Uzbek Journal of Physics

Vol.20(№6) 2018 PP.339-344

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОЛЛЕКТИВНЫХ 0^+ И 2^+ СОСТОЯНИЙ В ИЗОТОПАХ ^{158,160}Gd

П.Н. Усманов[1], А.А. Охунов[2], Абу Х. Кассим[3], Э. Юсупов[1], У.С. Салихбаев[4]

[1]Наманганский инженерно-технологический институт, Наманган, Узбекистан
usmanov1956.56@mail.ru
[2]Международный Университет Ислам Малая, Куала-Лумпур, Малайзия
[3]Университет Малая, Куала-Лумпур, Малайзия
[4)]МАГАТЭ, Вена, Австрия
(Получена 28.06.2018)

Қуйи энергияли ротацион бандлар ҳолатларининг кориолис аралашувини ҳисобга олувчи феноменологик модель ёрдамида ^{158,160}Gd изотопларининг мусбат жуфтликли бандларининг ҳолатларини электр характеристикаларини назарий таҳлил қилинган. Мусбат жуфтликли ҳолатларнинг энергия спектрлари, тўлқин функциялари ва $E2$-ўтишларнинг келтирилган эҳтимолликлари ҳисобланган. $\beta_1(0_2^+)$, $\beta_2(0_3^+)$, $\gamma(2^+)$ ва $K^\pi = 1_\nu^+$ бандлар ҳолатларидан $E2$ ўтиш эҳтимолликлари нисбатларининг ҳисобланган назарий қийматлари мавжуд экспериментал қийматлари билан таққосланган ва улар бир-бирига мос келиши кўрсатилган. Қуйи жойлашган бандларда аралашув эффекти муҳим роль ўйнашлиги ва айниқса электр ўтишлар эҳтимолликларининг, ҳатто паст спинли ҳолатларида ҳам яққол намоён бўлиши кўрсатилган.

Проведен теоретический анализ электрических характеристик состояний полос положительной четности ^{158,160}Gd в рамках феноменологической модели, учитывающей кориолисово смешивание состояний низколежащих ротационных полос. Вычислены спектр энергии уровней положительной четности, волновые функции состояний и приведенные вероятности $E2$-переходов. Вычисленные значения отношений вероятностей $E2$-переходов из $\beta_1(0_2^+)$, $\beta_2(0_3^+)$, $\gamma(2^+)$ и $K^\pi = 1_\nu^+$ полос сравниваются с имеющимися экспериментальными данными, которые дают удовлетворительное согласие. Показано, что эффект смешивания низколежащих полос играет важную роль и значимо проявляется в вероятностях электрических переходов даже при низких спинах.

The theoretical analysis of electric characteristics of the positive parity states in isotopes ^{158,160}Gd has been carried out in the phenomenological model taking into account the Coriolis mixing of low-lying states in rotational bands. The energy spectrum of the levels of positive parity, the wave functions of states, and the reduced probabilities of $E2$ transitions have been calculated. The calculated values of ratios of $E2$-transition probabilities from the $\beta_1(0_2^+)$, $\beta_2(0_3^+)$, $\gamma(2^+)$ and $K^\pi = 1_\nu^+$ bands are compared with the available experimental data which are in best agreement. It is shown that the effect of mixing of the low-lying bands plays an important role and it is significantly shown in probabilities of electric transitions even at low spins.

I. ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальные данные о возбужденных состояниях ^{158,160}Gd проанализированы и представлены в [1, 2]. В экспериментах [3-6] на пучке быстрых нейтронов были измерены спектры и угловые распределения γ-лучей в реакции ^{158,160}Gd (n,n′γ). Авторами [3-6] предложена модифицированная схема возбужденных состояний ^{158,160}Gd и для большинства γ-переходов установлены параметры смешивания мультиполей δ. В работах [7-9] исследованы состояния

$I = 1$ вплоть до энергий возбуждения 3.5 МэВ и определены значения вероятностей $B(M1)$ и $B(E1)$ переходов на $I^\pi = 0^+$ и 2^+ состояния основной ротационной полосы.

В ротационной полосе основного состояния с $K^\pi = 0_1^+$ ядра ^{158}Gd известны уровни до состояний со спином $I^\pi = 12^+$, однако в полосе с $K^\pi = 0_2^+$ из эксперимента известны лишь четыре уровня с $I^\pi = 0^+$–6^+. В третьей полосе с $K^\pi = 0_3^+$ известны три состояния $I^\pi = 0^+$, 2^+ и 4^+. В γ-вибрационной полосе $K^\pi = 2^+$ установлено пять уровней до $I^\pi = 6^+$. Известны низколежащие три полосы с $K^\pi = 1^+$, в каждой из которых лишь по три состояния $I^\pi = 1^+, 2^+$ и 3^+.

В ядре ^{160}Gd, отличающемся от ^{158}Gd на два нейтрона, известна полоса основного состояния до $I^\pi = 16^+$, а полоса γ-вибрационного состояния до $I^\pi = 12^+$. Вторая и третья полосы с $K^\pi = 0_2^+$ и 0_3^+ содержат по три состояния с $I^\pi = 0^+$, 2^+ и 4^+. В полосе в низколежащем состоянии $K^\pi = 1_1^+$ с энергией возбуждения 1568.7 кэВ известны три уровня до $I^\pi = 3^+$ [4]. Известны еще десять уровней с $I^\pi = 1^+$, которые не связаны с какими-либо ротационными состояниями [7].

В работе [10] нами изучены энергии и структуры волновых функций ротационных уровней основных и вибрационных полос изотопов ^{158,160}Gd в рамках феноменологической модели [11], учитывая кориолисово смешивание изучаемых уровней.

В данной работе, используя значения волновых функций состояний, полученных при вычислении энергии [10], изучены электрические характеристики возбужденных уровней в изотопах ^{158,160}Gd. Рассчитаны вероятности $E2$-переходов между ротационными уровнями.

Вычисленные значения $B(E2)$ и отношений приведенных вероятностей $E2$-переходов сравниваются с экспериментом, получено удовлетворительное согласие с экспериментальными данными. Показано, что в ротационных состояниях 0_2^+, 0_3^+ и γ-полос эффект смешивания играет заметную роль и значимо проявляется в вероятностях электрических переходов даже при низких спинах.

II. КВАДРУПОЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПЕРЕХОДЫ

В рамках рассмотренной модели выражение для приведенной вероятности $E2$-переходов из состояний I_iK_i на уровни $I_f\,gr$ основной полосы имеет следующий вид [11]:

$$B(E2I_iK_i \to I_f gr) = \left\{ \sqrt{\frac{5}{16\pi}} eQ_0 \left[\psi^{I_f}_{gr,gr} \psi^{I_i}_{gr,K_i} C^{I_f 0}_{I_i 0;20} + \right.\right.$$

$$\left. + \sum_n \psi^{I_f}_{K_n,gr} \psi^{I_i}_{K_n,K_i} C^{I_f K_n}_{I_i K_n;20} \right] + \sqrt{2} \left[\psi^{I_f}_{gr,gr} \sum_n \frac{(-1)^{K_n} m_{K_n} \psi^{I_i}_{K_n,K_i}}{\sqrt{1+\delta_{K_n,0}}} \times \right. \tag{1}$$

$$\left.\left. \times C^{I_f 0}_{I_i K_n;2-K_n} + \psi^{I_i}_{gr,K_i} \sum_n \frac{m_{K_n} \psi^{I_f}_{K_n,gr}}{\sqrt{1+\delta_{K_n,0}}} C^{I_f K_n}_{I_i 0;2K_n} \right] \right\}^2 .$$

Здесь $m_K=\left\langle gr\left|\hat{m}(E2)\right|K^\pi\right\rangle$ – матричные элементы между внутренними волновыми функциями основной (gr) и $K^\pi=0^+(\beta)$-, $2^+(\gamma)$-, 1^+-полос, значения которых определяются из экспериментальных данных; Q_0 – внутренний квадрупольный момент ядра; $C^{I_f K_f}_{I_i K_i;2(K_i+K_f)}$ – коэффициенты Клебша-Гордана; $\psi^I_{K,K'}$ – амплитуды смешивания базисных состояний.

В табл. 1 представлены вычисленные и экспериментальные [2, 5, 6, 12, 13] значения приведенных вероятностей $E2$-переходов из состояний β_1-, β_2- и γ-вибрационных полос.

Таблица 1. Вероятности $E2$-переходов $B(E2;IK\rightarrow I_1gr)$ из состояний 0_2-, 0_3- и γ-полос для ^{158,160}Gd (в единицах e^2fm^4).

A	$IK_i\rightarrow IK_f$	$B(E2)_{\text{эксп}}$	$B(E2)_{\text{теор}}$
158	$2^+0_2\rightarrow0^+0_1$	16(1) [12, 13]	20
	$2^+0_3\rightarrow0^+0_1$	19(2) [12, 13]	22
	$2^+2_1\rightarrow0^+0_1$	170(10) [12, 13]	164
160	$2^+0_1\rightarrow0^+0_1$	10371(82) [2, 12]	10381
	$2^+2_1\rightarrow4^+0_1$	37.2(51) [2, 12] 50.(4) [6]	26
	$2^+2_1\rightarrow2^+0_1$	371.5(52) [2, 12] 62^{+12}_{-9} [6]	332
	$2^+2_1\rightarrow0^+0_1$	198(20) [2, 12] 212(10) [6]	199
	$3^+2_1\rightarrow4^+0_1$	<2.1 [6]	207
	$3^+2_1\rightarrow2^+0_1$	<335.4 [6]	350
	$4^+2_1\rightarrow4^+0_1$	826^{+258}_{-516} [6]	388
	$4^+2_1\rightarrow2^+0_1$	196^{+134}_{-57} [6]	95
	$5^+2_1\rightarrow6^+0_1$	1600^{+361}_{-568} [6]	285
	$5^+2_1\rightarrow4^+0_1$	1806^{+413}_{-619} [6]	274
	$0^+0_2\rightarrow2^+0_1$	<160 [5, 6]	144
	$2^+0_2\rightarrow4^+0_1$	<676 [5, 6]	136
	$2^+0_2\rightarrow2^+0_1$	<125 [5, 6]	33
	$2^+0_2\rightarrow0^+0_1$	<35 [5, 6]	7.5
	$4^+0_2\rightarrow6^+0_1$	<1135 [5, 6]	166
	$4^+0_2\rightarrow4^+0_1$	<279 [5, 6]	53
	$0^+0_3\rightarrow2^+0_1$	<193 [5, 6]	94
	$2^+0_3\rightarrow2^+0_1$	<138 [5, 6]	39
	$2^+0_3\rightarrow0^+0_1$	<86 [5, 6]	7

В табл. 2 и 3 для изотопов ^{158,160}Gd представлены вычисленные и экспериментальные [3-5, 7-9] значения отношений $R_{IK'}=B(E2;IK\rightarrow I_1gr)/B(E2;IK\rightarrow I_2gr)$ для $E2$-переходов из состояний β_1-, β_2- и γ- вибрационных полос. Здесь же даны значения отношений, вычисленные по правилу Алаги.

Таблица 2. Отношения приведенных вероятностей $E2$-переходов $R_{IK}=B(E2;IK\rightarrow I_1gr)/B(E2;IK\rightarrow I_2gr)$ для ^{158}Gd.

IK	I_1gr	I_2gr	Эксперимент	Теория	Алага
2^+0_2	2^+gr	0^+gr	0.737(37) [9] 0.769(94) [7] 0.77(8) [3]	0.53	1.43
2^+0_2	4^+gr	2^+gr	6.4(6) [8] 5.78(56) [9] 5.77(70) [7]	4.54	1.8
4^+0_2	4^+gr	2^+gr	0.47(7) [8] 0.55(7) [9] 0.63(7) [3]	0.52	0.91
4^+0_2	6^+gr	4^+gr	3.8(5) [8] 4.2(6) [9] <7.15 [3]	1.7	1.75
6^+0_2	6^+gr	4^+gr	1.88(18) [3]	2.07	0.81
2^+2_1	2^+gr	0^+gr	1.01(9) [8] 1.72(24) [9] 1.86(11) [7] 2.59(27) [3]	1.67	1.43
2^+2_1	4^+gr	2^+gr	0.036(10) [8] 0.045(7) [9] 0.035(6) [7] 0.041(6) [3]	0.11	0.05
3^+2_1	4^+gr	2^+gr	0.37(4) [8] 0.60(6) [9] 0.50(5) [3]	0.61	0.40
4^+2_1	4^+gr	2^+gr	6.35(65) [8] 6.7(9) [9] 6.82(70) [3]	5.3	2.94
4^+2_1	6^+gr	4^+gr	0.90(11) [8] 0.25(4) [9] 0.51(6) [3]	0.93	0.25
5^+2_1	6^+gr	4^+gr	0.83(15) [9]	1.08	0.57
2^+0_3	2^+gr	0^+gr	1.85(13) [8] 1.5(1) [9] 1.05(21) [7] 1.84(21) [3]	1.58	1.43
2^+0_3	4^+gr	2^+gr	0.63(8) [8] 0.68(7) [9] 0.95(19) [7] 0.67(8) [3]	1.36	1.8
4^+0_3	4^+gr	2^+gr	1.27(16) [8] 1.65(18) [3]	1.22	0.91
4^+0_3	6^+gr	4^+gr	2.09(34) [8]	1.1	1.75

Таблица 3. Отношения приведенных вероятностей $E2$-переходов $R_{IK'}=B(E2;IK\to I_1gr)/B(E2;IK\to I_2gr)$ для ^{160}Gd.

IK	I_1gr	I_2gr	Эксперимент	Теория	Алага
2^+2_1	2^+gr	0^+gr	1.67(6) [4]	1.67	1.43
2^+2_1	4^+gr	0^+gr	0.225(19) [4]	0.13	0.072
2^+2_1	4^+gr	2^+gr	0.135(12) [4]	0.08	0.05
3^+2_1	4^+gr	2^+gr	0.64(3) [4]	0.59	0.40
4^+2_1	4^+gr	2^+gr	4.15(18) [4]	4.19	2.94
5^+2_1	6^+gr	4^+gr	0.97(8) [4]	1.04	0.57
6^+2_1	6^+gr	4^+gr	6.49(60) [4]	6.41	3.7
2^+0_2	4^+gr	2^+gr	5.43(8) [5]	4.19	1.8
2^+0_2	0^+gr	2^+gr	0.283(5) [5]	0.23	0.70
4^+0_2	6^+gr	4^+gr	4.154(5) [5]	3.11	1.75
2^+0_3	0^+gr	4^+gr	0.618(6) [5]	0.128	1.26

В вычислениях вероятностей переходов параметры выбирали следующим образом. В адиабатическом приближении для приведенной вероятности $E2$-переходов из β- и γ-вибрационных полос имеем

$$B^{rot}(E2;I_iK_i\to I_fgr)=(2-\delta_{K,0})\left|m_K C^{I_f0}_{I_iK;2-K}\right|^2. \qquad (2)$$

При спине $I = 2$ кориолисово взаимодействие является несущественным. Поэтому значения параметров $m_{\beta1}$, $m_{\beta2}$ и m_γ определяли по адиабатической формуле (2), используя экспериментальные данные для переходов из 2^+ состояний 0^+_2, 0^+_3 и γ-полос [11-12]. Однако по формуле (2) невозможно однозначно определить знаки эмпирических значений определенных выше параметров. Отсутствуют экспериментальные данные для $E2$-переходов из состояний полос с $K^\pi=1^+_\nu$. Поэтому знаки параметров $m_{\beta1}$, $m_{\beta2}$, m_γ и численные значения $m_{1\upsilon} = m_1$ определяли из условия наилучшего согласия вычисленных значений отношений $R_{IK'}=B(E2;IK\to I_1gr)/B(E2;IK\to I_2gr)$ $E2$-переходов из состояний $K^\pi=0^+_2$, 0^+_3 и γ-вибрационных полос с экспериментом. Использованные значения параметров m_K в вычислениях вероятностей $E2$-переходов приведены в табл. 4. Отметим, что значения внутреннего квадрупольного момента Q_0 взяты из эксперимента [12, 14].

Таблица 4. Значения параметров m_K и внутреннего квадрупольного момента Q_0, использованные в расчетах для изотопов ^{158,160}Gd (в единицах efm^2).

A	m_{0_1}	m_{0_2}	$m_{1\nu}$	m_γ	Q_0 [12,14]
158	9	9.7	–20	21.5	703(4)
160	12	9.7	–7.5	23.5	722(29)

В недавних работах [5, 6] экспериментально были определены верхние границы вероятностей $E2$-переходов из 2^+ состояний 0^+_2 и 0^+_3 полос для ^{160}Gd (см. табл. 1), поэтому значения параметров $m_{\beta1}$, $m_{\beta2}$ для данного ядра определяли из наилучшего согласия теоретических значений отношений $B(E2)$ из этих полос с экспериментальными значениями (см. табл. 3). Как видно из табл. 4, для ^{158}Gd

значения параметра m_1 намного больше, чем для ^{160}Gd. Это связано с тем, что в базисные состояния гамильтониана модели для ^{158}Gd включены три полосы с $K^{\pi} = 1^{+}$, для ^{160}Gd – одиннадцать [10].

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе проведен теоретический анализ спектроскопических характеристик состояний полос положительной четности ^{158,160}Gd в рамках феноменологической модели, учитывающей кориолисово смешивание состояний низколежащих ротационных полос. Продемонстрирована возможность исследования эффектов смешивания адиабатических полос.

Вычислены приведенные вероятности $E2$-переходов. Вычисленные значения вероятностей и отношений вероятностей $E2$-переходов из $\beta_1(0_2^+)$, $\beta_2(0_3^+)$, $\gamma(2^+)$ полос сравниваются с имеющимися экспериментальными данными, которые дают удовлетворительное согласие.

Показано, что эффект смешивания низколежащих полос играет важную роль и значимо проявляется в вероятностях электромагнитных переходов даже при низких спинах.

Работа выполнена при поддержке гранта ОТ-Ф2-75 Государственной научно-технической программы фундаментальных исследований (2017-2020 гг.).

ЛИТЕРАТУРА

1. R.G. Helmer, Nucl. Data Sheets **77,** 481 (1996).
2. C.W. Reich, Nucl. Data Sheets **105,** 555 (2005).
3. Л.И. Говор, А.М. Демидов, И.В. Михайлов, ЯФ **64**, 1329 (2001).
4. Л.И. Говор, А.М. Демидов, В.А. Куркин, И.В. Михайлов, ЯФ **72**, 1859 (2009).
5. S.R. Lesher, C. Casarella, A. Aprahamian, B.P. Crider, R. Ikeyama, I.R. Marsh, and M.T.Mc Ellistrem, Phys. Rev. C **91**, 054317 (2015).
6. S.R. Lesher, C. Casarella, A. Aprahamian, L.M. Robledo, B.P. Crider, R. Ikeyama, and I.R. Marsh, Phys. Rev. C **95**, 064309 (2017).
7. H.H. Pits et al., Nucl. Phys. A **492**, 411 (1989).
8. U. Hartmann, D. Bohle, F. Humbert, and A. Richter, Nucl. Phys. A **499**, 93 (1989).
9. H. Friedrichs, D. Hager, P. Von Brentano et al., Nucl. Phys. A **567**, 266 (1994).
10. П.Н. Усманов, С.С. Сабиров, Х. Бозоров, Э. Юсупов, Научно-технический журнал ФерПИ **22**, №1, 9 (2018).
11. П.Н. Усманов, И.Н. Михайлов, ЭЧАЯ **28** (4), 887 (1997).
12. Р.Б. Бегжанов и др. Справочник по ядерной физике (Фан, Ташкент, 1989).
13. F.K.Mc Gowan, W.T. Milner, Phys. Rev. C **23**, 1926 (1981).
14. Дж.Г. Гамильтон, Изв. АН СССР, сер. физ. **40**, 18 (1976).