

4126
F-56
ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P-2086



В. Гнатович, К. Громов

"КОЛЛЕКТИВНЫЕ" УРОВНИ
В ДЕФОРМИРОВАННЫХ ЯДРАХ С НЕЧЕТНЫМ А
В ОБЛАСТИ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
ДФ, 1966, т 3, в 1, с 8-12.

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

1965

P-2088

3241/3 нр.

В.Гнатович, К.Громов

"КОЛЛЕКТИВНЫЕ" УРОВНИ
В ДЕФОРМИРОВАННЫХ ЯДРАХ С НЕЧЕТНЫМ А
В ОБЛАСТИ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

ВНИИ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ
ИМЕНИ И.В. КУРИШВИЛИ
МОСКВА

За последние годы получено очень много экспериментальных данных об уровнях деформированных ядер с нечетным A в области редкоземельных элементов. Рассмотрение всей совокупности этих данных позволяет сделать заключение, что свойства уровней с энергией меньше ~ 500 кэв могут быть объяснены на основе представлений об одночастичных уровнях Нильссона и связанных с ними ротационных уровнях. Нет экспериментальных данных об уровнях с энергией меньше ~ 500 кэв, которые требовали бы введения в рассмотрение других представлений.

Иная картина наблюдается при энергиях, больших ~ 500 кэв. Количество возбужденных уровней в этой области заметно больше (больше их "плотность") и объяснить их, используя только одночастичные уровни Нильссона, становится невозможным. Для этого оказывается необходимым опустить уровни Нильссона из более высоких оболочек, что иногда и делали некоторые авторы, и что, очевидно, в большинстве случаев не обосновано.

Ясно, что для объяснения всех уровней нечетных ядер в области выше ~ 500 кэв требуются дополнительно иные, новые представления.

В последние несколько лет в теоретических и экспериментальных исследованиях появились указания на то, что в нечетных ядрах существуют уровни трехквaziчастичной природы и так называемые γ -"вибрационные" уровни.

Трехквaziчастичные уровни образуются в результате разрыва протонной или нейтронной пары и их свойства определяются тремя частицами, участвующими в образовании этого состояния. Энергия таких уровней обычно ~ 1 Мэв и выше, так как такая энергия требуется на разрыв пары.

Проблема трехквaziчастичных состояний в нечетных ядрах была проанализирована В.Г.Соловьевым с точки зрения сверхтекучей модели ядра в 1962 г.^{/1/}. Был указан ряд случаев, когда уровни такой природы экспериментально могут быть обнаружены. Экспериментальных данных о трехквaziчастичных уровнях пока немного. О.Б.Нильсен и др.^{/2/} наблюдали такие состояния в Yb^{177} и Lu^{177} . В работах, выполненных в Дубне, подтверждается вывод Соловьева о существовании трехквaziчастичных уровней в Er^{165} /3/ и No^{161} /4/.

Несколько больше экспериментальных данных о " γ -вибрационных" уровнях в ядрах с нечетным A . Первые экспериментальные указания на существование уровней "колебательной" природы в ядрах с нечетным A были получены Натаном и Поповым /5/ при изучении кулоновского возбуждения уровней в нечетных ядрах редкоземельных элементов. В работах Даймонда и др. /6/ и Шеллайна и др. /7/ и в ряде других работ получены более точные данные об уровнях такой природы. Представляет интерес рассмотреть все имеющиеся сведения о " γ -вибрационных" уровнях в нечетных ядрах. Это было сделано Пекером /8/ и Шеллайном и др. /7/. В настоящее время имеется значительно больше экспериментальных данных о " γ -вибрационных" уровнях в нечетных ядрах. Эти данные собраны в настоящей работе.

" γ -вибрационные" уровни в нечетных ядрах аналогичны по своим свойствам " γ -вибрационным", согласно обобщенной модели Бора-Моттельсона, уровням в четно-четных ядрах или аномальным вращательным уровням согласно модели Давыдова. Ожидаемые свойства этих уровней, полученные в значительной степени на основе аналогии со свойствами уровней в четно-четных ядрах, были сформулированы в ряде работ, например, /6,7,8/. Они заключаются в основном в следующем:

1) Так как в нечетных ядрах проекция момента количества движения на ось деформации $K_0 = \Omega$ не равна нулю, как в четно-четных ядрах, то должно быть два γ -вибрационных уровня типа $K_1 = \Omega - 2$ и $K_2 = \Omega + 2$ (K_1 и K_2 - проекции спинов γ -вибрационных состояний).

2) Вероятность кулоновского возбуждения $B(E2)$ γ -вибрационных уровней в соседних четно-четных ядрах обычно равна приблизительно пяти одностичным единицам. Так как в нечетных ядрах должно быть два γ -вибрационных уровня, можно ожидать, что вероятность кулоновского возбуждения каждого из них равна приблизительно половине $B(E2)$ для четных ядер, т.е. около двух одностичных единиц.

3) Как и в соседних четно-четных ядрах моменты инерции " γ -вибрационных" состояний в нечетных ядрах должны мало отличаться от момента инерции основного состояния. В случае, если $K_1 = \Omega - 2 = \frac{1}{2}$, параметр развязки a в формуле для энергии ротационных уровней $E_1 = E_0 + \frac{\hbar^2}{2J} [I(I+1) + a(-)^{I+\frac{1}{2}} (I + \frac{1}{2})]$ должен быть равен нулю. Этот факт является весьма характерным признаком " γ -вибрационных" состояний с $K_1 = \frac{1}{2}$, так как для всех одностичных состояний с $\Omega = 1/2$ в этой области параметр a заметно отличается от нуля. Отношения интенсивностей γ -лучей с " γ -вибрационных уровней" на уровни ротационной полосы основного состояния могут быть сопоставлены с теоретическими, полученными с использованием коэффициентов векторного сложения. Однако экспериментальных данных для таких сравнений пока мало.

В таблице № 1 представлены все имеющиеся в настоящее время экспериментальные данные о "у-вибрационных" уровнях в ядрах с нечетным А в области редкоземельных элементов. В первой колонке таблицы указано ядро, в котором наблюдалось "у-вибрационное" состояние. Во второй колонке - спин и четность этого состояния. Если из экспериментальных данных спин и четность установлены не однозначно, вероятные их значения заключены в скобки. В третьей колонке указан тип "у-вибрационного" уровня: $K_1 = \Omega - 2$ или $K_2 = \Omega + 2$. В четвертой колонке приведены квантовые характеристики - $K\pi[N_{\lambda}, A]$ одночастичного состояния, с которым связано рассматриваемое "у-вибрационное" состояние. В пятой строке - энергия "у-вибрационного" возбуждения: разность энергий "у-вибрационного" уровня и одночастичного состояния, с которым связан этот уровень. В тех случаях, когда "у-вибрационные" уровни относятся к возбужденным одночастичным уровням, в скобках указано значение энергии уровня по отношению к основному состоянию рассматриваемого ядра. В шестой колонке приведены для сравнения значения энергии 2^+ "у-вибрационного" состояния в соседнем (А-1) четно-четном ядре. В седьмой и восьмой колонках приведены экспериментальные значения параметров А и а в формулах энергии вращательных состояний:

$$E_1 = E_0 + A I(I+1) + B I^2(I+1)^2 \quad K = \frac{1}{2},$$

$$E_1 = E_0 + A [I(I+1) + a(-)^{I+\frac{1}{2}} (I+\frac{1}{2})] \quad K = \frac{1}{2}.$$

В девятом столбце для сравнения указаны значения параметра А для вращательной полосы основного состояния.

В последнем столбце приведены экспериментально измеренные величины вероятности кулоновского возбуждения $B(E2)$ соответствующих уровней. Значения $B(E2)$ даны в одночастичных единицах $B(E2) = 3 \cdot 10^{-5} \times A^{4/8} \times e^2 \times 10^{-48}$.

Работы, в которых получены экспериментальные данные, использованные в таблице, приведены в списке, следующем за таблицей.

Как видно из таблицы, больше всего имеется экспериментальных данных о "у-вибрационных" уровнях типа $K_1 = \Omega - 2$. Спины и четности этих уровней в большинстве случаев определены однозначно (в 12 из 17 случаев). Интерпретировать уровни с такими спинами и четностями, как одночастичные, трудно, так как в схемах Нильссона нет подходящих одночастичных состояний при этих энергиях возбуждения. Все приведенные в таблице "у-вибрационные" типа $(\Omega - 2)$ уровни в стабильных ядрах возбуждались кулоновски. Значения $B(E2)$, как и ожидается для "у-вибрационных" состояний, близки по величине к двум одночастичным единицам. Такие значения $B(E2)$ трудно понять, если интерпретировать обсуждаемые уровни как одночастичные. В тех случаях, когда наблюдались вращательные полосы для "у-вибрационных" типа $\Omega - 2$ состояний, зна-

Таблица № 1

	К π γ-вибр. сост.	ТИП γ-вибр.	Кπ(N _{н.Λ}) осн. сост.	E /кэв/(1) γ-вибр. сост.	четн. E _{γ(Λ-1)} (2) (кэв)	Λ /кэв/(3) γ-вибр.пол.	α /кэв/(3) γ-вибр. пол.	Λ /кэв/ основн. (3) пол.	В(Е2) (4)
I	2	3	4	5	6	7	8	9	10
E _a ¹⁵³	(1/2+)	α-2	5/2+ [4I3]	634,6	8II			II,78	
T _b ¹⁵⁵	(1/2+)	α-2	3/2+ [4II]	761 ± 2	997,3	15,1 ± 1,2	+(0,10 ± 0,08)	13,25±0,03	
	(7/2+)	α+2	3/2+ [4II]	$\frac{616}{776} \pm \frac{2}{2}$	997,3			13,25±0,03	
T _b ¹⁵⁷	1/2+	α-2	3/2+ [4II]	597 ± 1	II55	12,9 ± 0,6	+(0,03 ± 0,05)	12,42±0,03	
T _b ¹⁵⁹	1/2+	α-2	3/2+ [4II]	580±1	II85	11,8 ± 0,9	+(0,017±0,076)	11,74±0,01	1,5
	7/2	α+2	3/2+ [4II]	1270	II85			11,74±0,01	2,0
D _y ¹⁶¹	1/2+	α-2	5/2+ [642]	545	966,0			5,8	$\frac{1,2}{0,4}$
H ₀ ¹⁶¹	3/2-	α-2	7/2- [523]	593	966,0				
H ₀ ¹⁶⁵	3/2-	α-2	7/2- [523]	514,2 ± 1,7	761,8	10,3 ± 2,7		10,65±0,08	1,9
	11/2-	α+2	7/2- [523]	687	761,8	10,2±1,0		10,65±0,08	1,7
D _y ¹⁶³	3/2+	α-2	7/2+ [633]	538,02	761,8	8,854±0,009		9,1262+ +0,0014	
	3/2-	α-2	1/2- [521]	465,40 (573,56)	761,8	11,05		10,671+ +0,002	
	1/2-	α-2	5/2- [512]	386,00 (570,25)	761,8			11,2136+ ± 0,0011	

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
E _r ¹⁶⁵	1/2+	α-2	5/2+ [642]	460,5 (507,6)	861				
E _r ¹⁶⁷	3/2+	α-2	7/2+ [633]	531,8	787			8,21±0,19	1,5
T _a ¹⁶⁹	5/2+	α-2	1/2+ [4II]	520	822,4	13,1 ± 4,3		12,467±0,007	1,0
	5/2+	α+2	1/2+ [4II]	1170	822,4			12,467±0,007	1,5
T _a ¹⁷¹	3/2+	α-2	1/2+ [411]	675	930	12,4		12,127±0,003	
	5/2+	α+2	1/2+ [411]	912	930	12,1		12,127±0,003	
L _a ¹⁷³	3/2-	α-2	1/2- [541]	≥759,5 (>887,7)	1467			8,52±0,05	
R _e ¹⁸⁵	1/2+	α-2	5/2+ [402]	645,8	904	24		18,25±0,25	1,0
	9/2+	α+2	5/2+ [402]	750±25	904			18,25±0,25	1,0
R _e ¹⁸⁷	1/2+	α-2	5/2+ [402]	511,6	730			20,35±0,26	1,3
	9/2	α+2	5/2+ [402]	880±20	730			20,35±0,26	1,7

Объяснения к таблице 1

- Энергия γ-вибрационных состояний в ядрах с нечетным A. Вычтены энергии возбуждения одночастичного состояния, на котором основано данное γ-вибрационное состояние. Значения полных энергий приведены в скобках.
- Энергия 2+ γ-колебательного состояния в соседнем четно-четном ядре с массовым числом (A-1).
- Экспериментальные значения констант из формул $E_1 = E_0 + A1(1+1) + B(1+1)^2$ $K \neq \frac{1}{2}$
 $E_1 = E_0 + A[1(1+1) + a(-)]$ $(1+\frac{1}{2})$ $K = \frac{1}{2}$
- Величина в одночастичных единицах В одноч. = $3 \times 10^{-5} A^{4/3} e^2 10^{-48} / \text{см}^2 /$.

Литература к таблице I

- Eu 153 (1) T.Suter, P.Reyes-Suter, S.Gustafsson, I.Marklund. Nucl. Phys., 29, 33 (1962).
- Tb 155 (1) L.Person, H.Ryde, Ark. f. Fys. B25, No, 29, 397 (1964).
- Tb 157 (1) L.Person, H.Ryde, K.Oelsner-Ryde. Ark. f. Fys., B24, No. 34, 451 (1962).
- Tb 159 (1) L.Person. Ark. f. Fys. B25, 307 (1963);
(2) R.M.Diamond, B.Elbeq, F.S.Stephens. Nucl. Phys., 43, 560 (1963).
- Dy 161 (1) L.Funke, H.Graber, K.H.Kaup, H.Sodan, L.Werner. Nucl. Phys., 55, 41 (1964).
(2) К.И. Ерохина, И.Х. Лемберг, В.А.Набичвришвили. Программа и тезисы докладов XV ежегодного совещания по ядерной спектроскопии. Минск, 1985. Изд. Наука, М.Л. 1985.
- Ho 165 (1) L.Person, P.Hardell, S.Nilsson. Ark. f. Fys., 23, 1 (1963);
(2) R.M.Diamond, B.Elbeq, F.S.Stephens. Nucl. Phys., 43, 560 (1963).
- Dy 165 (1) R.K.Sheline, W.N.Shelton, H.T.Moks, R.E.Carter. Phys. Rev., 136, B351 (1964).
(2) O.W.B.Schalt, В.Р. Маиер, Ц.Губер. Zeit. f. Phys., 182, 171 (1964).
(3) В.А. Бондаренко, П.Т. Прокофьев, Л.И. Симонова. Программа и тезисы докладов XV ежегодного совещания по ядерной спектроскопии. Минск, 1985. Изд. Наука, М.Л., 1985.
- Er 165 (1) В.Звольска. Диссертация ОИЯИ 1984 г.
- Er 167 (1) В.Звольска. Диссертация ОИЯИ 1984 г.
(2) К.Я. Громов, Б.С. Дзепов, В.Звольска, И.Звольский, Н.А. Лебедев, Я.Урбанец. Изв. АН СССР с.ф. 28, 1023 (1982).
(3) Ю. Гангрский, И. Лемберг. Изв. АН СССР с.ф. 28, 1027 (1982).
- Tm 169 (1) R.M.Diamond, B.Elbeq, F.S.Stephens. Nucl. Phys., 43, 560 (1963).
- Tm 171 (1) A.Artna, M.W.Johns. Can. J. Phys., 39, 1817 (1961).
(2) Л.К. Пекер. Изв. АН СССР, с.ф. 28, 289 (1984).
- Lu 173 (1) J.Valentin, D.J.Horen, J.M.Hollander. Nucl. Phys., 31, 351 (1962).
- Re 185 (1) M.W.Johns, S.V.Nabbo, W.J.King. Can. J. Phys., 35, 1159 (1957).
(2) O.Nathan, V.L.Popov. Nucl. Phys., 21, 631 (1960).
- Re 187 (1) C.J.Gallagher, W.F.Edwards, G.Manning. Nucl. Phys., 19, 18 (1960).
(2) O.Nathan, V.P.Popov. Nucl. Phys., 21, 631 (1960).

Т а б л и ц а II

Основное сост. ⁽¹⁾ К π [N a _n L]	Ядро	E ^(y) (A-1)ЧЕТН	- E ^(y) ⁽²⁾ A
p 3/2+ [4I1]	155		
	Tb		236
	157		560
	Tb ¹⁵⁹		605
n 5/2+ [642]	Dy ¹⁶¹		421
	Er ¹⁶⁵		400
p 7/2- [523]	161		373
	Ho ¹⁶⁵		248
n 7/2+ [633]	Dy ¹⁶⁵		223
	Er ¹⁶⁷		255
p 5/2+ [402]	185		258
	Re ¹⁸⁷		218

- (1) квантовые характеристики одночастичного состояния, на котором основан рассматриваемый коллективный уровень.
- (2) разность энергий 2+ γ -колебательного состояния в четно-четном ядре с массой (A-1) и (A-2)- γ -колебательного состояния в нечетном ядре с массой A.

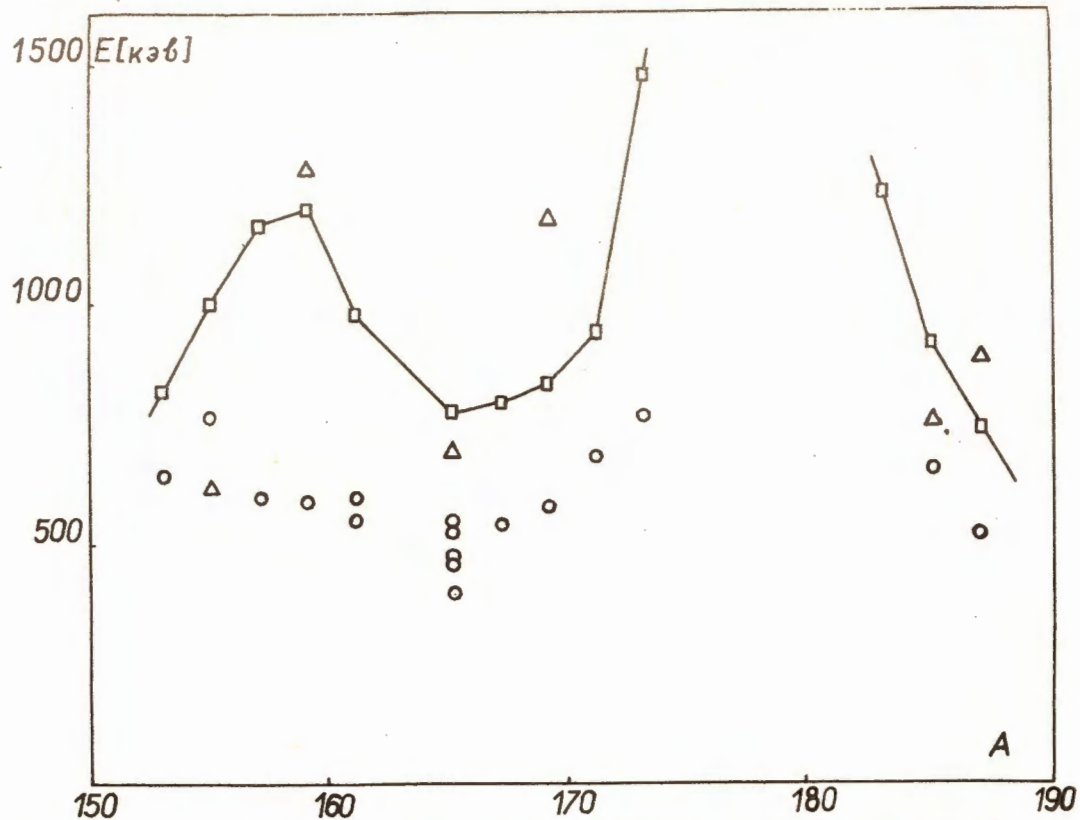


Рис. 1. Зависимость от A энергии $(\Omega-2)$ и $(\Omega+2)$ γ -вибрационных уровней для ядер с нечетным A .
 ○ - уровни типа $K_1 = \Omega - 2$, △ - уровни типа $K_2 = \Omega + 2$, □ - 2^+ γ -вибрационные уровни в четно-четных ядрах с массовым числом $(A-1)$.