

ESTUDO DA ESTRUTURA NUCLEAR DO ^{72}Ge ^{1,2}José Agostinho G. de Medeiros, ¹Frederico Antonio Genezini e ¹Cibele Bugno Zamboni¹Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN-CNEN/SP
Av. Lineu Prestes 2.242
5508-900 Butantã, São Paulo, SP, Brasil²Universidade Santo Amaro, UNISA - SP
Rua Professor Enéas de Siqueira Neto, 340
04829-900 Jardim da Imbuías, São Paulo, SP, Brasil

RESUMO

No presente estudo a estrutura nuclear do ^{72}Ge foi investigada em termos de modelos nucleares. Para isto foi elaborado um estudo sistemático de alguns parâmetros nucleares envolvendo os isótopos par-par de Ge ($A=66-78$) e isótonos $N=40$, com A par que permitiu a elaboração o esquema de níveis excitados do núcleo de ^{72}Ge previsto pelos modelos teóricos: Vibracional Puro, Rotacional Simétrico, Vibracional Anarmônico, bem como o modelo Unificado. A partir desta análise foi possível propor algumas hipóteses teóricas que descrevem com sucesso alguns níveis excitados do ^{72}Ge .

Keywords: Ge, vibrational model, vibrational-rotacional model, vibrational anarmonic model, unified model

I. INTRODUÇÃO

O objetivo deste estudo é interpretar a estrutura nuclear do ^{72}Ge em termos de modelos nucleares apropriados a esta região de massa. Para isto foi elaborado um estudo sistemático de alguns parâmetros nucleares, tais como: energia, spin e paridade de níveis excitados, envolvendo os isótopos par-par de Ge ($A=66-78$) que permitiu a elaboração do esquema de níveis excitados do núcleo de ^{72}Ge previsto pelos modelos teóricos: Vibracional (MV), Rotacional Simétrico (MRS), Vibracional Anarmônico (MVA), bem como o modelo Unificado (UM). Os esquemas de decaimento gerados, em função dos modelos teóricos investigados, foram confrontados com os dados experimentais sugerindo que o núcleo de ^{72}Ge é levemente deformado.

II. MODELOS VIBRACIONAL E ROTACIONAL

Na descrição vibracional os estados excitados são produzidos por oscilações da superfície nuclear em torno da forma de equilíbrio esférica, sendo E_{4+}/E_{2+} dado por 2,0. A medida que mais nucleons são adicionados e encontram-se distantes das camadas fechadas de prótons e nêutrons, o núcleo passa a se deformar adquirindo graus de liberdade

de rotação e a razão E_{4+}/E_{2+} passa a ser dada por 3,3. Já no modelo de rotor assimétrico, que leva em conta em sua formulação uma mistura de “vibração-rotação”, esta razão é dada por $2,67 < E_{4+}/E_{2+} < 3,33$ [1]. Considerando-se estas estimativas foi feita uma análise sistemática da razão E_{4+}/E_{2+} em função do número de massa, para os isótopos de Ge. Para os isótopos de Ge a razão E_{4+}/E_{2+} é da ordem de 2,2 para $A = 66,68$. Para $A = 70,72$ esta razão é da ordem do limite vibracional, subindo rapidamente para 2,5 para $A = 76$ e 78. Particularmente, para o núcleo ^{72}Ge ($E_{4+}/E_{2+} = 2,07$) o comportamento de um vibrador esférico puro é esperado, mas os aspectos coletivos associados a este isótopo, bem como a proposição da banda fundamental em medidas realizadas por meio de reações nucleares $^{70}\text{Zn}(\alpha, 2n\gamma)$ e $^{70}\text{Ge}(\alpha, ^2\text{He})$ [2,3] sugerem a descrição dos níveis em bandas vibracionais e rotacionais no espectro de estados excitados.

Desta forma, o diagrama de níveis do núcleo de ^{72}Ge previsto por MV e MRS foram calculados. Para o cálculo dos níveis de energia, usando o MV, considerou-se os estados 834 keV e 2514 keV como sendo estados de um fônon de quadrupolo e octupolo, respectivamente. Dentro do contexto de MRS o estado 834 keV foi adotado como o primeiro estado da banda $K=0$ ($I=0$). Na Fig. 1 é apresentado o diagrama de níveis experimental obtido no presente estudo e o previsto pelos modelos coletivos.

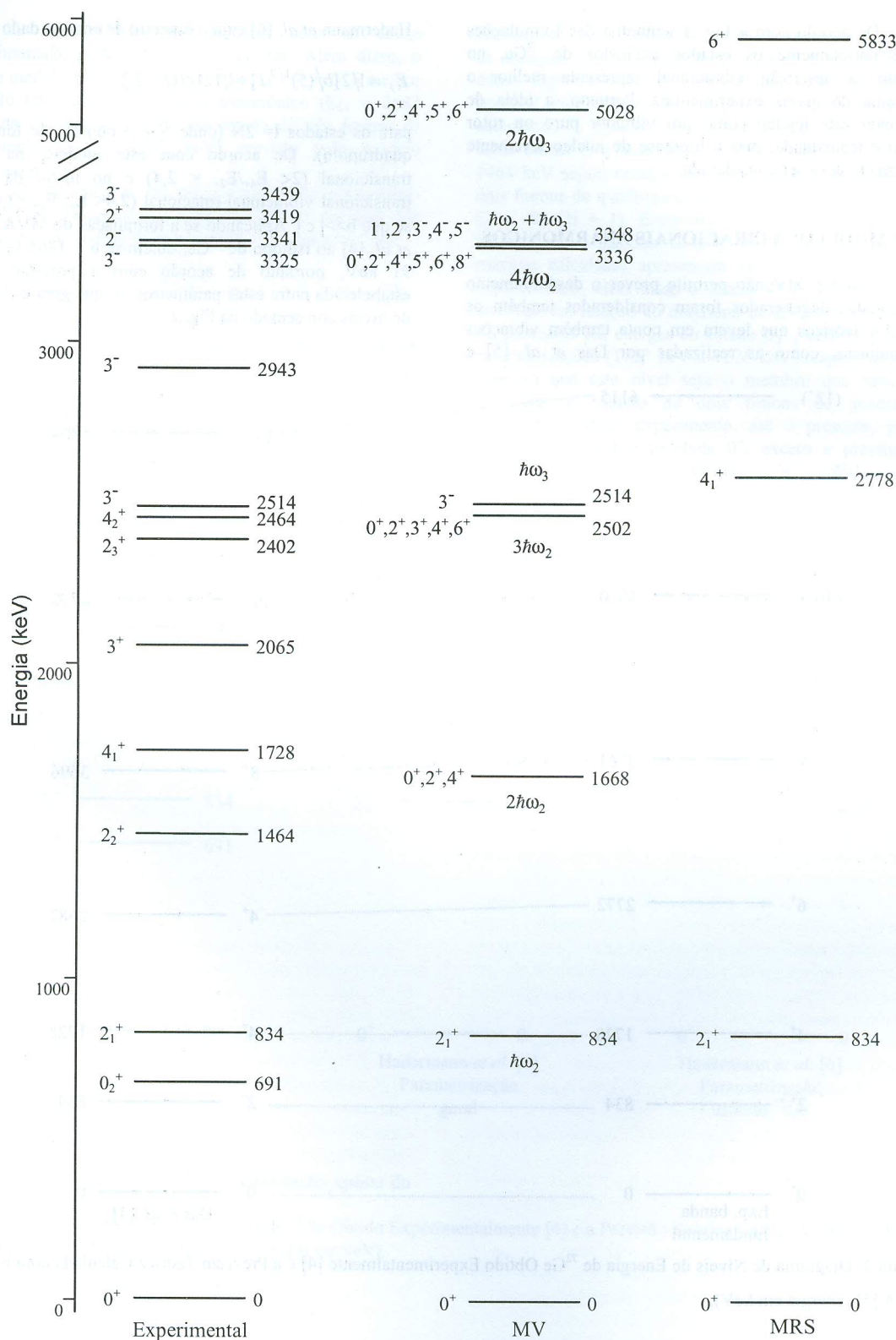


Figura 1. Diagrama Parcial de Níveis Experimentais [4] Previsto pelos Modelos Coletivos.

De acordo com a Fig. 1 nenhuma das formulações prevê corretamente os estados excitados do ⁷²Ge, no entanto, a descrição vibracional representa melhor o diagrama de níveis experimentais. Portanto, a idéia de descrever este núcleo como um vibrador puro ou rotor rígido é inadequada, mas a hipótese de núcleo levemente deformado deve ser considerada.

III. MODELOS VIBRACIONAIS ANARMONICOS

Como o MV não permite prever o desdobramento dos estados degenerados foram considerados também os modelos teóricos que levem em conta também vibrações anarmonicas, como as realizadas por Das *et al.* [5] e

Hadermann *et al.* [6] cuja o espectro de energia dado por:

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

para os estados I= 2N (onde N é o número de fonons de quadrupolo). De acordo com este modelo, na região transicional ($2 < E_{4+}/E_{2+} < 2,4$) e no inicio da região transicional vibracional-rotacional ($2,4 < E_{4+}/E_{2+} < 3,0$) tem-se que $b \gg |c|$. Aplicando-se a formulação do MVA de Das *et al.* [4] ao isótopo de ⁷²Ge, obtêm-se $b = 1865$ keV e $c = 91$ keV, portanto de acordo com a previsão teórica estabelecida entre estes parâmetros, o que gera o diagrama de níveis apresentado na Fig. 2.

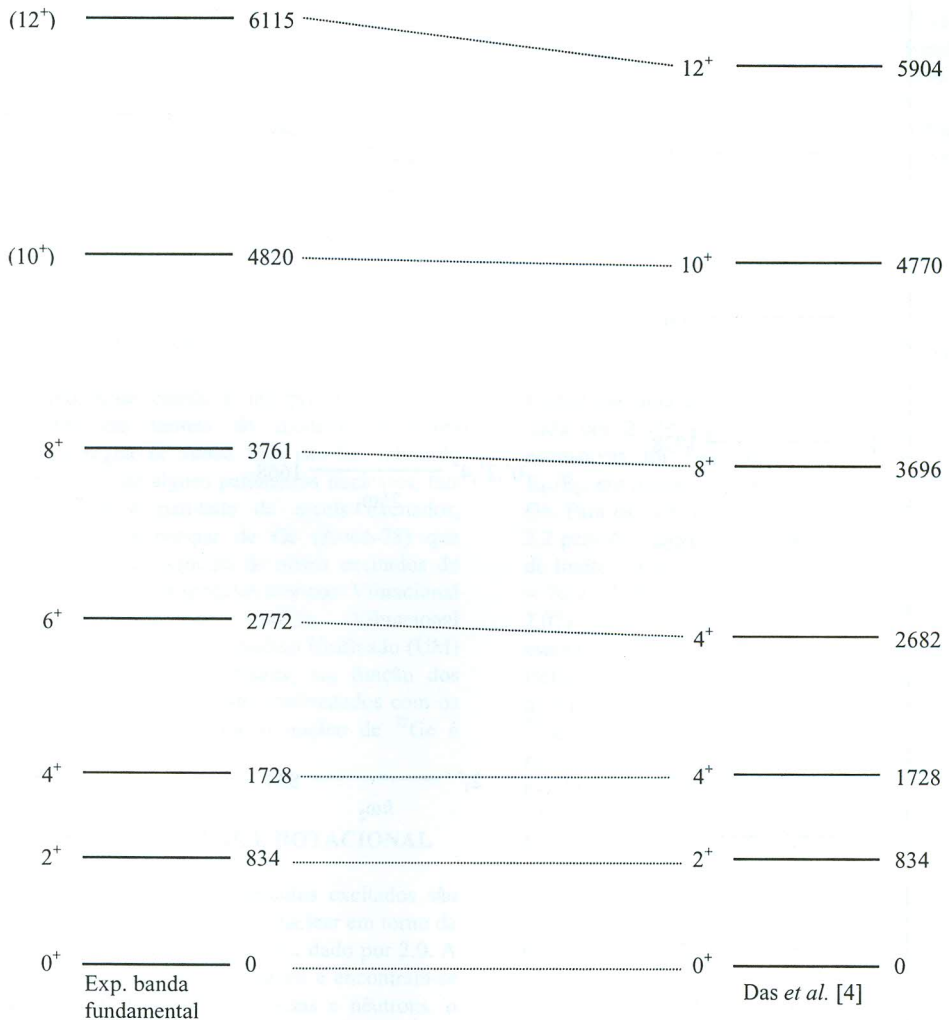


Figura 2: Diagrama de Níveis de Energia de ⁷²Ge Obtido Experimentalmente [4] e a Previsão Teórica Calculada com o Modelo MVA [5] (energia em keV).

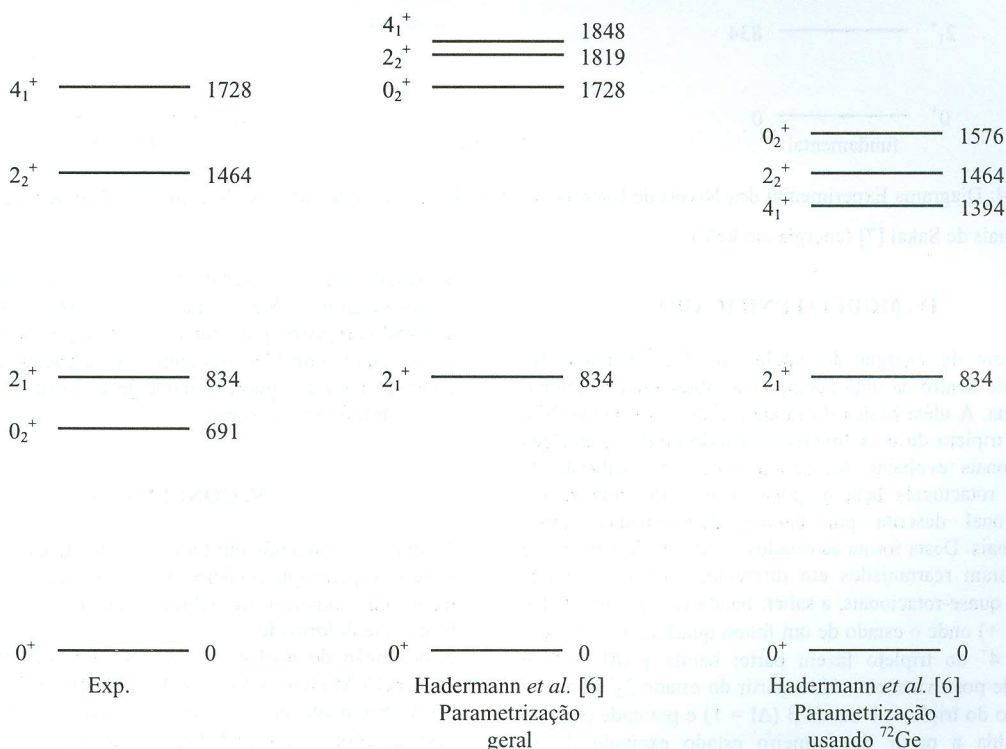
A concordância dos cálculos com os dados experimentais, pode ser considerada boa. Além disso, o estado medido em 2772 keV no ^{72}Ge com $I^\pi = 6^+$ é melhor descrito em termos do modelo anarmônico ($E_{6^+} = 2682$ keV) do que em termos de um estado de três fonons de quadrupolo ($E_{6^+} = 2502$ keV) previsto pelo modelo vibracional (Fig. 1).

Hadermann *et al.* [6] utiliza a mesma descrição semi-empírica de Das *et al.* [5] e propõe que as energias dos estados de dois fonons de quadrupolo sejam descritas por:

$$E_I = 2h\omega + [2/(2I + 1)^{1/2}] * C_1, \text{ para } I = 0, 2, 4 \quad (2)$$

onde $h\omega$ é a energia associada ao estado de um fonon de quadrupolo, sendo $C_1 = 30(2I + 1)$ keV, obtido através da compilação dos dados de energia dos estados de dois fonons de quadrupolo de 106 núcleos par-par na faixa entre: $30 < Z < 52$ e $34 < N < 72$. Utilizando-se esta parametrização foram calculados os níveis de energia do

modelo prever corretamente o posicionamento do tripleto, as energias obtidas apresentam valores muito acima dos dados experimentais. Ainda utilizando esta formulação é possível obter as energias dos níveis associados ao tripleto calculando C_1 especificamente para o núcleo de ^{72}Ge . Para tanto utiliza-se a hipótese de que os níveis a 834 keV e 1464 keV sejam estados excitados, com $I^\pi = 2^+$, de um e dois fonons de quadrupolo, respectivamente, o que fornece $C_1 = -46(2I + 1)$. Entretanto, o resultado deste modelo também não é satisfatório (Fig. 4). Da mesma forma, as energias calculadas apresentam valores acima dos dados experimentais, além disso o estado 4^+ é obtido na ordem invertida em relação ao diagrama de níveis experimentais. As previsões em energia do estado 0_2^+ , obtidas por estas parametrizações (1728 keV e 1576 keV, respectivamente), sugerem que este nível seja o membro que falta para completar o tripleto de dois fonons de quadrupolo, entretanto nenhum experimento, até o presente, propõe estados com spin e paridade 0^+ , exceto a presença do primeiro estado excitado a 691 keV.



^{72}Ge , o qual pode ser visto na Fig. 3. Entretanto, apesar do

Figura 3. Diagrama de Níveis de Energia de ^{72}Ge Obtido Experimentalmente [4] e a Previsão Teórica Calculada com o Modelo de Anarmonico de Haderman *et al.* [6] (energia em keV).

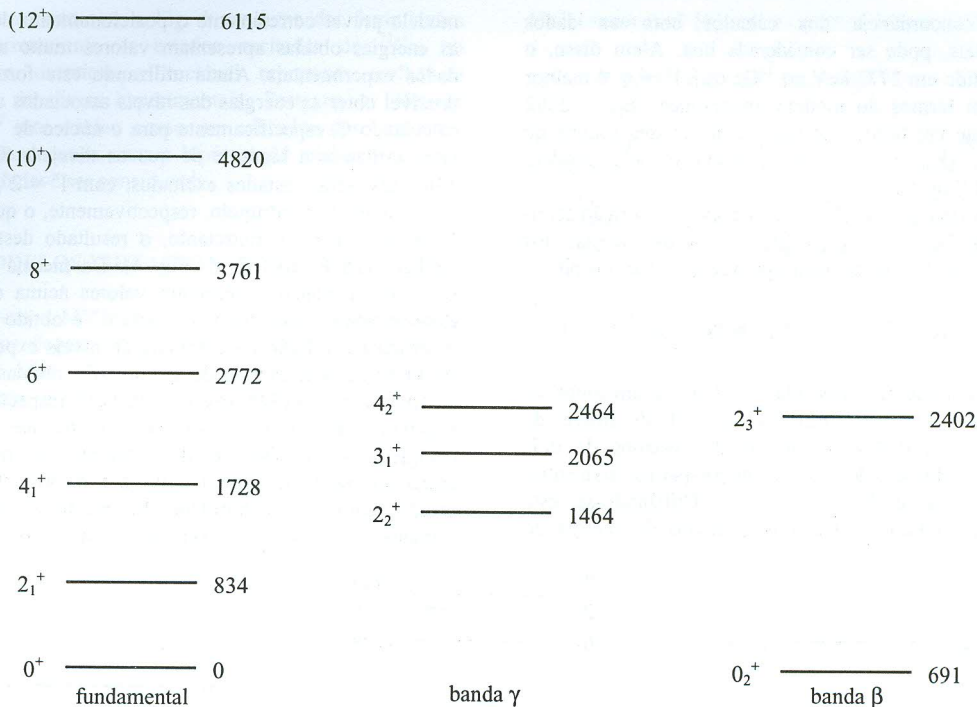


Figura 4: Diagrama Experimental dos Níveis de Energia do ^{72}Ge [4] Classificados de Acordo com o Modelo de Bandas Quase-rotacionais de Sakai [7] (energia em keV).

IV. MODELO UNIFICADO

Os níveis de energia do núcleo de Ge^{72} também foi analisado dentro de uma perspectiva vibracional-rotacional unificada. A idéia básica do modelo é que os estados 0_2^+ e 2_2^+ do tripleto de dois fonons de quadrupolo dos núcleos vibracionais evoluem, respectivamente, para cabeças de bandas rotacionais beta e gama através de uma região transicional descrita por bandas denominadas quase-rotacionais. Desta forma os estados excitados do isótopo de ^{72}Ge foram rearranjados em diferentes membros de três bandas quase-rotacionais, a saber: banda fundamental ($\Delta I = 2$ e $\pi = +$) onde o estado de um fonon quadrupolar (2_1^+) e o estado 4^+ do tripleto fazem parte; banda γ ($\Delta I = 1$) e paridade positiva construída a partir do estado 2_2^+ (também membro do tripleto) e banda β ($\Delta I = 1$) e paridade positiva construída a partir do primeiro estado excitado 0^+ . O diagrama de níveis do ^{72}Ge , descrito segundo o modelo unificado é apresentado na Fig. 4.

De acordo com os dados experimentais a razão $E_{2^+}/E_{0^+} = 3,1$, para a banda β quase-rotacional encontra-se próxima à previsão teórica (3,3), por outro lado a razão $E_{4^+}/E_{2^+} = 1,7$ referente à banda γ quase-rotacional está muito abaixo do valor teórico (2,5). Em decorrência dos fatos apresentados pode-se concluir que o tratamento de dados através do modelo de bandas quase-rotacionais não é o mais adequado, principalmente em função dos estados não classificados e

da discordância na tentativa de proposição da banda γ quase-rotacional. No entanto as previsões do modelo unificado propõem que o núcleo de ^{72}Ge possua bandas que se desviam consideravelmente do espaçamento $I(I+1)$ esperado para um núcleo altamente deformado, indicando "leve" deformação nuclear.

V. CONCLUSÃO

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

A descrição do núcleo em termos da banda fundamental dada pelo Modelo Vibracional Anarmônico de Das *et al.* [5] é sustentada pela descrição do Modelo Unificado no caso da proposição da banda fundamental e da banda β quase-rotacional. Entretanto, muitos níveis não são ainda explicados por estes modelos

REFERÊNCIAS

- [1] Mariscotti, M. A. J.; Scharff-Goldharber, G., and Buck, B., **Phenomenological Analyses of Ground-State Bands in Even-Even Nuclei.**, *Physic Review*, vol. 178, p 1864-1886, 1969.

[2] Morand, C.; Bruandet, J. F.; Chambon, B.; Dauchy, A.; Drain, D.; Giorni, A., and Chan, T. U., **Niveaux de spin élevé du ^{72}Ge atteints par la réaction $^{70}\text{Zn}(\alpha, 2n\gamma)$ à $E\alpha=30$ MeV.**, Nuclear Physics, vol. A313, p 45-76, 1979.

[3] Jahn, R.; Wienands, U.; Wenzel, D., and von Neumann-Cosel, P., **Systematics of nn States With High Spin: A Study of the $(\alpha, ^2\text{He})$ Reaction on fp Shell Nuclei.**, Physics Letter, vol. 150B, p 331-334, 1985.

[4] Medeiros, J. A. G.; Zamboni, C. B.; Lapoli, A. L.; Kenchian, G.; da Cruz, M. T. F., **Decay of ^{72}Ge .**, Applied Radiation and Isotopes., vol. 54, p 245-259, 2001.

[5] Das, T. K.; Dreizler, R. M., **Phenomenological Analysis of Quasiroational spectra and Possible Evidence for Higher-Phonon States.**, Physics Review C, vol 2, p 632-638, 1970.

[6] Hadermann, J., and Rester, A. C., **Two-Phonon States in Doubly Even Nuclei With $30 \leq Z \leq 52$.** Nuclear Physics., vol. A231, p 120-140, 1974.

[7] Sakai, M., **Unified Perspective of Vibrational and Rotational Models of the Nucleus.**, Nuclear Physics., vol A104, p 301-326, 1967.

ABSTRACT

In the present paper the ^{72}Ge has been discussed following the structure of nuclear models. A comparison of some nuclear properties of isotopes and isotones of even mass Ge nuclei (66-78) has been made following the nuclear prevision from collective models. Theoretical predictions from vibrational (VM), vibrational-rotacional (VRM), vibrational anarmonic (VAM) and unified model (UM) have been compared with experimental nuclear properties and the nuclear structure of ^{72}Ge can be explained by vibrational anarmonic model associated with soft deformation.