

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

P6-86-315

И.Адам\*, В.Вагнер\*, М.Гонусек\*, Б.Крацик\*,  
Д.Венос

ГАММА-ЛУЧИ  
И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ РАСПАДА  $^{169}\text{Yb}$

---

\* Институт ядерной физики, Ржеж, ЧССР

1986

Адам И. и др.

P6-86-315

Гамма-лучи и определение энергии распада  $^{169}\text{Yb}$

Антикомптоновским спектрометром измерены гамма-лучи распада  $^{169}\text{Yb} \rightarrow ^{169}\text{Tm}$  в области энергий выше 300 кэВ. Наблюдается семь новых гамма-переходов. В схему распада  $^{169}\text{Yb}$  введены два новых уровня с энергиями 832,479 и 878,40 кэВ. Определено значение энергии распада  $^{169}\text{Yb}$   $Q = (913_{-11})$  кэВ.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1986

Перевод О.С.Виноградовой

Adam J. et al.

P6-86-315

The Gamma-Ray and Decay Energy  
Determination for  $^{169}\text{Yb}$

Gamma-rays from the radioactive decay of  $^{169}\text{Yb}$  for energy region above 300 keV have been measured by means of the anticompton spectrometer. Seven new  $\gamma$ -transitions have been observed. Two new levels with 832.479 and 878.40 keV energies have been introduced into the decay scheme. The decay energy of  $^{169}\text{Yb}$  has been determined to be  $Q = (913_{-11})$  keV.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1986

Подробный перечень работ о бета-распаде  $^{169}\text{Yb}$ , опубликованных до 1975 г., и их тщательный анализ даны В.А.Балалаевым и др.<sup>/1/</sup> Позже Г.Л.Берхерт и др.<sup>/2/</sup> и Е.Г.Кесслер и др.<sup>/3/</sup> измерили с высокой точностью при помощи прецизионных кристалл-дифракционных спектрометров энергии девяти интенсивных гамма-линий. Анализ этих результатов проведен Б.С.Джелеповым и С.А.Шестопаловой<sup>/4/</sup>. В работе<sup>/5/</sup> был измерен спектр гамма-лучей в области низких энергий /ниже 140 кэВ/ и высоких энергий /выше 300 кэВ/ и подтверждены результаты предыдущих работ /см.<sup>/1/</sup>/. Г.Р.Верма и др.<sup>/6/</sup> обнаружили несколько новых гамма-переходов в области энергий от 280 до 430 кэВ; измерили гамма-гамма-совпадения и гамма-гамма угловые корреляции. Их результаты отличаются от результатов работы<sup>/7/</sup> и от результатов работы<sup>/5/</sup>. В.С.Ширли в обзоре по  $A = 169$ <sup>/8/</sup> отдал предпочтение работе Вермы<sup>/6/</sup>. Наши результаты, однако, подтверждают правильность работ<sup>/5,7/</sup> /см. ниже/.

Нами использованы разные радиоактивные источники  $^{169}\text{Yb}$ . Первый из них был приготовлен следующим образом: окись иттербия, обогащенного /до ~25%/  $^{168}\text{Yb}$ , весом 1,4 мг была растворена в азотной кислоте. Этим раствором пропитан цилиндр весом 300 мг из графита спектральной чистоты. После обжига окись иттербия распределялась однородно по всему объему цилиндра, который облучался потоком тепловых нейтронов  $\sim 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  в реакторе ИЯИ /Ржеж/. Вместе с мишенью облучался идентичный пустой цилиндр из графита для проведения контрольных измерений. После 6 дней облучения активность мишени составляла 400 мКи. Другие источники  $^{169}\text{Yb}$ , используемые для измерений во внутренней геометрии расположения источника по отношению к антикомптоновскому спектрометру<sup>/9/</sup>, были приготовлены путем облучения танталовой мишени протонами с энергией 680 МэВ на синхроциклотроне ЛЯП ОИЯИ /Дубна/. Из этой мишени радиохимически была выделена фракция иттербия, которая разделялась по изотопам на масс-сепараторе.

Измерения гамма-лучей, соответствующих распаду  $^{169}\text{Yb}$ , проводились с помощью антикомптоновского спектрометра<sup>/9/</sup>, который состоит из  $40 \text{ см}^3$   $\text{Ge}(\text{Li})$ -детектора с разрешением 2,3 кэВ на линии  $^{60}\text{Co}$  и из защитного  $\text{NaI}(\text{Tl})$  сцинтиллятора размерами  $6254 \text{ мм} \times 200 \text{ мм}$ . Поддавление непрерывного комптоновского спектра гамма-лучей  $^{60}\text{Co}$  достигает максимального значения, равного примерно 8. Кристалл  $\text{NaI}(\text{Tl})$  был окружен свинцовой защитой толщиной 100 мм, которая в режиме актисовпадений  $\text{Ge}(\text{Li})$ - $\text{NaI}(\text{Tl})$  существенным образом понижает естественный фон, регистрируемый

Ge(Li)-детектором. В области энергий гамма-квантов от 0,1 до 3 МэВ интегральный фон антикомптоновского спектрометра составляет 12 имп./мин., что в 270 раз меньше по сравнению с фоном, регистрируемым простым Ge(Li)-детектором. Результаты наших тщательных измерений фона антикомптоновского спектрометра приводятся в работах /10,11/. Повышение точности в определении энергии гамма-лучей достигается применением спектрометрической системы, устанавливающей дифференциальную нелинейность всего измерительного тракта в течение эксперимента /12/.

В отдельном эксперименте с помощью метода, описанного в /12/, определены энергии интенсивных гамма-лучей в жесткой части спектра  $^{169}\text{Yb}$ : 336,607/13/; 494,326/27/; 515,017/31/; 579,824/21/; 600,644/27/; 624,893/12/ кэВ. После коррекции положений пиков на нелинейность зависимость энергии калибровочных гамма-квантов от номера канала становится линейной с высокой точностью. В качестве калибровочных были использованы энергии гамма-лучей  $^{110}\text{Ag}$ ,  $^{152}\text{Eu}$  /13/ и энергии гамма-квантов 261,07877 /24/ кэВ / $^{2,3}$ /, соответствующих распаду  $^{169}\text{Yb}$ . Все энергии даны по отношению к нормали 411,80441 кэВ /распад  $^{198}\text{Au}$  / /14/.

Первое измерение гамма-излучения распада  $^{169}\text{Yb}$  в области энергий выше 250 кэВ проводилось с фильтром /12 мм Pb + 1 мм Cd + 1 мм Cu /. Весьма короткое описание этого эксперимента с подробным теоретическим анализом дано в работе /15/. После этого измерялся второй спектр с более интенсивным источником с фильтром /15 мм Pb + 1 мм Cd + 1 мм Cu /. Относительная эффективность регистрации антикомптоновского спектрометра с фильтром установлена путем измерения гамма-лучей  $^{110}\text{Ag}$ ,  $^{152}\text{Eu}$  /13/ и  $^{192}\text{Ir}$  /16/ и проведения через экспериментальные точки аналитической кривой методом наименьших квадратов. Зависимость относительной эффективности регистрации от энергии гамма-квантов описывается следующей функцией:  $\phi = \exp(A_0 + A_1 \log E + A_2 (\log E)^2 + BE^{-Q})$ . Вид кривых эффективности спектрометра с фильтром представлен в правой верхней части рис.1. Ошибки измерений отдельных точек показаны в виде палочек, однако в большинстве случаев они меньше размеров самой точки. Неточность в определении кривой эффективности не превышает 2%.

Измерения с фильтром происходили без применения системы точного установления нелинейности измерительного тракта. Калибровка по энергии в этом случае производилась проведением полинома третьей степени через реперные точки, соответствующие энергиям гамма-квантов  $^{169}\text{Yb}$ : 197,95809; 261,07877; 307,73773 /взвешенные средние величин, измеренных в работах / $^{2,3}$ / /, и следующих шести переходов, энергии которых нами были определены в отдельном эксперименте и приведены выше. Кроме того, в качестве калибровочных линий были использованы энергии 879,393/8/ и 1177,960/4/ /17/ принадлежащие  $^{160}\text{Tb}$ , 1173,238/4/ -  $^{60}\text{Co}$  /17/ и 396,331/20/ - /пересчитано к нормали 411,80441 кэВ/ -  $^{175}\text{Yb}$  /18/. Излучение  $^{160}\text{Tb}$  и  $^{175}\text{Yb}$  при длительных измерениях наблюдалось как примесное, излучение  $^{60}\text{Co}$  принадлежит фону.

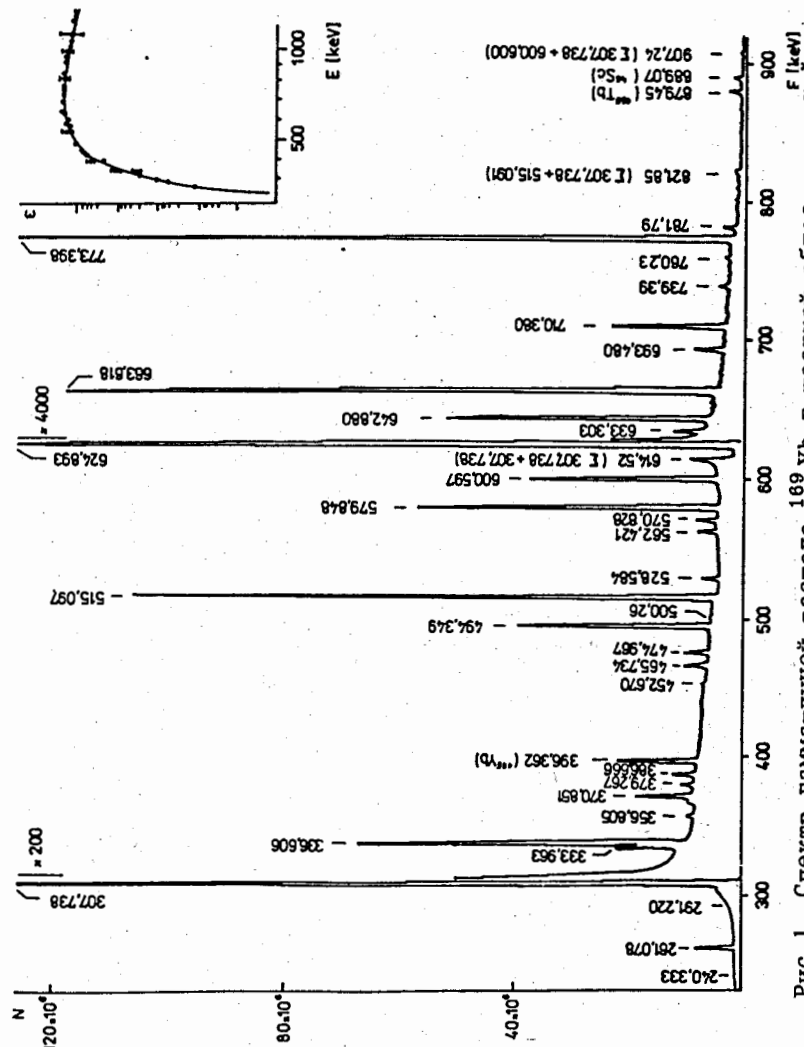


Рис.1. Спектр гамма-лучей распада  $^{169}\text{Yb}$  в жесткой области энергий.

Первое измерение с фильтром началось через 25 дней после облучения, происходило в течение 36 дней и состояло из 4 частей общей длительностью 287,5 час. Второе измерение проводилось в течение 20 дней и его длительность составляла 141 час. Для жестких линий была набрана примерно одинаковая статистика. Определен период полураспада всех наблюдаемых линий относительно гамма-лучей с энергией 307,738 кэВ <sup>19</sup>/В области энергий гамма-квантов от 250 до 1000 кэВ наблюдались слабые линии, принадлежащие <sup>175</sup>Yb /T<sub>1/2</sub> = 4,19 дн./, <sup>48</sup>Sc /83,8 дн./ и <sup>160</sup>Tb /72,1 дн./ - см.рис.1. Соответствующие радиоактивные ядра могли возникнуть в реакции (n, p) на изотопах, находящихся в качестве примесей в мишени.

Несмотря на то, что расстояние от источника до середины детектора было примерно 22 см, мы наблюдали четыре малоинтенсивных пика наложения с энергией 614,58/8/; 821,85/10/; 907,24/19/; 931,50/10/. Энергия пиков наложения примерно на 1 кэВ ниже соответствующей суммы энергий, их интенсивность убывает с периодом, в два раза короче, чем интенсивность одиночных гамма-лучей, и форма пиков наложения имеет более сложный вид /см. рис.1/.

Расчитанная относительная интенсивность пиков наложения соответствует экспериментальным значениям, интенсивность остальных возможных пиков значительно ниже предела обнаружения линии. Результаты измерений с первым <sup>15</sup>/и вторым источниками находятся в хорошем согласии, и их средние значения показаны в табл.1. Хотя значения данных о  $\gamma$ -переходах уточнены, это не отражается существенным образом на теоретических выводах, сделанных в работе <sup>15</sup>/По сравнению с результатами предыдущих работ <sup>1,5,8</sup>/ нами было обнаружено семь новых гамма-лучей распада <sup>189</sup>Yb: 356,805/18/ /T<sub>1/2</sub> = /32+6/ дн./; 500,26/9/ /T<sub>1/2</sub> = /36+20/ дн./; 633,303/24/ /T<sub>1/2</sub> = /30+6/ дн./; 693,480/19/ /T<sub>1/2</sub> = /30+3/ дн./; 739,39/4/ /T<sub>1/2</sub> = /25+5/ дн./; 760,23/7/ /T<sub>1/2</sub> = /23+9/ дн./; 781,79/3/ /T<sub>1/2</sub> = /25+4/ дн./ Скорость уменьшения интенсивности этих  $\gamma$ -переходов подтверждает их принадлежность распаду <sup>189</sup>Yb.

Полуширина линии 465,734 кэВ на 9% больше, чем полуширина одиночной линии с близкой энергией. Энергия рассматриваемой линии не совпадает с энергией перехода 5/2 5/2<sup>+</sup> — 7/2 7/2<sup>+</sup> или перехода 3/1 1/2<sup>-</sup> — 3/2 1/2<sup>+</sup>, вычисленной из схемы распада. Если предположить, что линия 465,734 кэВ является дублетом и энергии переходов можно вычислить на основе схемы распада E<sub>γ</sub>(5/2 5/2<sup>+</sup> — 7/2 7/2<sup>+</sup>) = 465,662/6/ кэВ и E<sub>γ</sub>(3/2 1/2<sup>-</sup> — 3/2 1/2<sup>+</sup>) = 466,560 /7/ кэВ, то получим оценки интенсивностей этих переходов I<sub>γ</sub>(5/2 5/2<sup>+</sup> — 7/2 7/2<sup>+</sup>) ~ 2,08 и I<sub>γ</sub>(3/2 1/2<sup>-</sup> — 3/2 1/2<sup>+</sup>) ~ 0,23.

В контрольном измерении облученного пустого цилиндра из графита, которое проводилось без фильтра в течение 88 час, не были обнаружены гамма-лучи вышеуказанных энергий. Сравне-

Энергии и относительные интенсивности гамма-лучей <sup>189</sup>Yb; область спектра  $E_{\gamma} > 240$  кэВ

E <sub>γ</sub> [кэВ]	ΔE <sub>γ</sub> [кэВ]	I <sub>γ</sub> [отн. ед.]	I <sub>γ</sub> [отн. ед.]
240,333	0,005	1060	90
261,07877 а)	0,00024	16000	1200
291,220	0,014	41,9	1,9
307,73773 а)	0,00010	100000	2000
333,963	0,008	19,2	0,5
336,606	0,003	95,1	1,9
356,805 н)	0,018	1,51	0,08
370,851	0,004	9,74	0,20
379,267	0,008	1,88	0,05
386,666	0,007	3,43	0,08
452,670	0,028	0,193	0,012
465,734 б)	0,007	2,26	0,05
474,967	0,007	2,13	0,05
494,349	0,006	15,9	0,3
500,26 н)	0,09	0,087	0,015
515,097	0,006	45,9	0,9
528,584	0,008	1,296	0,028
562,421	0,010	1,270	0,028
570,828	0,011	1,321	0,028
579,848	0,008	21,1	0,4
600,597	0,008	12,68	0,24
624,893	0,012	55,0	1,0
633,303 н)	0,024	0,086	0,004
642,880	0,010	0,862	0,014
663,618	0,010	2,130	0,024
693,480 н)	0,019	0,0995	0,0023
710,380	0,013	0,358	0,005
739,39 н)	0,04	0,0271	0,0018
760,23 н)	0,07	0,0120	0,0011
773,398	0,014	2,382	0,028
781,79 н)	0,03	0,0345	0,0017

н) — гамма-переходы, наблюдаемые впервые; а) — значение энергии из работ <sup>2,3</sup>/; б) — линия является дублетом с использованием энергий переходов E<sub>γ</sub>(5/2 5/2<sup>+</sup> → 7/2 7/2<sup>+</sup>) = 465,662/6/ кэВ и E<sub>γ</sub>(3/2 1/2<sup>-</sup> → 3/2 1/2<sup>+</sup>) = 466,560 /7/ кэВ, полученных на основе схемы распада; можно вычислить их интенсивности I<sub>γ</sub>(5/2 5/2<sup>+</sup> → 7/2 7/2<sup>+</sup>) ~ 2,08 и I<sub>γ</sub>(3/2 1/2<sup>-</sup> → 3/2 1/2<sup>+</sup>) ~ 0,23.

ние с работой В.А.Балалаева и Б.С.Джелепова <sup>17/</sup>, которая являлась самой точной и полной в области высоких энергий гамма-квантов, показывает, что имеется согласие с нашими данными в энергиях и интенсивностях гамма-лучей в пределах трехкратной ошибки за исключением самых слабых переходов. Точность определения энергий гамма-квантов /см. табл.1/ на один-два порядка лучше, чем в работе <sup>17/</sup>, точность в определении интенсивностей у нас от двух до пяти раз выше, чем в работе <sup>17/</sup>.

В табл.2 приведена верхняя граница интенсивности гамма-лучей  $I_M$  с энергией 614,8 кэВ <sup>17/</sup>, 492,4 кэВ <sup>20/</sup>, шести гамма-квантов, указанных Г.Р.Вермой и др. <sup>16/</sup>, и сомнительных гамма-лучей /см. <sup>11/</sup>/. Предельную интенсивность определяем как площадь пика высотой  $3\sigma$  за исключением линий, соответствующих энергиям: 301,6; 304; 314,7; 317; 320; 464; 492,4; 614,8 кэВ, которые должны располагаться вблизи интенсивных линий или на фоне сложного вида.  $I_M$  увеличена настолько, чтобы можно было пик на рисунке заметить простым глазом. Значения  $I_M$  от нескольких раз до нескольких десятков раз ниже, чем интенсивности, указанные в работах <sup>1,7,8,20/</sup>. В отдельном эксперименте, в близкой геометрии от размещения радиоактивного источника и Ge(Li)-детектора, мы наблюдали 19 пиков наложения разных энергий, среди которых были и линии с энергией 286,93; 295,43; 327,89; 353,50; 614,53 кэВ. Вероятно, близкие энергии гамма-лучей, которые приведены в табл.2, являются пиками наложения импульсов. Можно предположить, что переходы 304; 425,0 и 492,4 кэВ принадлежат примесям.

На основе схемы распада  $^{169}\text{Yb}$  /см. рис.2/ могли бы существовать гамма-переходы, которые до сих пор не наблюдались. В табл.3 установлена предельная интенсивность этих переходов с энергией выше 300 кэВ.

Полезные сведения о размещении гамма-переходов в схеме распада можно получить при измерениях во внутренней геометрии расположения радиоактивного источника в антикомптоновском спектрометре. В этом случае источник был помещен в оловянную коробочку непосредственно над Ge(Li)-детектором внутри NaI(Tl) кристалла. Олово толщиной 1 мм служит для подавления рентгеновских лучей, возникающих при распаде  $^{169}\text{Yb}$ . Интенсивность дифференциально-интегральных совпадений Ge(Li)-NaI(Tl) зависит от числа гамма-квантов в каскаде, и ее можно рассчитать для всех гамма-переходов, размещенных в схеме распада <sup>21/</sup>.

Результаты измеренных и вычисленных относительных интенсивностей совпадений даны в табл.4. Вычисления производились в предположении размещения всех обнаруженных нами гамма-переходов /см. табл.1/, показанном на рис.2. Совпадения гамма-гамма в области энергий ниже 307,74 кэВ измерялись много раз <sup>1,6/</sup>, хотя количественной обработки их не производилось. Введение уровней с энергиями 118,190; 138,934; 316,148; 379,269 и 472,884 кэВ подтверждается на основе сравнения эксперимен-

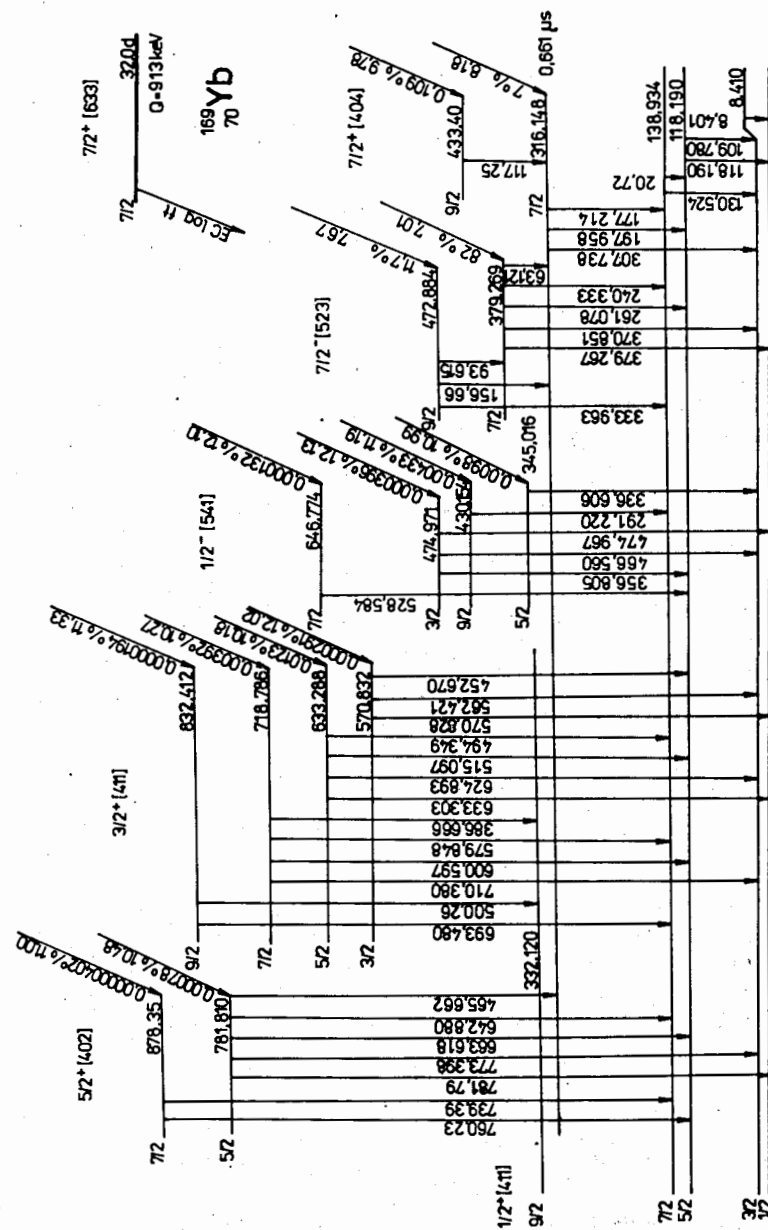


Рис.2. Схема распада  $^{169}\text{Yb}$  →  $^{169}\text{Tm}$ .

Таблица 2

Верхние пределы интенсивностей некоторых гамма-линий, приписанных распаду  $^{169}\text{Yb}$  авторами работ /6,7,20/

$E_{\gamma}(\Delta E_{\gamma})$ [кэВ]	$I_{\gamma}(\Delta I_{\gamma})$ [отн. ед., (307)=10 <sup>5</sup> ]	Работа	$I_{\gamma n}$ [отн. ед.]
252	а)	6)	<30
285,0(2)	28(5)	[6]	<10
288	а)	6)	<7
295,0(2)	70(7)	[6]	<5
304,0(1)	840(70)	[6]	<100
317	280	6)	<4
320,0(15)	210(100)	6)	<2
328,0(2)	70(30)	[6]	<1
354,7(1)	200(50)	[6]	<0,2
363	а)	6)	<0,12
394(2)	70	6)	<0,10
411(2)	30	6)	<0,09
417(2)	30	6)	<0,09
425,0(2)	7(3)	[6]	<0,08
492,4(8)	2(1)	[20]	<0,1
614,8(5)	0,93(9)	[7, 20]	<0,5

а) Интенсивность в работе не указана.

б) Предыдущие работы, которые анализировались Балалаевым и др. /1/ на стр.102.

тальных и вычисленных интенсивностей совпадений /см. табл.4/. Впервые измерены совпадения переходов 494,3; 515,1; 579,8; 600,6 и 624,9 кэВ, которые подтверждают существование уровней 633,287 и 718,793 кэВ, введенных раньше лишь на основе баланса энергий.

Согласие суммы энергий уровня и перехода, т.е.:

$$332,120/9/ + 500,26/9/ = 832,38/10/$$

$$138,934 + 693,480/19/ = 832,414/19/$$

$$138,934 + 739,39/4/ = 878,32/4/$$

$$118,190 + 760,23/7/ = 878,42/7/$$

позволяет ввести два новых уровня с энергиями 832,412 и 878,35 кэВ. Первый из вышеуказанных уровней наблюдался в реакции (p, 2ny) и (d, 3ny) /8/. Предполагается, что он является четвертым уровнем ротационной полосы состояния 3/2<sup>+</sup> /411/. Второй

Таблица 3

Пределы интенсивностей  $I_{\gamma m}$  некоторых гамма-лучей с энергией выше 300 кэВ

$I_i$	$K_i$	$I_f$	$K_f$	E (кэВ)	$I_{\gamma \text{ выч}}$ (отн. ед.)	$I_{\gamma m}$ (отн. ед.)
7/2 <sup>-</sup>	1/2 <sup>-</sup>	5/2 <sup>-</sup>	1/2 <sup>-</sup>	301,8		60
7/2 <sup>-</sup>	1/2 <sup>-</sup>	9/2 <sup>+</sup>	1/2 <sup>+</sup>	314,6	0,20(6) <sup>а)</sup>	5
7/2 <sup>-</sup>	1/2 <sup>-</sup>	7/2 <sup>+</sup>	7/2 <sup>+</sup>	330,6		0,3
1/2 <sup>-</sup>	1/2 <sup>-</sup>	3/2 <sup>+</sup>	1/2 <sup>+</sup>	333,6		10
1/2 <sup>-</sup>	1/2 <sup>-</sup>	1/2 <sup>+</sup>	1/2 <sup>+</sup>	342,0		0,2
5/2 <sup>+</sup>	5/2 <sup>+</sup>	9/2 <sup>+</sup>	7/2 <sup>+</sup>	348,5		0,2
7/2 <sup>+</sup>	3/2 <sup>+</sup>	11/2 <sup>+</sup>	1/2 <sup>+</sup>	351,1	0,001 <sup>б)</sup>	0,2
9/2 <sup>+</sup>	3/2 <sup>+</sup>	9/2 <sup>+</sup>	7/2 <sup>+</sup>	399,1	0,00004 <sup>г)</sup>	0,1
7/2 <sup>+</sup>	3/2 <sup>+</sup>	7/2 <sup>+</sup>	7/2 <sup>+</sup>	402,6	0,003 <sup>г)</sup>	0,1
3/2 <sup>+</sup>	3/2 <sup>+</sup>	7/2 <sup>+</sup>	1/2 <sup>+</sup>	431,9	0,0005 <sup>б)</sup>	0,09
7/2 <sup>+</sup>	5/2 <sup>+</sup>	9/2 <sup>+</sup>	7/2 <sup>+</sup>	445,0	0,004 <sup>г)</sup>	0,06
5/2 <sup>+</sup>	5/2 <sup>+</sup>	9/2 <sup>+</sup>	1/2 <sup>+</sup>	449,7		0,06
9/2 <sup>+</sup>	3/2 <sup>+</sup>	11/2 <sup>+</sup>	1/2 <sup>+</sup>	464,8	0,024(9) <sup>а)</sup>	0,2
7/2 <sup>-</sup>	1/2 <sup>-</sup>	7/2 <sup>+</sup>	1/2 <sup>+</sup>	507,8	0,043 <sup>д)</sup>	0,04
7/2 <sup>+</sup>	5/2 <sup>+</sup>	11/2 <sup>+</sup>	1/2 <sup>+</sup>	510,8	0,0000007 <sup>б)</sup>	0,04
9/2 <sup>+</sup>	3/2 <sup>+</sup>	7/2 <sup>+</sup>	7/2 <sup>+</sup>	516,3	0,000009 <sup>г)</sup>	1
7/2 <sup>+</sup>	5/2 <sup>+</sup>	9/2 <sup>+</sup>	1/2 <sup>+</sup>	546,3	0,004 <sup>г)</sup>	0,03
11/2 <sup>-</sup>	1/2 <sup>-</sup>	9/2 <sup>+</sup>	1/2 <sup>+</sup>	552,1		0,03
9/2 <sup>+</sup>	3/2 <sup>+</sup>	5/2 <sup>+</sup>	1/2 <sup>+</sup>	714,3	0,0003 <sup>б)</sup>	0,005
7/2 <sup>+</sup>	5/2 <sup>+</sup>	3/2 <sup>+</sup>	1/2 <sup>+</sup>	870,0	0,0003 <sup>б)</sup>	0,003

а) Рассчитано с использованием значения из реакций.

б) Рассчитано с использованием правил Алаги.

в) Определено на основе расчета вероятностей E2-переходов /см. работу /15/ /.

г) Рассчитано с учетом влияния смешивания Кориолиса /см. работу /15/ /.

уровень установлен лишь при бета-распаде. Предполагаем, что он является вторым уровнем ротационной полосы состояния 5/2<sup>+</sup>/402/. Такая интерпретация уровня 878,35 кэВ вытекает из близости экспериментальной энергии данного состояния к рассчитанной на основе ротационной модели /см. /15/ / и из характера его разрядки переходом 739,39 кэВ на уровень 7/2, 1/2<sup>+</sup>/411/ и переходом 760,23 кэВ на состояние 5/2, 1/2<sup>+</sup>/411/.

Таблица 4

Относительная интенсивность дифференциально-интегральных двойных совпадений  $T_2$ .

$E$ [кэВ]	$T_2$ расч [%]	$\Delta T_2$ расч <sup>а)</sup> [%]	$T_2$ экс [%]	$\Delta T_2$ экс [%]
63,1	46,9	0,3	31,0	2,1
93,6	46,0	0,3	13,2	0,2
109,8	37,4	1,9	39,5	1,7
118,2	37,4	1,9	38,2	1,4
130,5	32,6	1,2	31,7	0,9
177,2	14,7	0,3	11,1	0,3
198,0	8,90	0,24	6,31	0,12
240,5	13,32	0,29	12,5	0,6
261,1	7,39	0,26	6,32	0,19
307,7	2,04	0,06	2,15	0,07
494,3	13,00	0,29	10,2	4,2
515,1	7,00	0,26	5,5	0,5
579,8	13,00	0,29	10,8	1,0
600,6	7,00	0,26	4,9	1,9
824,9	0		2,1	0,3

а) Учтены только статистические ошибки.

Переход 781,79 кэВ можно разместить как прямой переход с уровня 781,810 кэВ, и таким образом вновь подтвердить существование рассматриваемого уровня. Сумма  $118,190 + 356,805/18/ = 474,995/18/$  кэВ близка энергии уровня 474,971 кэВ, который был введен<sup>1/</sup> предварительно. Возможная разрядка уровня 474,971 кэВ переходом 365,805 кэВ является важным фактом в пользу введения этого уровня в схему распада.

Для определения энергий возбужденных состояний были использованы данные об энергиях переходов в области до 310 кэВ из работ<sup>2,3/</sup> по которым нами рассчитаны средние взвешенные значения: 63,12078/8/; 93,61513/11/; 109,77990/5/; 118,19018/18/; 130,52383/17/; 177,21438/19/; 197,95809/20/; 261,07877/24/ и 307,73773/10/ кэВ. Для переходов 8,400/8/; 20,72/3/; 117,25/5/ и 156,66/10/ кэВ использовались данные работ, приведенных в<sup>1/</sup>. Методом наименьших квадратов мы вычислили энергии уровней  $^{169}\text{Tm}$ , которые приведены в табл.5. Интерпретация уровней осталась та же, что и в работе<sup>1/</sup>; дополнительно были введены только характеристики состояний с энергией 832,412 и 878,35 кэВ. Интенсивно-

Таблица 5

Энергии уровней, интенсивности бета-переходов и значения  $\log ft$  для распада  $^{169}\text{Yb}$  на уровни  $^{169}\text{Tm}$

$E_i$ ( $\Delta E_i$ ) [кэВ]	$I K^x$ [ $N_{\text{мэВ}}$ ]	$\pi_i$ ( $\Delta \pi_i$ ) [% на распад]	$\log ft$ ( $\Delta \log ft$ )
8,41028(19)	3/2 1/2 <sup>+</sup> [411]	-2(10)	>8,5
118,19017(18)	5/2 1/2 <sup>+</sup> [411]	1(3)	>8,7
138,93394(23)	7/2 1/2 <sup>+</sup> [411]	-1,4(18)	>9,7
316,14811(20)	7/2 7/2 <sup>+</sup> [404]	7(4)	8,18(27)
332,120(9)	9/2 1/2 <sup>+</sup> [411]	-0,000383 <sup>а)</sup>	а)
345,016(3)	5/2 1/2 <sup>-</sup> [541]	0,0098(4)	10,99(2)
379,26889(21)	7/2 7/2 <sup>-</sup> [523]	82(4)	7,01(4)
430,154(14)	9/2 1/2 <sup>-</sup> [541]	0,00433(26)	11,19(3)
433,40(5)	9/2 7/2 <sup>+</sup> [404]	0,109(12)	9,78(5)
472,88403(24)	9/2 7/2 <sup>-</sup> [523]	11,7(8)	7,67(4)
474,971(7)	3/2 1/2 <sup>-</sup> [541]	0,000396(19)	12,13(3)
570,832(7)	3/2 3/2 <sup>+</sup> [411]	0,000291(12)	12,02(3)
633,288(4)	5/2 3/2 <sup>+</sup> [411]	0,0123(5)	10,18(4)
646,774(8)	7/2 1/2 <sup>-</sup> [541]	0,000132(6)	12,10(4)
718,786(5)	7/2 3/2 <sup>+</sup> [411]	0,00392(16)	10,27(6)
781,810(6)	5/2 5/2 <sup>+</sup> [402]	0,00078(3)	10,48(9)
832,412(19)	9/2 3/2 <sup>+</sup> [411]	0,0000194(18)	11,33(16)
878,35(3)	7/2 5/2 <sup>+</sup> [402]	0,00000402(27)	11,00(26)

а) Не наблюдались переходы, уходящие из этого уровня, они имеют энергию меньше 300 кэВ и перекрыты большим комптоновским фоном интенсивных гамма-линий.

сти переходов в области энергий до 310 кэВ даны в<sup>1/</sup>. Полные интенсивности переходов вычислены при использовании значений конверсионных коэффициентов из работы<sup>22/</sup>. Абсолютные интенсивности в процентах на распад были определены подсчетом суммы интенсивностей переходов, идущих на два нижних уровня /бета-распад на уровень 3/2 1/2<sup>+</sup>/411/ относится к двукратному за-прещению, должен иметь  $\log ft = 12$  и его влиянием на баланс интенсивностей можно пренебречь/.

В адиабатической модели ротатора для отношения приведенных вероятностей разрешенных /по спине и квантовому числу  $K$  / бета-переходов, которые идут на два уровня /обозначим их  $m$  и  $n$  / одинаковой ротационной полосы /т.е.  $K_m = K_n = K_f$  /, справедливы правила Алаги. В случае электронного захвата, когда два бета-



перехода имеют небольшую энергию, можно, на основе вышеупомянутого правила, определить энергию распада материнского ядра  $Q$ , так как /см.<sup>23,24</sup>/:

$$\frac{\Pi_n}{\Pi_m} = \frac{\langle I_i \lambda K_i K_f - K_i | I_n K_f \rangle^2}{\langle I_i \lambda K_i K_f - K_i | I_m K_f \rangle^2} \times \frac{\sum_j G_j^2 g_j^2(n)}{\sum_j G_j^2 g_j^2(m)}, \quad /1/$$

где  $g_j(m) = Q - E_m - \epsilon_j$  аналогично  $g_j(n) = Q - E_n - \epsilon_j$ ,  $j = K, L_1, L_2, M_1, M_2, N_1, N_2$ ;  $G_j = g_j$  для  $j = K, L_1, M_1, N_1$ ;  $G_j = f_j$  для  $j = L_2, M_2, N_2$ ,  $g_j, f_j$  - функции для анализа электронного захвата, их значение вычислено в таблицах работы /<sup>24</sup>/,  $\epsilon_j$  - энергия связи электрона на  $j$ -той оболочке атома /принимались значения, указанные в работе /<sup>24</sup>//. Соотношение /1/ нами использовалось для бета-переходов  $7/2, 7/2^+/633/$  —  $7/2, 5/2^+/402/$  с  $E_n = 878,35$  кэВ,  $\Pi_n = 0,0000402/27/\%$  на распад и  $7/2, 7/2^+/633/$  —  $5/2, 5/2^+/402/$  с  $E_m = 781,810$  кэВ,  $\Pi_m = 0,00078/3/\%$  на распад. В этом случае  $\lambda = 1$ . Решение уравнения /1/ производилось методом постепенной экстраполяции вокруг заданного начального значения  $Q$ . Получено значение  $Q = /913+1/$  кэВ, которое находится в хорошем согласии с величиной, указанной в работе /<sup>25</sup>/:  $Q = 908/4/$  кэВ. Приведенная нами ошибка энергии распада не учитывает неопределенности в сумме интенсивностей ненаблюдаемых переходов и неточности выполнения соотношения /1/ в связи с нарушением адиабатичности.

Оценка интенсивности ненаблюдаемых переходов изменяет интенсивность бета-перехода, идущего на уровень  $7/2 5/2^+/402/$ , с  $0,0397/21/$  на  $0,083/4/$ , и бета-перехода, идущего на  $5/2 5/2^+/402/$ , с  $7,68/9/$  на  $11,3/3/$  отн.единиц. Тогда  $Q = 922/2/$  кэВ. Вышеуказанные уровни являются довольно чистыми состояниями  $5/2^+/402/$ , примесь  $7/2^+/404/$  составляет примерно  $10^{-4}$  /см. работу /<sup>15</sup>/). Если предположим /более или менее произвольно/, что правила Алаги выполняются с точностью 20%, то нужно увеличить ошибку примерно на шесть кэВ.

Величины  $\log ft$  даны в табл.5. Они вычислены с использованием интенсивностей заселения уровней  $^{169}\text{Tm}$ , периода полураспада  $^{169}\text{Yb} /T_{1/2} = 32,00$  дн./<sup>19</sup>/ и энергии распада  $Q = /913+11/$ кэВ.

Авторы благодарят М.Я.Кузнецову за ценные советы и помощь при написании статьи.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Балалаев В.А., Желепов Б.С., Тер-Нерсисянц В.Е. Изобарные ядра с массовым числом  $A = 169$ . "Наука", Л., 1976.
2. Borchert C.L., Scheck W., Wieder K.P. Z.Naturforsch., 1975, Bd.30a, N.3, S.274.
3. Kessler E.G. et al. Nucl.Instr. and Meth., 1979, vol.160, p.435.
4. Желепов Б.С., Шестопалова С.А. Ядерно-спектроскопические нормалы. Атомиздат, М., 1980.
5. Георгиева М.К., Тумбев Г.Х. Доклады БАН, 1976, т.29, с.639.
6. Verma H.R. et al. J.Phys.Soc.Jap., 1978, vol.45, p.374.
7. Балалаев В.А., Желепов Б.С. Изв. АН СССР, сер.физ., 1972, т.36, с.2089.
8. Shirley V.S. Nuclear Data Sheets A = 169, 1982, vol.36, p.443.
9. Адам И. и др. Прикладная ядерная спектроскопия, 1982, вып.11, с.26.
10. Adam J., Kracik S., Kugler A. Proc. of the Second Int. Conf. on "Low Radioactivities 80". Bratislava: Věda, 1982.
11. Adam J., Kracik S., Hoffmann J. Jaderná energie, 1984, vol.30, p.41.
12. Адам И. и др. Прикладная ядерная спектроскопия, 1979, вып.9, с.33.
13. Meyer R.A., Massey T.N. Multigamma-Ray Calibration Sources, ICRM Seminar on Applied Radionuclide Metrology Geel, Belgium, 1983, vol.5, p.16.
14. Kessler E.G. et al. Phys.Rev.Lett., 1978, vol.40, p.171.
15. Адам И. и др. Тезисы докладов XXXVI совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. Харьков, 1986. "Наука", Л., с.124.
16. Yoshizawa Y., Iwata Y., Iinuma Y. Nucl.Instr. and Meth., 1980, vol.174, p.133.
17. Helmer R.G., van Assche P.H.M., van der Leun C. Atomic Data and Nuclear Data Tables, 1979, vol.24, p.39.
18. Reiersen J.D., Nilson G.C., Hatch E.N. Nucl.Phys., 1971, vol.A153, p.109.
19. Helmer R.G., Gehrke R.J., Greenwood R.G. Nucl.Instr. and Meth., 1975, vol.123, p.51.
20. Георгиева М.К., Мишева М.А., Тумбев Т.Х. Доклады БАН, 1973, т.26, с.623.
21. Адам И., Крачик Б., Куглер А. Прикладная ядерная спектроскопия, 1981, вып.11, с.34.

22. Rösler F. et al. Atomic Data and Nuclear Data Tables, 1978, vol.21, p.298.
23. Соловьев В.Г. Теория сложных ядер. "Наука", М., 1971.
24. Желепов Б.С., Зырянова Л.Н., Суслов Ю.П. Бета-процессы. "Наука", Л., 1972.
25. Wapstra A.N., Audi G. Nucl.Phys., 1985, vol.A432, p.1.

Рукопись поступила в издательский отдел  
19 мая 1986 года.