

ВЕРОЯТНОСТИ $M1$ - ПЕРЕХОДОВ ИЗ ВИБРАЦИОННЫХ СОСТОЯНИЙ В ^{156}Gd .

Усманов Пазлитдин Нуритдинович

Наманганский инженерно-технологический институт, Наманган, ул. Касансай
7, 160115 Узбекистан, д.н.ф.-м., профессор

Юсупов Элмурод Кучкарбоевич

Наманганский инженерно-технологический институт, Наманган, ул. Касансай
7, 160115 Узбекистан, PhD

Тел: 905992299 e-mail: usmanov1956.56@mail.ru

Тел: 935719293 e-mail: yusupov.elmurod@gmail.com

Аннотация. Для ядра ^{156}Gd были проведены теоретические расчеты в рамках феноменологической модели с учетом кориолисова смешивания состояний низколежащих ротационных полос положительной четности. Кориолисово взаимодействие позволяет объяснить наблюдающиеся в свойствах возбужденных состояний эффекты неадиабатичности. Рассчитаны приведенные вероятности $M1$ - переходов $B(M1)$ из вибрационных состояний. Согласие теоретических результатов с экспериментальными данными в целом удовлетворительное.

Ключевые слова: ядро, спин, энергия, полоса, Кориолис, смешивание, вращения, положительная четность, магнит, переходы, вероятность, деформации.

^{156}Gd YADROSI VIBRASION HOLATLARIDAN $M1$ - O'TISH EHTIMOLLIKLARI

Usmanov Pazlitdin Nuritdinovich

Namangan muhandislik-texnologiya instituti, Namangan, Kosonsoy
ko'cha 7, 160115 O'zbekiston, f.-m.f.d., professor

Yusupov Elmurod Kuchkarboyevich

Namangan muhandislik-texnologiya instituti, Namangan, Kosonsoy ko'cha 7,
160115 O'zbekiston, f.-m.f.b., PhD

Tel: 905992299 e-mail: usmanov1956.56@mail.ru

Tel: 935719293 e-mail: yusupov.elmurod@gmail.com

Annotatsiya. ^{156}Gd yadrosi uchun nazariy hisob-kitoblar fenomenologik model doirasida, quyi joylashgan rotatsion band holatlarini Koriolis kuchi ta'sirida aralashishi o'rganildi. Koriolisning o'zaro ta'siri uyg'ongan holatlarning xossalari kuzatilgan noadiabatik effektlarni tushuntirishga imkon beradi. $M1$ - o'tishning vibration holatlardan keltirilgan ehtimolliklari $B(M1)$ hisoblandi. Nazariy va eksperimental natijalar o'rtasidagi moslik qoniqarli.

Kalit so'zlar: yadro, spin, energiya, band, koriolis, aralashuvi, aylanish, musbat juftlik, magnit, o'tishlar, ehtimollik, deformatsiya.

PROBABILITIES $M1$ - TRANSITIONS FROM VIBRATIONAL STATES

IN ^{156}Gd .

Usmanov Pazlitdin Nuritdinovich

Namangan Institute of Engineering and Technology, Namangan, 160115
Uzbekistan, DSc, professor

Yusupov Elmurod Kuchkarboyevich

Namangan Institute of Engineering and Technology, Namangan, 160115
Uzbekistan, PhD

Phone: 905992299 e-mail: usmanov1956.56@mail.ru

Phone: 935719293 e-mail: yusupov.elmurod@gmail.com

Annotation. For the ^{156}Gd nucleus, theoretical calculations were carried out within the framework of the phenomenological model, taking into account the Coriolis mixing of the states of low-lying positive-parity rotational bands. The Coriolis interaction makes it possible to explain the nonadiabaticity effects observed in the properties of excited states. Reduced probabilities $B(M1)$ of $M1$ - transitions from vibrational states are calculated. The agreement between the theoretical results and experimental data is generally satisfactory.

Keywords: nucleus, spin, energy, band, Coriolis, mixing, rotations, positive parity, magnet, transitions, probability, deformation.

ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальные данные о низколежащей части спектра возбуждений ядра ^{156}Gd с энергией $E_x < 2 \text{ МэВ}$, полученные в реакциях $(\alpha, 2n)$, (n, γ) и $(n, n'\gamma)$ на ядре ^{156}Gd достаточно многочисленны [1]. Известны пять вращательных полос, построенных на основаниях с $K^\pi = 0^+$, две полосы с основаниями $K^\pi = 2^+$ и пятнадцать дипольных уровней 1^+ . Определены энергии 1^+ уровней, а для одиннадцати из них – вероятности $B(M1) \uparrow$ возбуждения [2]. Эти данные очень важны для систематики и поиска соответствующих уровней в соседних ядрах.

Экспериментально определены приведенные вероятности $E2$ - и $M1$ - переходов из состояний $K^\pi = 0_2^+$, 0_3^+ и $K^\pi = 2_1^+$ - полос на уровни основной полосы, а также отношения вероятностей $E2$ - переходов и коэффициенты смеси мультиполей $\delta(E2 / M1)$ и магнитные моменты [1-11]. Экспериментально измерены K -запрещенные $M1$ - переходы из вибрационных состояний на уровни

основной полосы, которых невозможно объяснить в адиабатическом приближение.

В работах [13,14] в рамках феноменологической модели [12], учитывающей кориолисово взаимодействие, были исследованы низколежащие состояния ядра ^{156}Gd . Были рассчитаны энергии, волновые функции и электрические характеристики состояний вращательных полос и выявлены причины неадиабатических эффектов.

В данной работе, используя волновые функции полученные в работе [13], вычислены вероятности M1- переходов. Объясняются возможности появления К-запрещенных M1- переходов из β^- и γ^- полос.

ВЕРОЯТНОСТИ M1- ПЕРЕХОДОВ

В рамках модели [12] выражение для приведенной вероятности $B(M1)$ из состояния $I_i K_i$ на уровень $I_f 0_1$ основной полосы имеет следующий вид:

$$B(M1; I_i K_i \rightarrow I_f 0_1) = \frac{1}{2I_i + 1} \left| \langle I_f 0_1 | \hat{m}(M1) | I_i K_i \rangle \right|^2, \quad (1)$$

где $\hat{m}(M1)$ – магнитный дипольный оператор.

Приведем выражение для приведенного матричного элемента M1- перехода из формулы (1):

$$\langle I_f 0_1 | \hat{m}(M1) | I_i K_i \rangle = \sqrt{\frac{3(2I_i + 1)}{4\pi}} \times \left(\sum_{K_1=1}^2 (g_{K_1} - g_R) K_1 \psi_{K_1, K}^I \psi_{K_1, 0_1}^{I'} C_{IK_1; 10}^{IK_1} + \right. \\ \left. \frac{\sqrt{6}}{10} \sum_v m'_{1_v} (\psi_{0_1, 0_1}^{I'} \psi_{1_v, K}^I - \psi_{1_v, 0_1}^I \psi_{0_1, K}^{I'}) C_{I+1; 1-1}^{I0} \right) \quad (2)$$

где $m'_{1_v} = \langle 0_1^+ | \hat{m}(M1) | 1_v^+ \rangle$ – матричные элементы между внутренними волновыми функциями основной и 1_v^+ – полос; $C_{I_f K_f; 1(K_i + K_f)}^{I_f K_f}$ – коэффициенты Клебша–Гордана; $\psi_{K, K'}^I$ – амплитуды смешивания базисных состояний; g_K – внутренний g – фактор полосы с $K \neq 0$, $g_R = Z/A$ – гиромагнитный фактор, связанный с вращением.

В нечетных состояниях полос с $K^\pi \neq 0^+$ компонента волновой функции $\psi_{0_1, K}^I = 0$, так как в основной полосе отсутствуют состояния с нечетными спинами. Поэтому приведенный матричный элемент (2) для переходов из I -нечетных состояний полос с $K^\pi \neq 0^+$ имеет следующий вид:

$$\langle (I \pm 1)0_1 \| \hat{m}(M1) \| IK \rangle = \sqrt{\frac{3(2I+1)}{4\pi}} \times \left(\sum_{K_1=1}^2 (g_{K_1} - g_R) K_1 \psi_{K_1, K}^I \psi_{K_1, 0_1}^{(I \pm 1)} C_{IK_1, 10}^{(I \pm 1)K_1} + \frac{\sqrt{6}}{10} \sum_v m'_{1_v} \psi_{0_1, 0_1}^{(I \pm 1)} \psi_{1_v, K}^I C_{I1; 1-1}^{(I \pm 1)0} \right) \quad (3)$$

В адиабатическом приближении приведенная вероятность M1-перехода из состояний $K^\pi = 1_v^+$ полос на уровни основной полосы имеет следующий вид:

$$B^A(M1; I1_v \rightarrow I'0_1) = \left(\frac{3}{4\pi} \right) \cdot 0.06 \cdot \left(m'_{1_v} C_{I1; 1-1}^{I'0} \right)^2 \quad (4)$$

Адиабатическая формула для M1-переходов внутри полос с $K^\pi \neq 0^+$ имеет следующий вид:

$$B^A(M1; IK \rightarrow (I+1)K) = \left(\frac{3}{4\pi} \right) \left[(g_K - g_R) \cdot K \cdot C_{IK; 10}^{(I+1)K} \right]^2 \quad (5)$$

ЧИСЛЕННЫЕ РАСЧЁТЫ

Параметры g_K и m'_{1_v} необходимые для описания магнитных характеристик состояний определялись следующим образом. Значение параметра g_R определяли по общепринятой формуле $g_R = Z/A$ для деформированных ядер, поскольку для ядра ^{156}Gd отсутствуют экспериментальные данные для M1-переходов внутри $K^\pi = 2_{1,2}^+$ полос. Из систематики гиромангнитных отношений для деформированных ядер редкоземельной и трансурановой областей следует $g_R \approx 0.4 \pm 0.1$.

Для параметра g_K были использованы значения, определенные ранее для ядра ^{158}Gd [15]. Влияние указанных параметров на рассчитанные значения магнитных моментов состояний $K^\pi = 0_2^+$, $K^\pi = 2_1^+$, $K^\pi = 1^+$ полос и вероятности внутриволосных переходов заметно. Однако на вероятности переходов между

состояниями разных ротационных полос они влияют слабо. В межполосных переходах в формуле (2) важную роль играет часть формулы, где присутствуют параметры m'_{1_v} . Их значения определялись по формуле

$$m'_{1_v} = \sqrt{\frac{B(M1; 0gr \rightarrow 11_v^+)}{0.014325}}, \quad (6)$$

где для $B(M1; 0gr \rightarrow 11_v^+)$ использовались экспериментальные данные [1]. Значения m'_{1_v} , определенные по формуле (6) для 1_v^+ уровней с номерами $v=2, 7 \div 15$ и соответствующие экспериментальные значения $B(M1; 0gr \rightarrow 11_v^+)$ приведены в таблице 1.

Таблица 1. Приведенные вероятности $B(M1)$ для M1- переходов из 1_v^+ состояний на состояния 2_1^+ и 0_{gr}^+ основной полосы ядра ^{156}Gd . $E_{1_v^+}$ - энергии 1_v^+ уровней, E_γ - энергии γ - переходов на указанные уровни.

1_v^+	$E_{1_v^+}$ (кэВ)	$E_\gamma(11_v \rightarrow 20_1)$ $E_\gamma(11_v \rightarrow 00_1)$ (кэВ)	$m_{1_v'} (\mu_N)$	$B(M1) (\mu_N^2)$	
				Эксперимент [1,2]	Теория
1_1^+	1965	1877 1965	11.25	–	0.303 0.604
1_2^+	2027	1938 2027	–7.82	0.025^{+6}_{-9} 0.066(20)	0.145 0.292
1_3^+	2187	2098 2187	–3.88	–	0.036 0.072
1_4^+	2270	2181 2270	–7.34	–	0.128 0.257
1_5^+	2301	2212 2301	–	–	–
1_6^+	2361	2272 2361	–	–	–
1_7^+	2402	2314 2403	–4.8	0.064^{+20}_{-25} 0.109^{+22}_{-34}	0.055 0.110
1_8^+	2785	2696 2785	–4.09	0.048^{+14}_{-16} 0.079^{+18}_{-22}	0.040 0.080
1_9^+	2974	2885 2974	–4.87	0.064(11) 0.113(39)	0.056 0.113
1_{10}^+	3010	2921 3010	–0.79	0.018^{+9}_{-11} 0.030(7)	0.0015 0.030
1_{11}^+	3050	2961 3050	–2.77	0.014^{+7}_{-9} 0.036(11)	0.018 0.037
1_{12}^+	3070	2981 3070	–9.23	0.254^{+30}_{-34} 0.406(30)	0.203 0.407
1_{13}^+	3122	3033 3122	–2.64	0.018(2) 0.032(7)	0.021 0.029
1_{14}^+	3158	– 3158	–4.87	– 0.113(16)	0.056 0.113
1_{15}^+	3218	3129 3218	–4.80	0.052^{+14}_{-16} 0.109(13)	0.055 0.110

В таблице 2 мы привели значения $B(M1)_{теор}$ для переходов из состояний полос $K^\pi = 0_3^+$ и $K^\pi = 2_1^+$ на уровни основной полосы. Имеющиеся экспериментальные данные об этих переходах немногочисленны. Для γ^-

полосы теоретические значения получились заметно больше экспериментальных, для единственного известного перехода на 0_3^+ -полосу значение $B(M1)_{теор}$ много меньше экспериментального.

Таблица 2. $B(M1)$ величины для переходов из состояний полос с основаниями $K^\pi = 0_3^+$ и 2_1^+ на основную полосу ядра ^{156}Gd . E_γ - энергии γ -переходов.

IK_i	$I_f K_f$	E_γ	$B(M1)(\mu_N^2)$	
			Эксперимент [1]	Теория
2^+2_1	2^+0_1	1065.2	$1.07 \cdot 10^{-4}(72)$	$1.7 \cdot 10^{-3}$
3^+2_1	4^+0_1	959.8	$1.07 \cdot 10^{-4}(72)$	$6.76 \cdot 10^{-4}$
	2^+0_1	1159	$2.51 \cdot 10^{-4}(54)$	$9.80 \cdot 10^{-4}$
4^+2_1	4^+0_1	1067.2	$2.51 \cdot 10^{-3}(+1.25, - 1.43)$	$4.10 \cdot 10^{-3}$
2^+0_3	2^+0_1	1169.1	$1.40 \cdot 10^{-2}(+16, - 13)$	$2.9 \cdot 10^{-3}$

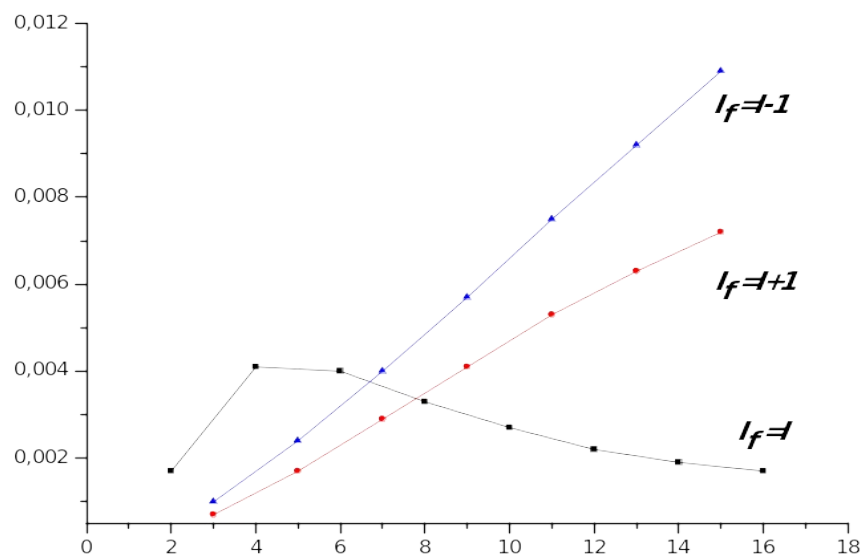
Рассмотрим поведение вероятностей $B(M1; I_i 2_1 \rightarrow I_f 0_1)$ переходов с состояний I_i полосы $K^\pi = 2_1^+$ на уровни I_f основной полосы в зависимости от спина начального состояния. Эта зависимость изображена на рис.1.

Силы Кориолиса смешивают состояния из разных полос имеющие одинаковые спины. В основной полосе все состояния имеют четные спины. Поэтому $M1$ -переходы из полосы $K^\pi = 2_1^+$ с $\Delta I = 0$ идут из состояний с нечетными спинами I_i , а переходы с $\Delta I = 0$ только из состояний с четными I_i . Как видно из рисунка, вероятности переходов с $\Delta I = 1$ монотонно растут с ростом I , в то время как вероятности переходов с $\Delta I = 0$ при небольших спинах ($I \leq 6$) увеличиваются, а при дальнейшем росте I уменьшаются. Приведенные матричные элементы $M1$ -переходов из состояний 2_1^+ полосы с четными спинами I_i вычислены по формуле (2), с нечетными спинами I_i по формуле

(3). В волновых функциях состояний с нечетными спинами полосы $K^\pi = 2_1^+$ отсутствуют компоненты от смешивания с соседними полосами с $K^\pi = 0^+$, которые увеличиваются с ростом спина I_i . Однако эти компоненты имеются в волновых функциях состояний этой полосы с четными спинами. Именно эти примеси объясняют немонотонную зависимость от I_i вероятностей М1-переходов с $\Delta I = 0$ на рис.1.

Рисунок 1. Вероятности М1-переходов из состояний $K^\pi = 2_1^+$ полосы на состояния основной полосы в зависимости от спина I .

$$B(M1; I_i 2_1 \rightarrow I_f 0_1), (\mu_N^2)$$



Заключение

В рамках феноменологической модели выполнены расчеты магнитных характеристик ротационных состояний ядра ^{156}Gd , учитывающие кориолисово смешивание низколежащих ротационных полос положительной четности.

Эффекты неадиабатичности, наблюдающиеся в магнитных характеристиках возбужденных состояний, объясняются кориолисовым

смешиванием состояний вращательных полос. В адиабатическом приближении $M1$ - переходы из состояний полос с $K^\pi = 0^+, 2^+$ запрещены по K . Они возникают в данной модели как следствие кориолисова смешивания, благодаря появлению компонентов 1_v^+ - полос в волновых функциях γ и β - полос. Эти K - запрещенные переходы и описывает наша модель.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Reich C. W. // Nucl. Data Sheets. 2005. V. 105. P. 557–575.
<https://doi.org/10.1016/j.nds.2005.08.001>
2. Pitz H. H., Berg U. E. P., Heil R. D., Knaissl U. and Stock R, Wesselborg C., Brentano V. P. Systematic study of low-lying dipole excitations in $^{156,158,160}\text{Gd}$ by photon scattering // Nuclear Physics 1989. V. A 492. P. 411–425.
[https://doi.org/10.1016/0375-9474\(89\)90405-3](https://doi.org/10.1016/0375-9474(89)90405-3)
3. McGowan F. K., Milner W.T. Reduced $M1$, $E1$, $E2$ and $E3$ transition probabilities for transitions in $^{156-160}\text{Gd}$ and $^{160-164}\text{Dy}$ // Phys. Rev. 1981 V. C 23. P. 1926–1937.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevC.23.1926>
4. Backlin A., Hedin G., Folgelberg B., Saraceno M., Greenwood R. C., Reich C. W., Koch., H. R., Baader H. A., Breitig H. D., Schult O. W. B., Schreckenbach K., Von Egidy T., Mampe W. Levels in ^{156}Gd studied in the (n,γ) reaction // Nuclear Physics 1982. V. A 380. pp. 189–260. [https://doi.org/10.1016/0375-9474\(82\)90104-X](https://doi.org/10.1016/0375-9474(82)90104-X)
5. Aprahamian A., de Haan R. C., Lesher S. R., Casarella C., Stratman A., Borner H. G., Lehmann H., Jentschel M., Bruce A. M. Lifetime measurements in ^{156}Gd // Physical Review C. 2018. V. 98. 034303.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevC.98.034303>
6. Бегжанов Р. Б., Белецкий В. М., Залюбовский И. И., Кузниченко А. В., Справочник по ядерной физике. Ташкент: ФАН, 1989.-Т.1.-с.738, Т.2. -с.828.
7. Rud N., Ewan G.T., Christy A., Ward D., Graham R. L., Geiger J.S. Measurement of lifetimes in ^{152}Sm , ^{154}Gd and ^{156}Gd by Doppler-shift recoil-distance techniques //

- Nucl. Phys. 1972. V. A191. P. 545–560. [https://doi.org/10.1016/0375-9474\(72\)90631-8](https://doi.org/10.1016/0375-9474(72)90631-8)
8. Sie S.H., Ward D., Geiger J.S., Graham R. L., Andrews H. R. Measurement of lifetimes for high spin states in ^{152}Sm , ^{154}Gd and ^{156}Gd by the Doppler broadened line shape method // Nucl. Phys. 1977. V. A291. P. 443–458. [https://doi.org/10.1016/0375-9474\(77\)90331-1](https://doi.org/10.1016/0375-9474(77)90331-1)
9. Kearns F., Varley G., Dracoulis G.D., Inamura T., Lisle J. C., Willmott J. C. Lifetimes of high spin rotational states // Nucl. Phys. 1977. V. A278. P. 109–123. [https://doi.org/10.1016/0375-9474\(77\)90188-9](https://doi.org/10.1016/0375-9474(77)90188-9)
10. Konijn J., Be Boer F. W. N., Van Poelgeest A., Hesselink W. H. Voigt D. M. J. A. The level structure of ^{156}Gd studied by means of the $(\alpha, 2n\gamma)$ reaction // Nucl. Phys. 1981. V. A352. P. 191–220. [https://doi.org/10.1016/0375-9474\(81\)90376-6](https://doi.org/10.1016/0375-9474(81)90376-6)
11. Iwata Y. Gamma-Ray Spectroscopy of ^{156}Gd following the Decay of ^{156}Eu and ^{156}Tb . // J. Phy. Soc. Jap. 1980. V. 49. P. 2114–2121. <https://doi.org/10.1143/JPSJ.49.2114>
12. Усманов П. Н., Михайлов И. Н. Эффекты неадиабатичности коллективного движения в четно-четных деформированных ядрах // ЭЧАЯ. 1997. Т. 28. вып. 4. С. 887–950; Usmanov P. N., Mikhailov I. N. Effect of nonadiabaticity of collective motion in even – even deformed nuclei // Phys. Part. Nucl. 1997. V. 28. № 4. P. 348–373.
13. Usmanov P. N., Yusupov E. K. Energy and structure states of low-lying bands in ^{156}Gd // IIUM Engineering Journal, Malaysia, 2021. Vol. 22 No. 1. pp. 167–174. <https://doi.org/10.31436/iiumej.v22i1.1497>
14. Usmanov P. N., Vdovin A. I., Yusupov E. K. Electric properties of rotation states in ^{156}Gd // Bulletin of the Russian Academy Sciences: Physics, 2021, Vol. 85, No 10, pp. 1102–1107. <https://doi.org/10.3103/S1062873821100269>
15. Usmanov P. N., Vdovin A. I., Yusupov E. K., Salikhbaev U. S. Phenomenological analysis of characteristics of rotational bands in $^{158,160}\text{Gd}$ isotopes. // Physics of Particles and Nuclei Letters. – Moscow (Russia), 2019. Vol. 16, No 6, - pp. 706–712. <https://doi.org/10.1134/S1547477119060530>