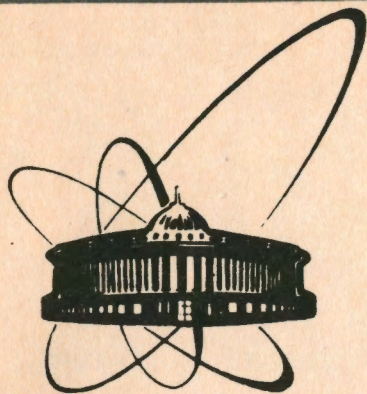


92-97



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

P6-92-97

К.Я.Громов, П.Н.Усманов¹, А.Х.Холматов²,
Т.А.Исламов², Ю.С.Бутабаев², Р.А.Ниязов²

ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ
ОКТУПОЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ В ^{164}Er

Направлено в журнал "Известия АН СССР, серия физическая"

¹Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова

²Ташкентский государственный университет

1992

Исследования свойств октупольных состояний в ^{164}Er

Продолжен анализ экспериментальных результатов исследований возбужденных уровней ^{164}Er . В рамках феноменологической модели, учитывающей кориолисово смешивание вращательных уровней, приведен расчет полос отрицательной четности ^{164}Er . Найдена новая октупольно-вибрационная полоса с $K^\pi = 1^-$.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1992

Перевод авторов

Gromov K.Ya. et al.

P6-92-97

Investigation of Properties of the Octupole States in ^{164}Er

The further analysis of the experimental results of ^{164}Er excited levels is performed. The calculation of the negative parity bands in the ^{164}Er in the framework of the phenomenological model taking into account Coriolis mixing of rotational levels has been done. A new octupole vibrational band with $K^\pi = 1^-$ is found.

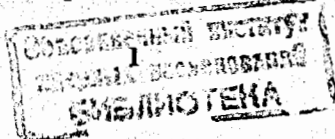
The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

В работах /1-3/ нами проведены прецизионные исследования спектров электронов внутренней конверсии (ЭК), γ -лучей и γ - γ -совпадений при распаде ^{164}Tm ($T_{1/2}=2.04$ мин). На основе полученных экспериментальных данных была пересмотрена схема уровней, возбуждающихся в этом распаде: не подтверждены шесть уровней введенных в /4/; вводится новый уровень 1568.7 кэВ; установлены квантовые характеристики ряда уровней ^{164}Er , в том числе показано, что шесть уровней имеют $I^\pi=0^+$. В работе /5/ нами исследовались свойства ротационных полос состояний положительной четности (основной, β - и γ -вибрационных полос) ядра ^{164}Er , была изучена неадиабатичность в электромагнитных E2- и M1- переходах с уровнями γ -полосы.

В настоящей работе анализ экспериментальных данных /3/ продолжен для исследования свойств коллективных состояний отрицательной четности.

В распаде $^{164}\text{Tm} \rightarrow ^{164}\text{Er}$ заселяются (см. табл.3 в /3/) два $I^\pi=1^-$ уровня с энергиями 1386.7 и 1577.5 кэВ и два $I^\pi=3^-$ уровня - с энергиями 1434.1 и 1568.7 кэВ, которые разряжаются на $I^\pi=0^+, 2^+, 4^+$ вращательные уровни основной полосы. На рис.1 представлен фрагмент схемы уровней ^{164}Er . В работе /7/ полоса с $K^\pi=0^-$ впервые описана вплоть до уровня $I^\pi=11^-$ и предположена новая полоса с $K^\pi=2^-$. Состояния 1577.5 кэВ, 1^- и 1568.7 кэВ, 3^- пока не были включены в состав ротационных полос.

Экспериментальные данные /3-7/ позволяют вычислить отношения приведенных вероятностей E1-переходов с уровней



отрицательной четности (рис.1) на уровне полосы основного состояния $R_{IK} = V(E1; IK \rightarrow (I+1)O_{gr}) / V(E1; IK \rightarrow (I-1)O_{gr})$ (см. табл.1). Эти значения R_{IK} сильно отличаются от значений, предсказываемых правилом Алаги. Эти данные свидетельствуют о сильном смешивании октупольных полос в ядре ^{164}Er . Отметим, что в адиабатическом приближении E1-переходы с уровней полосы $K^\pi = 2^-$ на состояния основной вращательной полосы запрещены.

Мы провели теоретические расчеты в рамках модели /8/, в которой рассматривается кориолисово смешивание состояний октупольных полос с $K^\pi = 0^-, 1^-, 2^-$ и 3^- . В такой схеме параметрами модели являются: ω_K - головные энергии полос;

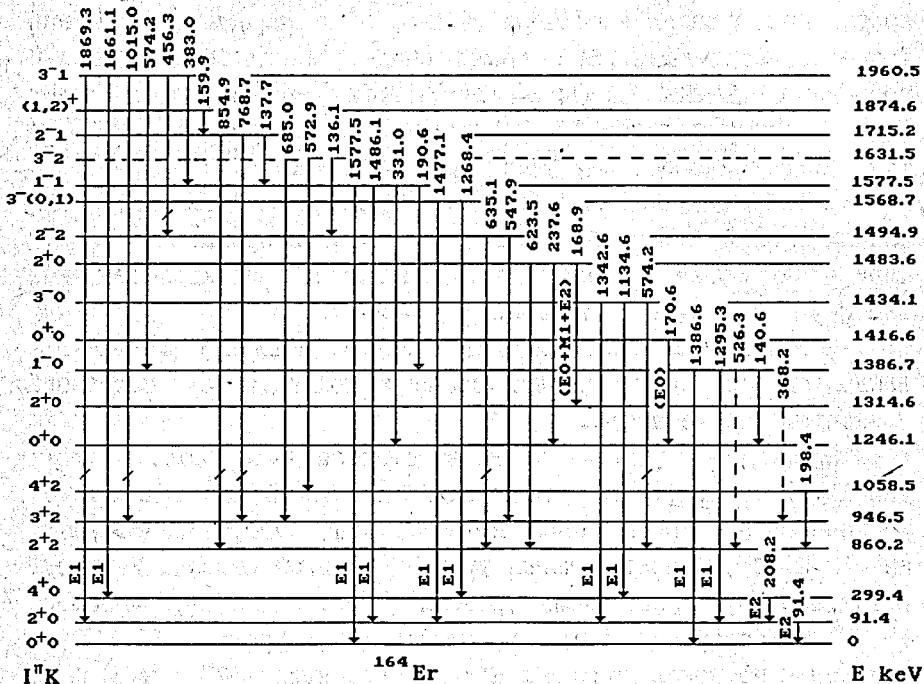


Рис.1. Фрагмент схемы уровней ^{164}Er .

$(J_x)_{K,K}$ - матричные элементы, описывающие кориолисово смешивание состояний октупольных полос; J_0, J_1 - инерционные параметры вращающегося остова, которые определялись из согласия рассчитанного энергетического спектра с экспериментом /6,7/. При этом использовались одни и те же инерционные параметры для всех полос. В рассматриваемом ядре не известны уровни октупольной полосы $K^\pi = 3^-$. В расчетах головную энергию этой полосы брали произвольно равной $\omega_3 = 2$ МэВ. В таблице 2 представлены использованные значения параметров модели. На рис.2 даны вычисленные и экспериментальные значения энергий. Структура состояний октупольных полос приведена в таблице 3. Как видно из таблицы 3, состояния $K^\pi = 0^-, 1^-$ и 2^- полос сильно смешиваются даже при низких спинах, что приводит к сильной неадиабатичности E1 - переходов.

Далее, используя мультипольный оператор, как в /9,10/, для определения отношений приведенных вероятностей дипольных электрических переходов из октупольных состояний имеем следующую формулу:

$$R_{IK} = \frac{V(E1; IK \rightarrow (I+1)O_{gr})}{V(E1; IK \rightarrow (I-1)O_{gr})} = \left[\frac{\Psi_{OK}^I - Z \cdot \Psi_{1K}^I \sqrt{\frac{I}{I+1}}}{\Psi_{OK}^I \sqrt{\frac{I}{I+1}} + Z \cdot \Psi_{1K}^I} \right]^2, \quad (2)$$

где Ψ_{KK}^I - амплитуды смешивания состояний октупольных полос и $Z = \langle 0^+_{gr} | M(1; -1) | 1^- \rangle / \langle 0^+_{gr} | M(1; 0) | 0^- \rangle$ - параметр введенный Кокбачем и Фогелем /11/. Здесь $\langle K_f^+ | M(1; K_f - K_i) | K_i^- \rangle$ - матричный элемент от оператора E1-перехода между внутренними волновыми функциями.

Теоретические значения R_{IK} , вычисленные по формуле (2) в табл.1 сравниваются с экспериментальными, а также с вычисленными по адиабатической формуле Алаги. При значении $Z = 0.11(2)$ нам удалось качественно описать все известные экспериментальные значения R_{IK} . Отметим, что параметр Z определялся из лучшего согласия отношений $R_{IK}^{теор.}$ с экспериментом $R_{IK}^{эксп.}$ для уровней $IK^\pi = 10^-, 30^-$ /4/.

Таблица 1

Отношения приведенных вероятностей E1-переходов
 R_{IK} из состояний октупольных полос

I^π	R_{10^-}			R_{11^-}			R_{12^-}	
	Экспер.	Теор.	Ала-га	Экспер.	Теор.	Ала-га	Экспер.	Теор.
1 ⁻	1387 кэВ	1.62	2.0	1578 кэВ	6.3	0.5	-	-
	1.80(18) ^A			3.9(6) ^H				
	1.88(17) ^H			5.5 ^C				
3 ⁻	1434 кэВ	0.91	1.33	1961 кэВ	3.3	0.75	-	1.57
	0.82(12) ^A			>2.8				
	1.16(24) ^H							
5 ⁻	1553 кэВ	0.77	1.2	-	2.6	0.83	1798 кэВ	
	1.8(14) ^B						1.3(7) ^B	1.3
7 ⁻	-	0.71	1.14	-	2.3	0.88	-	1.19
9 ⁻	-	0.67	1.11	-	2.2	0.9	-	1.13
11 ⁻	-	0.65	1.09	-	2.1	0.92	-	1.09

Примечание: А-из работы /4/,
 В-из работы /7/,
 С-из работы /6/,
 Н-настоящая работа.

Таблица 2

Параметры, использованные в расчетах

ω_0 (МэВ)	ω_1 (МэВ)	ω_2 (МэВ)	ω_3 (МэВ)	$(j_x)_{01}$	$(j_x)_{12}$	$(j_x)_{23}$	J_0 $\hbar^2/\text{МэВ}$	J_1 $\hbar^4/\text{МэВ}^3$
1.375	1.530	1.510	2.0	1.85	1.85	1.5	27.65	756.5

Примечание: ω_k - головные энергии полос;
 $(j_x)_{kk}$ - матричный элемент кориолисова взаимодействия;
 J_0, J_1 - инерционные параметры вращающегося остова.

Таблица 3

Структура октупольных состояний

I	Ψ_{OK}^I				Ψ_{IK}^I			
	K=0	K=1	K=2	K=3	K=0	K=1	K=2	K=3
1	.9102	.4143	-	-	-.4143	.9102	-	-
2						.7651	-.6439	-
3	.7048	.6069	.3639	.0488	-.3905	.7594	-.4849	-.1888
4						.7614	-.5793	-.2912
5	.6284	.6382	.4358	.0890	-.4279	.7367	-.3907	-.3487
6						.7516	-.5225	-.4026
7	.5926	.6482	.4651	.1110	-.4465	.7085	-.3112	-.4493
8						.7411	-.4784	-.4711
9	.5716	.6527	.4812	.1253	-.4565	.6811	-.2471	-.5163
10						.7317	-.4438	-.5173
11	.5575	.6551	.4912	.1356	-.4625	.6568	-.1957	-.5625
12						.7236	-.4162	-.5506
13	.5473	.6566	.4987	.1436	-.4664	.6359	-.1540	-.5953
	Ψ_{2K}^I				Ψ_{3K}^I			
2	-	.6439	.7651	-	-	-	-	-
3	-.5917	.2183	.7626	.1434	-.0239	.0850	-.2254	.9703
4	-	.6358	.7557	.1602	-	.1271	-.3071	.9432
5	-.6461	.1125	.7217	.2217	-.0683	.1932	-.3697	.9063
6	-	.6293	.7510	.2001	-	.1978	-.4037	.8932
7	-.6616	.0577	.6995	.2640	-.1084	.2731	-.4444	.8463
8	-	.6247	.7483	.2229	-	.2459	-.4595	.8535
9	-.6671	.0232	.6847	.2927	-.1410	.3310	-.4885	.795
10	-	.6213	.7464	.2385	-	.2803	-.4959	.8219
11	-.6698	-.0011	.6736	.3143	-.1667	.3733	-.5162	.7526
12	-	.6186	.7448	.2500	-	.3060	-.5215	.7965
13	-.6693	-.0186	.6647	.3315	-.1872	.4051	-.5345	.7177

Новые γ -переходы при распаде $^{164}\text{Tm} \rightarrow ^{164}\text{Er}$

$E_\gamma (\Delta E_\gamma)$ кэВ	$I_\gamma (\Delta I_\gamma)$	$I_K (\Delta I_K)$	σ_L	$I_K^\pi - I_K^\pi$	$E_{\text{нач.}} - E_{\text{кон.}}$
136.1(2)	-	0.20(7)	-	$3^-2^-2^-$	1631-1494
137.7(2)	-	0.15(6)	-	$2^-1^-1^-$	1715-1577
140.6(2)	-	≈ 0.05	-	$1^-0^-1^-$	1386-1246
159.9(2)	0.4(1)	0.05(2)	E1	$(1,2)^+-2^-1$	1875-1715
168.9(3)	-	0.15(5)	(E0+M1+E2)	$2^+0^-2^+0$	1483-1314
170.6(3)	-	0.20(7)	(E0)	$0^+0^-0^+0$	1416-1246
190.6(3)	-	0.07(3)	-	$1^-1^-1^-$	1577-1386
198.4(3)	-	0.05(2)	-	$4^+2^-2^+2$	1058-860
237.6(3)	-	0.04(2)	-	$2^+0^-0^+0$	1483-1246
318.6(3)	-	≈ 0.003	-	$2^+0^-3^-1$	2278-1960
331.0(3)	-	≈ 0.002	-	$1^-1^-0^+0$	1577-1246
368.2(3)	-	0.008(3)	-	$2^+0^-3^+2$	1314-946
383.0(4)	-	≈ 0.003	-	$3^-1^-1^-1$	1960-1577
465.3(4)	-	0.0025(10)	-	$3^-1^-2^-2$	1960-1494
484.0(4)	-	0.0015(6)	-	$2^+ -3^-1$	2444-1960
526.3(4)	-	≈ 0.0015	-	$1^-0^-2^+2$	1386-860
547.9(4)	-	≈ 0.0015	-	$2^-2^-3^+2$	1494-946
572.9(4)	-	≈ 0.0010	-	$3^-2^-4^+2$	1631-1058
574.2(4)	-	≈ 0.0010	-	$3^-1^-1^-0$	1960-1386
574.2(4)	-	≈ 0.0010	-	$3^-0^-2^+2$	1433-860
623.5(4)	-	0.0025(10)	-	$2^+0^-2^+2$	1483-860
685.0(4)	-	0.0015(6)	-	$3^-2^-3^+2$	1631-946
862.7(4)	-	0.0010(5)	-	- -3^-1	2823-1960

Как видно из табл.1 смешивание состояний октупольных полос приводит к уменьшению значений R_{10} для переходов из $K^\pi=0^-$ и к увеличению R_{11} для переходов из $K^\pi=1^-$ полос по сравнению с R_{IK}^A , вычисленных по правилу Алаги. Это связано с тем, что фазы компонентов Ψ_{OK} и Ψ_{1K} в волновых функциях состояний $K^\pi=0^-$ полосы одинаковы, а в состояниях $K^\pi=1^-$ полосы противоположны (см. табл.3). Присутствие Ψ_{02} и Ψ_{12} компонентов в волновых функциях $K^\pi=2^-$ полосы приводит к E1-переходам на уровни основной полосы. Для E1- переходов из $K^\pi=2^-$ полосы известно только одно экспериментальное значение R_{IK} для $I=5$, которое качественно согласуется с $R_{IK}^{\text{ТЕОР.}}$, вычисленным в рамках используемой модели. Состояние 1568.7 кэВ, 3^- пока не удалось включить в состав какой-либо полосы.

Для отношения E1-переходов из состояний с четными спинами полос с $K \neq 0$ имеем:

$$\frac{B(E1; IK^- \rightarrow I0_{gr})}{B(E1; 2K^- \rightarrow 20_{gr})} = \left[\frac{\Psi_{1K}^I}{\Psi_{1K}^2} \right]^2 \quad (3)$$

Отношение (3) не зависит от Ψ_{OK}^I , т.к. в $K^\pi=0^-$ полосе состояния с четными I отсутствуют. В рамках модели для такого отношения имеем величину ≈ 1 , т.е. неадиабатичность в E1-переходах из четных I проявляется не существенно.

Для получения дополнительных экспериментальных данных о распаде $^{164}\text{Tm} \rightarrow ^{164}\text{Er}$ мы воспользовались тем, что в спектрах ЭВК на фотопластинках в нашей работе /3/ наблюдалось значительное количество неидентифицированных слабых линий ЭВК. В качестве дополнительного аргумента при их идентификации мы использовали согласие энергии γ -кванта с принципом Ритца для известных ранее или вводимых энергетических уровней. Эти новые данные представлены в табл.4, которая дополняет результаты работы /3/. На основе новых данных уточнена и дополнена схема распада ^{164}Tm . В схему распада (см. табл.5) включены дополнительно ряд новых переходов; введены новые уровни - 1495.0 кэВ 2^- , 1631.5 кэВ 3^- , 1715.2 кэВ 2^- и 1960.5 кэВ 3^- . На рис.1 представлена

Схема распада $^{164}\text{Tm} \rightarrow ^{164}\text{Er}$

разрядка этих уровней. Экспериментальный анализ показал, что для уровня 1960.5 кэВ, $3^- R_{\text{ИК}}^{\text{ЭКСП}} > 2.8$ согласуется с $R_{31}^{\text{ТЕОР}} = 3.3$ (см. табл.1), что дает возможность приписать этому уровню $K^{\pi}=1^-$. Характер разрядки и близость энергии к расчетным значениям позволяет также приписать уровню 1715.2 кэВ $K^{\pi}=1^-$.

Результаты расчетов и дополнительный анализ экспериментальных данных /3/ позволяют сделать следующие выводы:

- предположение сделанное в работе /7/ относительно $K^{\pi}=2^-$ полосы, подтверждается расчетами проведенными в данной работе, и не противоречат экспериментальным данным из распада ^{164}Tm ;
- высказано предположение о существовании новой октупольной вращательной полосы с $K^{\pi}=1^-$ в ^{164}Er , уровни 1^- , 2^- и 3^- с энергиями 1577.5 кэВ, 1715.2 кэВ и 1960.5 кэВ относятся к этой полосе. Уровни 1715.2 кэВ, 2^- и 1960.5 кэВ, 3^- экспериментально установлены впервые;
- отклонение $R_{\text{ИК}}$ от адиабатического правила Алаги для переходов из состояния отрицательной четности связано с сильным смешиванием уровней $K^{\pi}=0^-, 1^-, 2^-$ и 3^- октупольных полос.

Авторы выражают признательность проф. Ш.Бриансон и И.Адаму за полезные обсуждения и ценные замечания.

$E_{\text{ур}} (\Delta E_{\text{ур}})$ кэВ	$I^{\pi}_{\text{К}}$	$\epsilon + \beta^+$, % расп.	$\lg f_{\text{T}}$	Разряжающие переходы, кэВ
1	2	3	4	5
91.4(3)	2^+0	24.4	5.2	91
299.43(5)	4^+0			208
860.20(5)	2^+2			561;769;860
946.5(1)	3^+2			86;647;855
1058.8(2)	4^+2			198;759;968
1246.08(6)	0^+0	1.56	5.8	385;1155;1246
1314.56(5)	2^+0	1.12	5.9	68;368;455;1015;1223;1314
1386.67(5)	1^-0	0.92	6.0	140;526;1295;1386
1416.6(1)	0^+0	0.85	6.0	170;1325;1417
1434.1(1)	3^-0			574;1135;1343
1483.6(1)	2^+0	0.26	6.5	169;237;623;1184;1392;1483
1494.9	2^-2			548;635
1568.7(2)	$3^-(0,1)$			1268;1477
1577.5(1)	1^-1	0.17	6.6	190;331;1486;1578
1631.5	3^-2			136;573;685
1702.8(6)	0^+0	1.56	5.6	218;315;388;456;842;1610;1701
1715.2	2^-1			138;769;855;1624
1765.82(6)	0^+0	1.50	5.6	451;520;906;1674;1766
1788.4(1)	2^+0	0.77	5.3	474;729;1489;1697;1788
1833.31(1)	2^+0	0.51	6.0	973;1534;1742;1833
1841.6(3)	(0^+0)			358;1750
1861.4(3)	(0^+0)			378;547
1874.6(3)	$(1,2)^+$	0.23	6.3	160;1015;1783
1911.2(1)	2^+0	0.48	6.0	525;667;1819.2
1953.9(1)	2^+0	0.60	5.9	1093;1655;1862
1960.5(3)	3^-1			383;465;574;1015;1661;1869
2025.7(2)	2^+	0.94	5.7	780;1165;1936
2032.1(2)				786
2035.4				1943;2036
2069.4(2)	2^+	0.18	6.4	355;635;1978

Таблица 5 (окончание)

1	2	3	4	5
2168.1(2)				142;1869
2172.8(1)	0^+0	1.52	5.4	298;339;407;595;689;858;926;1312 2081;2172
2254(3)	2,3,4			1955
2278.0(1)	2^+0	0.32	6.1	319;795;845;964;1418;2186;2278
2444.4(1)	2^+	0.57	5.7	729;875;1057;1584
2541.1(2)		0.14	6.3	666;776
2823.4(1)		1.0	6.2	753;798;863;1877
3028.8(3)		0.19	5.7	1460;1714;1969
3409.3(2)	2,3,4			1841;1974;3110
3629.3(7)	2^+	0.46	4.5	1351;2383;2570
3768.8(2)		0.25	4.3	1894;1935;2522

Примечание: "—" - новые данные

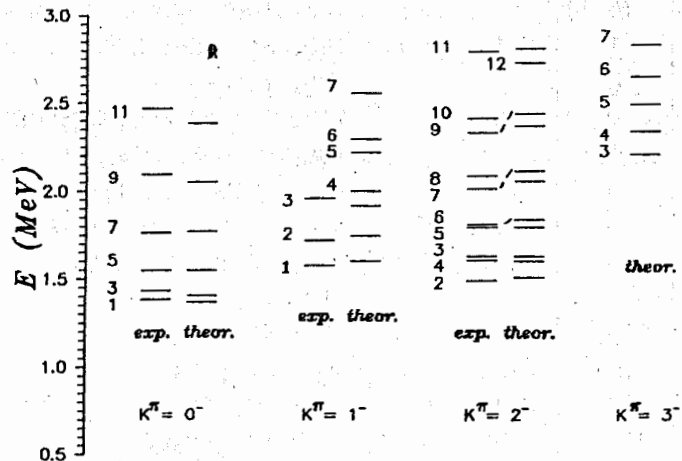


Рис.2. Сравнение экспериментальных и теоретических энергий октупольных состояний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абдуразаков А.А., Холматов А.Х., Тангабаев А.А. и др. Спектры электронов внутренней конверсии нейтронодефицитных радиоактивных нуклидов в области $A=131-172$, Ташкент, "Узбекистан", 1991.
2. Адам И., Гонс Э., Громов К.Я., Исламов Т.А., Кононенко Г.А., Холматов А.Х. Краткие сообщения ОИЯИ, №10, 1985, Дубна, с.69-76.
3. Адам И., Гонс Э., Громов К.Я., Исламов Т.А., Кононенко Г.А., Холматов А.Х. Изв.АН СССР, сер.физ., т.54, №9, 1990 с.1802.
4. De Boer F.W.N. et al. Nucl.Phys.1971, v.A169, p.577.
5. Громов К.Я., Исламов Т.А., Усманов П.Н. Изв. АН СССР, сер.физ., 1989, т.53, с.858.
6. Бондаренко В.А., Григорьев Е.П., Прокофьев П.Т. Изв.АН СССР, сер.физ., 1981, т.45, с.2141.
7. Fields C.A. et al. Nucl.Phys., 1984, v.A422, p.215.
8. Бриансон Ш., Михайлов И.Н., Усманов П.Н. Тезисы докладов 42-совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, Апрель, 1992, Алма-Ата.
9. Михайлов И.Н., Сафаров Р.Х., Усманов П.Н., Бриансон Ш. ЯФ, т.38, 1983, с.177.
10. Kulesa R. et al. Z.Phys.A - Atomic Nuclei 334, 1989, p.299.
11. Kocbach L., Vogel P. Phys Lett. 32B, 434, 1970.

Рукопись поступила в издательский отдел
5 марта 1992 года.