

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПАДА ^{151}Tb Investigation of the ^{151}Tb Decay

М. Гонсиор**, И. И. Громова, Г. И. Исхаков, В. В. Кузнецов, М. Я. Кузнецова,
М. Михайлов, А. В. Потемпа**, В. И. Фоминых

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна*

(Поступила в редакцию 21 августа 1970)

Исследовались спектры гамма-лучей, гамма-гамма-совпадений, а также спектры конверсионных электронов и e - e -совпадений при распаде ^{151}Tb .

Предлагается схема возбужденных уровней ^{151}Gd , возникающих при распаде ^{151}Tb .

Анализ спектров гамма-гамма-совпадений позволит определить количество позитронов при распаде ^{151}Tb , ведущих к заселению уровня с энергией 839,3 кэВ, $(3/2^-)$. Интенсивность позитронов составляет $(0,8 \pm 0,3)\%$ на распад ^{151}Tb .

Определено отношение α/ϵ при распаде ^{151}Tb по накоплению дочерних изотопов ^{147}Eu и ^{151}Gd . Оно равно $(10 \pm 5) \cdot 10^{-5}$.

Определены заселенности уровней ^{151}Gd при распаде ^{151}Tb и рассчитаны соответствующие значения $\lg f\tau$.

По отношению κ/β^+ для заселения уровня с энергией 839,3 кэВ $(3/2^-)$ ^{151}Gd в предположении разрешенного бета-перехода определена граничная энергия позитронов $E_{\text{гр},\beta^+} = (750 \pm 70)$ кэВ, и следовательно, разность масс ^{151}Tb — ^{151}Gd равна (2610 ± 70) кэВ.

The decay of ^{151}Tb have been investigated. The spectra of gamma rays, gamma-gamma coincidences, conversion electrons spectra and electron-electron coincidences were measured. The level scheme of ^{151}Gd populated from the decay of ^{151}Tb is proposed.

1. Введение

Излучение ^{151}Tb исследовалось ранее авторами работ [1—11]. Авторы работы [1] идентифицировали гамма-переходы с энергией 108,3; 180,3; 192,2; 252,1 и 287,6 кэВ, принадлежащие распаду ^{151}Tb .

* Адрес: Объединенный институт ядерных исследований, Москва, Главпочтамт п/я 79, СССР.

** Адрес: Instytut Fizyki Jądrowej, Kraków 23, Radzikowskiego 152, Poland.

При исследовании радиоактивных изотопов тербия Антоньева и др. [2] обнаружили ряд линий конверсионных электронов, интенсивность которых спадала с периодом полураспада ~ 18 часов. Они были приписаны известным в то время изотопам ^{151}Tb и ^{154}Tb . Однако, позже после открытия радиоактивного изотопа ^{152}Tb ($T_{1/2} = 17,5$ час) стало ясно, что большинство из наблюдаемых переходов должны сопровождать распад ^{152}Tb .

Авторы работы [3] при исследовании радиоактивных изотопов тербия с помощью бета-спектрографа типа Даныша и бета-спектрометра с двойной фокусировкой пучка электронов и сцинтилляционного спектрометра для изучения гамма-гамма-совпадений предложили вариант схемы распада $^{151}\text{Tb} \rightarrow ^{151}\text{Gd}$. Ими были введены возбужденные состояния ^{151}Gd с энергиями 108,3; 359,6; 395,6 и 575,7 кэВ.

В работе [4] исследовался спектр конверсионных электронов с помощью бета-спектрографа. Авторы этой работы предложили вариант схемы уровней ^{151}Gd с энергиями 108,1; 395,2; 587,3; 839,0 и 906,4 кэВ.

Вильский, Кузнецов и др. [5] исследовали спектр гамма-лучей ^{151}Tb в области энергии до 1000 кэВ с помощью полупроводникового $\text{Ge}(\text{Li})$ -детектора, спектры конверсионных электронов и e - γ -совпадений с помощью тороидального шестизазорного бета-спектрометра и сцинтилляционного спектрометра с кристаллом $\text{NaJ}(\text{Tl})$. В их работе использовался моноизотопный препарат ^{151}Tb . В работе [5] более полно развита схема распада $^{151}\text{Tb} \rightarrow ^{151}\text{Gd}$ и обсуждается природа отдельных уровней ^{151}Gd . Наблюден уровень с энергией 1191 кэВ ($3/2^+$) с положительной четностью. Обращалось внимание на большое значение коэффициентов внутренней конверсии для ряда переходов, в частности перехода с энергией 443,8 кэВ. Мультипольность ($E2 + E0$) перехода с энергией 443,8 кэВ, разряжающего уровень с энергией 839,3 кэВ ($3/2^-$), и сравнение с характером разрядки подобных уровней в соседнем ядре ^{155}Gd указывали на бета-вибрационную природу уровня с энергией 839,3 кэВ ($3/2^-$). Однако, исследования времени жизни этого уровня в работе [8] дают сравнительно большое время жизни $T_{1/2} = (0,32 \pm 0,05) \cdot 10^{-9}$ сек, что противоречит предположению о бета-вибрационной природе уровня.

Возбужденные состояния ^{151}Gd исследовались Тьемом и Элбеком [12] в реакции $^{152}\text{Gd}(d, t) ^{151}\text{Gd}$, ими наблюдалось более двадцати возбужденных уровней ^{151}Gd . Авторами этой работы рассматриваются состояния с энергией 0 кэВ типа $f 7/2$, 977 кэВ — $d 3/2$ и 1047 кэВ — $s 1/2$, об остальных наблюдаемых возбужденных состояниях, по-видимому, было трудно сделать какие-либо выводы.

В работе [6] при исследовании спектров e - e -совпадений при распаде ^{151}Tb с помощью сдвоенного тороидального бета-спектрометра были получены результаты, подтверждающие введение уровней с энергиями 108,1; 395,2; 575,3; 587,3 и 839, 0 кэВ в работах [4, 5].

В настоящей работе продолжено исследование излучения ^{151}Tb . Исследовался спектр гамма-лучей в области энергий до 2000 кэВ с использованием моноизотопного препарата ^{151}Tb с помощью полупроводниковых $\text{Ge}(\text{Li})$ -детекторов, исследовались также спектры гамма-гамма-совпадений с помощью двух $\text{Ge}(\text{Li})$ -детекторов в связи с вычислительной машиной „Минск-2“ [13] и спектры конверсионных электронов

и e - e -совпадений с помощью сдвоенного безжелезного тороидального бета-спектрометра [14].

Предварительные результаты анализа спектров гамма-гамма- и e - e -совпадений при распаде ^{151}Tb были опубликованы в работах [10, 11].

2. Экспериментальная часть

1. Приготовление источников

Радиоактивные изотопы тербия получались в реакциях расщепления тантала или эрбия протонами с энергией 660 Мэв на синхроциклотроне Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ. Мишени тантала (эрбия) облучались на внутреннем пучке протонов синхроциклотрона в течение 15—120 минут. Из облученных мишеней химическим методом [15] выделялся элемент тербий.

При исследовании спектров гамма-излучения ^{151}Tb использовались моноизотопные источники, получаемые с помощью масс-сепаратора [16] Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ. Разделение на масс-сепараторе радиоактивных изотопов тербия проводилось через 2,5—3,0 часа после конца облучения мишеней на синхроциклотроне.

Для исследования спектров гамма-гамма-совпадений, а также e - e -совпадений и конверсионных электронов с помощью сдвоенного безжелезного тороидального бета-спектрометра использовались источники тербия, выделенные из мишеней тантала (эрбия), облученных протонами на синхроциклотроне в течение 15—20 минут.

Спектр конверсионных электронов при распаде ^{151}Tb в области энергий выше 1000 кэв исследовался с помощью бета-спектрометра с двухкратной фокусировкой пучка электронов на угол $\pi/2$ [17]. В этих измерениях использовался препарат тербия, выделенный из мишеней тантала, облученных протонами на синхроциклотроне в течение двух или более часов.

2. Исследование спектра конверсионных электронов и спектров e - e -совпадений

Спектр конверсионных электронов в области энергий до 1200 кэв и спектры e - e -совпадений исследовались с помощью сдвоенного безжелезного тороидального бета-спектрометра [14]. Спектр конверсионных электронов измерялся при разрешении бета-спектрометра $R \approx 0,5\%$ и светосиле $T \approx 7\%$. Спектры e - e -совпадений измерялись, в основном, при разрешении $R \approx 1\%$ и светосиле $T = 20\%$ на обеих частях бета-спектрометра; в отдельных случаях измерения спектров совпадений были проведены при разрешении $R \approx 0,5\%$.

Измерения спектров конверсионных электронов и e - e -совпадений осуществлялись автоматически с выводом результатов на многоканальный анализатор NTA-512. Проводились эти измерения в Институте ядерной физики в Кракове и начинались через ~ 20 час после облучения мишеней тантала (или эрбия) на синхроциклотроне в Дубне. Спектр конверсионных электронов с энергией выше 1000 кэв исследо-

ТАЛИЦА 1

Относительная интенсивность гамма-лучей и конверсионных электронов при распаде ¹⁵¹Tb, КВК и мультипольности переходов в ядре ¹⁵¹Gd

№ №	E_{γ} (кэв)	I_{γ}	I_K	$I_{\text{полн}}$	$\alpha_K \cdot 10^4$	Мультипольность
1	2	3	4	5	6	7
1	103,8 ^a	572±143	396±79	968	6923±2322	E2
2	108,1	10613±531	11000±1100	27030	10365±1555	E2, M1
3	118,2	< 22,2	1,8±0,4	< 24	> 811	E1
4	140,6 ^a	< 22,2	8,4±1,7	< 30,6	> 3784	E2
5	148,94 [*]	138±17	149±22	294	10797±2350	M1
6	149,51 [*]					
7	161,0					
8	180,1	5157±103	1490±75	6920	2890±328	E2+M1
9	192,0	1956±172	465±46	2488	2377±396	M1+E2
10	217,0 ^a	116±12	—	—	—	—
11	222,0 ^a	100±20	—	—	—	—
12	235,9 ^a	167	11,7 ±2,3	178,7	701	E2
13	249,2	—	14,6±3,0	—	—	—
14	251,9	11223±224	1459±73	12888	1300±148	M1
15	255,4 ^a	—	14,4±3,0	—	—	—
16	258,1 ^a	~ 72	14,4±3,0	~ 92	~ 2000	M1
17	263,8 ^a	~ 95	7,9±1,6	~ 104	~ 832	E2
18	267,0 ^a	< 44	0,71	< 45	> 160	E1
19	287,2	11112	1000	12350	900	M1
20	318,7 [*]	172	10±2	186	581	E2+M1
21	348,0	—	1,3±0,4	—	—	—
22	355,3 ^a	—	0,53±0,16	—	—	—
23	369,0 ^a	—	0,84±0,21	—	—	—
24	375,0 ^a	—	0,49±0,15	—	—	—
25	378,0 ^a	—	10,6±2,1	—	—	—
26	380,0	2031±104	14±0,3	2046	69±13	E1
27	384,0 ^a	618±87	19,4±4,0	640	314±83	E2+M1
28	395,2	4836±111	164±16	5010	339±49	M1+E2
29	401,2 ^a	278	2,5	280,5	90	E1
30	407,3 ^a	216	1,3±0,4	217,3	60	E1
31	413,9 ^a	462	—	—	—	—
32	416,1	832±34	33,7±6,7	871	405±92	M1
33	426,3 ^a	1735±87	71,1±10,7	1823	410 ±77	M1
34	440,2	—	13,6±2,7	—	—	—
35	443,8	3827±191	176±18	4029	460±69	E2+E0
36	450,7 ^a	~ 111	0,76±0,23	~ 112	~ 68	E1
37	467,2	495±46	10±2	505	202±49	E2
38	479,1	5698 ±103	121±12	5846	212±30	M1, M1+E2
39	500,5	278±28	4,4±0,9	283	158±39	E2
40	507,8 ^a	< 111	0,51±0,15	< 111,5	> 46	E1
41	512,0	1316±46	9,1±1,8	1326	69±16	M1**
42	535,1 ^a	121	0,7 ±0,2	121,7	58	E1 или E2
43	539,0	294±25	—	—	—	—

Таблица I (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7
44	563,0 ^a	~ 81	1,0	82	~ 123	M1
45	572,4 ^a	~ 61	0,3±0,1	~ 61	~ 49	E2
46	578,2 ^a	~ 81	0,1±0,2	~ 82	~ 123	M1
47	587,5	5734±132	65±7	5817	113±16	E2+M1
48	604,5	1207±74	5±1	1213	41±10	E1
49	616,4	4000±112	22,6±2,3	4030	57±8	E1+M2
50	657,0	231±14	—	—	—	—
51	661,0	189±12	—	—	—	—
52	671,2 ^a	—	0,28±0,08	—	—	—
53	692,0	704±67	6,5±1,3	711	92±22	M1
54	703,6	1489±71	21,6±2,2	1514	145±22	M1
55	730,9	3226±39	21±2,1	3250	65±9	E2, E2+M1
56	762,2	134±13	0,15±0,05	134	11±4	E1
57	766,3	178	—	—	—	—
58	770,1 ^a	—	0,3±0,09	—	—	—
59	773,2 ^a	59±3	—	—	—	—
60	785,4 ^a	—	0,52 ±0,16	—	—	—
61	805,3	319±26	3,5±0,35	323	110±18	M1
62	865,2	49±5	—	—	—	—
63	881,0 ^a	48±10	—	—	—	—
64	885,0 ^a	59±12	0,11±0,03	59,1	19±7	E2
65	895,8 ^a	36	—	—	—	—
66	901,9 ^a	—	0,45±0,07	—	—	—
67	905,7	439±35	1,16±0,17	440	26±5	E2
68	912,0 ^a	85	0,24±0,07	85,2	28	E2
69	918,0 ^a	24	0,1±0,03	24,1	42	E2+M1
70	938,8 ^a	50±5	0,26±0,08	50,3	52±17	M1
71	946,3 ^a	48±7	0,16±0,05	48,2	33±12	E2+M1
72	956,0	30	0,07±0,02	30,1	23	E2
73	979,5	173±26	0,6±0,2	173,6	35±11	E2, M1
74	985,0 ^a	46	0,3±0,1	46,3	65	M1
75	1003,2 ^a	30±15	—	—	—	—
76	1010,0 ^a	81±12	0,15	81	19	—
77	1024,0 ^a	57±17	—	—	—	—
78	1029,3 ^a	41±12	—	—	—	—
79	1050,0	64±9	0,10±0,03	64,1	16±6	E2
80	1053,0 ^a	22±11	—	—	—	—
81	1061,0 ^a	73±7,3	0,27±0,08	73,3	37±12	M1
82	1069,0 ^a	—	0,16±0,05	—	—	—
83	1079,0 ^a	35,6±11	—	—	—	—
84	1084,0	58±17	—	—	—	—
85	1088,2	33±17	—	—	—	—
86	1091,8 ^a	30±12	—	—	—	—
87	1098,0	42±11	—	—	—	—
88	1110,0	278±25	—	—	—	—
89	1119,1 ^a	34	—	—	—	—
90	1126,0	23,6±11	0,16±0,05	23,8	68±35	—
91	1130,0 ^a	33±10	—	—	—	—

Таблица I (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7
92	1133,8 ^a	24±10	—	—	—	—
93	1157,0	92±14	—	—	—	—
94	1163,0 ^a	39±12	—	—	—	—
95	1170,3	224±9	0,95±0,19	225	42±10	M1
96	1181,8 ^a	87±9	—	—	—	—
97	1190,8	63±13	0,2±0,04	63,2	32±10	M1
98	1194,0 ^a	53±11	—	—	—	—
99	1222,0	189±32	—	—	—	—
100	1232,0 ^a	37±5	—	—	—	—
101	1236,5 ^a	13,3±2,7	—	—	—	—
102	1250,0	17,8±7,1	—	—	—	—
103	1259,5	35,6±10,7	—	—	—	—
104	1264,0 ^a	21±6	—	—	—	—
105	1279,0	60±9	0,05±0,01	60,1	8,3±2,2	E1
106	1298,7	13	—	—	—	—
107	1311,8	208±16	0,5±0,1	208,5	24±6	M1
108	1344,2	25	—	—	—	—
109	1348,9	120±76	—	—	—	—
110	1360,0	52±13	—	—	—	—
111	1363,6 ^a	77	0,13±0,03	77,2	17	M1
112	1367,0 ^a	28±9	—	—	—	—
113	1382,2	160±45	0,21±0,04	160,2	13±5	E2
114	1395,0 ^a	33±7	—	—	—	—
115	1408,0 ^a	16	0,043	16	27	M1
116	1446,0 ^a	37	—	—	—	—
117	1482,5	222±29	0,4±0,1	222,4	18+5	M1
118	1494,0	106±22	—	—	—	—
119	1579,0 ^a	18	—	—	—	—
120	1593,0 ^a	172	—	—	—	—
121	1600,0	86±3	—	—	—	—
122	1606,0 ^a	14,4±2,6	—	—	—	—
123	1632,5	27±4	—	—	—	—
124	1638,0	31±4	—	—	—	—
125	1644,0	12	—	—	—	—
126	1670,0	224±8	0,33±0,07	224,3	15±3,4	M1
127	1689,0	33±4	—	—	—	—
128	1719,5 ^a	31±9	—	—	—	—
129	1727,5 ^a	12,2±3,7	—	—	—	—
130	1746,0	14,4±3,0	—	—	—	—
131	1778,5	42,2±3,4	—	—	—	—
132	1815,2 ^a	53±5	—	—	—	—
133	1870,0	32±2	—	—	—	—
134	1962,5	11	—	—	—	—

^a Переходы не размещены в схеме распада.

* Значения энергий переходов определены в работе [7].

** Мультипольность перехода 512 кэВ может быть типа M1, так как интенсивность гамма-лучей этой энергии завышена за счет аннигиляции позитронов (0,8% на распад) при распаде 151-Tb.

ТАБЛИЦА II

Наблюдаемые относительные интенсивности e - e -совпадений при распаде ^{151}Tb

Переход в I канале (β -сп. 1)	Переходы, наблюдаемые во II канале (β -сп. 2)	Совпад. в относит. единицах	Переход в I канале (β -сп. 1)	Переходы, наблюдаемые во II канале (β -сп. 2)	Совпад. в относит. единицах
K 108,1	K 140,6	111	K 192,0	K 384,0	69
	K 161,0	95		K 395,2	240
L 108,1	K 180,1	1490		K 426,3	78
	K 192,0	672		K 604,5	6,6
	K 263,8	61	K 251,9	M 192,0 + K 240,0	74
	K 275 или L 235,9	45		K 287,2	303
	K 287,2	1450		K 384,0	13
	K 395,2	107		K 395,2	38
	K 401,2	7,5		K 426,3	23
	K 616,4	22,6		K 479,1	121
K 192,0	L 108,1 + K 149,5	> 242	K 287,2	M 192,0 + K 240,0	77
	M 108,1	> 76		K 251,9	520
	K 161,0	> 3		K 263,8	43
	L 149,5	21		K 416,1	40
	K 251,9	1459		K 436,8	53
	K 287,2	970		K 443,8	176

Примечание: Относительные интенсивности совпадений для интенсивных переходов определены с точностью не хуже 20%. Возможно, что интенсивности совпадений с электронами K 140,6, 240,0, K 263,8 и K 384,0 кэв завышены за счет присутствия других изотопов тербия и дочерних изотопов гадолиния.

вался с помощью безфоновго бета-спектрометра [17] с двухкратной фокусировкой электронов на угол $\pi/\sqrt{2}$. Разрешение бета-спектрометра при измерении спектров конверсионных электронов составляло $R \approx 0,2\%$ при светосиле $T \approx 0,1\%$.

Результаты исследования спектров конверсионных электронов сведены в таблице № I. В таблице № II представлены результаты анализа спектров e - e -совпадений при распаде ^{151}Tb . Исследовались совпадения конверсионных электронов K-108,1, L-108,1, K-180,1, K-192,0, K-251,8 и K-287,2 кэв с конверсионными электронами при распаде ^{151}Tb .

Активность используемого в качестве источника препарата тербия и большая светосила тороидального бета-спектрометра позволили измерять спектры совпадений конверсионных электронов сравнительно быстро при шаге $\Delta\beta q = 4,4$ эрстед. см на второй половине бета-спектрометра. Экспозиция при каждом шаге для разных участков спектра составляла от 50 до 500 сек.

3. Исследование спектров гамма-лучей и гамма-гамма-совпадений

Спектр гамма-излучения ^{151}Tb исследовался с использованием моноизотопных источников с помощью полупроводниковых Ge(Li)-детекторов с чувствительными объемами $\sim 30 \text{ см}^3$, $\sim 10 \text{ см}^3$ и $6,3 \text{ см}^3$ и разрешением 4,5; 4,0 и 3,5 кэв на гамма-лучах ^{60}Co , соответственно.

Для исследования гамма-излучения ^{151}Tb было проведено два опыта, в которых применялось разделение радиоактивных изотопов тербия с помощью масс-сепаратора. Во втором опыте ^{151}Tb был получен более чистым от примесей соседних изотопов тербия, чем в первом опыте. На рисунке 1 А и 1 Б приведены спектры гамма-лучей в области малых энергий, измеренные в первом опыте с помощью Ge(Li)-

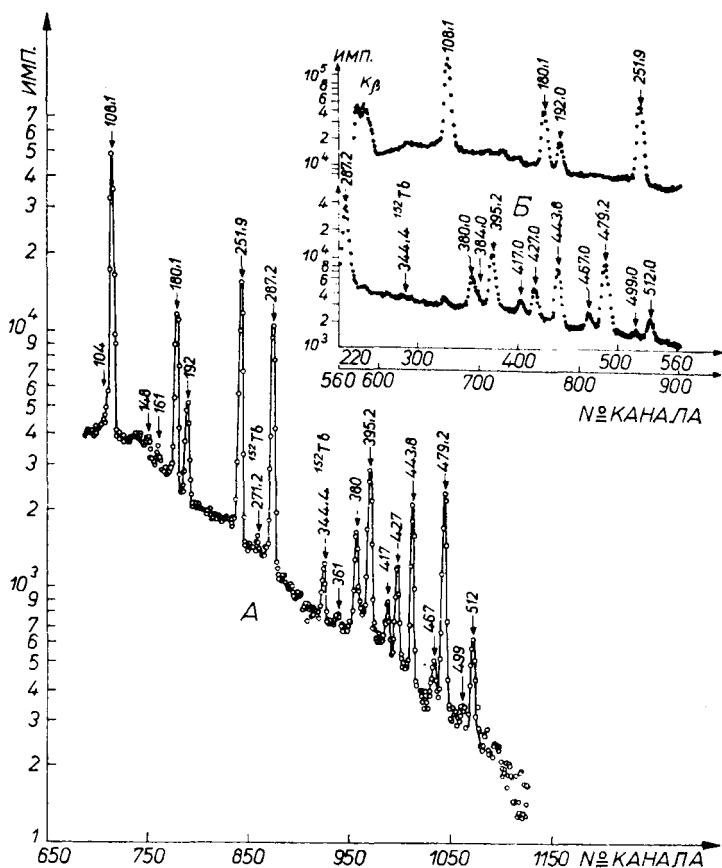


Рис. 1. Участки спектров гамма-лучей ^{151}Tb в области малых энергий: А) измеренные в первом опыте с помощью Ge (Li)-детектора с чувствительным объемом 6,3 см³. Б) измеренные во втором опыте с помощью Ge(Li)-детектора с чувствительным объемом ~ 10 см³

-детектора с чувствительным объемом 6,3 см³ и во втором — с помощью Ge(Li)-детектора с чувствительным объемом ~10 см³, соответственно. Видно, что в случае второго опыта (рис. 1 Б) в измеренном спектре практически не проявляются даже самые интенсивные гамма-лучи с энергией 344,4 кэВ, возникающие при распаде ^{151}Tb .

На рис. 2 представлен участок спектра гамма-лучей, возникающих при распаде ^{151}Tb , в области больших энергий, полученный при измерении препарата ^{151}Tb после второго разделения тербия на масс-сепараторе. Спектр измерен с помощью

Ge(Li)-детектора с чувствительным объемом $\sim 10 \text{ см}^3$. В случае измерения спектров с помощью Ge(Li)-детектора с чувствительным объемом $\sim 10 \text{ см}^3$ телесный угол (геометрия) составлял $\sim 9\%$ от 4π . Естественно, что в этом случае в спектрах гамма-лучей наблюдаются фотопики — „пики сумм“, обусловленные эффектом регистра-

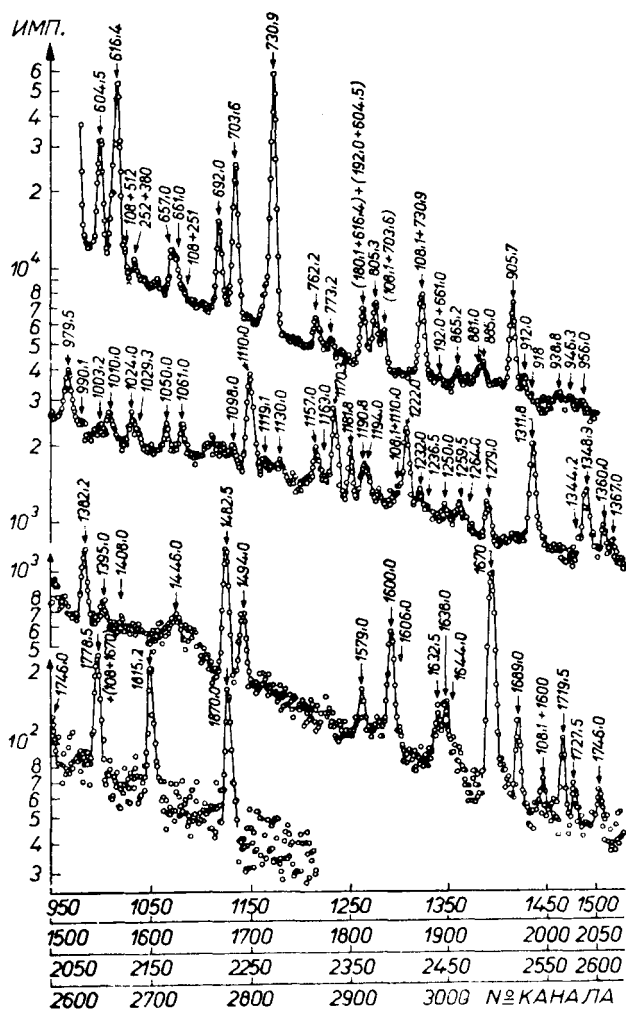


Рис. 2. Участок спектра гамма-лучей ^{151}Tb в области больших энергий, измеренный во втором опыте с помощью Ge(Li)-детектора с чувствительным объемом $\sim 13 \text{ см}^3$

ции каскадных гамма-лучей, сопровождающих распад ^{151}Tb . Чтобы исключить „пики-суммы“ при анализе спектра гамма-лучей, возникающих при распаде ^{151}Tb , было проведено измерение спектра с использованием поглотителя-фильтра (3 мм Pb, 0,5 мм Cd и 0,5 мм Cu). Поглотитель-фильтр практически полностью исключал возможность суммирования каскадных гамма-лучей с интенсивными гамма-лучами

малых энергий. На рис. 3 представлен спектр гамма-излучения ^{151}Tb измеренный с помощью $\text{Ge}(\text{Li})$ -детектора с чувствительным объемом $6,3\text{ см}^3$ с использованием поглотителя.

Сравнение спектров, измеренных с использованием поглотителя и без поглотителя, с одной стороны, позволило нам исключить фотопики — „пики-суммы“;

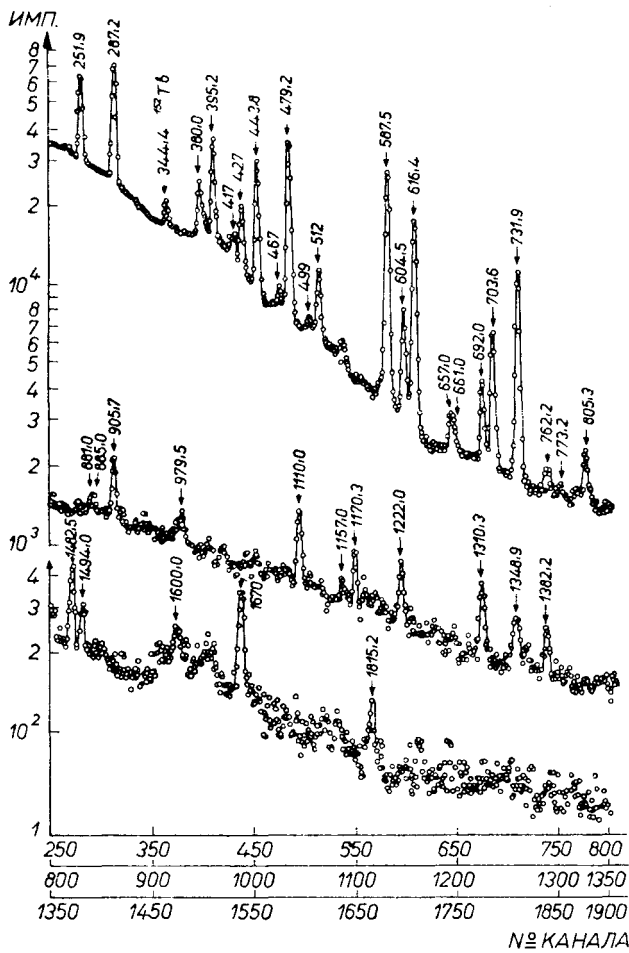


Рис. 3. Участок спектра гамма-излучения ^{151}Tb измеренный в первом опыте с помощью $\text{Ge}(\text{Li})$ — детектора с чувствительным объемом $6,3\text{ см}^3$ и с использованием поглотителя

с другой стороны, наблюдение этих фотопиков значительно помогло при анализе схемы возбужденных уровней ^{151}Gd . В таблице I сведены данные анализа спектров гамма-лучей при распаде ^{151}Tb . Указанные в таблице ошибки определения относительных интенсивностей гамма-лучей не включают в себя погрешности, обусловленные неточностью в определении эффективности регистрации гамма-лучей, равной 10%. Ошибка в определении энергии гамма-лучей ^{151}Tb составляет не более 0,5 кэВ.

При определении энергий гамма-переходов в качестве градуировочных энергий использовались энергии гамма-лучей ^{151}Tb [4, 7] (в области энергий до 500 кэВ) и гамма-лучей ^{56}Co [18]. Эффективность регистрации гамма-излучения детекторами определялась с помощью калибровочных источников ^{56}Co [18], ^{26}Na [19], ^{169}Yb [20], ^{241}Am [21], ^{226}Ra [22, 23].

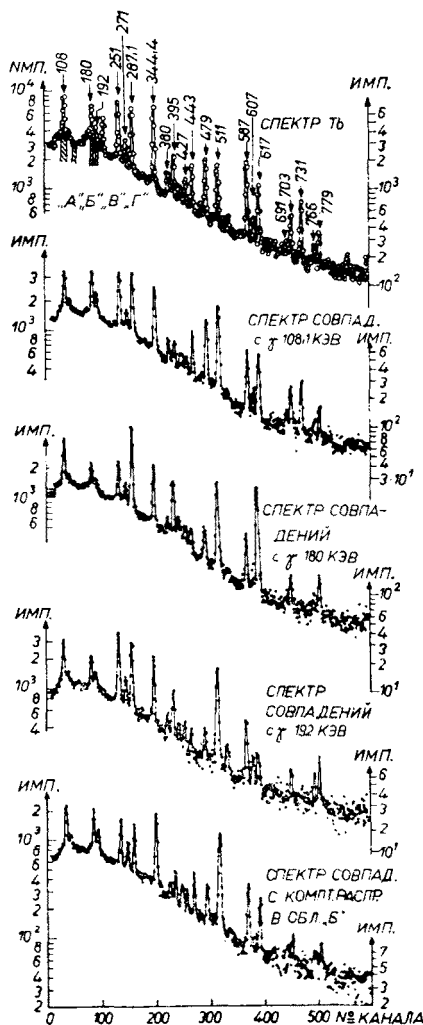


Рис. 4. Спектры гамма-гамма-совпадений с $\gamma 108$, $\gamma 180$ и $\gamma 192$ кэВ

Спектры гамма-гамма-совпадений при распаде ^{151}Tb исследовались с помощью двух Ge(Li) -детекторов с чувствительным объемом $\sim 30 \text{ см}^3$ в связи с вычислительной машиной „Минск-2“ [13]. Измерения спектров совпадений начинались через ~ 20 часов после конца облучения тантала на синхроциклотроне. Тербий перед измерением повторно очищался от дочерних изотопов гадолиния, накопившихся при распаде изотопов тербия, присутствовавших в источнике.

Часть спектров гамма-гамма-совпадений представлена на рисунках 4 и 5. В верхней части рисунков приведены спектры тербия, в нижней — спектры совпадений гамма-лучей с энергией 108,1; 180,1; 192,0; 251,9; 287,2 кэВ и участков комптоновского распределения спектра с гамма-лучами при распаде ^{151}Tb . Как видно из рис. 4 и 5, в спектре тербия наблюдаются несколько фотопиков, принадлежащих распаду

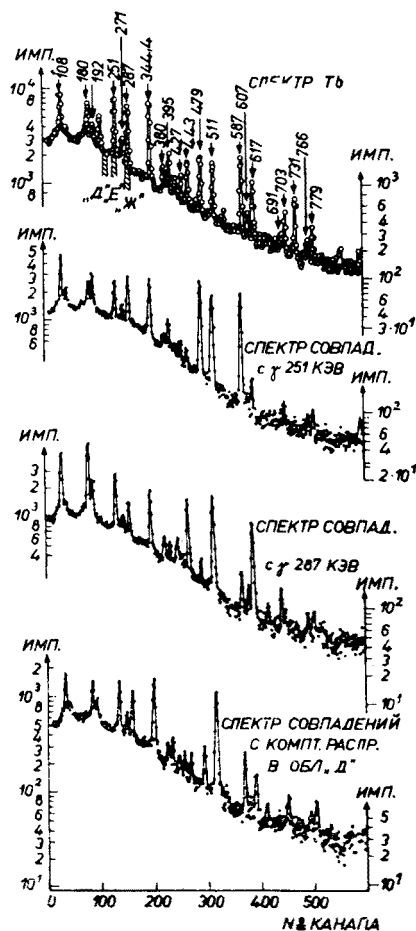


Рис. 5. Спектры гамма-гамма-совпадений с γ_{251} и γ_{287} кэВ

^{152}Tb и ^{154}Tb , присутствовавших в источнике. При анализе спектров совпадений гамма-лучей в каждом случае учитывался вклад от совпадений с комптоновским распределением спектра. Анализ спектров гамма-гамма-совпадений проводился методом подобным описанному в работе [24]. На рисунках 4 и 5 отмечены области (А, Б, В, Г, Д, Е, Ж) спектра гамма-лучей, с которыми измерялись совпадения гамма-лучей при распаде ^{151}Tb . Анализ спектров совпадений, в основном, подтвердил результаты исследований $e\text{-}\gamma$ -совпадений, полученные в работе [5] и находится

ТАБЛИЦА III

Результаты анализа спектров гамма-гамма-совпадений

$\frac{E_{\text{кэв}}}{E_{\text{кэв}}}$	108,1	180,1	192,0	251,9	287,2	479,1	511	692,0
108,1	—	840 ± 280 (1440 ± 370)	720 ± 220 (540 ± 140)	2730 ± 490 (2350 ± 940)	4600 ± 740 (4360 ± 870)	2030 ± 410 (2240 ± 450)	710 ± 340 (350 ± 250)	~380 (200 ± 60)
180,1	1300 ± 280 (1440 ± 370)	—	—	—	4750 ± 740 (3300 ± 660)	—	850 ± 290 (400 ± 160)	—
192,0	~320 (540 ± 140)	—	—	1570 ± 290 (1550 ± 340)	1340 ± 250 (1250 ± 250)	—	<400 (60 ± 25)	—
251,9	2660 ± 480 (2350 ± 940)	—	1200 ± 240 (1550 ± 340)	—	1610 ± 340 (1260 ± 380)	6010 ± 960 (4520 ± 1040)	360 ± 260 (400 ± 160)	—
287,2	4360 ± 710 (4360 ± 870)	4290 ± 700 (3300 ± 660)	1390 ± 260 (1250 ± 250)	2000 ± 360 (1260 ± 380)	—	—	500 ± 260 (500 ± 300)	730 ± 270 (450 ± 90)
348	—	—	—	—	~300	—	—	—
395,2	—	1620 ± 300 (1440 ± 290)	405 ± 130 (550 ± 110)	1140 ± 280 (550 ± 170)	—	—	—	~250 (200 ± 40)
416,1	—	—	—	—	570 ± 290 (530 ± 110)	—	—	—
443,8	820 ± 340 (1070 ± 280)	—	—	—	4300 ± 730 (2450 ± 500)	—	—	—
479,1	2600 ± 480 (2240 ± 450)	—	—	6810 ± 1090 (4520 ± 1040)	—	—	—	—

Таблица III (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
587,5	—	—	—	7010±1120 (4550±1050)	—	—	—	—
604,5	—	—	—	—	—	~390 (490±120)	—	—
616,4	750±320 (1150±460)	2850±500 (2780±620)	—	—	3620±650 (2390±710)	—	—	—
692,0	~430 (200±60)	—	—	—	~380 (450±90)	—	—	—
730,9	870±320 (1270±260)	—	—	—	—	—	—	—

Примечание: Интенсивности гамма-гамма-совпадений определялись как в работе [24], т.е. $J_{\gamma_1-\gamma_2} = \frac{N_{\gamma_1-\gamma_2}}{\sigma_1 \cdot \sigma_2}$, где $N_{\gamma_1-\gamma_2}$ представляет

число зарегистрированных совпадений между гамма-лучами с энергиями E_1 и E_2 , а σ_1 и σ_2 — эффективности регистрации гамма-лучей с энергиями E_1 и E_2 в соответствующих детекторах. В скобках приведены рассчитанные интенсивности гамма-гамма-совпадений для принятой схемы распада (рис. 6). При этом интенсивности гамма-гамма-совпадений нормированы таким образом, чтобы выполнялось соотно-

шение $J_{\gamma_{108,1}-\gamma_{287,2}} = \frac{J_{\gamma_{108,1}} \cdot J_{\gamma_{287,2}}}{J_{\text{полн. } 108,1}}$ где J_{γ} и $J_{\text{полн.}}$ выражены в единицах, приведенных в таблице I.

Интенсивности совпадений гамма-лучей с гамма-лучами с энергией 511 ÷ 512 кэВ рассчитаны в предположении, что при позитронном распаде ^{151}Tb заселяется лишь уровень с энергией 839,3 кэВ ^{151}Gd .

в хорошем согласии с результатами анализа спектров e - e -совпадений, проведенных в данной работе.

В таблице III сведены результаты анализа спектров совпадений гамма-лучей с энергиями 108,1; 180,1; 192,0; 251,9; 287,2; 479,1; 511 и 692,0 кэВ с гамма-лучами при распаде ^{151}Tb .

Анализ спектров гамма-лучей и конверсионных электронов позволил рассчитать экспериментальные значения коэффициентов внутренней конверсии (КВК) и сделать выводы о мультипольности ряда переходов в ядре ^{151}Gd . При определении экспериментальных значений КВК принималось, что переход с энергией 251,9 кэВ, согласно работам [4, 7], является переходом типа $M1$ ($\alpha_K = 0,130$). Экспериментальные значения КВК и выводы о мультипольности переходов приведены в таблице I.

При расчете значений КВК учитывались также погрешности определения относительных интенсивностей гамма-лучей из-за неопределенности кривой эффективности регистрации гамма-излучения детекторами.

3. Схема распада $^{151}\text{Tb} \rightarrow ^{151}\text{Gd}$

Анализ экспериментальных данных позволил ввести ряд новых возбужденных состояний ^{151}Gd , возникающих при распаде ^{151}Tb . Схема распада $^{151}\text{Tb} \rightarrow ^{151}\text{Gd}$ приведена на рис. 6. Уровни ^{151}Gd вводились преимущественно на основании анализа спектров e - e -совпадений, гамма-гамма-совпадений и наблюдения „пику-сумм“ в спектре гамма-лучей ^{151}Tb (рис. 2). Наблюдаемые совпадения ($\gamma 512$) ($\gamma 287$) и ($\gamma 512$)($\gamma 180$) указывают на размещение перехода с энергией 512 кэВ между уровнями с энергией 1087,3 и 575,3 кэВ. Совпадения ($\gamma 511$) ($\gamma 251$) в спектре совпадений гамма-лучей 511 кэВ с гамма-лучами тербция интерпретируются нами как совпадения гамма-лучей с энергией 251,9 кэВ, разряжающих уровень с энергией 839,3 кэВ с гамма-квантами, возникающими при аннигиляции позитронов ^{151}Tb . Интенсивность позитронов, ведущих к заселению с энергией 839,3 кэВ, ($3/2^-$) ^{151}Gd составляет $(0,8 \pm 0,3)\%$ на распад ^{151}Tb .

По отношению $K/\beta^+ = 59,6_{-14,9}^{+30,0}$ для уровня с энергией 839,3 кэВ в предположении разрешенного бета-перехода определена граничная энергия позитронов $E_{\text{гп}} = (750 \pm 70)$ кэВ. Отсюда разность масс ^{151}Tb — ^{151}Gd равна (2610 ± 70) кэВ.

Анализ спектров гамма-лучей дочерних изотопов ^{151}Gd и ^{147}Eu , накопившихся при распаде ^{151}Tb , позволил определить интенсивности гамма-лучей, возникающих при распаде ^{151}Tb , в процентах на распад и отношение α/ϵ при распаде ^{151}Tb . В расчетах принималось, что интенсивность гамма-лучей с энергией 153,7 кэВ составляет 9,3% на распад ^{151}Gd [25], а интенсивность гамма-лучей с энергией 121,3 кэВ составляет 16% на распад ^{147}Eu [26]. В результате получено, что интенсивность гамма-лучей с энергией 287,2 кэВ составляет 21% на распад ^{151}Tb . Непосредственно из схемы распада $^{151}\text{Tb} \rightarrow ^{151}\text{Gd}$ (рис. 6) по результатам данной работы получаем $I_{\gamma 287,2} = 28\%$ на распад. В пределах возможных ошибок определения $I_{\gamma 287,2}$ по накоплению дочернего ^{151}Gd и по результатам настоящей работы полученные зна-

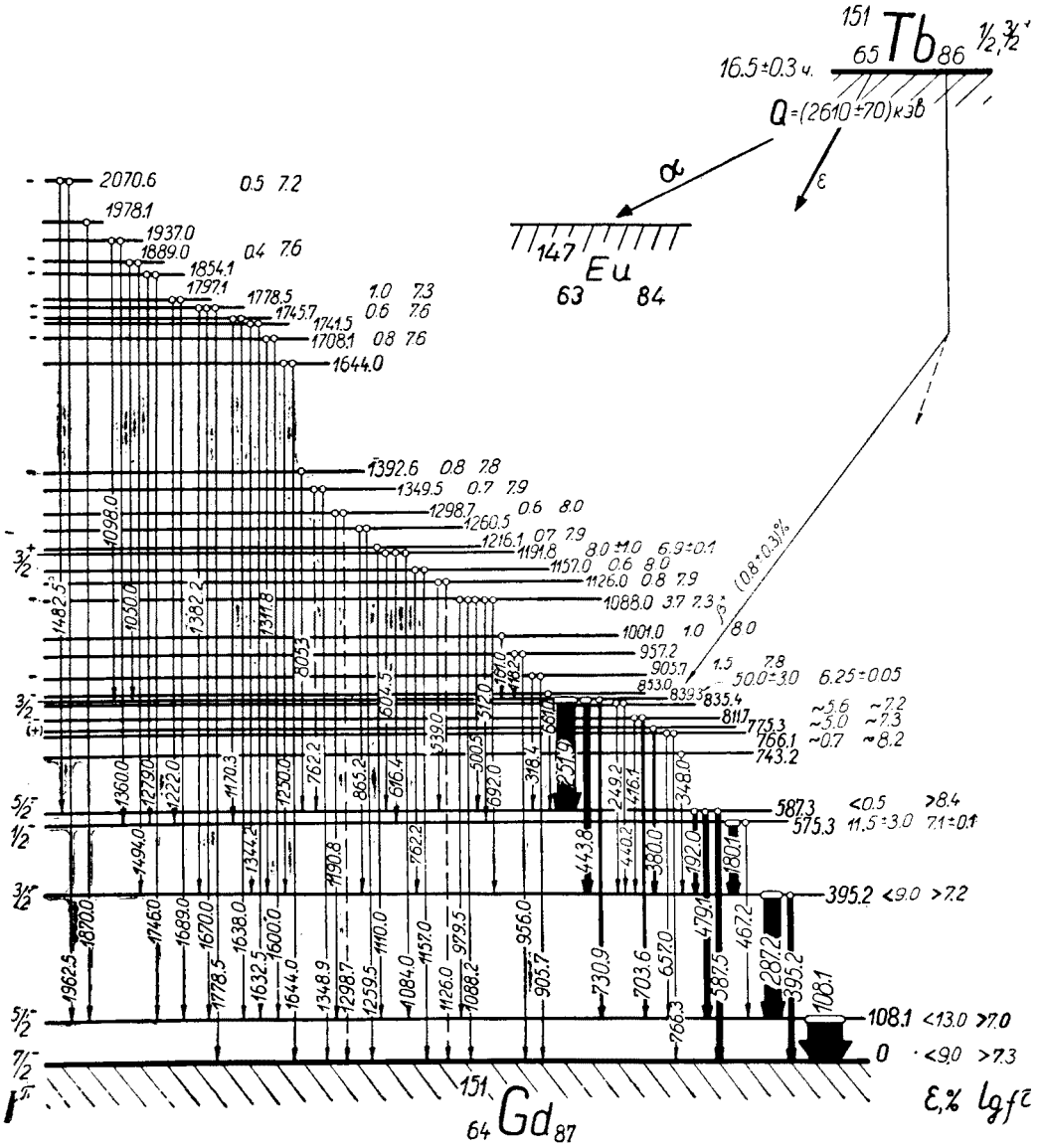


Рис. 6. Схема распада $^{151}\text{Tb} \rightarrow ^{151}\text{Gd}$

чения величины $I_{\gamma,287,2}$ (21% и 28%) согласуются между собой. В расчетах по определению отношения α/ϵ использовалось среднее значение $I_{\gamma,287,2} = 24,5\%$. Отношение α/ϵ оказалось равным $(10 \pm 5) \cdot 10^{-5}$. Эта величина находится в согласии с значениями $(8 \pm 2) \cdot 10^{-5}$ и $3,3 \cdot 10^{-5}$, полученными в работах [27, 28] и не согласуется с величинами $(5,0 \pm 1,5) \cdot 10^{-6}$, $\sim 3 \cdot 10^{-6}$ и $(4,8 \pm 0,5) \cdot 10^{-6}$ работ [7, 29, 30].

На схеме распада $^{151}\text{Tb} \rightarrow ^{151}\text{Gd}$ (рис. 6) приведены значения $\lg ft$ и доли бета-распада на возбужденные уровни и основное состояние ^{151}Gd . При расчете значе-

ний $lg ft$ использовалась экспериментально определенная разность масс $^{151}\text{Tb} - ^{151}\text{Gd}$, равная (2610 ± 70) кэв.

На основании наших результатов не представляется возможным сделать однозначные выводы о спинах возбужденных состояний ^{151}Gd . Такие выводы не следуют пока и из предварительных измерений угловых корреляций гамма-переходов в ядре ^{151}Gd [31]. Однако, измеренное значение спина основного состояния ^{151}Tb $I = 1/2$ [32], как и приписание основному состоянию ^{151}Tb по модели оболочек квантовых характеристик $I^\pi = 3/2^+ (d3/2)$ не противоречит предположенным спинам возбужденных состояний ^{151}Gd .

Ядро ^{151}Gd находится на границе области деформированных ядер, где можно ожидать проявления свойств, присущих как сферическим, так и деформированным ядрам. На современном этапе трудно дать определенную интерпретацию природы уровней этого ядра. Рассмотрим более подробно свойства его нижних состояний и уровня с энергией 839,3 кэв.

Основному состоянию ^{151}Gd следует приписать квантовые характеристики $7/2^- (f7/2)$. Это следует из модели оболочек Майер и из сравнения с соседними ядрами $^{143}_{60}\text{Nd}_{83}$, $^{145}_{62}\text{Sm}_{83}$, $^{145}_{60}\text{Nd}_{85}$, $^{147}_{62}\text{Sm}_{85}$ и $^{149}_{62}\text{Sm}_{87}$ [33]. В работе [5] указывается, что три нижних состояния ^{151}Gd (0 кэв, $I^\pi = 7/2^-$; 108,1 кэв, $I^\pi = 5/2^-$ и 395,2 кэв, $I^\pi = 3/2^-$), напоминают конфигурационный мультиплет $f7/2^{-3}$. Однако, возможна и другая интерпретация этих уровней ^{151}Gd . Сравнение парциального периода полураспада первого возбужденного состояния ^{151}Gd для E2-перехода [8, 9] с теоретическими расчетами по Мошковскому указывает на значительное ускорение E2-перехода с первого возбужденного состояния (108,1 кэв, $I^\pi = 5/2^-$) на основное. Ускорение получено равным ~ 50 [9] без учета и ~ 300 [8] с учетом статистического множителя S . Наблюдение ускорения для E2-перехода с энергией 108,1 кэв, как отмечается в работе [8], позволяет интерпретировать возбужденные состояния с энергией 395,2 кэв ($3/2^-$), 108,1 кэв ($5/2^-$) и основное состояние ($7/2^-$) ^{151}Gd на основе модели для нечетных ядер, предложенной Де Шалитом [34]. Часть состояний в нечетных сферических ядрах можно описывать согласно этой модели, предполагая существование слабой связи между нечетной частицей и колебаниями остова ядра.

Завышенное значение КВК для перехода с энергией 443,8 кэв, разряжающего уровень с энергией 839,3 кэв ($3/2^-$) позволяет предположить также, как и в работе [5], мультипольность этого перехода типа E2+E0. Как отмечалось в [5], возможно, что уровень с энергией 839,3 кэв является бета-вибрационным состоянием. С другой стороны согласно работе [8], переход с энергией 443,8 кэв по сравнению с оценкой по Мошковскому для перехода типа E2 оказался несколько замедленным (фактор запрета $F = 2,5$), что находится в противоречии с предположением о бета-вибрационной природе уровня с энергией 839,3 кэв. По-видимому, это противоречие снимется, если предположить, что ядро ^{151}Gd имеет небольшую деформацию, тогда следует проводить сравнение парциальных периодов полураспада для перехода с энергией 443,8 кэв экспериментального и рассчитанного по формуле Нильссона. Известно [35], что в деформированных ядрах переходы типа E2, которые, как правило, характеризуются небольшими ускорениями относительно оценки Мош-

ковского, а иногда и заторможены, часто оказываются сильно ускоренными относительно оценок по Нильссону; это ускорение может достигать трех и даже четырех порядков. Очевидно, что решение вопроса о природе уровня с энергией 839,2 кэВ требует дальнейших исследований.

В заключение авторы приносят искреннюю благодарность доктору физико-математических наук К. Я. Громову за полезные дискуссии при выполнении работы, Г. И. Лизурею, К. Зубер, Х. Штрусному за помощь в проведении ряда измерений, В. Михайловой и Я. Квашинику за приготовление препаратов на отдельных этапах работы, Е. Лебедевой за оформление рисунков.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] J. W. Mihelich, B. Harmatz, T. H. Handley, *Phys. Rev.*, **103**, 989 (1957).
- [2] Н. М. Антеньева, А. А. Башилов, Б. С. Джелепов, Б. К. Преображенский, *ДАН СССР*, **119**, 241 (1958).
- [3] А. Т. Стригачев, Л. С. Новиков, А. А. Сорокин, В. А. Халкин, Н. В. Цветкова, В. С. Шпинель, *Изв. АН СССР (сер. физ.)*, **25**, 813 (1961).
- [4] B. Harmatz, T. H. Handley, J. W. Mihelich, *Phys. Rev.*, **128**, 1136 (1962).
- [5] К. Вильский, В. В. Кузнецов, О. Б. Нильсен, О. Скилбрайт, В. А. Халкин, *ЯФ*, **6**, 672 (1967).
- [6] Б. С. Джелепов, И. А. Тишкин, И. А. Шишелов, *Программа и тезисы докладов XVII ежегодного совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра*, стр. 59, Изд. Наука, Ленинград 1967.
- [7] J. Kormicki, H. Niewodniczański, Z. Stachura, K. Zuber, A. Budziak, *Nuclear Phys.*, **A100**, 297 (1967).
- [8] В. А. Морозов, Т. М. Муминов, В. И. Разов, *Препринт ОИЯИ*, 6—4406, 1969.
- [9] А. Баланда, М. Гонсдор, В. В. Кузнецов, Г. И. Лизурей, В. Менчински, М. Михайлов, *Acta Phys. Polon.*, **36**, 1099 (1969).
- [10] К. Я. Громов, Г. И. Исхаков, В. В. Кузнецов, М. Я. Кузнецова, Э. З. Рындина, В. И. Фоминых, М. Михайлов, *Препринт ОИЯИ*, 6—4756, 82, 1969.
- [11] М. Гонсдор, К. Я. Громов, В. В. Кузнецов, М. Я. Кузнецова, М. Михайлов, А. В. Потемпа, *Препринт ОИЯИ*, 6—4756, 78, 1969.
- [12] P. O. Tjøm, V. Elbek, *Nat. Fys. Medd. Dan. Vid. Selsk.*, **36**, 8 (1967).
- [13] В. С. Александров, Ф. Дуда, О. И. Елизаров, Г. П. Жуков, Г. И. Забиякин, З. Зайдлер, И. Звольски, Е. Т. Кондрат, З. В. Лысенко, В. И. Приходько, В. Г. Тишин, В. И. Фоминых, М. И. Фоминых, В. М. Цупко-Ситников, *Изв. АН СССР (сер. физ.)*, **34**, 69 (1970).
- [14] M. Gąsior, *Postępy Techniki Jądrowej*, **9-10**, 859 (1964) (in Polish).
- [15] Б. К. Преображенский, О. М. Лилова, А. Н. Добролюбова, Е. Д. Тетерин, *ЖАХ*, **1**, 2294 (1956).
- [16] В. П. Афанасьев, А. Т. Василенко, И. И. Громова, Ж. Т. Желев, В. В. Кузнецов, М. Я. Кузнецова, Л. Мончка, Ю. Поморски, В. И. Райко, А. В. Ревенко, В. М. Сороко, В. А. Уткин, *Препринт ОИЯИ*, 13—4763, 1969.
- [17] J. Adam, V. G. Chumin, Yu. N. Denisov, M. Finger, K. Ya. Gromov, M. Ya. Kuznetsova, Lu Si-ting, *Preprint JINR*, G-2494, 1965.
- [18] P. H. Barker, R. D. Connor, *Nuclear Instrum. Methods*, **57**, 147 (1967).
- [19] Б. С. Джелепов, Л. К. Пекер, *Схемы распада радиоактивных ядер, $A < 100$* , **149**, изд. Наука М-Л, 1966.
- [20] P. Alexander, F. Boehm, *Nuclear Phys.*, **46**, 108 (1963).

- [21] L. B. Magnusson, *Phys. Rev.*, **107**, 161 (1957).
- [22] К. Я. Громов, Б. М. Сабиров, Я. Я. Урбанец, *Изв. АН СССР (сер. физ.)*, **33**, 1646 (1969).
- [23] E. W. A. Lingeman, J. Konijn, P. Polak, A. H. Warstra, *Nuclear Phys.*, **A133**, 630 (1969).
- [24] П. Галан, М. Я. Кузнецова, М. Фингер, И. Юрсик, *Препринт ОИЯИ*, Р6—3479, 1967; *Czech. J. Phys.*, **B19**, 232 (1969).
- [25] К. Я. Громов, В. В. Кузнецов, Н. Ненов, О. Б. Нильсен, О. Скилбрайт, В. И. Фоминых, Д. Христов, *Изв. АН СССР (сер. физ.)*, **31**, 1716 (1967).
- [26] I. Adam, K. S. Toth, R. A. Meyer, *Phys. Rev.* **159**, 985 (1967).
- [27] Н. А. Головков, К. Я. Громов, Н. А. Лебедев, Б. Махмудов, А. С. Руднев, В. Г. Чумин, *Изв. АН СССР (сер. физ.)*, **31**, 1618 (1967).
- [28] К. Я. Громов, И. Махунка, М. Махунка, Т. Фенеш, *Изв. АН СССР (сер. физ.)*, **29**, 194 (1965).
- [29] K. S. Toth, J. O. Rasmussen, *Nuclear Phys.*, **1**, 474 (1960).
- [30] R. D. Macfarlane, D. W. Seegmiller, *Nuclear Phys.*, **53**, 449 (1964).
- [31] Э. Божек, Е. Гольчевски, А. З. Хрынкевич, М. Рыбicka, Я. Стычень, С. Шимчик, Р. Кулесса, Б. Стычень, *Программа и тезисы докладов XX — ежегодного совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра* (ч. 1) Изд. Наука, Ленинград, 106, 1970.
- [32] I. Lindgren, H. Nyqvist, A. Rosen, K. E. Adelroth, C. Ekström, M. Olsmats, B. Wannberg, *Atomic-beam measurements in the rare earth region*, Göteborg, Uppsala (Sweden, 1969).
- [33] Б. С. Дзелепов, Л. К. Пекер, В. О. Сергеев, *Схемы распада радиоактивных ядер, $A \geq 100$* , Изд. АН СССР, М-Л, 1963.
- [34] A de Shalit, *Phys. Rev.*, **122**, 1530 (1961).
- [35] Э. Е. Берлович, *Времена жизни уровней и структура ядра*, в сб. „Структура ядра“, стр. 15, Изд. ФАН, Ташкент 1969.