

С 341.18

В-465

ЯФ, 1967, т. 6, в. 4,

с. 672-684

29/xii-66

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

Р - 2915



ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

К. Вильский, В.В. Кузнецов, О.Б. Нильсен,
О. Скилбрайт, В.А. Халкин

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ¹⁵¹ТЬ

1966

Р - 2915

4675/1 мф.
К. Виельский, В.В. Кузнецов, О.Б. Нильсен,
О. Скилбрайт, В.А. Халкин

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ¹⁸¹Ть

Направлено в ЯФ



Настоящая работа выполнена совместно сотрудниками
следующих институтов:

Объединенный институт ядерных исследований

В.В. Кузнецов, В.А. Халкин

Институт им. Нильса Бора, Дания

К. Вильский, О.Б. Нильсен, О. Скелбрайт

1. Введение

Излучение ^{151}Tb исследовалось ранее авторами работ /1-4/. Авторы работы /1/ идентифицировали γ -переходы 108,3; 180,1; 192,1; 251,3 и 287,3 кэВ принадлежащими ^{151}Tb . При исследовании тербиевой фракции Антоньевой и др. /2/ был найден ряд линий конверсионных электронов, спадающих с периодом полураспада $T_{1/2} = 18$ час. Они были приписаны известным в то время изотопам ^{151}Tb и ^{154}Tb . Однако после открытия изотопа ^{152}Tb ($T_{1/2} = 17,5$ час) стало ясно, что большинство из наблюдаемых переходов принадлежит последнему изотопу. Авторы работы /3/ при исследовании тербиевой фракции, получаемой в реакции глубокого расщепления тантала, с помощью спектрографа типа Даниш и β -спектрометра с поперечным магнитным полем (БПП) и исследуя γ - γ -совпадения на сцинтилляционном γ -спектрометре, предложили вариант схемы распада $^{151}\text{Tb} \rightarrow ^{151}\text{Gd}$. Авторами этой работы были введены уровни 108,3; 359,8; 395,8 и 587,5 кэВ ^{151}Gd .

В работе /4/ наиболее полно исследовался спектр конверсионных электронов ^{151}Tb (см. таблицу № 1). Авторами /4/ предложен вариант схемы уровней ^{151}Gd с энергиями 108,1; 395,2; 587,3; 839,0 и 906,4 кэВ, введенных по аналогии с уровнями ^{149}Sm /5/.

Однако большинство наблюдаемых переходов при распаде ^{151}Tb не было размешено в схеме распада $^{151}\text{Tb} \rightarrow ^{151}\text{Gd}$. Таким образом, до настоящего времени не было достаточных экспериментальных данных для построения схемы возбужденных уровней ^{151}Gd . С этой целью нами были проведены исследования гамма-спектра моноизотопного препарата ^{151}Tb с помощью Ge(Li) -детектора и спектров конверсионных электронов и e - γ совпадений с помощью тороидального шестизазорного β -спектрометра /6/.

II. Экспериментальная часть

II.1. Подготовка источников

Изотопы тербия получались в результате глубокого расщепления ядер тантала под действием протонов с энергией 680 Мэв на синхротроне Объединенного института ядерных исследований в Дубне. Мишени тантала облучались в течение 2-3 часов на внутреннем пучке синхротрона. Из облученных мишеней химическим методом выделялась группа редкоземельных элементов. Тербиевая фракция выделялась из смеси редкоземельных элементов хроматографическим методом^{17/}.

При исследовании излучения ^{151}Tb использовался монокристаллический источник, полученный с помощью масс-сепаратора^{18/} в Институте имени Нильса Бора. Разделение тербиевой фракции на масс-сепараторе проводилось спустя ~15 часов после хроматографического разделения редкоземельных элементов в Объединенном институте ядерных исследований.

II.2. Исследование спектра конверсионных электронов ^{151}Tb

Спектр конверсионных электронов исследовался с помощью тороидального шестизазорного β -спектрометра^{18/}. Регистрация электронов на тороидальном шестизазорном β -спектрометре осуществлялась двумя независимыми сцинтилляционными детекторами, позволяющими одновременно измерять два спектра конверсионных электронов; причем в нашем случае один из них измерялся с "высоким" разрешением (разрешение = 0,5%, светосила = 1%), а другой - с высокой светосилой (разрешение = 1%, светосила = 9%). При исследовании спектров использовались только три зазора β -спектрометра. Экспериментальные спектры, полученные при разрешении = 0,5%, представлены на рисунке 1а, б. На рисунках пунктирными линиями показан спад активности источника ^{151}Tb в процессе измерения. Спектр, измеряемый с разрешением = 1%, был необходим при постановке опытов по исследованию $e-\gamma$ -совпадений. Сведения о энергиях и относительных интенсивностях линий конверсионных электронов приведены в таблице № 1, здесь же для сравнения приведены данные работы^{14/}. Как видно из таблицы, нами обнаружен ряд линий конверсионных электронов новых переходов с энергией 104,5; 118,0; 140,5; 263,8; 615,7 и 691,0 кэв. Как видно из рисунка 1а, в спектре наблюдается линия К 344, принадлежащая ^{152}Tb , поэтому в случае определения относительных интенсивностей линий конверсионных электронов К 587,5, К 615,7 и К 703,8, близких по энергии к конверсионным электронам ^{152}Tb К 586,7, К 615,6 и К 703,8 кэв, учитывался вклад от ^{152}Tb , согласно данным работы^{19/}. Препарат ^{151}Tb содержал примесь ^{152}Tb не более 3%.

1.3. Исследование гамма-спектра ^{151}Tb

Гамма-спектр ^{151}Tb исследовался с помощью плоскопараллельного $\text{Ge}(\text{Li})$ полупроводникового детектора с размерами 0,7 см x 0,35 см и 1024-канального амплитудного анализатора^{х)}. Гамма-спектр приведен на рис. 2а, б. Экспериментальные данные об энергиях и относительных интенсивностях γ -лучей представлены в таблице № 1. Указанные в таблице ошибки определения интенсивностей гамма-лучей не включают погрешностей, обусловленных неточностью в определении эффективности регистрации гамма-лучей.

Определение относительных интенсивностей гамма-лучей проводилось с помощью прямой эффективности регистрации γ -излучения $\text{Ge}(\text{Li})$ -детектором с размерами 0,5 см² x 0,35 см, взятой из работы^{10/}. С целью обоснования использования данной зависимости эффективности регистрации от энергии γ -лучей нами в процессе исследования излучения ^{151}Tb измерялись на данном детекторе спектры ^{207}Bi и ^{208}Tl , энергии и интенсивности γ -лучей которых известны и хорошо ложатся на кривую эффективности, определенную в работе^{10/} (рис. 3).

II. Исследование спектров $e-\gamma$ -совпадений при распаде ^{151}Tb

Спектры $e-\gamma$ -совпадений исследовались на тороидальном шестизазорном β -спектрометре (разрешение = 1%, светосила = 9%) и γ -спектрометре с 512-канальным амплитудным анализатором фирмы RCL с кристаллом $\text{NaJ}(\text{Tl})$ (7,6 см x 7,6 см), имеющим разрешение на линии цезия-137 ($E_\gamma = 661$ кэв) = 8%.

Возможность регистрации электронов, отличающихся по энергии на 1,8%, на тороидальном шестизазорном β -спектрометре двумя независимыми сцинтилляционными счетчиками позволяла измерять два спектра $e-\gamma$ -совпадений одновременно; спектр совпадений электронов на максимуме конверсионной линии с γ -лучами ^{151}Tb и спектр фоновых совпадений электронов за данной конверсионной линией ($E_e > E_k$) с γ -лучами ^{151}Tb . При исследовании $e-\gamma$ -совпадений 512-канальный анализатор использовался как две независимые половинки по 256 каналов.

На рисунке 4 показаны спектры γ -лучей, совпадающих с конверсионными электронами К 108,1; К 180,1; К 251,8; К 287,2; К 395,3; К 443,8; К 478,2 и К 587,5 кэв.

Анализ спектров $e-\gamma$ -совпадений проводился следующим образом. Спектр совпадений γ -лучей с заданной линией конверсионных электронов разлагался на составляющие части методом последовательного вычитания спектров. Затем полученные

х) Измерение проводилось в Исследовательском центре в Рисо при комиссии по атомной энергии в Дании.

интенсивности γ -лучей (площади под пиками γ -лучей, поправленные на эффективность регистрации детектором $N \cdot J(T\ell)$) были отнесены к числу N зарегистрированных электронов β -спектрометром в процессе измерения совпадений. Для разложения γ -спектров был измерен ряд стандартных препаратов, имеющих характерные одиночные γ -пики. Отношение полученных интенсивностей γ -лучей к числу N в большинстве случаев позволяет сделать заключение об интенсивностях γ -переходов, совпадающих с конверсионными электронами заданной энергии.

Анализ спектров γ -лучей и конверсионных электронов позволил рассчитать экспериментальные значения коэффициентов внутренней конверсии и сделать выводы о мультипольности большинства переходов в ядре ^{151}Tb . При определении коэффициентов внутренней конверсии принималось, что переход с энергией 287,2 кэВ является переходом типа $M1$ ($a_1 = 0,09$). Экспериментальные и теоретические значения коэффициентов внутренней конверсии и выводы о мультипольности переходов приведены в таблице № 2.

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

Как отмечалось выше, авторы работы [4] ввели ряд уровней $^{151}\text{Gd}_{87}$ по аналогии с уровнями ядра $^{149}\text{Sm}_{87}$.

Анализ спектров $e-\gamma$ совпадений, определения коэффициентов внутренней конверсии переходов позволили нам ввести в схему распада $^{151}\text{Tb} \rightarrow ^{151}\text{Gd}$ ряд новых уровней. Схема возбужденных уровней ^{151}Gd приведена на рис. 5 в сравнении с уровнями ^{149}Sm и ^{149}Gd .

Уровни, с которых идут переходы, отмеченные незачерненными кружками, введены на основании анализа спектров $e-\gamma$ совпадений. Уровни, с которых переходы отмечены точками, введены на основании энергетического баланса и баланса интенсивностей.

На схеме распада $^{151}\text{Tb} \rightarrow ^{151}\text{Gd}$ (рис. 5) приведены значения $lg\text{f}_\beta$ и доли электронного захвата на возбужденные уровни и основное состояние ^{151}Gd . При расчете значений $lg\text{f}_\beta$ принималось, что разность масс $^{151}\text{Tb} - ^{151}\text{Gd}$ равна 2590 кэВ. Интенсивность рентгеновского излучения была оценена как из γ -спектра, так и из анализа групп Оже-электронов в конверсионном спектре ^{151}Tb . Наблюдаемое различие в значениях рассчитанных интенсивностей рентгеновского излучения (см. таблицу № 1), по-видимому, следует объяснить неточностью в определении кривой эффективности регистрации γ -квантов малых энергий Ge(Li) -полупроводниковым детектором. Анализ спектров $e-\gamma$ совпадений и баланс интенсивностей указывает на то, что ^{151}Tb должен распадаться также путем испускания позитронов. Если предположить, что переход 511,7 кэВ типа $M1$, то γ -пик в гамма-спектре ^{151}Tb обязан также аннигиляции позитронов, интенсивность которых должна составлять $\approx 1\%$ на распад.

Основному состоянию ^{151}Gd следует приписать квантовые характеристики $7/2^-$ ($f 7/2$) по модели оболочек Майер и из сравнения с соседними ядрами ^{149}Sm и ^{149}Gd . Введенным уровням с энергией 108,1; 395,2 и 575,3 кэВ приписаны квантовые характеристики $5/2^-$, $3/2^-$ и $\lambda 1/2^-$, соответственно. Основному состоянию ^{151}Tb по модели оболочек и из сопоставления с ^{151}Pm приписаны квантовые характеристики $5/2^+$ ($d 5/2$).

Берловичем в работе [11] рассматриваются ядра переходной области и делается заключение о наличии малой деформации у этих ядер. В частности, он рассматривает нижние два уровня и основные состояния ядер $^{145}\text{Nd}_{88}$, $^{147}\text{Sm}_{88}$ и $^{149}\text{Gd}_{88}$ как уровни, напоминающие компоненты конфигурационного мультиплетта ($f 7/2$). Если рассматривать в нашем случае нижние уровни $^{151}\text{Gd}_{87}$ как указано в работе [11], то это не противоречит экспериментальным результатам.

Большая примесь $E2$ для перехода 108,1 кэВ ($M1/E2=1,6$) говорит в пользу коллективной природы уровня с энергией 108,1 кэВ ($5/2^-$). Однако информации еще недостаточно, чтобы утверждать об однозначности приписанных квантовых характеристик возбужденным уровням ^{151}Gd .

Анализ спектров $e-\gamma$ совпадений и выводы о мультипольностях переходов 804,8 кэВ ($E1$) и 615,7 кэВ ($E1+M2$) позволяют ввести уровень с энергией 1191 кэВ с положительной четностью. Основываясь на квантовых характеристиках, приписанных уровням 575,3 кэВ ($1/2^-$) и 587,5 кэВ ($5/2^-$), уровню 1191 кэВ следует приписать квантовые характеристики $3/2^+$, этому выводу не противоречит и значение $lg\text{f}_\beta = 8,8 \pm 0,1$ на этот уровень. Если исходить из оболочечной модели Майер, то трудно объяснить появление уровня с положительной четностью в ядре ^{151}Gd с числом дейтронов $N = 87$.

Характер разрядки уровня 1191 кэВ напоминает октупольный уровень 1123,8 кэВ (3^-) в четно-четном ядре ^{152}Gd [9]. И в том и в другом случае рассматриваемые уровни не разряжаются прямыми переходами в основные состояния ядер ^{151}Gd и ^{152}Gd , соответственно.

В заключение один из авторов (В.В. Кузнецов) приносит искреннюю благодарность проф. Оге Бору за гостеприимство и предоставленную возможность проведения экспериментов в Институте им. Нильса Бора, проф. К.Э. Александеру, К.Я. Грому, Ж.Т. Желеву и В.Г. Калининкову за ценные замечания и обсуждение результатов.

Л и т е р а т у р а

1. J.W. Mihelich, V. Harnatz, T.H. Handley, Phys. Rev., **108**, 989 (1957).

2. Н.М. Антонова, А.А. Башилов, Б.С. Джелепов, Б.К. Преображенский. Докл. АН СССР **119**, 241 (1958).
3. А.Т. Стригачев, Л.С. Новиков, А.А. Сорокин, В.А. Халкин, Н.В. Цветкова и В.С. Шпинель. Изв. АН СССР (сер. физ.), **25**, № 7, 813 (1961)
4. V.Harmatz, T.H. Handley, J.W. Mihelich, Phys. Rev., **128**, 1186 (1962).
5. V.Harmatz, T.H. Handley and J.W. Mihelich. Phys. Rev., **123**, 1758 (1961).
6. O.V.Nielsen, O.Kofoed-Hansen. Mat. Fys. Medd. Vid. Selsk., **29**, N6, 1955.
7. Б.К. Преображенский, А.В. Калямин, О.М. Лилова. ЖЭТФ, **2**, 1164 (1957).
8. K.O.Nielsen, O.Skilbreid. Nucl. Instr., **2**, 15 (1958).
9. К.Я. Громов, В.В. Кузнецов, М.Я. Кузнецова, М. Фингер, Я. Урбанец, О.Б. Нильсен, К. Вильский, О. Скилбрайт, М. Йоргенсен. Препринт ОИЯИ Р-2762, Дубна 1966.
10. G.T.Ewan and A.J.Tavendale, J. Can. Phys. **42**, 2286 (1964).
11. Э.Е. Берлович. Изв. АН СССР (сер. физ.), **29**, 2176 (1965).

Рукопись поступила в издательский отдел
1 сентября 1966 г.

Таблица 1. Сводные данные об энергиях и относительных интенсивностях γ -лучей и линий конверсионных электронов 151Tb.

NN п/п	Наши данные										Данные работы / 4 /				
	Е перек. кэВ	J _r	J _k	J _L	J _M	J _{полн.} ^{***}	Е перек. кэВ	J _k	J _L	J _M	J _{полн.}	Е перек. кэВ	J _k	J _L	J _M
1	X-лучи	13200±2000*													
2	104,5	18,0±8,0**	690±116			~150									
3	108,1	1200±60	10400±1040	5900	1520	2800±350	108,1	>9100	1540	1630	1560	910			
4	119,0		~10												
5	140,5	8,5±4,0**	~30			~25									
6	180,1	440±10	1500±105	264	42	620±68	180,1	1450	220	слаб	50				
7															
8	192,0	150±9	456±14	55,5	15	200±30	183,2	~14							
9	251,8	1000±40	1585±25	265	45	1160±115	192,0	400	63,5						
10	263,8	22,5±7,9	9,8±0,5			23±9	251,8	1410	191	слаб	45				
11	287,2	1000	1000	178	52,4	1110±110	287,2	1000	136	слаб	36				
12	318,8	9,0±3,0	10,3±2,0	2,4	0,5	16±2	318,5	9,1							
13	380,0	213±10	15,5±3,8				380,1	15,5							
14	384,0		21,2±1,8				384,6	21,0							
15	395,2	388±32	152,0±9,6	11,9		400±34	395,2	82	12,7						
16	417,0	50,0±6,0	51,8±4,2	40		53±7	416,0	25,0	3,6						
17	427,0	146,0±8,0	75,5±5,1	13,6		152±9	426,4	55,0	9,1						
18	443,8	515,0±10,0	182,0±36,0	23,9	6,3	332±14	445,8	100	14;5						
19	467	40±10				40±10									
20	479,2	507±10	110,0±10,5			515±11	479,2	73,0	11,0						
21	499,0	16,5±3,5	3,8±0,7			17±6	499,8	5,2							
22	512,0	84,0±10,0	6,1±1,4			85±10	511,7	3,2							

Продолжение таблицы 1.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
23	587,5	527,0±37,0	64,8±3,6	11,5	3,3	530±40	587,5	38	6,0			
24	605,5	100±16	4,6±0,6			100±16	604,8	3,6				
25	615,7	352±14	14,3±0,7	2,9		352±14						
26	691,0	54,5±8,5	4,5±1,1			55±9						
27	703,9	121±12	18,3±3,7	2,7		121±12	703,9	12,7	1,8			
28	731,8	278±14	19,9±1,4	2,2	0,6	278±14	731,7	11,8	1,8			
29	792		0,7			21±14	794,3	~0,54				
30							798,8	~0,54				
31	807	37,4±17,0	3,4±0,2			38±17	805,5	2,55				
32	906,0	40,3±20,0				40±20	906,0	1,55				
33	940,0	6,0±3,0**				6±3	938,8	~0,36				
34							979,5	0,50				
35							1009,5	~0,36				
36							1025,5	0,31				
37							1053,0	слаб				
38							1090,0	0,39				
39							1096,6	0,36				
40							1170,8	0,68				
41							1249,5	слаб				
42							1308,4	0,5				
43							1311,7	0,68				

* Интенсивность рентгеновского излучения наблюдаемая в γ - спектре ^{151}Tb . Интенсивность рентгеновского γ излучения, рассчитанная на группу α электронов составляет 3160±320 в этих же единицах.
 ** Интенсивность γ - лучей определена из спектров e - γ - совпадений.
 *** Полная интенсивность переходов в единицах гамма - спектра.

Таблица 2. Экспериментальные и теоретические коэффициенты конверсии и выводы о мультипольностях переходов при распаде ^{151}Tb .

№№ п/п	Энерг. кэВ	$\alpha_{к эксп} \cdot 10^3$ из γ -сп.	$\alpha_{к эксп} \cdot 10^3$ из e - γ сов	$\alpha_{к теор} \cdot 10^3$			Мульти- польность
				E1	E2	M1	
1	104,5		5900	240	1000	1500	M1 ?
2	108,1	780,9±150,0		200	900	1450	M1+E2, E2
3	140,5		350±170	100	460	680	E2
4	180,1	306,0±41,0		50	220	330	M1
5	192,0	274,0±38,0		44	190	280	M1
6	251,8	124,0±18,0	112±16	21	76	130	M1
7	263,8	39,2±18,3	78±39	19,5	70	120	E1+M2
8	287,2	90*		15	52	90	M1
9	318,8	103,0±49,0		11	40	66	M1, E2
10	380,0	} 15,5±3,0		7,6	23	"43	
11	384,0						
12	395,2	30,6±6,0		7	21	33	E2(E2+M1)
13	417,0	57,2±14,8		6,4	19	36	
14	427,0	46,4±8,0		5,6	16,5	1,5	M1 ?
15	443,8	52,0±12,5	27,5±6,5	5,2	15,5	29,0	M1
16	479,2	21,7±3,5	10,2±5,2	4,4	13,0	24,0	E2+M1, E2
17	499,0	20,7±8,0		3,9	11,5	21,8	E2+M1
18	512,0	6,5±2,1		3,75	11,0	1,4	E1(E2+M1)
19	587,5	11,1±1,8		2,8	7,8	14,0	E2+M1
20	605,5	4,1±1,2		2,65	7,2	13,0	E1, (E1+M2)
21	615,7	3,7±0,6	2,8±0,8	2,55	7,0	12,7	E1(E1+M2)
22	691,0	7,4±2,7		1,97	5,2	9,6	E2(E2+M1)
23	703,9	13,6±3,8		1,8	4,6	8,5	M1
24	731,8	6,5±1,2		1,8	4,6	8,5	E2(E2+M1)
25	805,5	8,2±4,5	8,1±4,0	1,47	3,7	6,8	M1(M1+E2)
26	906,0	3,5±1,3	4,1±2,0	1,15	2,8	5,0	E2, M1
27	940,0		5,4±2,7	1,07	2,6	4,6	M1, E2

*) При расчете α_k принято, что переход 287,2 кэВ типа M1

***) Мультипольность перехода 512 кэВ возможна типа M1 при предположении, что γ -лучи 512 кэВ обязаны также аннигиляции позитронов (~1% на распад) при распаде ^{151}Tb .

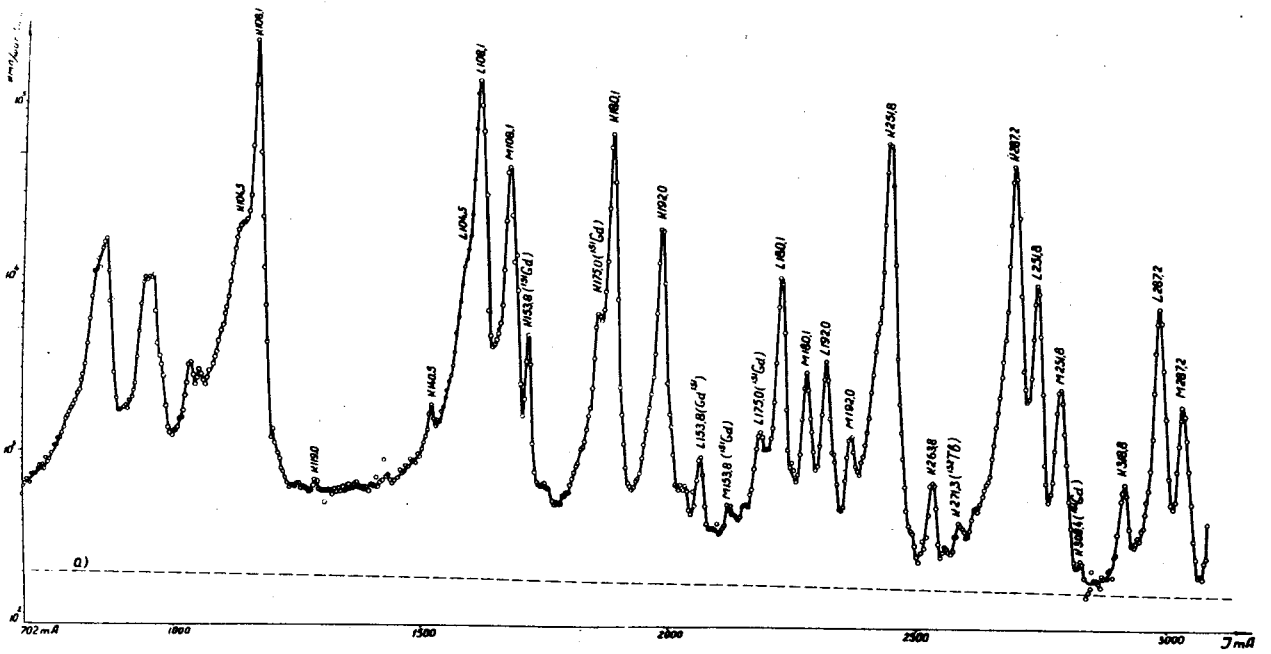


Рис. 1, а. Спектр конверсионных электронов ^{181}Tl в области энергий 20–280 кэВ.

а) Кривая спада активности источника ^{181}Tl в процессе опыта.

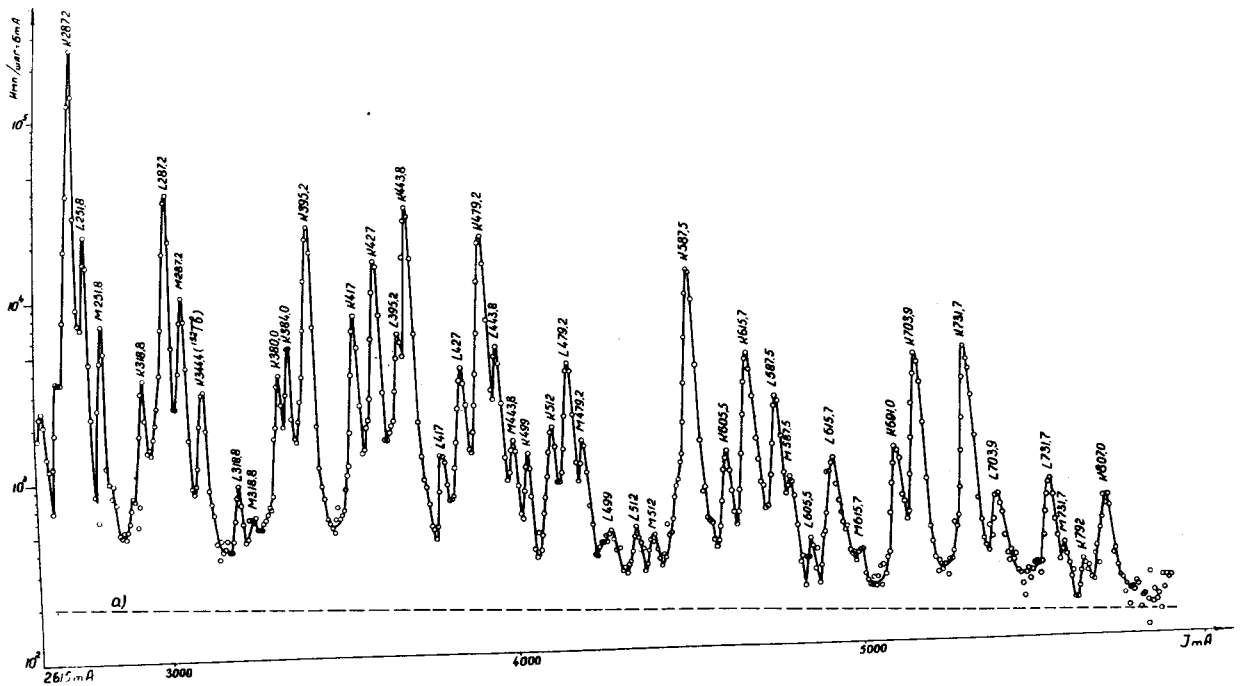


Рис. 1, б. Спектр конверсионных электронов ^{181}Tl в области энергий 230–760 кэВ.

а) Кривая спада активности источника ^{181}Tl в процессе опыта.

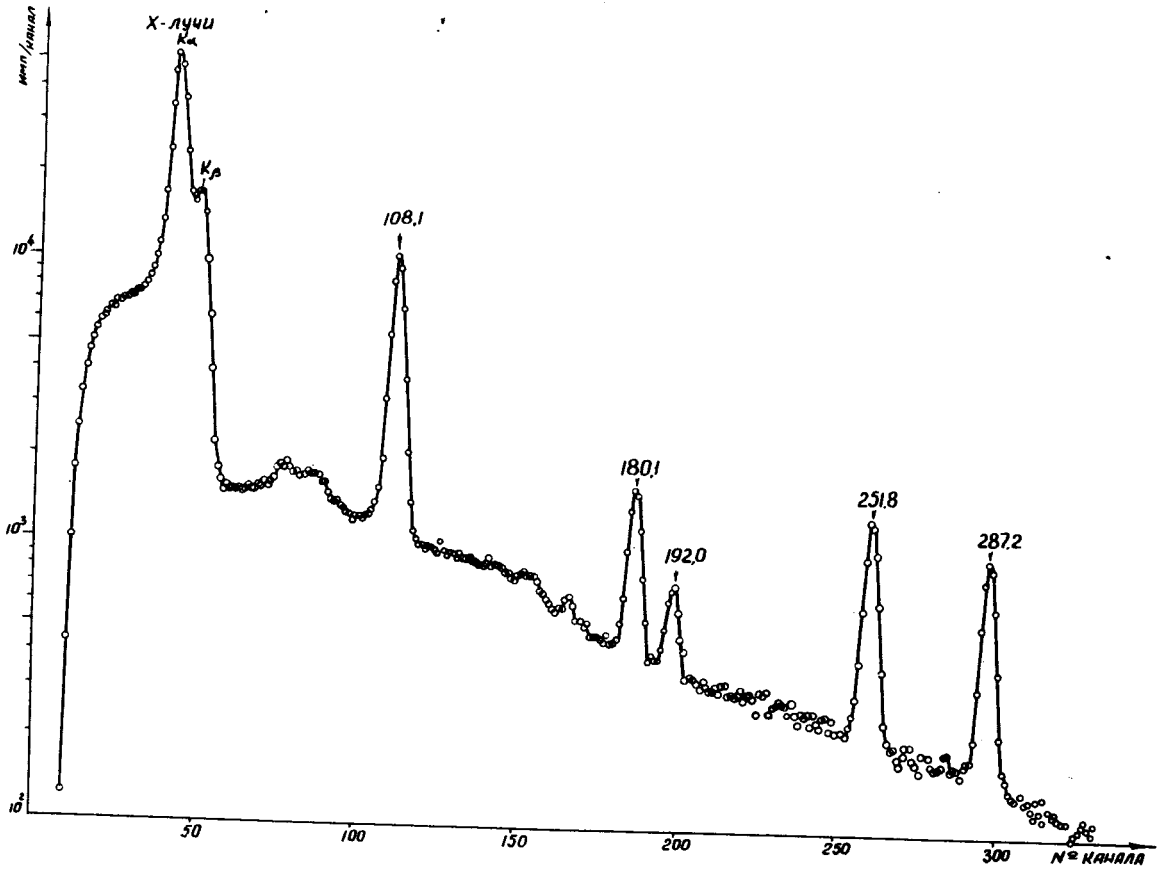


Рис. 2,а. Гамма-спектр ^{181}Tl , измеренный с помощью Ge(Li) полупроводникового детектора ($0,7\text{ см}^2 \times 0,35\text{ см}$) в области энергий до 300 кэВ.

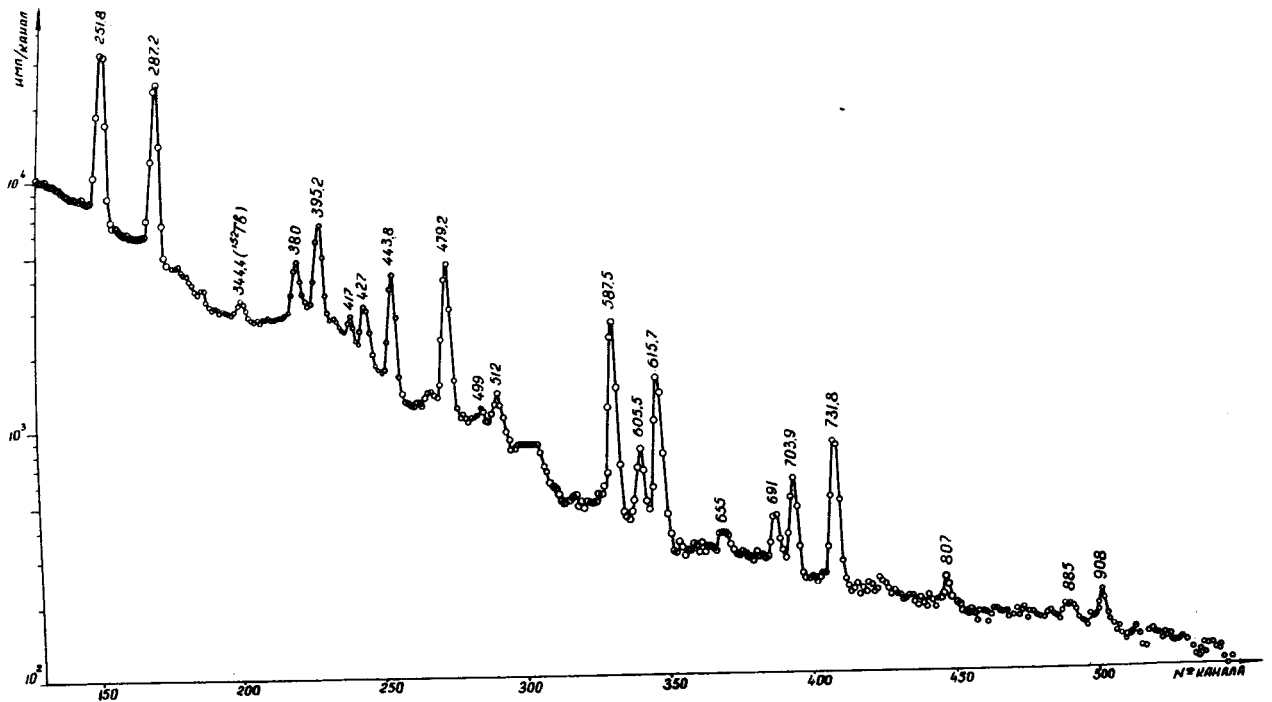
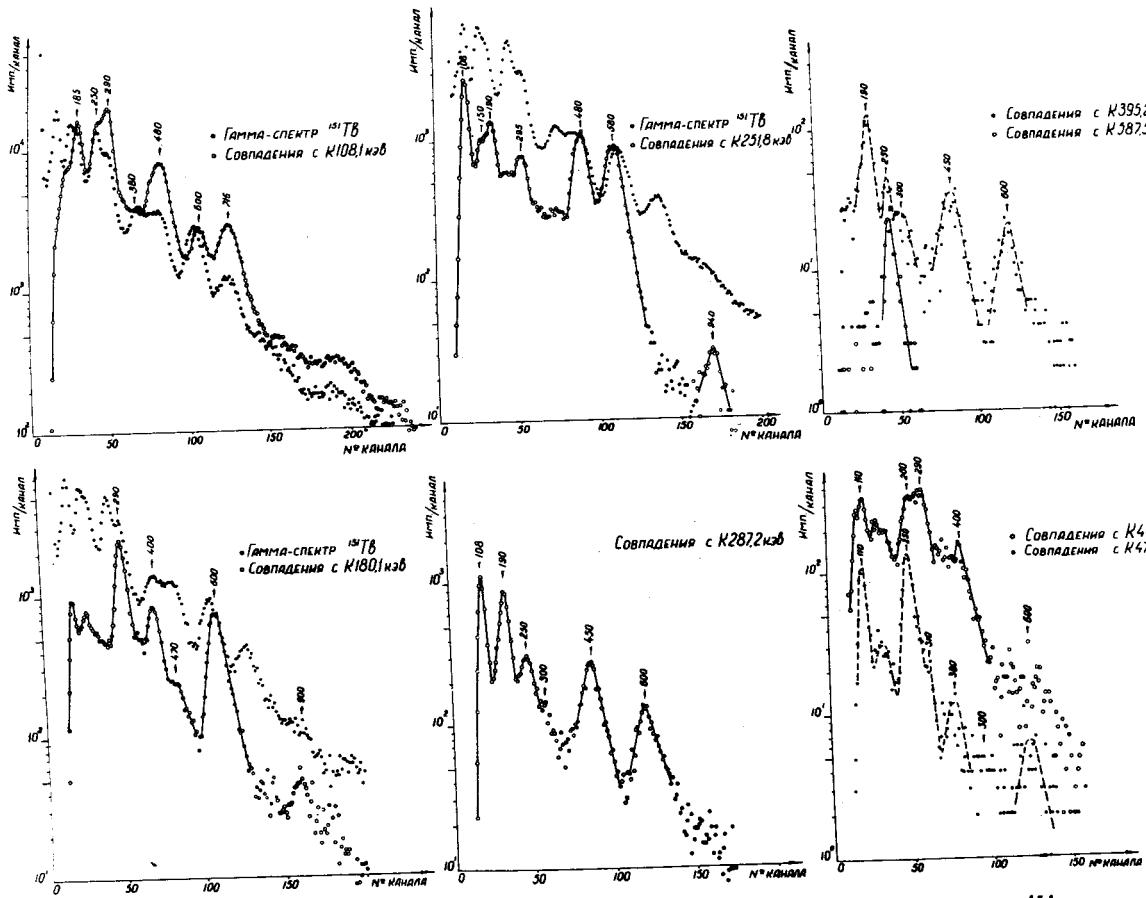
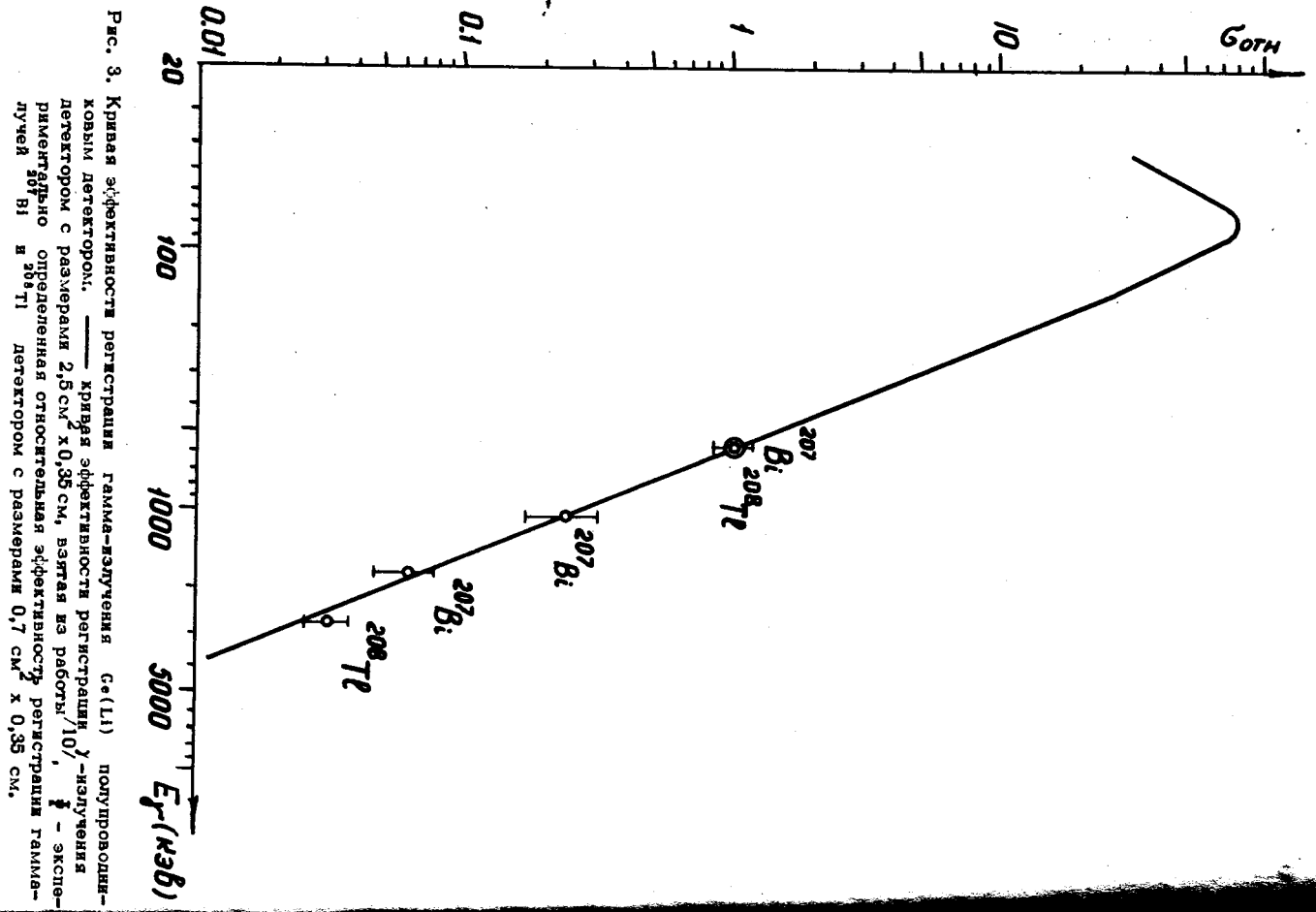


Рис. 2,б. Гамма-спектр ^{181}Tl , измеренный с помощью Ge(Li) полупроводникового детектора ($0,7\text{ см}^2 \times 0,35\text{ см}$) в области энергий 200 - 1000 кэВ.



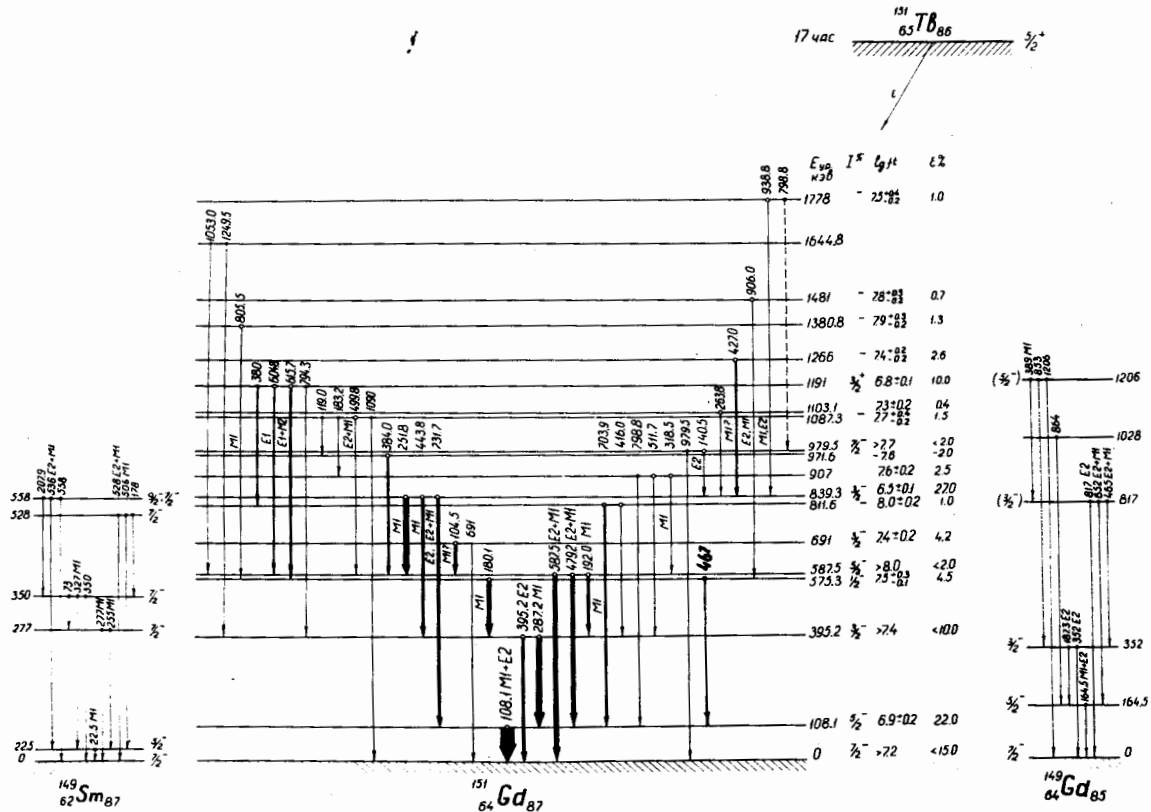


Рис. 5. Схемы распада $^{151}_{63}\text{Tb}_{86} \rightarrow ^{151}_{64}\text{Gd}_{87}$ в сравнении с уровнями $^{149}_{64}\text{Gd}_{85}$ и $^{149}_{62}\text{Sm}_{87}$.

Уровни, обозначенные незачерненными кружками, введены из анализа $e - \gamma$ совпадений. Квантовые характеристики, приписанные уровням $^{151}_{64}\text{Gd}_{87}$, являются одним из наиболее вероятных вариантов, удовлетворяющих экспериментальным результатам.