

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



3/III-75

A-465

P6 - 8384

771/2-75

В.С.Александров, Ц.Вылов, И.И.Громова,
А.А.Ключников, А.Ф.Новгородов, А.И.Феоктистов

ИССЛЕДОВАНИЕ
РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА ^{149}Gd

1974

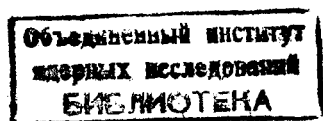
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

P6 - 8384

В.С.Александров, Ц.Вылов, И.И.Громова,
А.А.Ключников, А.Ф.Новгородов, А.И.Феоктистов

ИССЛЕДОВАНИЕ
РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА ^{149}Gd

Направлено в "Известия АН СССР"
(сер. физ.)



Результаты исследования спектров γ -лучей, конверсионных электронов, γ - γ -совпадений и α -частиц при радиоактивном распаде ^{149}Gd приведены в^{/1-6/}. Целью настоящей работы является изучение спектров γ -лучей и конверсионных электронов с использованием более совершенных препаратов, спектрометрической аппаратуры и методики, а также построение более полной схемы распада и проведение ее обсуждения.

1. Условия эксперимента

Нуклид ^{149}Gd получался при облучении танталовой и эрбиевой мишеней на внутреннем пучке синхротрона ОИЯИ /энергия протонов 660 МэВ/ с последующим радиохимическим выделением фракции гадолиния и ее разделением на электромагнитном масс-сепараторе^{/7/}. Спектры γ -лучей и конверсионных электронов исследовались с помощью полупроводниковых детекторов, характеристики которых приведены в табл. 1^{/8-10/}. Спектры конверсионных электронов исследовались также с помощью магнитного бета-спектрометра ($\pi\sqrt{2}$) с разрешением 0,03 - 0,06% по $H\rho$. Характерные аппаратные спектры показаны на рис. 1-3. Точность определения энергий γ -лучей достигает 10-30 эВ, а точность определения интенсивностей - 2,5%^{/11/}.

Таблица I
Характеристики применяемых полупроводниковых
спектрометров

№	Детектор	Размеры	Измерение	Энерг. разреш.
1	Si (Li)	30 мм ² x 4 мм	X + γ	440 эВ при E _γ = 14 кэВ
2	Ge (Li)	1 см ³	X + γ	600 эВ при E _γ = 26 кэВ
3	Ge (Li)	37 см ³	γ	2,1 кэВ при E _γ = 1,33 МэВ
4	Si (Li)	30 мм ² x 4 мм	e + X + γ	1,1 кэВ при E _e = 150 кэВ
5	Si (Li) в магн. поле	100 мм ² x 3 мм	e	2,2 кэВ при E _e = 150 кэВ

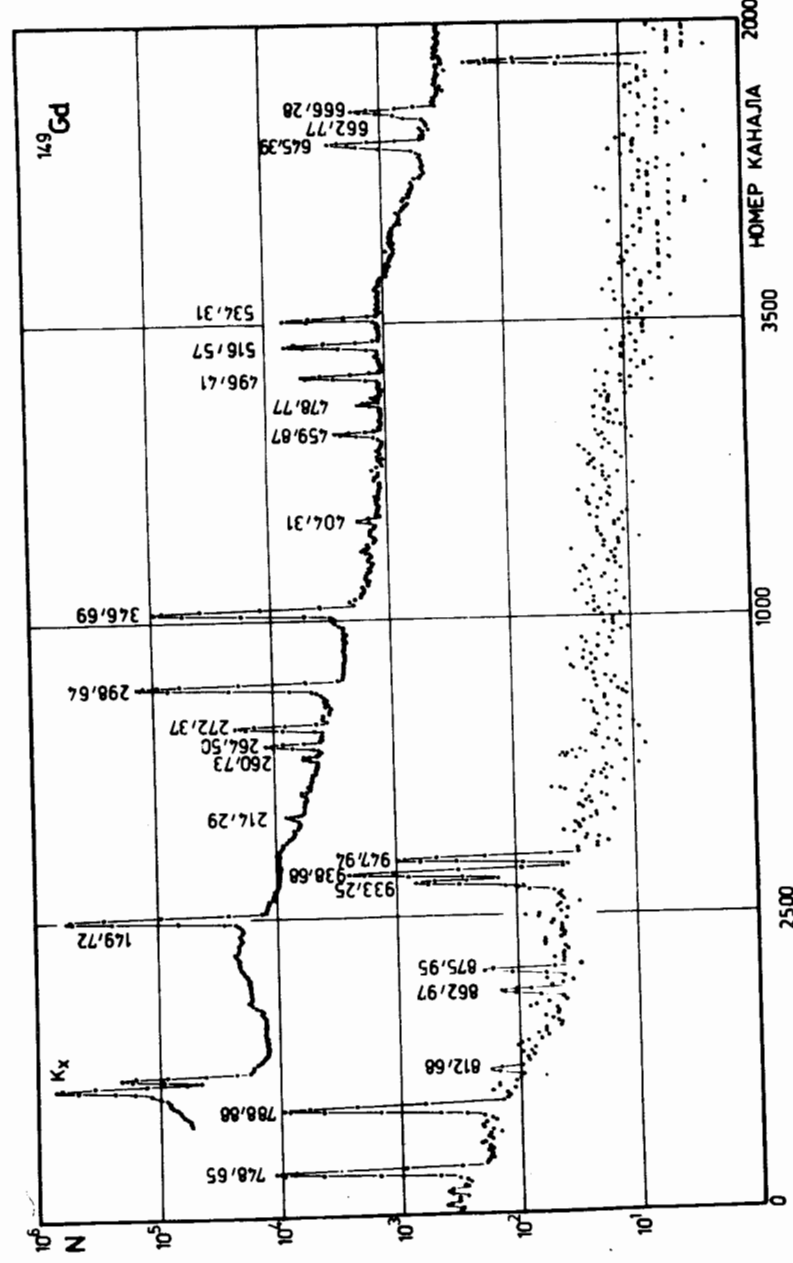


Рис. 1. Спектр γ -лучей при распаде ^{149}Gd , измеренный с помощью Ge(Li) - детектора /37 см³ /.

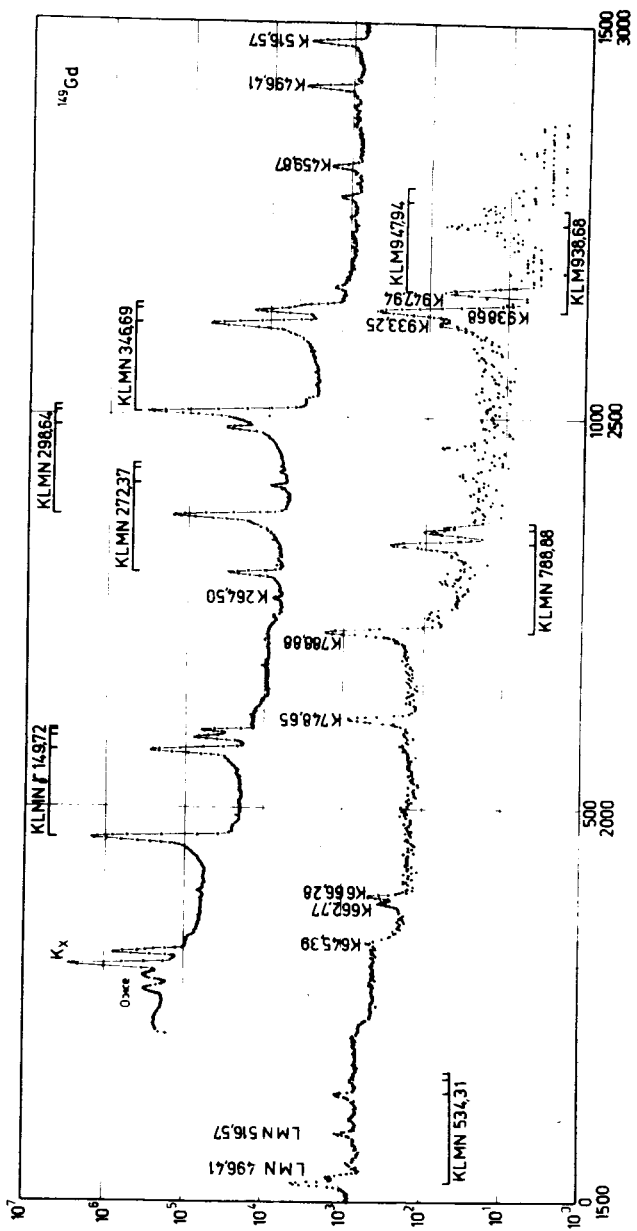


Рис. 2. Спектр низкоэнергетических γ -квантов и конверсионных электронов при распаде ^{149}Gd , измеренный с помощью $\text{Si}(\text{Li})$ - детектора /30 мм² x 4 мм/.

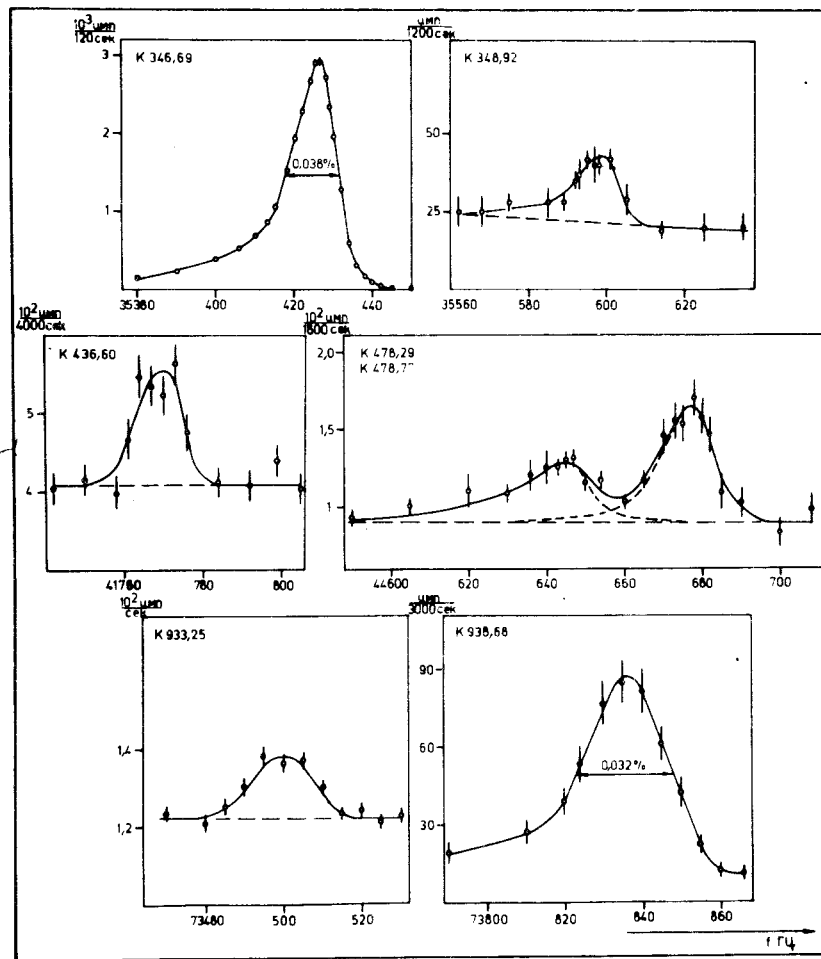


Рис. 3. Участки спектра электронов внутренней конверсии при распаде ^{149}Gd , измеренные с помощью магнитного бета-спектрометра типа $\pi \sqrt{Z}$.

2. Результаты экспериментов

Результаты исследования спектров γ -лучей и конверсионных электронов приведены в табл. 2. Там же представлены значения коэффициентов конверсии, выводы о мультипольностях /рис. 4/, показаны полные интенсивности ядерных переходов и их размещение в схеме распада /табл. 3/. Интенсивности даются в единицах на 100 распадов. На рис. 5 приводится диаграмма γ -переходов.

Нормировка интенсивностей конверсионных электронов осуществлена с помощью абсолютного значения коэффициента конверсии на k-оболочке a_k для перехода $149,72 \pm 0,01$ кэВ, который равняется: $a_k = 0,48 \pm 0,02$. В ошибку определения a_k включены ошибка юстировки источника /1,8%/; ошибка первичного репера a_k /166 кэВ - ^{139}Ce / = $0,2142 \pm 0,0045$ /2,1% при доверительном интервале 3σ / 12 /; ошибка определения I_γ , обусловленная абсолютной эффективностью Ge(Li)-детектора /2,5%/; статистическая ошибка определения I_γ и I_k /0,6% и 1,5% соответственно/.

Нормировка интенсивностей на 100 распадов выполнена с помощью интенсивностей характеристического рентгеновского излучения. В расчетах принималось, что выход флуоресценции на k-оболочке атома равен $\omega_k = 0,92$ / 13 / и использовались результаты работы / 14 /. Ввиду малости / 16 / вкладом α -распада пренебрегали.

Обнаружены новые переходы: 37,80; 82,50; 127,10; 128,70; 189,70; 278,20; 341,60; 384,60; 398,90; 416,20; 436,60; 794,70. В спектре конверсионных электронов ($\pi\sqrt{2}$) не наблюдаются переходы, отнесенные к распаду ^{149}Gd в работах /1,2/ /в скобках приведены верхние пределы интенсивностей этих k-линий/: 112,8 /0,03/;

119,5 /0,015/; 130,8 /0,008/; 143,0 /0,005/; 178,5 /0,005/; 230,4 /0,005/; 235,1 /0,005/; 264,6 /0,003/; 267,8 /0,003/; 268,6 /0,003/; 296,6 /0,005/; 316,9 /0,005/; 325,6 /0,005/; 401,8 /0,0005/; 593,5 /0,0005/; 613,8 /0,0005/; 727,4 /0,0005/; 1012,6 /0,0005/ и 1081,7 /0,0005/.

Таблица 2
Сведения о ядерных переходах при радиоактивном распаде ^{149}Gd

E_γ	I_γ %	I_k %	$a_k \cdot 10^3$	I_{11} %	M	Разм.
37,80(15)	0,13(2)	-	-	0,13(2)	-	4-3
k_γ	106,6(51)	-	-	-	-	-
82,50(15)	0,03(1)	-	-	0,03(1)	-	6-5
126,00(4)	0,16(3)	0,083(15)	523(181)	0,24(4)	E2	II-8
127,10(30)	0,010(5)	-	-	0,010(5)	-	9-6
128,70(15)	0,05(3)	0,010(4)	191(168)	0,060(13)	E1	7-5
132,02(15)	0,08(3)	0,054(10)	667(400)	0,13(4)	MI+E2	5-4
138,00(15)	0,10(3)	0,022(7)	214(140)	0,12(4)	E1	10-7
149,72(1)	53,37(100)	25,61(73)	480(20)	79,98(236)	MI+E2	I-0
184,50(10)	0,07(2)	0,007(2)	97(50)	0,06(2)	E1	10-6
189,70(20)	0,010(5)	-	-	0,010(5)	-	II-6
214,29(2)	0,25(2)	0,019(10)	79(45)	0,27(3)	E1	6-4
252,26(7)	0,34(3)	0,025(2)	72(8)	0,36(3)	E2	6-3
260,73(2)	1,53(3)	0,027(4)	18(3)	1,57(3)	E1	7-4
264,50(40)	0,03(2)	0,01	70	0,03(2)	E2	I2-6
272,37(2)	3,04(6)	0,36(3)	118(17)	3,40(9)	MI	II-5
278,20(15)	0,09(3)	-	-	0,09(3)	-	6-4
298,64(2)	31,16(50)	2,40(12)	77(4)	33,56(62)	MI+E2	7-3
341,60(15)	0,03(2)	-	-	0,03(2)	-	9-4
346,69(2)	24,73(71)	5,14(20)	206(15)	32,68(91)	MI	3-1
348,92(8)	-	0,003(1)	-	0,003(1)	-	I3-6
398,90(10)	0,04(2)	-	-	0,04(2)	-	10-4
404,31(9)	0,14(2)	0,0022(7)	15,8(73)	0,14(2)	E2	II-4
416,20(10)	0,02(1)	-	-	0,02(1)	-	9-2

Таблица 2 /продолжение/

E_{γ}	I_{γ} %	I_k %	$\alpha_k \cdot 10^3$	I_n %	м	Разм.
431,40(12)	0,08(1)	0,0008(4)	9,6(58)	0,08(1)	E1	I3-5
436,60(16)	0,06(1)	0,003(1)	40(21)	0,06(1)	E3	I0-3
459,87(6)	0,59(2)	0,015(2)	25,5(25)	0,60(2)	MI	2-0
478,29(6)	-	0,0012(7)	-	0,0012(7)	-	I2-4
478,77(6)	0,24(2)	0,0029(7)	12,2(39)	0,24(2)	E2	II-2
482,83(18)	0,06(1)	0,0017(5)	28,8(122)	0,06(1)	MI	I4-6
496,41(3)	1,77(3)	0,049(3)	27,7(18)	1,82(3)	E3	3-0
516,57(5)	3,35(3)	0,046(3)	13,7(9)	3,40(3)	MI+E2	5-1
534,31(3)	3,33(3)	0,058(4)	17,5(14)	3,39(3)	MI	4-0
552,72(11)	0,12(3)	0,0010(4)	9,8(60)	0,12(3)	E1	I2-2
600,92(30)	0,19(6)	0,0010(2)	5,3(28)	0,19(6)	E2	I3-3
645,39(5)	1,51(2)	0,0034(9)	2,3(6)	1,51(2)	E1	7-1
662,77(7)	0,33(2)	0,0032(9)	9,6(15)	0,33(2)	MI	8-1
666,28(3)	1,02(2)	0,006(1)	6,2(11)	1,03(2)	E2	5-0
726,36(5)	0,11(2)	0,0010(3)	8,5(34)	0,11(2)	MI	9-1
734,97(13)	0,14(2)	0,0008(4)	5,5(34)	0,14(2)	MI+E2	I4-3
748,65(3)	8,16(4)	0,015(5)	1,8(6)	8,17(4)	E1	6-0
788,88(3)	7,55(9)	0,027(5)	3,6(7)	7,82(9)	E2	II-1
794,70(30)	0,03(1)	-	-	0,03(1)	-	7-0
812,68(9)	0,17(1)	0,0010(3)	5,5(17)	0,17(1)	MI	8-0
862,97(12)	0,10(1)	0,0013(3)	13,5(45)	0,10(1)	M2	I2-1
875,95(10)	0,16(1)	0,0010(3)	5,5(20)	0,16(1)	MI	9-0
933,25(8)	0,68(2)	0,0016(5)	2,4(9)	0,68(2)	E2	I0-0
938,68(4)	2,27(3)	0,010(2)	4,3(6)	2,28(3)	MI	II-0
947,94(5)	1,07(2)	0,0012(4)	1,1(3)	1,07(2)	E1	I3-1
1012,60(20)	0,020(5)	-	-	0,020(5)	-	I2-0
1081,70(20)	0,020(5)	-	-	0,020(5)	-	I4-1

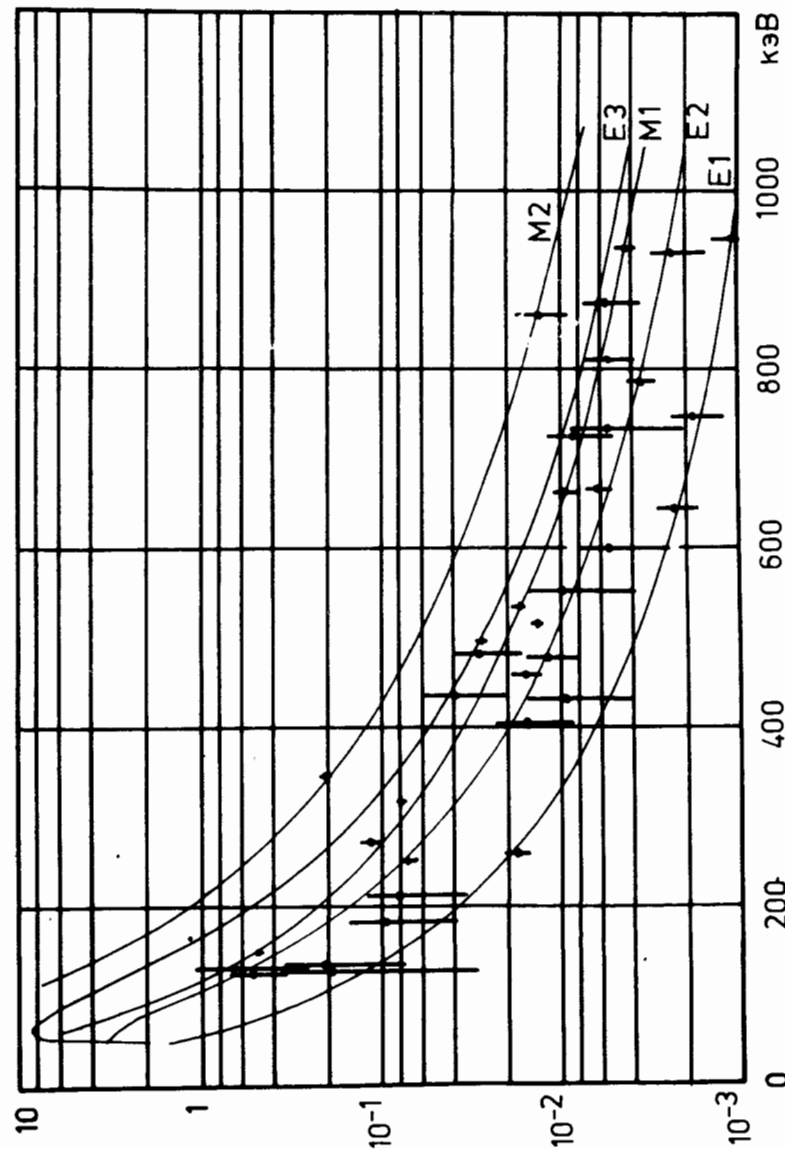


Рис. 4. Коэффициенты конверсии и выводы о мультипольности переходов при распаде ^{149}Gd .

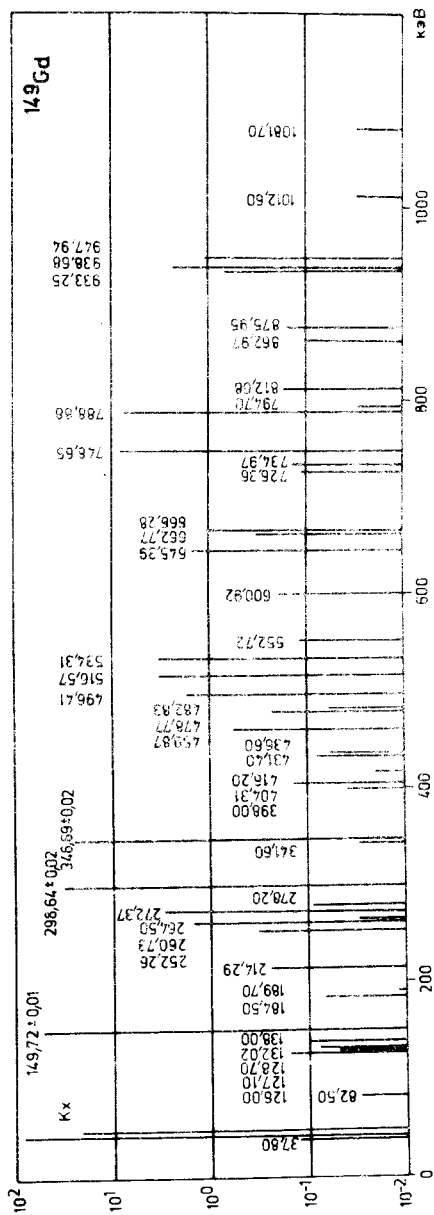


Рис. 5. Диаграмма γ -переходов /интенсивности даются в единицах на 100 распадов/.

3. Схема распада

В табл. 3 представлена схема распада ^{149}Gd , которая отличается от предложенных ранее ^{149}Gd своей полнотой. В схеме размещены все 50 переходов, причем для 32 получены новые данные: либо переход впервые наблюдался в γ -спектре или в спектре электронов внутренней конверсии, либо впервые определены интенсивности и установлены мультипольности переходов. Подтверждено существование уровней 1012,66 кэВ и 1231,04 кэВ, предположительно введенных в работах ^{149}Gd соответственно. Уточнены значения спинов ряда уровней. Получены более точные значения вероятностей электронного захвата и значения величин $\log ft$ в предположении, что $Q_c = 1290$ кэВ $^{15/2}$.

4. Обсуждение

Основное состояние ^{149}Eu $5/2^+$, возбужденный уровень 149,72 кэВ $7/2^+$ и третий возбужденный уровень 496,41 кэВ $11/2^-$ аналогичны соответствующим уровням в ^{145}Eu $^{16/2^-}$, ^{147}Eu $^{17/2^-}$ и ^{151}Eu $^{18/2^-}$ - рис. 6. Они интерпретируются как квазичастичные уровни, соответствующие протонным возбуждениям типа $d_{5/2}$, $g_{7/2}$, и $h_{11/2}$. Энергии этих уровней уменьшаются по мере увеличения числа нейтронов.

Уровень 459,87 кэВ $5/2^+$, $7/2^+$. В схеме уровней ^{149}Eu наблюдается второй возбужденный уровень 459,87 кэВ $5/2^+$, $7/2^+$, в то время как в ^{145}Eu , ^{147}Eu и ^{151}Eu вторым возбужденным уровнем является $11/2^-$ - рис. 6. Это состояние практически не возбуждается электронным захватом ($\log ft < 9,2$), и его возбуждение, в основном, реализуется за счет разрядки высоколежащих уровней 938,68 кэВ и 1012,66 кэВ. Возможно, например, что аналогичный уровень в ^{147}Eu лежит выше уровня со спином $11/2^-$. Действительно, в схеме ^{147}Eu наблюдается уровень 778,2 кэВ $5/2^+$, $7/2^+$, имеющий $\log ft \leq 8,1$ и разряжающийся так же, как и уровень

Таблица 3
 Состояния, возбуждаемые при распаде ^{149}Gd , и их разрядка
 $/Q_{\epsilon} = 1290 \text{ кэВ}; T_{1/2} = 9,5 \text{ дн}/$

№ уровня	E, ур.	I ^π	r%	log ft	Разрядка				
					E, ур.	I _β	π	E, ур.	
I	2	3	4	5	6	7	8	9	
0	0	5/2 ⁺	2,2	8,5	-	-	-	-	
I	149,72(1)	7/2 ⁺	33,1	7,3	149,72	79,98	MI+E2	0	
2	459,87(6)	5/2 ⁺ , 7/2 ⁺	0,2	9,2	459,87	0,60	MI	0	
3	496,41(3)	11/2 ⁻	0,1	9,5	346,69 496,41	32,68 1,82	M2 E3	149,72 0	
4	534,31(3)	7/2 ⁺	1,3	8,3	37,80 534,31	0,13 3,39	- MI	496,41 0	
5	666,28(3)	7/2, 9/2 ⁺	0,9	8,3	132,02 516,57 666,28	0,13 3,40 1,03	MI+E2 MI+E2 E2	534,31 149,72 0	
6	748,65(3)	7/2 ⁻	8,5	7,3	82,50 214,29 252,26 748,65	0,03 0,27 0,36 8,17	- E1 E2 E1	666,28 534,31 496,41 0	

Таблица 3 / продолжение/

I	2	3	4	5	6	7	8	9
7	794,98(10)	9/2 ⁻	36,5	6,5	128,70 260,73 298,64 645,39 794,70	0,06 1,57 33,56 1,51 0,03	E1 E1 MI+E2 E1 -	666,28 534,31 496,41 149,72 0
8	812,68(9)	5/2, 7/2 ⁺	0,4	8,4	278,20 662,77 812,68	0,09 0,33 0,17	- MI MI	534,31 149,72 0
9	875,95(10)	5/2, 7/2 ⁺	0,3	8,4	127,10 341,60 416,20 726,36 875,95	0,010 0,03 0,02 0,11 0,16	- - - MI MI	748,65 534,31 459,87 149,72 0
10	933,25(8)	7/2 ⁺	1,0	7,8	138,00 184,50 398,90 436,60 933,25	0,12 0,08 0,04 0,06 0,68	E1 E1 - E3 E2	794,98 748,65 534,31 496,41 0

Таблица 3 / продолжение /

I	2	3	4	5	6	7	8	9
II	938,68(4)	7/2 ⁺	13,7	6,6	126,00 189,70 272,37 404,31 478,29 788,88 988,68	0,24 0,01 3,40 0,14 0,24 7,82 2,28	E2 - M1 E2 E2 E2 M1	812,68 748,65 666,28 534,31 459,87 149,72 0
I2	1012,66(20)	5/2, 7/2, 9/2 ⁻	0,3	8,1	264,50 478,29 552,72 862,97 1012,60	0,03 0,0012 0,12 0,10 0,020	E2 - E1 M2 -	748,65 534,31 459,87 149,72 0
I3	1097,76(20)	7/2, 9, 2 ⁻	1,3	7,3	348,92 431,40 600,92 947,94	0,003 0,08 0,19 1,07	- E1 E2 E1	748,65 666,28 496,41 149,72
I4	1231,04(20)	9/2 ⁻	0,2	7,3	482,83 734,97 1081,70	0,06 0,14 0,020	M1 M1+E2 -	748,65 496,41 -

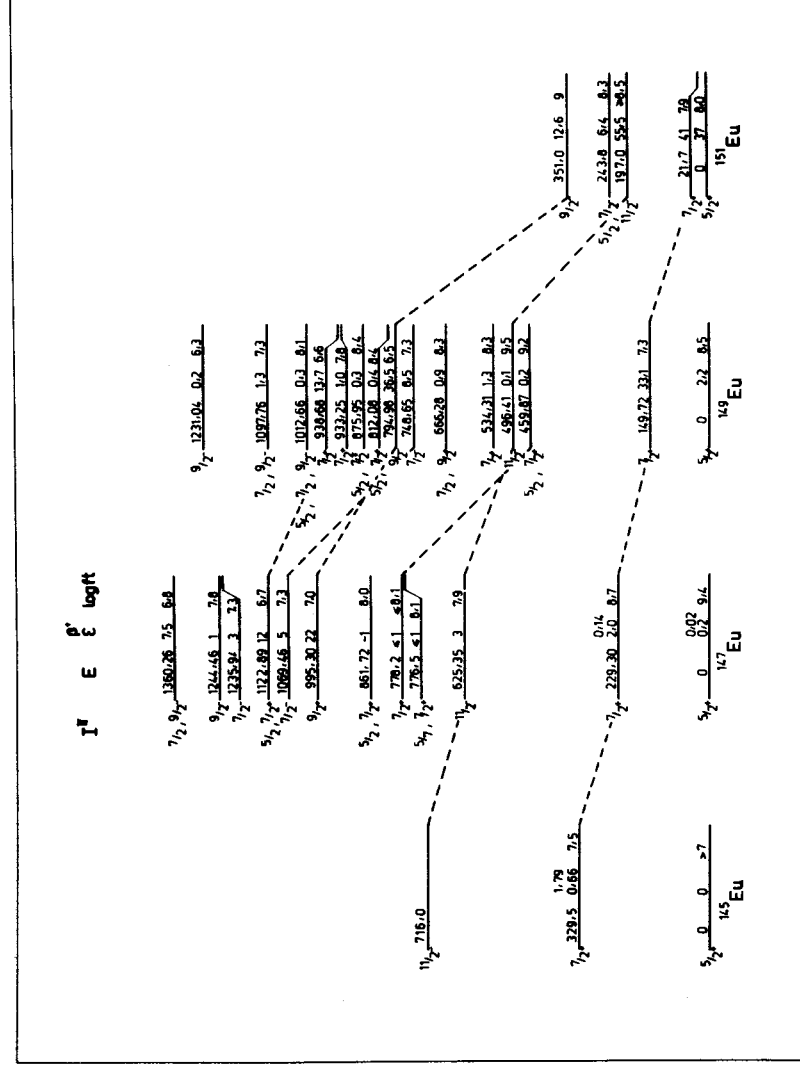


Рис. 6. Возбужденные состояния 145 Eu, 147 Eu, 149 Eu и 151 Eu и их квантовые характеристики.

459,87 кэВ в ^{149}Eu , главным образом в основное состояние. Если это верно, то уровень такой природы опускается все ниже по мере увеличения числа нейтронов, и в ^{151}Eu он должен иметь энергию меньшую, чем в ^{149}Eu . Такой уровень, однако, в схеме распада ^{151}Gd не наблюдается. Объяснением может служить тот факт, что непосредственно электронным захватом этот уровень не возбуждается, а должен запитываться переходами с высокоэнергетических уровней, что в случае ^{151}Eu невозможно ввиду малой энергии распада ^{151}Gd
 $Q_{\epsilon} = 464 \pm 11 \text{ кэВ}^{11/}$.

Уровни положительной четности. О природе уровня 459,87 кэВ /5/2⁺, 7/2⁺/ и других более высоколежащих уровней положительной четности ничего конкретного сказать нельзя. Все они имеют высокие значения $\log ft$. Исключение составляет состояние 938,63 кэВ /7/2⁺/, имеющее $\log ft = 6,6$. Возможно, этот уровень можно сопоставить с уровнем 1122,89 кэВ /5/2, 7/2⁺/ в ядре ^{147}Eu , также имеющем низкое значение $\log ft = 6,7$. Оба сравниваемых уровня разряжаются в основном на первое возбужденное состояние.

Представляет интерес и разрядка уровня 933,25 кэВ /7/2⁺/, при которой наблюдается конкуренция E2 - и даже E3 - переходов с E1-переходами. E3 - переход идет на уровень 496,41 кэВ /11/2⁻/. Возможно, этот переход имеет коллективную природу, если предположить, что уровень 933,25 кэВ /7/2⁺/ содержит компоненту, соответствующую октупольным колебаниям, построенным на уровне 496,41 кэВ /11/2⁻/.

Уровни отрицательной четности. Помимо уровня 496,41 кэВ /11/2⁻/, в схеме ^{149}Eu наблюдаются еще пять уровней отрицательной четности. Все они возбуждаются непосредственно при электронном захвате, а при их разрядке наблюдается конкуренция переходов мультипольности E2 и M1 с переходами мультипольности E1. При разрядке уровня 1012,66 кэВ зарегистрирован переход 862,97 кэВ мультипольности M2.

Уровни 748,65 кэВ /7/2⁻/ и 794,98 кэВ /9/2⁻/ в ^{149}Eu можно сопоставить с идущими в обратном порядке уровнями 995,30 кэВ /9/2⁻/ и 1069,46 кэВ /7/2⁻/ в ^{147}Eu . В обоих случаях рассматриваемые уровни со спинами 9/2⁻ имеют большую вероятность возбуждения электронным захватом. Значения $\log ft$ 6,5 и 7,0 для ^{149}Gd и ^{147}Gd соответственно близки между собой. Подобен и характер разрядки этих уровней. Распад идет в основном на уровень 11/2⁻. В ^{149}Eu этот переход имеет энергию 298,64 кэВ и мультипольность M1 + /6±2/%E2 /мультипольный состав определен нами на основании измерения интенсивностей конверсионных линий на L-подоболочках/. Аналогичный переход в ^{147}Eu имеет энергию 369,97 кэВ и мультипольность M1 + /<4%/E2^{17/}. По-видимому, уровни 748,65 кэВ /7/2⁻/ в ^{149}Eu и 1069,46 кэВ /7/2⁻/ в ^{147}Eu также имеют одинаковую природу, ибо вероятности их возбуждения электронным захватом близки /8,5% и 5%/, значения $\log ft$ равны 7,3 и они разряжаются главным образом в основное состояние.

К сожалению, во многих случаях характеристики уровней при распаде ^{147}Gd и ^{149}Gd определены неоднозначно и можно сопоставить между собой большое число состояний. Например, уровню 1360,26 кэВ /7/2⁻, 9/2⁻/ в ^{147}Eu , возможно, соответствует уровень 1231,04 кэВ /9/2⁻/ в ^{149}Eu . Тогда для всех уровней ^{149}Eu можно найти аналогичные уровни в ^{147}Eu , за исключением 933,25 кэВ /7/2⁺/, 875,95 кэВ /5/2⁺, 7/2⁺/ и 812,68 кэВ /5/2, 7/2⁺/. Возможно, что либо эти уровни не обнаружены в ^{147}Eu , либо спектр уровней ^{149}Eu богаче из-за наличия двух лишних нейтронов. Поэтому мы предполагаем провести исследование радиоактивного распада ^{147}Gd на более высоком экспериментальном уровне.

В заключение благодарим за помощь Н.А.Лебедева за приготовление радиоактивных препаратов и И.Куля за помощь в обработке экспериментальных данных.

Литература

1. М.П.Авотина, Е.П.Григорьев, А.В.Золотавин, В.О.Сергеев, Я.Врзал, Я.Липтак, Н.А.Лебедев, Я.Урбанец. Изв. АН СССР, сер. физ., 30, 1304 (1966).
2. V.Harmatz and T.H.Handley. Nucl. Phys., 81, 481 (1966).
3. I.Adam, K.S.Toth and R.A.Meyer. Nucl. Phys., A106, 275 (1968).
4. R.E.Eppley, Wm.C.McHarris and W.H.Kelly. Phys. Rev., C2, 1077 (1970).
5. В.И.Гаврилюк, К.Я.Громов, А.А.Ключников, В.Т.Купряшкин, Г.Д.Латышев, Ю.В.Маковецкий, А.И.Феоктистов. Изв. АН СССР, сер. физ., 38, 34 /1974/.
6. T.Fenyves, I.Mahunka, M.Mahunka. JINR, E-1861, Dubna, 1964.
7. В.П.Афанасьев, А.Т.Василенко, И.И.Громова и др. Препринт ОИЯИ, 13-4763, Дубна, 1969.
8. С.К.Васильев, Ц.Вылов, Б.П.Осипенко, Я.Юрковски. Препринт ОИЯИ, P13-8026, Дубна, 1974.
9. Е.Береги, Ц.Вылов, И.Крацикова, Ли Чен Сон, Б.П.Осипенко, Л.А.Пермякова, В.Г.Тишин. Сообщение ОИЯИ, P13-6830, Дубна, 1972.
10. Ц.Вылов, И.Н.Егошин и др. Сообщение ОИЯИ, P13-6759, Дубна, 1972.
11. В.С.Александров, Ц.Вылов, Т.М.Муминов, Б.П.Осипенко. Сообщение ОИЯИ, P6-7308, Дубна, 1973.
12. S.M.Lederer, J.M.Hollander and I.Pertman. Table of Isotopes, Sixth Edition, 1968.
13. A.H.Wapstra, G.J.Nijgh and R. van Lieshout. Nucl. Spectr. Tables, North Holland Publishing Company, Amsterdam, 1959.
14. Б.С.Джеленов, Л.Н.Зырянова, Ю.П.Суслов. Бета-процессы, Наука, Ленинград, 1972.
15. В.А.Кравцов. Массы атомов и энергии связи ядер. Атомиздат, 1974.
16. R.E.Eppley, Wm.C.McHarris and W.H.Kelly. Phys. Rev., C3, 282 (1971).
17. М.П.Авотина, А.В.Золотавин. Изобарные ядра с массовым числом $A = 147$, Наука, Ленинград, 1971.
18. Е.П.Григорьев, А.В.Золотавин, В.О.Сергеев и др. Изв. АН СССР, сер. физ., 32, 786 /1968/.

Рукопись поступила в издательский отдел
15 ноября 1974 года.