

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

96-60

P6-96-60

И.Адам, З.А.Салех¹, В.Г.Калинников, А.Н.Приемышев,
В.С.Пронских, В.И.Стегайлов, Ю.А.Ваганов, П.Чалоун,
Я.Франа², М.Б.Юлдашев

СХЕМА РАСПАДА $^{157}\text{Dy} \rightarrow ^{157}\text{Tb}$

Направлено в журнал «Zeitschrift für Physik»

¹Научно-исследовательский ядерный центр, Каир, Египет

²Институт ядерной физики АН ЧР, Ржеж, Чехия

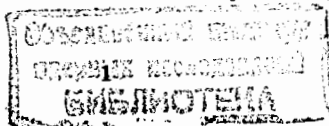
Исследован распад ^{157}Dy ($T_{1/2}=8.14(4)\text{ч}$). Использовался радиоактивный источник, масс-сепарированный из диспрозиевой фракции, которая была хроматографически выделена из танталовой мишени, облученной протонами на фазотроне ОИЯИ. Выполнены измерения спектров γ -лучей, электронов внутренней конверсии и γ - γ -совпадений. К распаду ^{157}Dy приписано 78 γ -переходов, из них 53 наблюдаены впервые. Определены типы мультипольностей 40 переходов, при этом у переходов 983.50 и 991.70 кэВ обнаружены E0 примеси. Результаты γ - γ -совпадений позволили существенно дополнить схему распада. Введены четыре новых состояния ^{157}Tb : 883.32, 895.06, 925.29, 970.38 кэВ и подтверждается существование уровня 357.66 кэВ.

По энергетическому балансу введены уровни 1160.71 и 1318.62 кэВ. Предположительно введены новые уровни 252.58, 327.65, 658.4, 793.5 и 922.72 кэВ.

1. Гамма-лучи

Измерение спектров γ -лучей выполнено различными HPGe-детекторами: детектором с эффективностью $\epsilon_{\gamma}=20\%$, $\Delta E_{\gamma}=1.8$ кэВ (^{60}Co) и с бериллиевым окном толщиной 0.5 мм, детектором с $\epsilon_{\gamma}=27\%$, $\Delta E_{\gamma}=1.9$ кэВ и планарным детектором (диаметр активной области - 6 мм, ее толщина - 7.5 мм) с бериллиевым окном толщиной 20 мкм, $\Delta E_{\gamma}=240$ эВ при $E_{\gamma}=6.1$ кэВ. Выполнено несколько серий измерений спектров: без фильтров и с фильтрами (1мм Cd + 1мм Cu, 10мм Pb + 1мм Cd + 1мм Cu и 1мм Sn). Измерения длились от 20 до 40 часов, в течение которых прослеживалось убывание интенсивности γ -лучей. Условия измерений простых спектров γ -лучей и количество наблюдаемых примесей дано в табл.1. На рис.1 и рис.2 представлены некоторые из измеренных γ -спектров.

К распаду ^{157}Dy приписано 78 γ -перехода, из них 53 на-



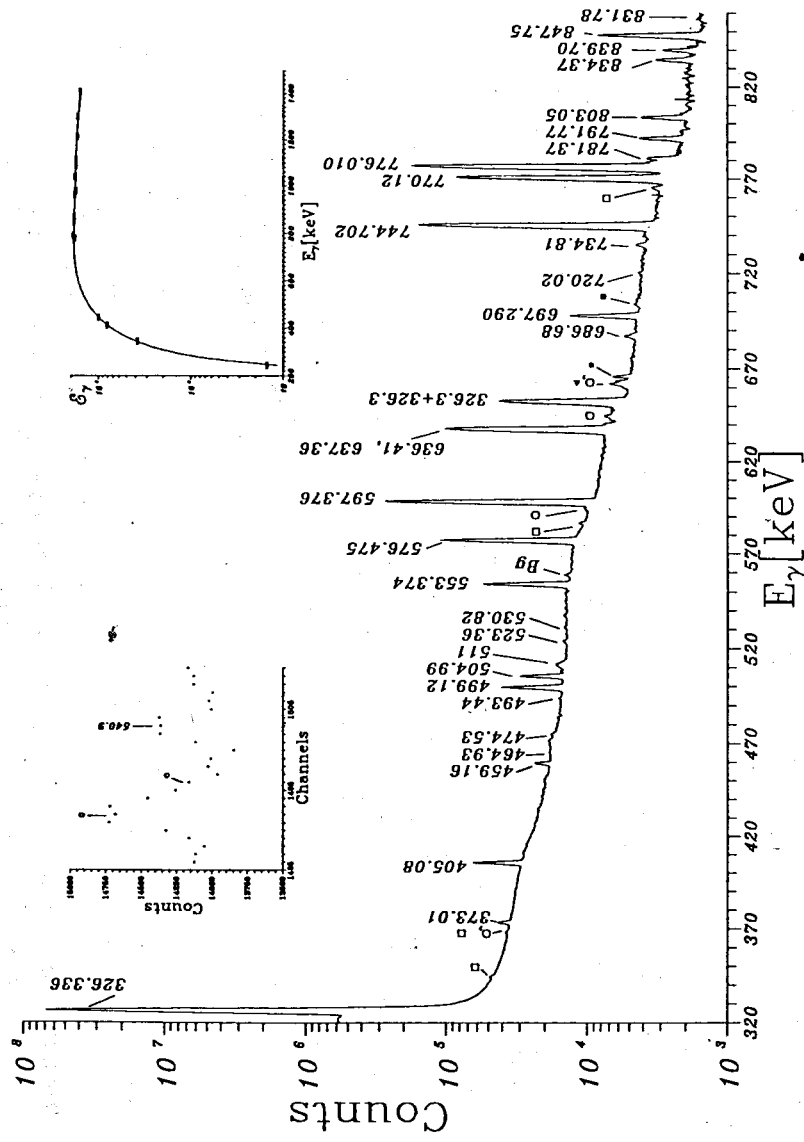


Рис.2

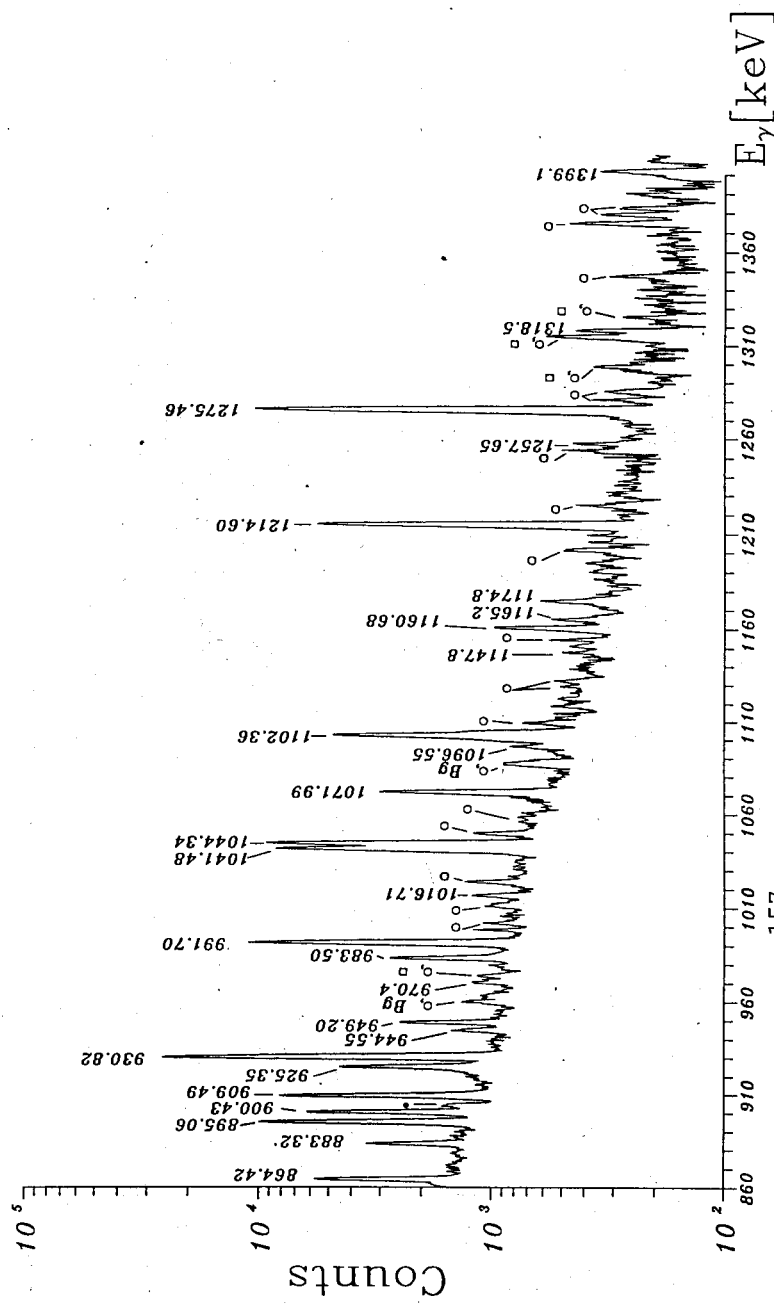
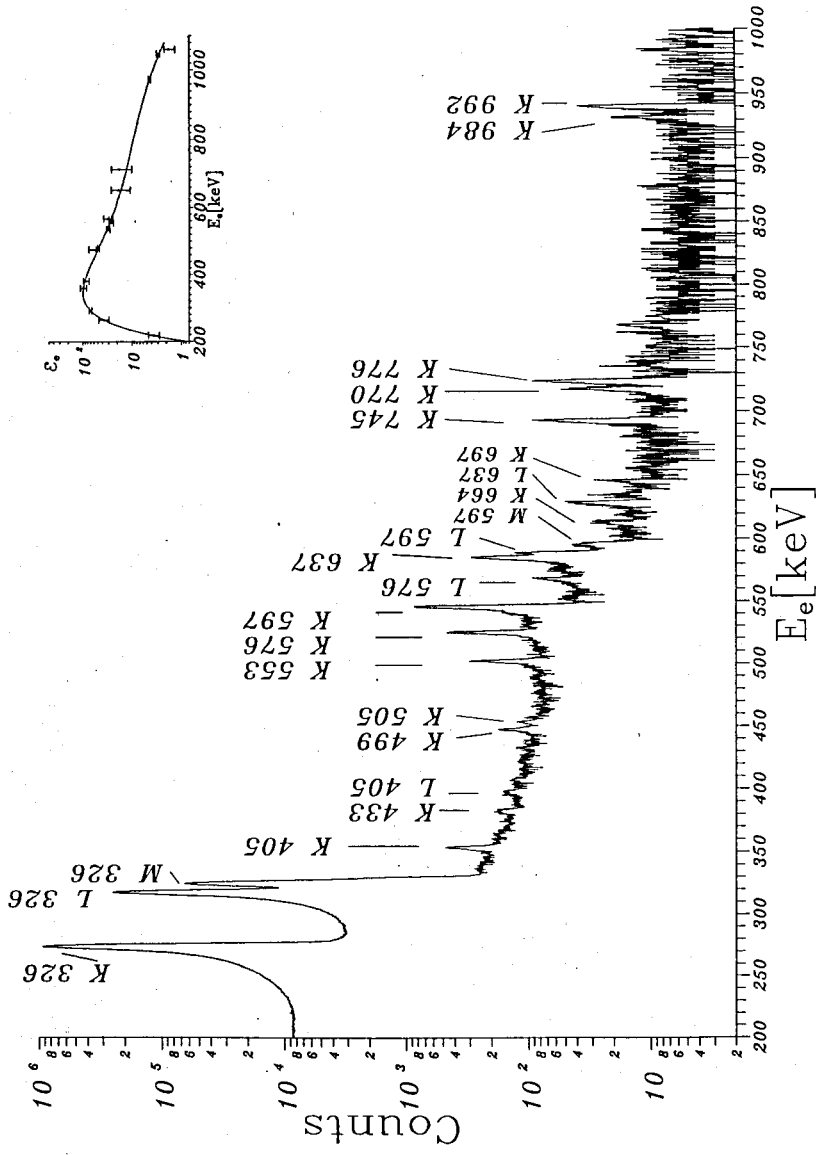
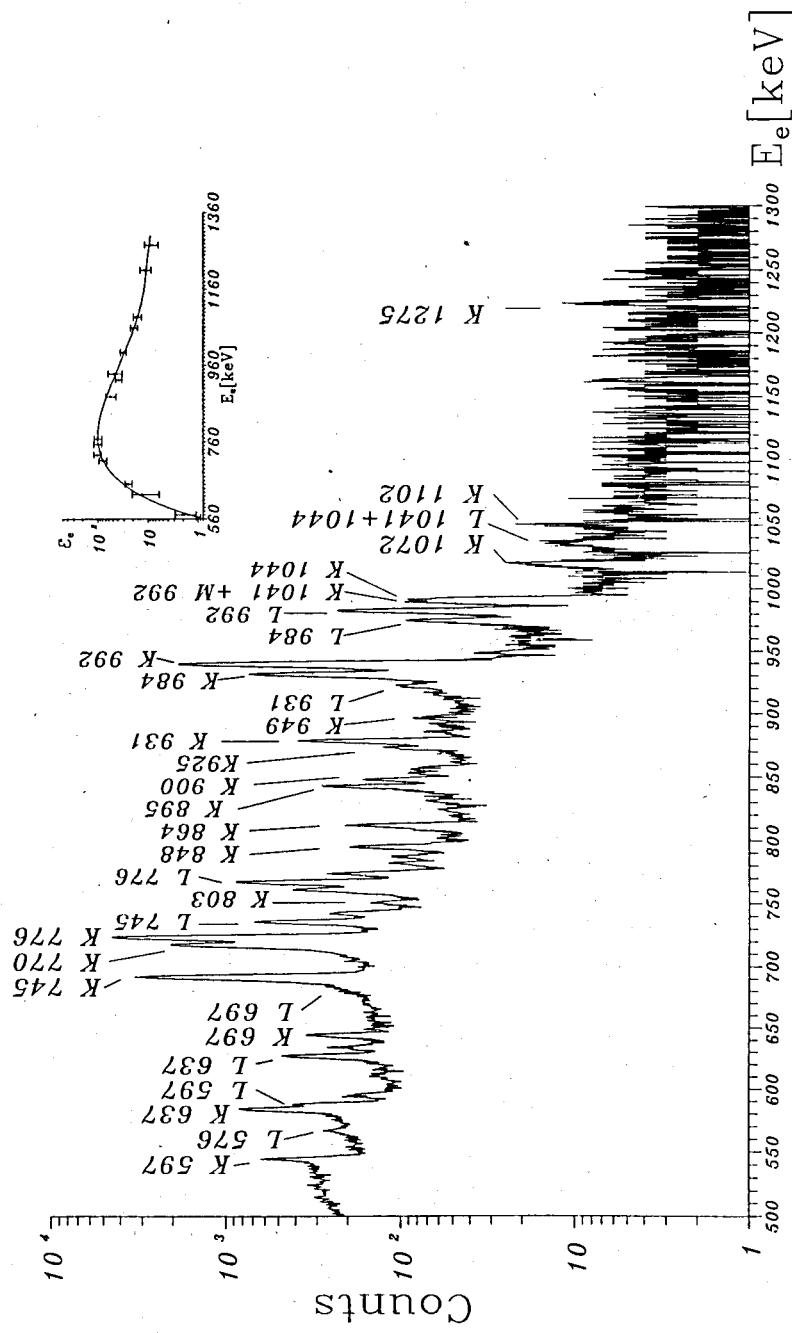


Рис.2. γ -спектр ^{157}Dy , снятый на HPGe детекторе ($\epsilon_\gamma=20\%$, $\Delta E_\gamma=1.8\text{кэВ}$ (^{60}Co), фильтр: $1\text{мм}(\text{Cu}) + 1\text{мм}(\text{Cd}) + 10\text{мм}(\text{Pb})$); \square - ^{152}Tb , \blacksquare - ^{155}Tb , \circ - ^{153}Dy , \bullet - ^{155}Dy , \blacktriangle - ^{137}Cs .



9

Рис. 3



7

Рис. 3. Спектры ЭВК распада ^{157}Dy , снятые на Si(Li) детекторе ($\Delta E_e = 2.6$ кэВ при $E_e = 1$ МэВ) с миниатюрным в двух областях энергий: от 300 до 800 кэВ и от 600 до 1200 кэВ.

блюжены впервые (см. табл.2). Определен предел интенсивности ряда γ -переходов, которые могли бы соответствовать разрядке возбужденных состояний ^{157}Tb (см. табл.8). Точность определения энергий и интенсивностей γ -переходов примерно от 4 до 125 и от 1.2 до 100 раз выше по сравнению с работой [1]. Среднее значение отношения σ (работа[2])/ σ (наша работа) для энергий меняется от 0.7 до 17 раз и для интенсивностей от 1 до 64 раз, соответственно. Энергии и относительные интенсивности γ -лучей, определенные нами и в работе [2], совпадают в большинстве случаев в пределах значения одной ошибки, за исключением интенсивности γ -переходов с энергией меньше 300 кэВ. Самая большая разность почти 8σ наблюдается для I_γ переходов с энергией 60.9 и 83.0 кэВ. Относительные интенсивности переходов с $E_\gamma < 330$ кэВ измерялись нами планарным детектором и HPGe-детектором большого объема. В пределах ошибок соответствующие значения интенсивностей совпадают, что подтверждает правильность наших результатов. Неточность I_γ для $E_\gamma < 300$ кэВ в работе [2] возникает, вероятно, как следствие резкого изменения кривой эффективности использовавшегося ими Ge(Li)-детектора в области низких энергий, в то время как для нашего HPGe-детектора имеет место существенно более плавное изменение кривой эффективности в данной области энергий γ -лучей. Надежность определения E_γ и их ошибки σE_γ подтверждаются расчётом по методу наименьших квадратов энергий 19 уровней ^{157}Tb , между которыми размещено 56 переходов ($\chi^2=0.54$).

2. Электроны внутренней конверсии и мультипольности переходов

Измерение ЭВК проводилось с помощью Si(Li)-детектора ($\Delta E_e=2.6$ кэВ при $E_e=1$ МэВ) и с мини-апельсином [11] в двух разных областях энергий (от 300 до 800 кэВ и от 600 до 1200 кэВ). Спектры ЭВК распада ^{157}Dy приводятся на рис.3а и 3б; на вставках показана кривая эффективности мини-апельсина,

ТАБЛИЦА 2

E_γ (ΔE_γ) [кэВ]	I_γ (ΔI_γ)	I_K (ΔI_K)	XL
60.882 (3)	191 (5)	133 (3) *	M1
83.041 (4)	283 (6)	76 (5) *	M1
143.922 (10)	67 (6)	1.64 (9)	E2
171.20 (4)	3.5 (16)		
182.424 (9)	1430 (40)	7.1 (4)	E1
201.44 (4)	1.02 (21)		
207.31 (3)	1.82 (31)		
243.78 (4)	3.4 (5)		
245.96 (4)	1.2 (3)		
265.469 (9)	183 (4)	0.65 (4)	E1
266.766 (20)	22.5 (8)		M1
273.09 (4)	3.6 (7)		
285.96 (5)	1.7 (4)		
287.7 (2)	0.98 (35)		
296.784 (11)	41.1 (8)	0.062 (8)	E1
300.7 (2)	1.3 (5)		
326.336 (9)	10E+05	100 (6)	E1
333.03 (6)	0.70 (11)		
373.01 (4)	6.26 (23)		
405.08 (2)	23.2 (5)	0.0132 (9)	E1
459.16 (4)	2.50 (21)	0.0017 (5)	E1
464.93 (17)	0.16 (7)		
493.440 (20)	0.16 (2)		
499.12 (4)	10.77 (26)	0.0043 (5)	E1
504.99 (2)	6.23 (16)	0.0026 (4)	E1
523.36 (3)	0.39 (6)		
530.82 (9)	0.26 (4)		
540.9 (2)	0.11 (3)		
548.91 (8)	0.19 (6)		
553.374 (10)	15.7 (3)	0.0138 (17)	90 (12) *E2+M1
576.475 (9)	35.2 (7)	0.0345 (24)	65 (7) *E2+M1
597.376 (8)	90.9 (19)	0.096 (5)	42 (5) *E2+M1
636.41 (4)	15.9 (22)	0.022 (2)	M1
637.36 (3)	21.8 (21)	0.028 (3)	M1
686.68 (6)	0.36 (4)		
697.290 (10)	3.08 (9)	0.0020 (6)	60 (40) *E2+M1
720.02 (13)	0.06 (2)		
734.81 (6)	0.27 (3)		
744.702 (8)	52.0 (12)	0.0188 (11)	E2

ТАБЛИЦА 2 (продолжение)

$E_{\gamma} (\Delta E_{\gamma})$ [кэВ]	$I_{\gamma} (\Delta I_{\gamma})$	$I_K (\Delta I_K)$	XL
770.12 (3)	27.8 (6)	0.0103 (7)	E2
776.010 (10)	57.0 (12)	0.0219 (13)	95 (5) %E2+M1
781.37 (6)	0.20 (6)		
791.77 (7)	0.70 (5)		
803.05 (3)	0.75 (6)	0.00023 (6)	E2
834.37 (3)	0.52 (4)	0.00017 (3)	95 (23) %E2+M1
839.70 (5)	0.35 (5)	0.00019 (3)	
847.75 (5)	2.36 (8)	0.00059 (6)	E2
861.78 (9)	0.13 (4)		
864.42 (4)	1.50 (9)	0.00058 (8)	61 (24) %E2+M1
883.32 (3)	0.72 (4)	0.00007 (3)	E1
889.9 (3)	0.04 (1)		
895.06 (3)	3.10 (11)	0.00124 (8)	42 (14) %E2+M1
900.43 (3)	1.74 (8)	0.00055 (7)	77 (20) %E2+M1
909.49 (3)	2.26 (9)	0.00018 (5)	E1
922.78 (15)	0.12 (2)		
925.35 (6)	1.10 (5)	0.00047 (5)	M1
930.817 (30)	8.50 (23)	0.00202 (17)	E2
944.55 (6)	0.14 (4)		
949.20 (4)	0.52 (5)	0.00022 (8)	M1
970.4 (1)	0.12 (2)		
983.50 (6)	0.69 (3)	0.0068 (3)	M1+E0
991.703 (20)	3.45 (11)	0.0193 (11)	M1+E0
1016.71 (8)	0.14 (4)		
1041.477 (30)	2.90 (8)		
1044.340 (30)	3.24 (9)	0.0009 (2)	E2
1096.55 (7)	0.13 (1)		
1099.89 (6)	0.20 (4)		
1102.36 (6)	1.68 (7)	0.00017 (8)	E1
1147.78 (16)	0.05 (1)		
1160.68 (6)	0.19 (7)		
1171.5 (4)	0.04 (1)		
1174.79 (8)	0.13 (4)		
1214.60 (5)	2.20 (10)	0.00031 (11)	E2
1257.65 (13)	0.09 (1)		
1275.46 (6)	4.38 (12)	0.00023 (9)	E1
1318.50 (11)	0.12 (1)		

ТАБЛИЦА 3а

265.47 кэВ	$I_K (265.47)_{\text{ВЧ.}}$		
	E1	E2	M1
266.77 кэВ	0.269	0.95	1.76
$I_K (266.77)_{\text{ВЧ.}}$			
E1 0.033	0.302	0.98	1.80
E2 0.117	0.386	1.07	1.88
M1 0.217	0.486	1.17	1.98

$$I_K (265.47+266.77) = 0.65 (4)$$

ТАБЛИЦА 3б

636.41 кэВ	$I_K (636.41)_{\text{ВЧ.}}$		
	E1	E2	M1
637.36 кэВ	0.0035	0.0092	0.023
$I_K (637.36)_{\text{ВЧ.}}$			
E1 0.00478	0.0083	0.014	0.028
E2 0.0125	0.016	0.022	0.036
M1 0.0249	0.028	0.034	0.048

$$I_K (636.41+637.36) = 0.050 (4)$$

которая получена из анализа спектров ЭВК распада ^{152}Tb .

Для связи шкал интенсивностей ЭВК и γ -лучей использован коэффициент А, расчетное значение которого равно $A = \alpha_K = 11.4$ () для E1-перехода 326.34 кэВ. Сравнением экспериментальных и расчетных значений α_K установлены мультипольности 40 переходов, из них у 16 впервые, (см. табл.2). Переходы 265 и 636 кэВ оказались дублетными, относительные интенсивности их компонент удалось определить в спектре γ -лучей, однако остались неопределенными в спектре ЭВК. Несмотря на это неблагоприятное обстоятельство, вычисляя суммы интенсивностей К-конверсионных электронов в предположении разной мультипольности отдельных компонент (и отсутствия примеси M2 для перехода 265.47 кэВ) и сравнивая их с экспериментальными значениями, удалось определить мультипольности этих дублетных переходов (см. табл.3а,3б).

Мультипольный состав переходов 60.88 и 83.04 кэВ точно определен путем установления параметра смешивания δ^2 (E2/M1) из L структуры в работе [3]. С учетом значений δ^2 (60.88кэВ) = 0.011(3) и δ^2 (83.04кэВ) < 0.028 были определены I_{tot} для указанных выше переходов, с помощью соотношения:

$$I_{\text{tot}} = [(1 - \Delta) \alpha_{\text{tot}}^{\text{teor}}(\text{M1}) + \Delta \alpha_{\text{tot}}^{\text{teor}}(\text{E2}) + 1] I_{\gamma}^{\text{exp}}, \quad (1)$$

где $\Delta = \delta^2 / (1 + \delta^2)$. Получены значения полной интенсивности переходов с энергией 60.88 и 83.04 кэВ: $I_{\text{tot}} = 19.4(6)$ и $14.2(8)$, соответственно. Существенным образом уточнена величина E0 примеси у переходов 983.5 и 991.7 кэВ. Если предположить, что имеет место смесь мультипольности E0+E2, тогда параметр смешивания q^2 вычисляется по формуле:

$$q^2 = W_K(\text{E0}) / W_K(\text{E2}) = (\alpha_K(\text{exp}) - \alpha_K(\text{E2})) / \alpha_K(\text{E2}), \quad (2)$$

где $W_K(\text{E0})$ и $W_K(\text{E2})$ - вероятности E0 и E2 - компонент конверсионных электронов.

А в случае смешивания E0+M1+E2 имеет место соотношение:

ТАБЛИЦА 4
переходы с E0 примесью

Уровень [кэВ]	E_{γ} [кэВ]	$I_i \rightarrow I_f$	$\alpha_K^{\text{экс.}} \times 10^3$	q^2		$X(\frac{E0}{E2})$	Ω_K
				эксперимент	выч. [4]		
991.699	991.70	3/2 ⁺ → 3/2 ⁺	64(3)	24.7(15) ^{a)} 49(3) ^{b)}	12.4	2.5(1)	0.514
1044.35	983.50	5/2 ⁺ → 5/2 ⁺	113(8)	43(3) ^{a)} 86(6) ^{b)} 310(50) ^{c)}	174.1	4.2(3)	0.510

a) только E2 примесь.

b) $\delta^2 = 1.0$

c) $\delta^2 = 0.16(2)$

ТАБЛИЦА 5

Детектор i-j	$k \cdot \omega_i \cdot \omega_j \times 10^4$
1-5	7.4(8)
2-5	2.1(3)
3-5	1.85(28)
4-5	1.97(29)
2-1	1.7(3)
3-1	3.2(6)
4-1	2.3(6)
5-1	5.6(9)

1-CANBERRA, 2,3,4-Ge(Li), 5-ORTEC;
калибровка по каскаду $\gamma\gamma$ (326.34, 776.01).

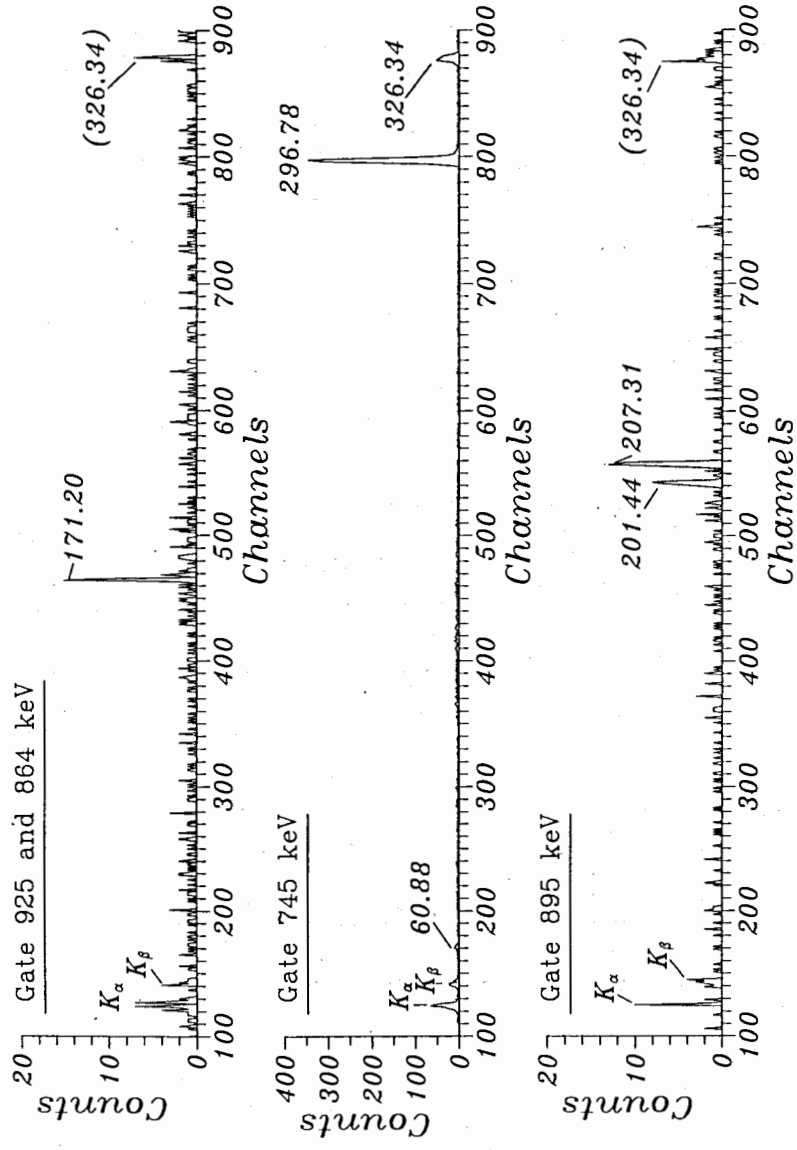


Рис. 4

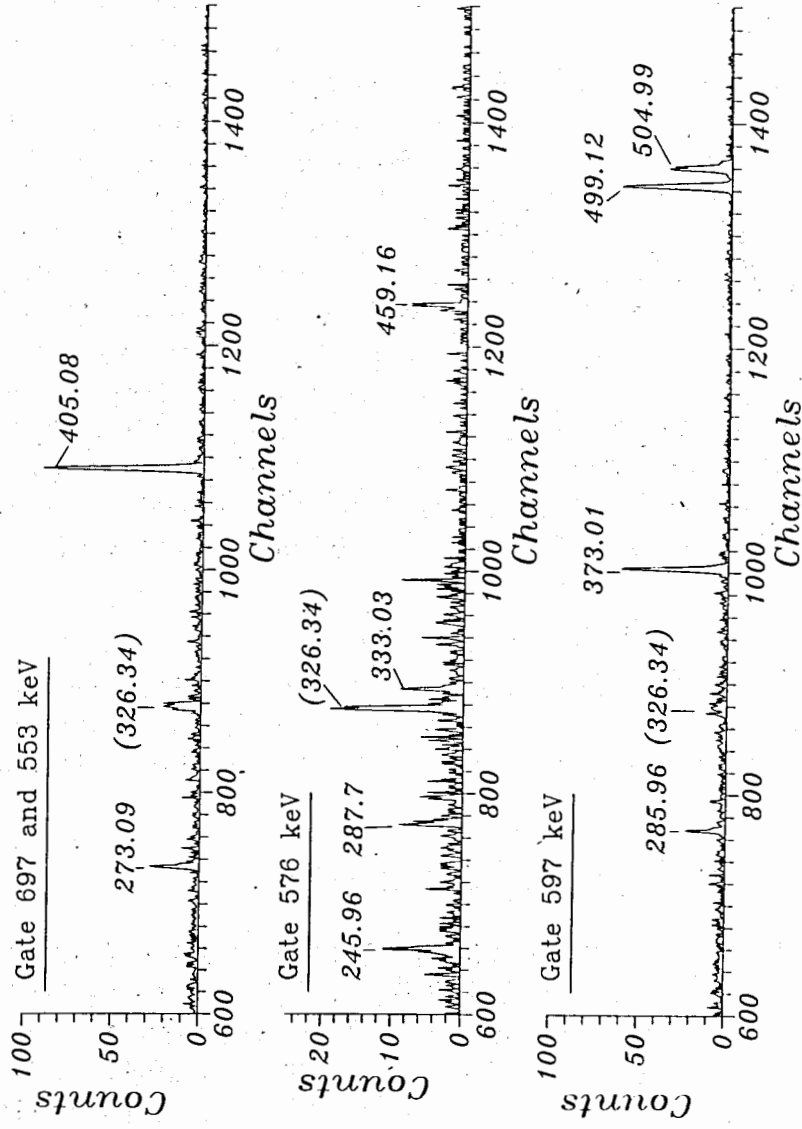


Рис. 4. Спектры γ - γ -совпадений при распаде ^{157}Dy с выбранными "окнами"

$$q^2 = W_K(E0) / W_K(E2) =$$

$$= ((\alpha_K(\text{exp}) \cdot (1 + \delta^2) - \alpha_K(M1) - \delta^2 \cdot \alpha_K(E2)) / \alpha_K(E2) \cdot \delta^2, \quad (3)$$

где $\delta^2 = I_\gamma(E2) / I_\gamma(M1)$. К сожалению, точность измеренных нами коэффициентов конверсии α_K и α_L для переходов 983.50 и 991.70 кэВ не позволяет определить параметр смешивания δ^2 . Поэтому, чтобы оценить возможные пределы изменения значений параметра q^2 , предполагаем в другом варианте расчета, что $\delta^2 = 1$ (см. табл.4). Применяя правила Алаги мы нашли, что переход 983.50 кэВ имеет, вероятно, смесь мультипольностей 86% M1 + 14% E2 и переход 991.70 кэВ имеет, вероятно, мультипольность E2. В табл.4 дано значение параметра смешивания q^2 , вычисленное в предположении, что переход 983.50 кэВ имеет 14(2)0 E2 мультипольности. В работе [4] вычислены значения параметра q^2 для рассматриваемых переходов с использованием модели независимых квазичастиц. Наблюдается удовлетворительное согласие экспериментальных и теоретических значений параметра q^2 , см. табл.4. Безразмерный параметр Расмуссена $X(E0/E2)$ вычисляется по формуле, приведенной в работе [5]:

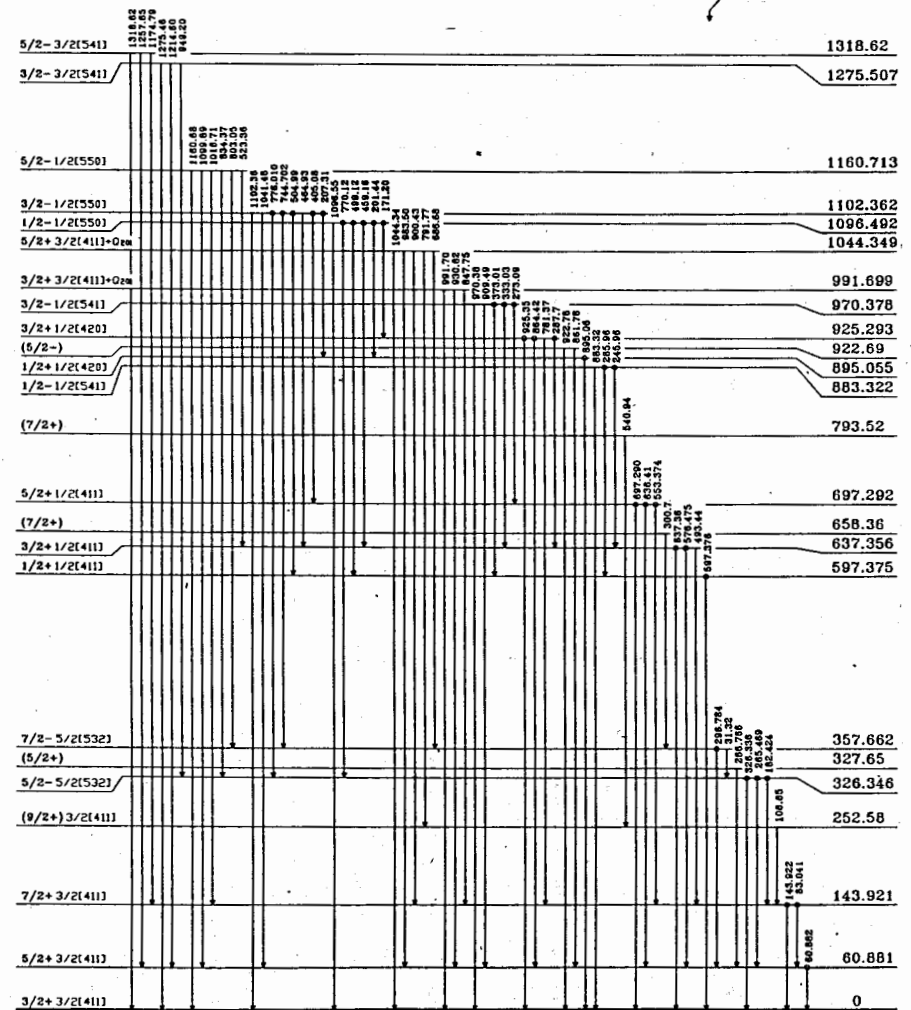
$$X(E0/E2) = 2.54 \cdot 10^9 \cdot A^{4/3} \cdot E_\gamma^5 \cdot q^2 \cdot \alpha_K(E2) / \Omega_K, \quad (4)$$

здесь E_γ дается в [МэВ] (см. табл.4). Полученные значения параметра $X(E0/E2)$ больше единицы, хотя для четно-четных деформированных ядер этот параметр, как правило, меньше единицы.

3. Гамма-гамма-совпадения

Измерения γ - γ -совпадений проводились с пятью детекторами (1^{ый} и 5^{ый} HPGe с эффективностью 20% и 27%, соответственно, а 2^{ой}, 3^{ий} и 4^{ый} Ge(Li) с эффективностью 5 - 6%). Совпадения представляют сумму совпадений следующих пар детекторов: 1+2, 1+3, 1+4, 1+5, 5+1, 5+2, 5+3, 5+4. Другие комбинации пар не учитывались из-за незначительного статис-

3/2-3/2(521) B.1 h
157
66 Dy₉₁ EC



157
65 Tb₉₂

Рис.5. Схема распада $^{157}\text{Dy} \rightarrow ^{157}\text{Tb}$. (знаками "•" помечены γ -переходы, которые проявились в γ - γ -совпадениях).

ТАБЛИЦА 6

E_{γ} (a) [кэВ]	E_{γ} (b) [кэВ]	$\Gamma_{\gamma\gamma}^{\text{ЭКС}}$ (a, b)	$\Gamma_{\gamma\gamma}^{\text{ВЫЧ.}}$ (a, b)
326.34	744.70	0.72 (25)	0.99 (2) *
	770.12	2.7 (8)	2.70 (4)
	776.01	\equiv 5.5 (18)	5.53 (9)
553.37	60.88	0.14 (6)	0.145 (3)
	83.04	0.33 (10)	0.292 (5)
	143.92	0.09 (6)	0.069 (7)
	273.09	0.17 (8)	0.16 (3)
	405.08	1.04 (30)	1.032 (15)
576.48	60.88	0.26 (12)	0.347 (6)
	245.96	0.07 (4)	0.073 (18)
	287.95	0.06 (4)	0.061 (24)
	333.03	0.05 (3)	0.042 (6)
	459.16	0.17 (9)	0.151 (13)
597.29	285.96	0.13 (7)	0.17 (4)
	373.01	0.67 (22)	0.619 (22)
	499.12	1.0 (3)	1.061 (13)
	504.99	0.6 (2)	0.609 (12)
744.70	60.88	0.35 (12)	0.513 (13)
	296.78	3.9 (12)	5.10 (6)
	326.34	0.78 (27)	0.99 (2) *
864.42	60.88	>0.02	0.0148 (12)
	171.20	0.07 (3)	0.14 (7)
895.06	201.44	0.08 (3)	0.097 (13)
	207.31	0.13 (4)	0.174 (25)
925.35	171.20	0.04 (3)	0.10 (6)

ТАБЛИЦА 7

E_{γ} [кэВ]	Γ^{π}	$\Gamma_{\beta, \gamma}$ %	log ft	E_{γ} [кэВ]	XL	E_{γ} [кэВ]
60.881 (3)	5/2 ⁺	0.18 (15)	8.4	60.882 (3)	M1	0
143.921 (4)	7/2 ⁺	-0.03 (11)	>8.7	143.922 (10)	E2	0
				83.041 (4)	M1	60.881
252.58 (7)	(9/2 ⁺)	0.0021 (16)	10.2	108.65 (19)		143.921
326.346 (5)	5/2 ⁻	99.5 (21)	5.44	326.336 (10)	E1	0
				265.469 (9)	E1	60.881
				182.424 (9)	E1	143.921
327.65 (2)	(5/2 ⁺)	0.0236 (16)	9.1	266.766 (20)		60.881
357.662 (8)	7/2 ⁻	-0.004 (2)	>10	31.32		326.346
				296.784 (11)	E1	60.881
597.375 (7)	1/2 ⁺	0.0645 (19)	8.35	597.376 (8)	E2	0
637.356 (8)	3/2 ⁺	0.0503 (22)	8.41	637.36 (3)	M1	0
				576.475 (9)	M1	60.881
				493.44 (2)		143.921
658.36 (30)	(7/2 ⁺)	0.0010 (4)	10.1	300.7 (3)		357.662
697.292 (7)	5/2 ⁺	0.0076 (23)	9.1	697.290 (10)	E2, M1	0
				636.41 (4)	M1	60.881
				553.374 (10)	E2	143.921
793.52 (19)	(7/2 ⁺)	0.00011 (3)	10.9	540.94 (18)		252.578
883.322 (22)	1/2 ⁻ , 3/2 ⁻	0.0037 (5)	9.1	883.32 (3)	E1	0
				285.96 (5)		597.375
				245.96 (4)		637.356
895.055 (19)	1/2 ⁺ , 3/2 ⁺ , 5/2 ⁺	-0.0002 (5)	>10	895.06 (3)	E2	0
922.69 (8)	(5/2 ⁻)	0.00024 (6)	10.2	922.78 (15)		0
				861.78 (9)		60.881
925.293 (24)	3/2 ⁺ , 5/2 ⁺	-0.0007 (22)	>9	925.35 (6)	M1	0
				864.42 (4)	E2	60.881
				781.37 (6)		143.921
				287.7 (2)		637.356
970.378 (19)	3/2 ⁻	0.0130 (9)	8.4	970.38 (9)		0
				909.49 (3)	E1	60.881
				373.01 (4)		597.375
				333.03 (6)		637.356
				273.09 (4)		697.292
991.699 (16)	3/2 ⁺	0.0141 (2)	8.3	991.70 (2)	M1+E0	0
				930.82 (3)	E2	60.881
				847.75 (5)	E2	143.921
1044.349 (19)	5/2 ⁺	0.0067 (2)	8.5	1044.34 (3)	E2	0
				983.50 (6)	M1+E0	60.881
				900.43 (3)	E2	143.921
				791.77 (7)		252.578
				686.68 (6)		357.662

ТАБЛИЦА 7 (продолжение)

E_i [кэВ]	I^π	$I_\beta, \%$	log ft	E_γ [кэВ]	XL	E_f [кэВ]
1096.492 (17)	$1/2^-$, $3/2^-$	0.0454 (22)	7.5	1096.55 (7)		0
				770.12 (3)	E2	326.346
				499.12 (4)	E1	597.375
				459.16 (4)	E1	637.356
				201.44 (4)		895.06
171.20 (4)		925.293				
1102.362 (7)	$3/2^-$	0.1409 (17)	7.0	1102.36 (6)	E1, E2	0
				1041.48 (3)		60.881
				776.010 (10)	E2	326.346
				744.702 (8)	E2	357.662
				504.99 (2)	E1	597.375
				464.93 (17)		637.356
				405.08 (2)	E1	697.292
207.31 (3)		895.06				
1160.713 (16)	$5/2^-$	0.0021 (2)	8.5	1160.68 (6)		0
				1099.89 (6)		60.881
				1016.71 (8)		143.921
				834.37 (3)	E2	326.346
				803.05 (3)	E2	357.662
523.36 (3)		637.356				
1275.507 (28)	$3/2^-$, $5/2^-$	0.0069 (2)	6.8	1275.46 (6)	E1	0
				1214.60 (5)	E2, E1	60.881
				949.20 (4)	M1, E2	326.346
1318.62 (6)	$3/2^-$, $5/2^+$, $5/2^+$, $7/2^-$	0.00033 (6)	7.5	1318.50 (11)		0
				1257.65 (13)		60.881
				1174.79 (8)		143.921

тического вклада в сумму совпадений $N_{\gamma\gamma}$ и ухудшения энергетического разрешения при добавлении их в общую картину совпадений. Тогда интенсивность совпадений гамма-лучей с энергией $E_\gamma(a)$ и $E_\gamma(b)$ равна :

$$I_{\gamma\gamma}(a,b) = N_{\gamma\gamma}(a,b) / A_{\gamma\gamma}(a,b), \quad (5)$$

где $N_{\gamma\gamma}(a,b)$ - число зарегистрированных γ - γ -совпадений; $A_{\gamma\gamma}(a,b)$ - суммарная эффективность регистрации совпадений, зависящая от относительной эффективности регистрации $\gamma(a)$, $\gamma(b)$ -кванта в i -детекторе $\epsilon_i(E_\gamma(a))$, $\epsilon_i(E_\gamma(b))$, от телесного угла ω_i для i -го детектора и от нормировочной константы k . Для рассматриваемой комбинации пар детекторов можно записать следующее выражение для $A_{\gamma\gamma}(a,b)$:

$$A_{\gamma\gamma}(a,b) = k \cdot \left\{ \omega_1 \cdot \epsilon_1(E_\gamma(a)) \cdot \sum_{i=2}^5 \omega_i \cdot \epsilon_i(E_\gamma(b)) + \omega_5 \cdot \epsilon_5(E_\gamma(a)) \cdot \sum_{i=1}^4 \omega_i \cdot \epsilon_i(E_\gamma(b)) \right\} \quad (6)$$

Относительные значения произведений телесных углов $k \cdot \omega_i \cdot \omega_j$ рассчитаны для каждой пары детекторов i - j по измеренным отдельным интенсивностям совпадений $N_{i,j}$ (326,776) прямого каскада γ (326.34) - γ (776.01):

$$k \cdot \omega_i \cdot \omega_j = N_{i,j}(326,776) / (I_\gamma(326) \cdot I_\gamma(776) \cdot \epsilon_i(326) \cdot \epsilon_j(776)), \quad (7)$$

где $I_\gamma(326)$, $I_\gamma(776)$ - относительные интенсивности γ (326.34) и γ (776.01). Полученные значения приведены в табл.5. При их вычислении поправка на угловую корреляцию γ -лучей не производилась.

Интенсивности совпадений $I_{\gamma\gamma}^{\text{exp}}$ представлены в табл. 6, где приводятся и вычисленные значения $I_{\gamma\gamma}^{\text{calc}}$ в предположении размещения γ -переходов, указанном на рис.5 и в табл.7. Наблюдается хорошее соответствие экспериментальных и рассчитанных значений $I_{\gamma\gamma}$, что подтверждает правильное размещение 25 γ -переходов в схеме распада. Кроме того, из слабых совпадений $I_{\gamma\gamma}(744.70, 326.34)$, а также из факта, что полная

интенсивность перехода 744.70 кэВ больше, чем у 296.78 кэВ, можно предположить наличие перехода 31.3 кэВ с полной интенсивностью не менее 0.0097% на распад. С учётом данного предположения, теоретическая интенсивность совпадений $I_{\gamma\gamma}(744.70, 60.88) = 0.41(1)$, $I_{\gamma\gamma}(744.70, 296.78) = 4.09(5)$, что лучше соответствует опытным данным, так как без учёта перехода 31.3 кэВ получим интенсивности 0.51(1) и 5.10(6), соответственно.

На рис.4 показаны γ - γ -совпадения с выбранными "окнами". В некоторых сечениях проявляется малоинтенсивный пик 326.34 кэВ, который соответствует неполностью вычтенным случайным совпадениям или части комптоновского спектра, тогда энергия указанного пика поставлена в скобки.

4. Схема распада

Ранее введенные уровни (см. [3], [6]), возбуждающиеся при β -распаде ^{157}Dy , с энергиями 60.881, 143.921, 326.346, 597.375, 637.356, 697.292, 1096.492, 1102.362, однозначно подтверждаются результатами наших совпадений (см. табл.6). Существование уровня 357.66 кэВ, который в работе [6] был введён предположительно, подтверждается совпадениями перехода 744.70 кэВ с γ 296.78 и малоинтенсивными совпадениями перехода 744.70 кэВ с γ 60.88.

На основе γ - γ -совпадений введено четыре новых уровня в ^{157}Tb . Совпадения $\gamma\gamma(597.38, 285.96)$ и $\gamma\gamma(576.48, 245.9)$ позволяют ввести уровень с энергией 883.32 кэВ, который также разряжается в основное состояние ^{157}Tb . Уровень 895.06 кэВ введён из-за совпадений γ 895.06 с переходами 201.44 и 207.31 кэВ, которые разряжают надёжно установленные уровни 1096.49 и 1102.36 кэВ, соответственно. Уровень 925.29 кэВ введён на основе совпадений переходов 925.35 и 864.42 кэВ с γ 171.20, который разряжает уровень 1096.49 кэВ и из совпадений $\gamma\gamma(576.48, 287.7)$. Из совпадений переходов 597.38 кэВ с γ 373.01, 576.48 кэВ с γ 333.03, 553.37 и 697.29 кэВ с

γ 273.10 введён уровень с энергией 970.38 кэВ. Кроме того, в одиночном γ -спектре найден слабый переход с энергией 970.4 кэВ, направленный в основное состояние, а также переход 909.49 кэВ, который может идти на уровень 60.88 кэВ. Уровни 991.669, 1044.35 и 1275.51 кэВ введены в работе [6] на основе энергетического баланса лишь двух переходов. Мы подтверждаем данный баланс энергий переходов и уровней, используя примерно на порядок более точные энергии и связывая с уровнем 991.669 также новый переход 847.75 кэВ, с уровнем 1044.35 два новых перехода 686.68 и 900.43 кэВ и с уровнем 1275.51 новый переход 949.20 кэВ. Уровень 1160.71 кэВ введён нами на основе энергетического баланса шести γ -переходов: 1160.68, 1099.89, 1016.71, 834.37, 803.05, 523.36 кэВ. Уровень с энергией 1318.62 кэВ также введён нами из энергетических соображений по трем γ -переходам (1174.79, 1257.65, 1318.50 кэВ).

Г.Винтером и др. показано в работе [7], что в реакциях $(d, 2n\gamma)$, $(p, n\gamma)$ возбуждается несколько низколежащих уровней ^{157}Tb со спином $\leq 9/2$, которые в списке нами рассмотренных 21 уровней не появились. Эти уровни бы могли возбуждаться и при β -распаде ^{157}Dy . В работе [7] были определены их энергии, спины, четности, энергии и относительные интенсивности γ -переходов, которые их разряжают, (см. табл.8). Энергии γ -переходов и уровней определены в работе [7] с точностью от 0.1 до 0.4 кэВ. Нами была предпринята попытка их обнаружения. Результаты наших измерений даны в табл.7 и 8. В работе [7] также показано, что уровень 327.6 кэВ разряжается переходами 266.33 кэВ ($I_{\gamma}=4.6$) и 327.6 кэВ ($I_{\gamma}=10$) на уровни ротационной полосы основного состояния. Нами наблюдаются γ -лучи с энергией 266.766(20) кэВ ($I_{\gamma}=22.5$), что в пределах ошибки согласуется с энергией 266.3(3) кэВ [7]. Определена мультипольность M1 для рассматриваемого перехода, (см. табл.3а). Если переход 266.77 кэВ связан с уровнем 327.65 кэВ, $I^{\pi}=5/2^{+}$, тогда мы должны наблюдать и переход 327.65 кэВ с интенсивностью $I_{\gamma}=49$. Однако этот переход

ТАБЛИЦА 8

E _{уровня} [кэВ]	[7]			I _γ {I _γ (326.3)=10E+05}
	I ^π	E _γ [кэВ]	I _γ	
252.5	9/2 ⁺	108.6	44	1.5(6)
		191.6	15	< 2.3
327.6	5/2 ⁺	266.3	4.6	22.5(7)
		408.0	11	< 3.7
408.0	7/2 ⁺	408.0	2.4	< 2.5
		426.0	5.8	< 1.2
426.0	9/2 ⁻	68.3	5.8	< 1.2
		99.1	0.8	< 1.5
513.8	9/2 ⁺	282.1	20	< 0.9
		156.2	6	< 3.
513.8	9/2 ⁺	186.3	1.6	< 2.
		370.0	10	< 1.8
571.6	7/2 ⁻	453.0	2.1	< 2.
		214	3.2	< 0.9
571.6	7/2 ⁻	245.3	8.6	1.2(3) ^{a)}
		658.5	1.8	< 1.1
658.5	7/2 ⁺	251.1	1.8	< 1.1
		300.9	3.9	0.9(4)
709.1	9/2 ⁻	331.1	1.9	< 3.7
		137.3	1.2	< 1.2
709.1	9/2 ⁻	351.5	5.5	< 3.7
		793.7	3.7	0.10(3)
793.7	7/2 ⁺	541	3.7	0.10(3)
		650	4.7	< 1.1

a) На основе γ-γ-совпадений переход расположен между уровнями 883.32 и 637.36 кэВ.

ТАБЛИЦА 9

β-распад				Идентификация уровней [7]	
E _γ [кэВ]	E _f [кэВ]	E _i [кэВ]	log ft	(³ He, d) [кэВ]	I ^π _{к^π} [Nn _z Δ]
839.70(5) ^{b)}	0	839.70	10.3	837(3) ^{a)}	5/2 ⁺ 5/2 ⁺ [402]
861.78(9)	60.88	922.69	10.3	923(3) ^{a)}	5/2 ⁻ 1/2 ⁻ [541] ^{d)}
922.78(15)	0	922.69			
720.02(13)	326.35	1046.37	10.6	1047(3) ^{a)}	5/2 ⁺ 1/2 ⁺ [420]
734.81(6)	326.35	1061.16	9.86	1067(4)	7/2 ⁺ 1/2 ⁺ [420]
944.55(6)	60.88	1005.43	10.3	1004(3) ^{a)}	(5/2 ⁻ 1/2 ⁻ [541])
839.70(5) ^{b)}	326.35	1166.05	9.3	1164(5) ^{c)}	7/2 ⁻ 1/2 ⁻ [541]) ^{d)}

a) уровень определен также в работе [8].

b) Переход имеет двойное расположение.

c) уровень был определен только в работе [8].

d) Значения I^π_{к^π} [Nn_zΔ] взяты из работы [8].

замаскирован самым интенсивным переходом 326.34 кэВ, $I_{\gamma} = 10^5$, поэтому его обнаружение весьма затруднено. В γ -спектре нами обнаружены переходы 108.6, 300.7 и 540.9 кэВ и установлены предельные интенсивности конкурирующих с ними переходов 191.6, 251.1 и 650 кэВ, соответственно, см. табл. 8. Эти данные не противоречат возможности, что при β -распаде ^{157}Dy возбуждаются уровни 252.5 ($9/2^+$), 327.65 ($5/2^+$), 658.5 ($7/2^+$) и 793.7 кэВ ($7/2^+$). Поэтому вводим предварительно данные уровни в схему распада $^{157}\text{Dy} \rightarrow ^{157}\text{Tb}$. Следует заметить, что введение уровня 252.58 кэВ позволяет разместить два γ -перехода (540.94 и 791.77 кэВ), связанных с данным состоянием (см. табл. 7).

Из не размещенных в схеме распада переходов можно подобрать такие, которые могли бы быть связаны с разрядкой уровней, возбуждаемых в ядерных реакциях ($^3\text{He}, d$), (α, t) [8, 9] и (p, t) [10]. Однако в работах [8, 9, 10] энергии уровней определены с точностью 3-5 кэВ, поэтому только совпадение энергий уровней, наблюдаемых при β -распаде и в ядерных реакциях, не является достаточным аргументом для введения уровня, который возбуждался бы также и при β -распаде. Тем не менее, очень предварительно можно было бы предполагать, что до сих пор не размещенные переходы указывают на возможность возбуждения при β -распаде уровней: 839.70 - $5/2^+ 5/2^+$ [402], 922.69 - $5/2^- 1/2^-$ [541] (который разряжается двумя γ -переходами, и поэтому мы его предварительно включили в схему распада), 1046.37 - $5/2^+ 1/2^+$ [420], 1005.43 (нильссоновские квантовые числа неопределены), 1166.05 - $732^- 132^-$ [541] (этот уровень должен разряжаться γ -переходом 839.70 кэВ, однако, переходом с такой же энергией разряжается и уровень 839.70 кэВ). Ввиду того, что для уровня 1166.05 кэВ $\lg ft = 9.3$, это значение довольно низкое для двукратно запрещенного бета-перехода, даем предпочтение размещению γ 839.70 кэВ как прямого перехода, идущего на основное состояние (см. табл. 9). Однако, ввиду выше сказанного, мы эти уровни не включили (кроме уровня 922.69 кэВ) в схему распада ^{157}Dy , (см. табл. 7).

Определение спина, четности и нильссоновских квантовых характеристик низколежащих уровней ^{157}Tb осуществлено в работах [8, 9, 10] сравнением экспериментальных и вычисленных значений сечений реакций ($^3\text{He}, d$) и (α, t). Таким образом, можно однозначно установить ротационные полосы $3/2^+$ [411]: 0 кэВ с $I^{\pi} = 3/2^+$, 60.88 кэВ - $5/2^+$ и 143.92 кэВ - $7/2^+$; $5/2^-$ [532]: 326.35 кэВ - $5/2^-$, 357.66 кэВ - $7/2^-$; $1/2^+$ [411]: 597.38 кэВ - $1/2^+$, 637.36 кэВ - $3/2^+$, 697.29 кэВ - $5/2^+$ и $3/2^+$ [411] + Q_{201} : 991.70 кэВ - $3/2^+$, 1044.35 кэВ - $5/2^+$ (эти два уровня не наблюдаются в реакциях передачи одного протона, однако их коллективный характер подтверждается возбуждением в реакции (p, t) [10]). Все эти уровни возбуждаются также при β -распаде ^{157}Dy . Мультипольности всех переходов (см. табл. 2, 3), которые связывают указанные выше уровни, подтверждают правильность приписания им значений I^{π} .

Принимая указанные значения I^{π} для перечисленных уровней, нам удалось однозначно определить спин и четность для уровней 991.70 - $3/2^+$, 1044.35 кэВ - $5/2^+$ (разряжающиеся γ -переходами, мультипольный состав которых содержит компоненту $E0$), 970.378 - $5/2^+$, 1102.326 - $3/2^-$ и 1160.713 кэВ - $5/2^-$. Для остальных уровней, с энергией выше 700 кэВ, значения I^{π} установлены неоднозначно (см. табл. 7), однако мы приписываем их разным ротационным полосам, что позволяет присвоить им определенное значение π_I , которое выделено в табл. 7 жирным шрифтом. Спины и четности уровней 252.58, 327.65, 658.36, 793.52, 922.69 кэВ были определены в других работах, и поэтому в табл. 7 поставлены в скобки.

В адиабатической модели ротатора для отношения приведенных вероятностей разрешенных (по спину и квантовому числу K) β -переходов, которые идут на два уровня одной ротационной полосы, должны выполняться правила Алаги:

ТАБЛИЦА 10

$K_f^\pi [Nn_z \Lambda]$	I_f	E [кэВ]	I_β [%]	$\frac{ft(I_i \rightarrow I_f-1)}{ft(I_i \rightarrow I_f)}$	c
$3/2^+ [411]$	$3/2^+$	0	?	?	0.67
	$5/2^+$	60.88	0.18 (15)		
$1/2^+ [411]$	$1/2^+$	597.38	0.0645 (19)	0.87 (6)	0.8
	$3/2^+$	637.36	0.0503 (22)	0.18 (6)	
	$5/2^+$	697.29	0.0076 (23)		
$1/2^- [541]$	$1/2^-$	883.32	0.0037 (5)	5.7 (23)	0.8
	$3/2^-$	970.38	0.0130 (9)	0.011 (3)	
	$5/2^-$	922.69	0.00024 (6)		
$1/2^+ [420]$	$1/2^+$	895.06	0.0005 (3)	6 (5)	0.8
	$3/2^+$	925.29	0.0010 (20)		
$3/2^+ [411]$ $+Q_{201}$	$3/2^+$	991.70	0.0141 (2)	0.66 (7)	0.67
	$5/2^+$	1044.35	0.0067 (2)		
$1/2^- [550]$	$1/2^-$	1096.49	0.0454 (22)	3.3 (2)	0.8
	$3/2^-$	1102.36	0.1409 (17)	0.030 (3)	
	$5/2^-$	1160.71	0.0021 (2)		
$3/2^- [541]$	$3/2^-$	1275.51	0.0069 (2)	0.41 (14) ^{a)}	0.67
	$5/2^-$	1318.62	0.00033 (6)		

$$c = \frac{\langle I_i K_i \lambda (K_f - K_i) | I_f K_f \rangle^2}{\langle I_i K_i \lambda (K_f - K_i) | I_f - 1 K_f \rangle^2}$$

a) значение рассчитано для $Q=1369$ кэВ.

$$\frac{ft(I_i \rightarrow I_{f1})}{ft(I_i \rightarrow I_{f2})} = \frac{\langle I_i K_i \lambda K_{f2} - K_i | I_{f2} K_f \rangle^2}{\langle I_i K_i \lambda K_{f1} - K_i | I_{f1} K_f \rangle^2} \quad (8)$$

В случае электронного захвата, когда два β -перехода имеют небольшую энергию, можно на основе этого правила определить энергию распада материнского ядра Q . С этой целью использовались β -переходы $3/2^- 3/2^- [521] \rightarrow 5/2^- 3/2^- [541]$ ($E_{ур.} = 1318.62$ кэВ, $I_\beta = 0.00034(10)\%$) и $3/2^- 3/2^- [521] \rightarrow 3/2^- 3/2^- [541]$ ($E_{ур.} = 1275.507$ кэВ, $I_\beta = 0.0069(2)\%$). Теоретическое отношение для $\lambda=1$ равно 0.67, см. формулу (8). Экспериментальное значение равно 0.41(14): оно вычислено для $Q=1369(7)$ кэВ, что в пределах 3σ перекрывается со значением энергии распада $Q=1341(6)$ кэВ [1]. Для $Q=1341$ кэВ экспериментальное отношение $ft(3/2^- \rightarrow 3/2^-) / ft(3/2^- \rightarrow 5/2^-)$ равно 0.023(8). Сравнение этих экспериментальных отношений для других β -переходов с правилами Алаги приведено в табл. 10.

Значения $\lg ft$ даны в табл. 7. Они вычислены с использованием периода полураспада ^{157}Dy ($T_{1/2} = 8.14(4)$ ч) [1], энергии распада $Q=1354(10)$ (среднее значение между нашим результатом и данными [1]) и интенсивностей заселения уровней ^{157}Tb . Для некоторых уровней баланс интенсивностей получился отрицательным, но $|I_{\beta i}| < \sigma(I_{\beta i})$, тогда даны лишь нижние границы $\lg ft$, вычисленные в предположении, что $I'_{\beta i} = I_{\beta i} + \sigma(I_{\beta i})$.

В заключение авторы выражают глубокую благодарность В.М.Горожанкину за внимательное ознакомление с работой.

Литература

1. A.H.Wapstra, G.Audi-Nucl.Phys. A565(1993),1.
2. Ц.Вывлов и др.: "Спектры излучений радиоактивных нуклидов", изд."ФАН" Узбекской ССР, Ташкент 1980, стр. 233.
3. L.Persson, H.Ryde, K.Olsner-Ryde, Arkiv Fysik 24(1962),151.
4. G.Winter, H.Sodan, Nucl. Phys. A114(1968)629.
5. J.Lange, K.Kumar, J.H.Hamilton, Rev. Mod. Phys. 54 (1982) 119
6. P.H.Blichert-Toft, E.G.Funk, J.W.Mihelich, Nucl.Phys. A100(1967)369.
7. G.Winter, L.Funke, K.-H.Kaun, P.Kemnitz, H.Sodan. Nucl.Phys. A176 (1971), 609.
8. J.S.Boyno, J.R.Huizenga. Phys.Rev. C6 (1972), 1411.
9. J.C.Tippett, D.G.Burke, Can.J.Phys. 50(1972)3152.
10. R.W.Goles, R.A.Warner, Wm.C.McHarris, W.H.Kelly, Phys.Rev.Lett.29(1972)302.
11. Ж.Сэррээтэр, М.Б.Юлдашев, В.М.Горожанкин, К.Я.Громов, В.Г.Калинников, В.В.Кузнецов, Б.П.Осипенко, В.И.Фоминых. Препринт ОИЯИ Р13-94-267.

Рукопись поступила в издательский отдел
22 февраля 1996 года.