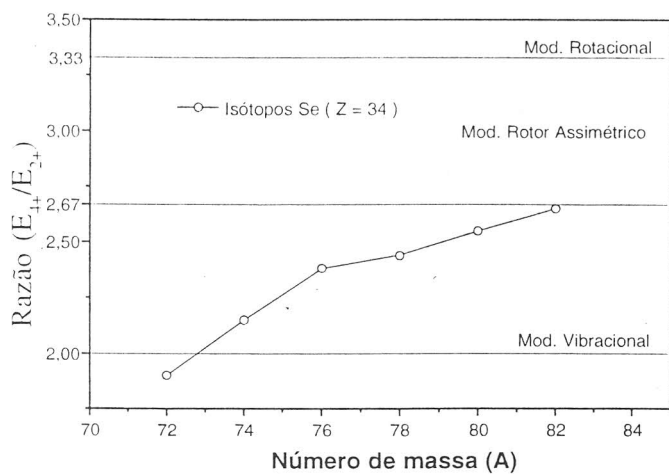


Figura 3 - Análise sistemática da razão E_{4+}/E_{2+} em função do número de massa para isótopos de Se.

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

Considerando a existência de bandas com $\Delta J = 2$ e paridade positiva para os isótopos par-par do Se ($A = 72$ a 78) [Firestone *et al*, 1996] pode-se, através de gráficos

de momento de inércia, $2\zeta/\hbar^2$, versus $(\hbar\omega)^2$, onde z 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 4 é apresentado o gráfico de $2\zeta/\hbar^2$ versus $(\hbar\omega)^2$ para os isótopos de Selênio para $A = 72$ a 78 . As curvas foram obtidas utilizando a metodologia estabelecida por SORENSEN [Sorensen *et al*, 1973]. 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.

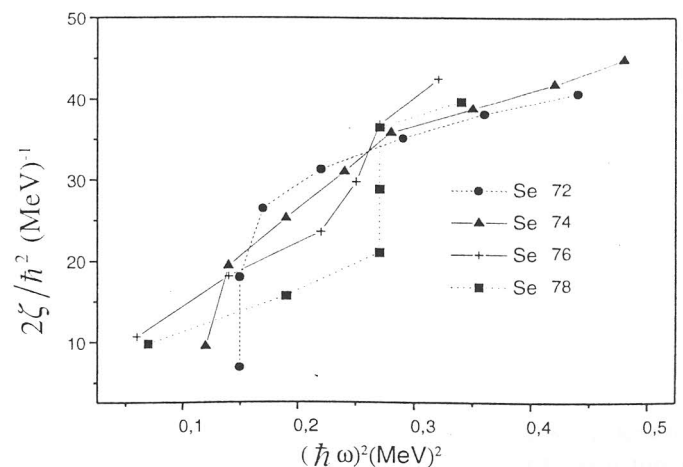


Figura 4- Variação de $2\zeta/\hbar^2$ versus $(\hbar\omega)^2$ para os isótopos de Selênio com $A=72$ a 78 .

De acordo com a expressão para energia do espectro rotacional [Eisemberg *et al*, 1987], dada por:

$$E_{rot} = \frac{\hbar^2}{2\zeta} J(J+1), \text{ é esperado um comportamento}$$

monotônico de $\Delta E_{1,1,2}$ em função de J_{min} , desde que não haja mudanças no comportamento estrutural dessas bandas (cruzamento de bandas). Entretanto, observando-se as curvas geradas, apresentadas na figura 5, é nítida a presença de mudanças abruptas para todos os isótopos, o que sugere o cruzamento de estruturas diferentes. Para o caso do ^{74}Se observa-se dois cruzamentos de diferentes estruturas. Para o ^{76}Se e ^{78}Se esta mudança estrutural ocorre para $J=6$. Novamente a hipótese de coexistência de estados vibracionais com estados rotacionais pode ser considerada. Particularmente, para o núcleo de ^{72}Se pode-se supor que o cruzamento de bandas ocorra para $J=4$, apesar do aparente comportamento monotônico de ΔE em função de J_{min} , característico de núcleos vibracionais.

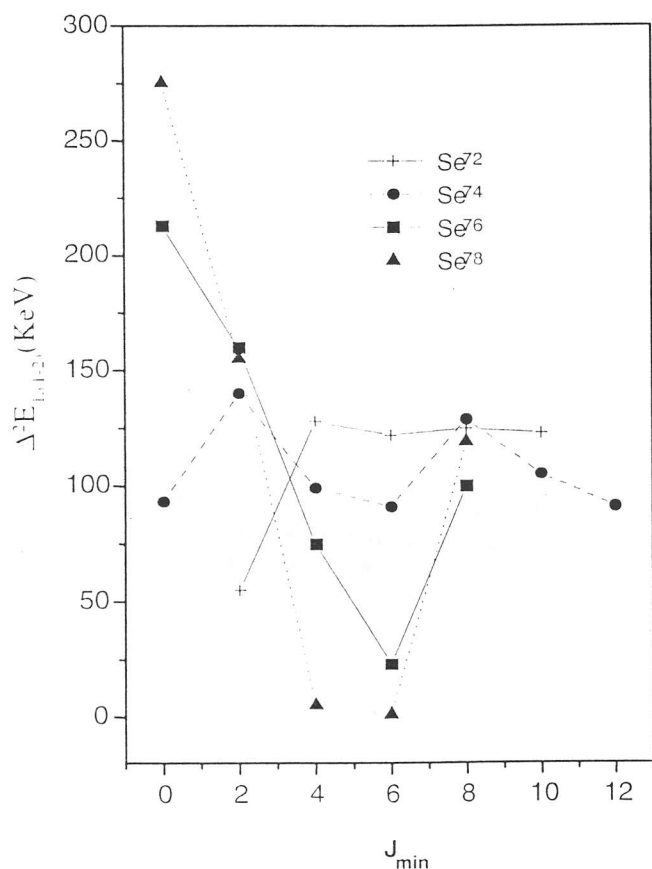


Figura 5- Variação de $\Delta E (E_{1,1,2})$ em função de J_{min} para os isótopos de Selênio com $A=72$ a 78 .

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 obtida a reprodução da estrutura da banda de paridade positiva [Hamilton *et al*, 1974] e dos níveis de mais baixa energia e alguns valores de $B(E2)$ [Ramayya

et al, 1975; Lieb *et al*, 1977]. Este modelo também foi empregado na interpretação da estrutura nuclear do ^{74}Se [Ronningen *et al*, 1976; Piercey *et al*, 1979; Cottle *et al*, 1990]. Foram realizados cálculos dos valores de $B(E2)$ e a comparação com os dados obtidos mostrou-se consistente. Para os demais isótopos, particularmente para os núcleos de ^{76}Se e ^{78}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 formas nos níveis de energia mais baixa.

CONCLUSÃO

A abordagem teórica da estrutura nuclear dos estados excitados de mais baixa energia mostra que não é possível admitir que um único tipo de deformação nuclear seja adequado para descrição simultânea de todas as propriedades já estabelecidas para estes isótopos. O que se conclui é que todos os estudos apontam para a coexistência de forma na estrutura de níveis nesta faixa de energia, embora sejam predominantemente vibracionais.

BIBLIOGRAFIA

- 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.
- Blatt, J. M.; Weisskopf, V.F. *Theoretical Nuclear Physics*. New York, Wiley, 1952.
- Bohr, A.; Mottelson, B.R. *Nuclear structure*, v. 2. W. A. Benjamin, Reading, 1975.
- Bygrave, W.; Eccleshall, D.; Yates, J.L. The coulomb excitation of ^{76}Se and ^{78}Se using oxygen ions. *Nucl. Phys.*, v. 53, p. 385-96, 1964.
- Camargo, S.P. Tese de Doutorado, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, 1998.
- 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.
- Davydov, A.S.; Filippov, G.F. Rotational states in even atomic nuclei. *Nucl. Phys.* v.8, p. 237, 1958.
- 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.

- Eisemberg, J.M.; Greiner, W. *Nuclear theory*, v. 1 Nuclear models, 3. Ed., North-Holland, 1987.
- Firestone, R.B.; Shirley, V.S.(Eds.). *Table of isotopes*. 8 ed. New York, N.Y.: Wiley, 1996.
- Hamilton, J.H.; Ramayya, A.V.; Pinkston, W.T.; Ronningen, R.M.; Garcia-Bermudez, G.; Carter, H.K.; Robison, 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.
- Hornyak, W.F. *Nuclear Structure*. Academic Press, 1975.
- 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.
- Lecomte, R.; Paradis, P.; Barrette, J.; Barrette, M.; Lamoureux, 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.
- Lieb, K.P.; Kolata, J.J. Ground-state band in ^{72}Se . *Phys. Rev. C*, v. 15, p. 939, 1977.
- Lin, E.K. Inelastic scattering of deuterons from Zn and Se isotopes. *Nucl. Phys.*, v. 73, p. 613-24, 1965.
- 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.
- 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.
- Piercey, R.B.; Ramayya, A.V.; Ronnigen, R.M.; Hamilton, J.H.; Maruhn-Rezwani, V.; Robison, 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 $^{65}\text{Cu}(^{11}\text{B},2n)$ actions. *Phys. Rev. C*, v. 19, p. 1344, 1979.
- Preston, M.A. *Physics of the nucleus. reading, mass*. Addison-Wesley, 1962.
- Ramayya, A.V.; Ronningen, R.M.; Hamilton, J.H.; Pinkston, W.T.; Garcia-Bermudez, G.; Robison, 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.
- Ronningen, R.M.; Ramayya, A.V.; Hamilton, J.H.; Lourens, W.; Lange, J.; Arter, 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.
- Sorensen, R.A. Nuclear moment of inertia at high spin. *Rev. Mod. Phys.*, v 45, p. 353, 1973.