

Оценка значений характеристик распада и излучений ^{155}Eu

В. П. ЧЕЧЕВ, В. О. СЕРГЕЕВ

Приведены новые оцененные значения характеристик распада и излучений радионуклида ^{155}Eu , полученные с учетом информации, опубликованной в мировой литературе к 2003 г.

Ключевые слова: оцененные значения, характеристика распада и излучений.

New evaluated values of decay and radiations characteristics of radionuclide ^{155}Eu obtained taking into account information published to 2003 are presented.

Key words: evaluated values, decay and radiations characteristics.

Рассмотрим оцененные значения характеристик распада и излучений радионуклида ^{155}Eu , полученные в рамках исследовательской программы работ международной кооперации «Decay Data Evaluation Project» [1]. В 1982 г. сотрудниками Радиового института им. В. Г. Хлопина [2] была проведена оценка ядерно-физических характеристик (ЯФХ) ^{155}Eu , которая показала, что имевшиеся в то время экспериментальные данные отличаются большими погрешностями в расчетных значениях абсолютной вероятности эмиссии основных излучений, сопровождающих β^- -распад ^{155}Eu . В последующие годы непосредственные точные измерения абсолютной вероятности эмиссии фотонного излучения в распаде ^{155}Eu , проведенные в лаборатории прикладной ядерной спектроскопии и радиометрии Радиового института им. В. Г. Хлопина, позволили существенно уменьшить эти погрешности [3, 4]. В данной статье проведем ревизию ранее сделанных оценок и получим новые оцененные значения ядерно-физических характеристик ^{155}Eu с учетом теоретических и экспериментальных данных, опубликованных к 2003 г.

Схема распада ^{155}Eu (см. рисунок). В [2] при отсутствии прямых измерений абсолютной вероятности эмиссии фотонного излучения (P_γ , P_X) в качестве опорной характеристики для оценки интенсивности излучений было выбрано значение вероятности β^- -распада в основное состояние ^{155}Gd , полученное усреднением результатов пяти β -спектрометрических измерений ($P\beta_0 = 0,18(4)$). Большая погрешность этой величины (из-за значительного расхождения результатов измерений) приводит к большой относительной погрешности P_γ , P_X (4 %). Сейчас для новой оценки мы имеем возможность использовать в качестве опорной ха-

рактеристики непосредственно измеренную в двух независимых экспериментах абсолютную вероятность эмиссии наиболее интенсивного γ -излучения с энергией 86,55 кэВ: 30,5(3) % [3] и 31,1(4) % [5]. Среднее взвешенное этих значений — 30,7(3) %. Рекомендуемое значение периода полураспада ^{155}Eu принято по результатам оценки [6]: $T_{1/2}(^{155}\text{Eu}) = 1736(5)$ суток или 4,753(14) лет. В табл. 1 представлены оцененные значения характеристик β^- -переходов в распаде ^{155}Eu . Для расчета энергии β^- -переходов использовано значение полной энергии распада $Q(\beta^-) = 252,2(11)$ кэВ, принятое по данным [7]. Энергии возбужденных уровней ^{155}Gd (см. рисунок) приняты из наиболее точных измерений [8], где для изучения энергетических уровней ^{155}Gd , проявляющихся в реакции $^{154}\text{Gd}(n, \gamma)^{155}\text{Gd}$, был использован кристалл-дифракционный спектрометр.

Вероятности β^- -переходов рассчитаны из баланса интенсивностей для каждого уровня на основе значения указанной выше опорной характеристики $P_\gamma(86,5 \text{ кэВ}) = 30,7(3)\%$. Средняя энергия β^- -частиц ^{155}Eu получается равной 45,7(10) кэВ. В табл. 2 приведены оцененные значения характеристик γ -излучения в распаде ^{155}Eu . Базовые экспериментальные результаты для оценки значений энергии γ -излучения (с указанием данных, включенных в статистическую обработку) приведены в табл. 3. Экспериментальные данные для оценки относительной интенсивности γ -излучения показаны в табл. 4.

Оцененные значения относительной интенсивности P'_γ получены как средние взвешенные результатов измерений, приведенных в табл. 4, кроме $P'(\gamma_{5,4}, 10,4 \text{ кэВ})$ и $P'(\gamma_{4,2}, 21,0 \text{ кэВ})$. Последние рассчитаны на основе данных об интенсивностях L -конверсионных электронов, измеренных

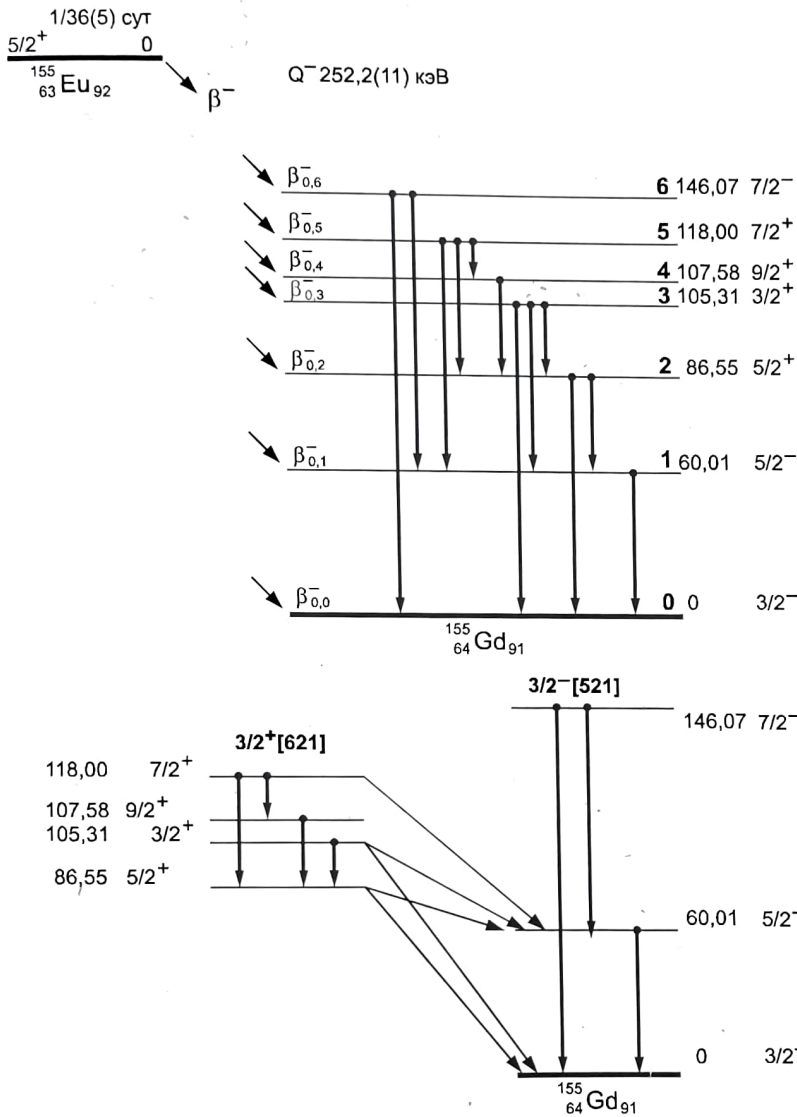


Схема распада ^{155}Eu .

В нижней части рисунка дана схема уровней и ротационных полос ^{155}Gd , которые проявляются в распаде ^{155}Eu

в [10], и принятых теоретических коэффициентов внутренней конверсии: $P_{ce}(L_1)$, $\alpha(L_1)$ для $\gamma_{5,4}$ и $P_{ce}(L_3)$, $\alpha(L_3)$ для $\gamma_{4,2}$.

Значения из [11] не включены в усреднение, так как они позднее были ревидованы в [16]. Остальные результаты

Таблица 1

β^- -переходы в распаде ^{155}Eu

Переходы	Энергия, кэВ	Вероятность	Природа	lg ft
β_6^-	106,1(11)	0,0073(7)	Запрещенный 1-го порядка	8,83
β_5^-	134,2(11)	0,0185(23)	Разрешенный	8,75
β_4^-	144,6(11)	<0,0001	Запрещенный 2-го порядка	>11,1
β_3^-	146,9(11)	0,461(29)	Разрешенный	7,47
β_2^-	165,7(11)	0,255(29)	Разрешенный	7,89
β_1^-	192,2(11)	0,092(4)	Запрещенный 1-го порядка	8,54
β_0^-	252,2(11)	0,0166(11)	Разрешенный	8,65

опущены по статическим критериям или из-за грубости измерений.

Оцененное значение $P(\gamma_{3,0}, 105,3 \text{ кэВ}) = 68,8(14)$ поддерживается результатом измерения отношения интенсивностей K-конверсионных электронов $\gamma_{3,0}$ и $\gamma_{2,0}$ $P(\text{ce}_{3,0} K) / P(\text{ce}_{2,0} K) = 0,408(8)$ [10], из которого с учетом принятых теоретических коэффициентов внутренней конверсии для этих E1-переходов получается $P(\gamma_{3,0}, 105,3 \text{ кэВ}) = 68,7(17)$.

Значения абсолютной вероятности эмиссии γ -излучения (P_γ) рассчитаны на основе значений носительной интенсивности P'_γ , приведенных в табл. 2, и принятого значения $P_\gamma(86,5 \text{ кэВ}) = 30,7(3)\%$.

Абсолютная вероятность эмиссии $\gamma_{3,0}$ ($105,3 \text{ кэВ}$) $= 20,39(13)\%$, измеренная в [24], значительно меньше оцененного и измеренных значений в [3, 4]. Если принять его при сохранении значения $P(\gamma_{2,0}, 86,5 \text{ кэВ}) = 30,7(3)\%$, то относительная интенсивность $P(\gamma_{3,0}, 105,3 \text{ кэВ}) = 66,4(9)$, т. е. меньше оцененной по девяти работам (см. табл. 4). С другой стороны, если принять результат из [24] при сохранении оцененного значения $P(\gamma_{3,0}, 105,3 \text{ кэВ}) = 68,8(14)$, то абсолютная вероятность эмиссии $P(\gamma_{2,0}, 86,5 \text{ кэВ})$ получится равной $29,6(6)\%$, меньше обоих результатов непосредственных измерений [3, 5]. Поэтому данные из [24] не были использованы для определения абсолютной вероятности эмиссии γ -излучения в распаде ^{155}Eu .

Следует также отметить, что если основываться на экспериментальных данных об интенсивности β^- -перехода в основное состояние (оцененное значение в [2] $P_{\beta 0} = 18,4(39)\%$), то расчет на основе баланса интенсивностей с учетом принятых P'_γ и коэффициента внутренней конверсии дает значение $P(\gamma_{2,0}, 86,5 \text{ кэВ}) = 30,6(17)\%$ [3], поддерживающее нашу оценку.

Мультипольный состав (M1+E2) γ -переходов $\gamma_{5,4}$, $\gamma_{9,2}$, $\gamma_{5,2}$ и $\gamma_{1,0}$ определен по данным работ, в которых были измерены отношения $L_1: L_2: L_3$ кон-

Таблица 2

Оцененные значения энергии и интенсивности γ -излучения в распаде ^{155}Eu

Переходы	Энергия, кэВ	Относительная интенсивность	Число фотонов на 100 распадов
$\gamma_{5,4}$	10,4183(13)	0,0115(13)	0,0035(4)
$\gamma_{3,2}$	18,763(2)	0,156(20)	0,048(7)
$\gamma_{4,2}$	21,035(4)	0,0015(1)	0,00046(3)
$\gamma_{2,1}$	26,531(21)	1,03(6)	0,316(22)
$\gamma_{5,2}$	31,444(7)	0,023(5)	0,0071(15)
$\gamma_{3,1}$	45,2990(10)	4,27(12)	1,31(5)
$\gamma_{5,1}$	57,9890(10)	0,217(18)	0,067(6)
$\gamma_{1,0}$	60,0086(10)	3,96(12)	1,22(5)
$\gamma_{6,1}$	86,0591(10)	0,50(5)	0,154(17)
$\gamma_{2,0}$	86,5479(10)	100	30,7(3)
$\gamma_{3,0}$	105,3083(10)	68,8(14)	21,1(6)
$\gamma_{6,0}$	146,0710(10)	0,166(10)	0,051(4)

Таблица 3

Измеренные и оцененные значения энергии γ -излучения в распаде ^{155}Eu

Переходы	Измеренные значения энергии, кэВ										Оцененное значение, кэВ
	1959 [9]	1967 [10]	1969 [11]	1970 [12]	1970 [13]	1975 [14] ^a	1975 [15]	1986 [8] ^b	1990 [16]	1990 [17]	
$\gamma_{5,4}$	—	10,40 (2)*	—	—	—	10,40(2)*	—	10,4183 (13)	—	—	10,4183(13)
$\gamma_{3,2}$	—	18,776 (35)*	18,776 (35)*	—	—	18,749 (19)*	18,73 (3)*	18,760 (4)	18,784 (35)*	18,764 (2)	18,763 (2) ^c
$\gamma_{4,2}$	—	21,02 (2)	—	—	—	21,02 (2)	—	21,030 (10)	—	21,036 (4)	21,035 (4)
$\gamma_{2,1}$	—	—	26,513 (21)*	—	—	—	26,49 (5)	26,530 (23)	26,532 (21)	—	26,531 (21)
$\gamma_{5,2}$	—	—	31,40 (10)*	31,55 (12)	—	—	—	31,444 (7)	31,40 (10)	—	31,444 (7)
$\gamma_{3,1}$	45,29 (1)	45,3 (2)*	45,299 (13)*	45,299 (2)	45,2972 (13)	—	45,27 (5)*	45,3000 (10)	45,295 (13)	—	45,2990 (10)
$\gamma_{5,1}$	—	—	57,983 (30)*	57,970 (26)	57,9805 (20)	—	57,99 (4)	57,989 (10)	57,986 (30)	—	57,9890 (10)
$\gamma_{1,0}$	60,00 (2)	—	60,019 (15)*	60,006 (4)	60,0100 (18)	—	60,01 (4)	60,008 (2)	60,022 (15)	60,0086 (10)	60,0086 (10) ^c
$\gamma_{6,1}$	—	86,01 (20)	86,0 (5)	86,062 (23)	86,062 (5)	—	86,03 (7)	86,0590 (10)	—	—	86,05910 (10)
$\gamma_{2,0}$	86,56 (1)	86,82 (20)	86,539 (15)*	86,541 (3)	86,5452 (33)	—	86,53 (3)	86,5470 (10)	86,554 (15)	—	86,5479 (10)
$\gamma_{3,0}$	105,32 (3)	105,28 (20)	105,315 (15)*	105,302 (4)	105,308 (3)	—	105,30 (3)	105,3090 (10)	105,338 (15)	—	105,3083 (10)
$\gamma_{6,0}$	—	—	146,05 (2)*	146,061 (5)	—	—	146,04 (10)	146,0710 (10)	146,090 (30)	—	146,0710 (10)

^a Из распада ^{155}Tb .

^b Из исследования реакции $^{154}\text{Gd}(n, \gamma)^{155}\text{Gd}$.

^c При оценке дополнительно учтены данные [18] по распаду ^{155}Tb : $E(\gamma_{3,2}) = 18,769(15)$ кэВ и $E(\gamma_{1,0}) = 60,012(3)$ кэВ.

* Опушены из усреднения. Значения [11] опущены, так как позднее они ревидованы тем же автором в 1990 Me15. Остальные результаты опущены по статическим критериям или из-за грубости измерений.

версионных электронов в распаде ^{155}Eu [10, 14], в распаде ^{155}Tb [25] и в реакции $^{154}\text{Gd}(n, \gamma)^{155}\text{Gd}$ [8], а также по данным работ, в которых были изучены угловые $\gamma\gamma$ -корреляции при распаде ^{155}Tb [27] и при кулоновском возбуждении уровней ^{155}Gd [25,28]. Оцененные значения вклада $E2$ в мультипольность указанных γ -переходов даны в табл. 5.

Оцененные значения коэффициентов внутренней конверсии γ -переходов в распаде ^{155}Eu (табл. 6) получены интерполяцией теоретических значений из [30] по программе ICC99 [31]. Относительные погрешности коэффициентов внутренней конверсии для чистых мультипольностей приняты равными 1 % для α_K и 3 % для α_L и α_M (α_T — полный коэффициент внутренней конверсии). В табл. 6 приведены также оцененные значения вероятностей γ -переходов $P(\gamma + ce)$, полученные с использованием оцененных значений P_γ и α_T .

Оцененные значения характеристик электронного излучения в распаде ^{155}Eu приведены в табл. 7.

Энергии электронов внутренней конверсии вычислены из оцененных значений энергии γ -переходов и энергий связи электронов. Абсолютные вероятности эмиссии электронов внутренней конверсии рассчитаны из оцененных значений P_γ и коэффициентов внутренней конверсии. Средние энергии компонентов β -излучения (avg) вычислены по программе LOGFT [32].

Относительные интенсивности электронов внутренней конверсии $P'ce(\text{calc.})$, вычисленные из оцененных значений абсолютной вероятности эмиссии (табл. 8), сравниваются с измеренными в [10] $P'ce(\text{exp})$ (в единицах $P'(ce_{3,0} K) = 1000$).

Как видно из табл. 8, экспериментальные и расчетные значения хорошо согласуются за исключением $ce_{5,4} L$ и $ce_{6,1} K$. Расхождение для $ce_{5,4} L$ может быть связано с экспериментальными трудностями измерения электронов внутренней конверсии

Таблица 4

Измеренные и оцененные значения относительной интенсивности γ -излучения в распаде ^{155}Eu

Переходы	E_{γ} , кэВ	Измеренные значения относительной интенсивности										Оцененное значение
		1959 [9]	1967 [37]	1968 [19]	1969 [11]	1970 [12]	1971 [20]	1975 [15]	1990 [16]	1994 [3]	1996 [21]	
$\gamma_{5,4}$	10,418	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,0115(13) ^a
$\gamma_{3,2}$	18,763	$\approx 0,1^*$	—	—	0,16(4)*	—	0,17(3)	0,13(3)	0,16(4)	—	—	0,16(2) ^{b, c}
$\gamma_{4,2}$	21,035	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	$1,5(3) \cdot 10^{-3d}$
$\gamma_{2,1}$	26,531	$\approx 4^*$	—	$\approx 1^*$	1,03(6)*	—	1,00(10)	1,10(13)	1,03(6)	—	—	1,03(6) ^c
$\gamma_{5,2}$	31,444	—	—	—	0,023(5)*	0,03(2)	—	—	0,023(5)	—	—	0,023(5) ^c
$\gamma_{3,1}$	45,299	2,3*	—	2,8(7)*	4,18(17)*	3,6(7)	4,1(3)	3,95(40)	4,21(20)	4,36(12)	4,3(10)	4,27(12) ^c
$\gamma_{5,1}$	51,989	—	—	0,20(3)	0,217(18)*	0,22(5)	—	0,23(3)	0,221(18)	0,213(30)	—	0,217(18) ^c
$\gamma_{1,0}$	60,009	4,0*	5,1(20)*	3,8(2)	3,60(10)*	4,3(3)	3,9(9)	3,8(4)	3,60(10)	3,99(12)	3,9(9)	3,96(12) ^c
$\gamma_{6,1}$	86,059	—	—	0,50(5)	—	0,49(5)	—	0,54(11)	—	—	—	0,50(5) ^c
$\gamma_{2,0}$	86,548	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
$\gamma_{3,0}$	105,308	64*	65,7(65)	67,9(35)	66,8(27)*	68,3(27)	68(4)	69,9(35)	66,8(27)	68,5(14)	69,5(16)	68,8(14) ^{c, e}
$\gamma_{6,0}$	146,071	—	0,16(5)	—	0,167(10)*	0,19(2)	—	0,14(2)	0,167(10)	—	—	0,166(10) ^c

^a Оценено из баланса интенсивностей для уровня с энергией 107,58 кэВ.

^b В усреднение дополнительно включено значение 0,16(2) из [22].

^c Среднее взвешенное.

^d Оценено по интенсивности конверсионных электронов и принятым значениям КВК.

^e В усреднение дополнительно включено значение 69,1(9) из [23].

* Опущены из усреднения.

Таблица 5

Мультипольности γ -переходов в распаде ^{155}Eu

E_{γ} , кэВ	Результат измерения, %	Метод	Оценка, %	Литература
10,418	0,11(5) 0,4(3)	$L_1; L_2; L_3, ^{155}\text{Tb}$ $L_1; L_2; L_3, ^{155}\text{Eu}$	0,11(5) (принято)	[14] [10]
18,763	7,4(6) 6,3(8) 7,1(4) 5,6(12) 6,3(14)	$L_1; L_2; L_3, ^{155}\text{Eu}$ $L_1; L_2; L_3, ^{155}\text{Eu}$ $L_1; L_2; L_3, ^{155}\text{Tb}$ $L_1; L_2; L_3, ^{155}\text{Tb}$ $\gamma\gamma, ^{155}\text{Eu}$	7,1(4) (среднее взвешенное)	[17] [10] [14] [25] [15]
31,444	17(5)	$L_1; L_2; L_3, ^{154}\text{Gd}(n, \gamma)$	17(5) (принято)	[8]
60,009	4,0(4) 3,3(10) 4,4(4) 3,7(10) 3,5(9) 3,8(10) 4,9(24)	$L_1; L_2; L_3, ^{155}\text{Eu}$ $L_1; L_2; L_3, ^{155}\text{Tb}$ $L_1; L_2; L_3, ^{154}\text{Gd}(n, \gamma)$ $L_1; L_2; L_3, ^{155}\text{Tb}$ $\gamma\gamma, ^{155}\text{Eu}$ $\gamma\gamma, ^{155}\text{Eu}$ $^{155}\text{Gd}(p, p' \gamma)$	4,1(4) (среднее взвешенное)	[10] [26] [8] [25] [15] [27] [28]
86,059	2,5(6) 3,5(10) 4,9(15) 3,5(16)	$L_1; L_2; L_3, ^{154}\text{Gd}(n, \gamma)$ $\gamma\gamma, ^{155}\text{Eu}$ $^{155}\text{Gd}(p, p' \gamma)$ $^{155}\text{Gd}(p, p' \gamma)$	3,0(6) (среднее взвешенное)	[8] [15] [28] [29]

с энергией 2—3 кэВ на фоне интенсивных L Оже-электронов, а для $se_{6,1} K$ оно вызвано трудностями разделения близких линий $se_{6,1} K$ и $se_{2,0} K$.

Суммарная абсолютная вероятность эмиссии K Оже-электронов рассчитана с использованием суммарной абсолютной вероятности эмиссии K конверсионных электронов $\Sigma P(se_K) = 25,17(46) \%$ и принятого значения выхода флуоресценции $\omega_K(\text{Gd}) = 0,932(4)$ [33]. Суммарная абсолютная вероятность эмиссии L Оже-электронов вычислена с использованием оцененных значений $\Sigma P(se_K)$ и $\Sigma P(se_L) = 21,2(24) \%$ и принятых значений $\omega_L(\text{Gd}) = 0,176(6)$ и $n_{KL}(\text{Gd}) = 0,850(4)$ [33].

Аналогичным образом на основе оцененных значений $\Sigma P(se_K)$, ω_K , $\Sigma P(se_L)$, ω_L , n_{KL} вычислены суммарные абсолютные вероятности эмиссии KX - и LX -излучений: $\Sigma P(KX) = 23,5(5) \%$, $\Sigma P(LX) = 7,5(5) \%$.

Оцененные данные по компонентам KX -излучения Gd , полученные с использованием значений относительной интенсивности из [33, 34], приведены наряду с $\Sigma P(LX)$ в табл. 9.

Полученное нами оцененное (расчетное) значение $\Sigma P(KX) = 23,5(5) \%$ можно использовать для проверки сбалансированности оценок, связанных с интенсивностями излучений. С этой целью расчетное значение следует сравнить с опубликованными экспериментальными данными,

Оцененные значения характеристик γ -переходов в распаде ^{155}Eu и коэффициенты внутренней конверсии

Таблица 6

Переходы	Энергия, кэВ	$P(\gamma + ce) \times 100$	Мультипольность	α_K	α_L	α_M	α_T
$\gamma_{5,4}$	10,4183(13)	1,2(1)	$M1 + 0,11 \% E2$	—	265(22)	59(5)	340(23)
$\gamma_{3,2}$	18,763(2)	17,7(28)	$M1 + 7,1 \% E2$	—	284(22)	65,9(30)	367(22)
$\gamma_{4,2}$	21,035(4)	1,2(1)	$E2$	—	2013(60)	471(14)	2600(70)
$\gamma_{2,1}$	26,531(21)	0,94(7)	$E1$	—	1,55(5)	0,342(11)	1,98(6)
$\gamma_{5,2}$	31,444(7)	0,50(15)	$M1 + 17 \% E2$	—	53(13)	12,5(30)	69(14)
$\gamma_{3,1}$	45,2990(10)	1,89(7)	$E1$	—	0,347(10)	0,0758(23)	0,443(11)
$\gamma_{5,1}$	57,9890(10)	0,150(14)	$E1$	1,021(10)	0,173(5)	0,0377(11)	1,243(11)
$\gamma_{1,0}$	60,0086(10)	12,8(6)	$M1 + 4,1 \% E2$	7,48(9)	1,55(6)	0,347(14)	9,48(11)
$\gamma_{6,1}$	86,0591(10)	0,65(7)	$M1 + 3,0 \% E2$	2,66(3)	0,443(17)	0,098(4)	3,23(4)
$\gamma_{2,0}$	86,5479(10)	44,0(5)	$E1$	0,360(4)	0,0561(17)	0,0122(4)	0,432(7)
$\gamma_{3,0}$	105,3083(10)	26,5(8)	$E1$	0,214(2)	0,0323(10)	0,00701(21)	0,255(3)
$\gamma_{6,0}$	146,0711(10)	0,084(7)	$E2$	0,397(4)	0,198(6)	0,0462(14)	0,653(8)

Таблица 7

Характеристики электронного излучения в распаде ^{155}Eu

Электронное излучение	Энергия, кэВ	Число электронов на 100 распадов	Электронное излучение	Энергия, кэВ	Число электронов на 100 распадов
e_{AL} (Gd)	3,4—8,3	35,1(20)	$ce_{1,0} M$ (Gd)	58,128—58,823	0,42(3)
			$ce_{6,1} L$ (Gd)	77,683—78,816	0,068(8)
e_{AK} (Gd)			$ce_{2,0} L$ (Gd)	78,172—79,305	1,72(5)
KLL	33,49—35,75	1,09(7)	$ce_{6,1} M$ (Gd)	84,178—84,874	0,015(2)
KLX	39,98—42,86	0,55(4)	$ce_{2,0} M$ (Gd)	84,667—85,363	0,375(13)
KXY	47,98—48,95	0,070(5)	$ce_{6,0} K$ (Gd)	95,832(3)	0,0202(16)
			$ce_{3,0} L$ (Gd)	96,933—98,066	0,68(3)
$ce_{5,4} L$ (Gd)	2,043—3,175	0,93(13)	$ce_{3,0} M$ (Gd)	103,428—104,123	0,148(8)
$ce_{5,1} K$ (Gd)	7,750(3)	0,068(7)	$ce_{6,0} L$ (Gd)	137,696—138,829	0,0101(8)
$ce_{5,4} M$ (Gd)	8,538—9,233	0,21(3)	$ce_{6,0} M$ (Gd)	144,190—144,886	0,0024(2)
$ce_{1,0} K$ (Gd)	9,770(3)	9,1(4)			
$ce_{3,2} L$ (Gd)	10,387—11,520	13,6(23)	$\beta_{0,6}^-$ max	106,1(11)	0,73(7)
$ce_{4,2} L$ (Gd)	12,659—13,792	0,93(18)	avg	27,8(3)	
$ce_{3,2} M$ (Gd)	16,882—17,578	3,2(5)	$\beta_{0,5}^-$ max	134,2(11)	1,85(23)
$ce_{2,1} L$ (Gd)	18,155—19,288	0,49(4)	avg	35,6(3)	
$ce_{4,2} M$ (Gd)	19,154—19,850	0,22(4)	$\beta_{0,3}^-$ max	146,9(11)	46,1(29)
$ce_{5,2} L$ (Gd)	23,068—24,201	0,38(4)	avg	39,2(3)	
$ce_{2,1} M$ (Gd)	24,650—25,346	0,108(8)	$\beta_{0,2}^-$ max	165,7(11)	25,5(29)
$ce_{5,2} M$ (Gd)	29,563—30,259	0,09(3)	avg	44,6(3)	
$ce_{6,1} K$ (Gd)	35,820(3)	0,41(5)	$\beta_{0,1}^-$ max	192,2(11)	9,2(4)
$ce_{2,0} K$ (Gd)	36,309(3)	11,05(16)	avg	52,3(3)	
$ce_{3,1} L$ (Gd)	36,923—38,056	0,45(2)	$\beta_{0,0}^-$ max	252,2(11)	16,6(11)
$ce_{3,1} M$ (Gd)	43,418—44,114	0,099(5)	avg	70,2(3)	
$ce_{5,1} L$ (Gd)	49,613—50,746	0,012(1)			
$ce_{1,0} L$ (Gd)	51,633—52,766	1,89(11)			
$ce_{3,0} K$ (Gd)	55,069(3)	4,52(14)			
$ce_{5,1} M$ (Gd)	56,108—56,804	0,0025(3)			

Таблица 8
Сравнение экспериментальных и оцененных значений абсолютной вероятности эмиссии электронов внутренней конверсии в распаде ^{155}Eu

Электронное излучение	Энергия, кэВ	P_{ce} (exp)	P_{ce} (calc.)
$ce_{5,4} L$	2,043—3,175	305(27)	206(30)
$ce_{1,0} K$	9,770(3)	1870(100)	2000(130)
$ce_{3,2} L$	10,387—11,520	2730(110)	3080(400)
$ce_{4,2} L$	12,659—13,792	212(8)	218(30)
$ce_{6,1} K$	35,820(3)	66(5)	91(12)
$ce_{2,0} K$	36,309(3)	2450(50)	2440(50)
$ce_{3,1} L$	36,923—38,053	90(5)	100(5)
$ce_{1,0} L$	51,633—52,766	420(10)	418(16)
$ce_{3,0} K$	55,069(3)	1000	1000
$ce_{2,0} L$	78,172—79,305	380(9)	382(13)
$ce_{3,0} L$	96,933—98,066	152(6)	152(8)

Таблица 9
Оцененные значения энергии и интенсивности характеристического рентгеновского излучения в распаде ^{155}Eu

Вид излучения	Энергия, кэВ	Число фотонов на 100 распадов
XL (Gd)	5,36—8,35	7,5(5)
$XK\alpha_2$ (Gd)	42,3093(3)	6,70(13)
$XK\alpha_1$ (Gd)	42,9967(3)	12,05(23)
$XK\beta_1$ (Gd)	48,556(4)	1,29(3)
$XK\beta_3$ (Gd)	48,697(4)	2,51(7)
$XK\beta_5$ (Gd)	49,053(5)	0,036(4)
$XK\beta_2$ (Gd)	49,961(6)	0,856(23)
$XK\beta_4$ (Gd)	50,099(6)	0,0096(12)
$XKO_{2,3}$ (Gd)	50,219(4)	0,111(11)

которые получены из относительных измерений P_{KX} / P_{γ} и непосредственных абсолютных измерений P_{KX} :

1967 [10]	1967 [35]	1968 [36]	1969 [11]	1971 [20]	1994 [3]	Среднее взвешенное
22,9(10)	25,2(25)	21,3(23)	21,1(6)	22,5(12)	23,50(19)	23,3(2)

В последней колонке дано среднее взвешенное всех шести экспериментальных значений. Если исключить результат [11], который дает 80 %-ый вклад в χ^2 , среднее взвешенное остающихся пяти значений равно 23,5(2) %. Столь хорошее согласие экспериментальных данных с оцененным значением $\Sigma P(KX)$, расчет которого включает оцененные значения P_{γ} для 12 γ -переходов и принятое значение выхода флуоресценции ω_K , говорит о сбалансированности наших оценок интенсивностей излучений в распаде ^{155}Eu на

уровне 0,5 % числа распадов (погрешность расчетного значения $\Sigma P(KX)$).

В заключение отметим важность дальнейших экспериментальных и теоретических исследований свойств ^{155}Eu . Этот радионуклид относится к первичным стандартам для калибровки детекторов X -, γ -излучений. Для повышения точности его характеристик требуются, прежде всего, новые прецизионные измерения ключевой величины — абсолютной вероятности эмиссии γ -излучения с энергией 86,55 кэВ. Два имеющихся в настоящее время наиболее точных результата измерения этой величины слабо перекрываются и не позволяют достигнуть точности лучше 1 %.

Что касается возможных теоретических исследований, обратим внимание на весьма необычную структуру ротационной полосы $3/2^+$ [621] в схеме уровней дочернего ядра ^{155}Gd (см. рисунок). Она сильно отличается от структуры большинства известных ротационных полос. Ядро $^{155}_{64}\text{Gd}_{91}$ находится на границе между деформированными ($N \geq 92$) и сферическими ($N \leq 90$) ядрами. В этой области аналогично другой известной переходной области вблизи $N = 126$ [38] ядра могут иметь аксиально-несимметричную форму — переходную от сферической к деформированной. Для таких ядер характерно наличие дублетов уровней с одинаковым спином и разной четностью и быстрых $E1$ -переходов между дублетами.

Похожая картина наблюдается в ^{155}Gd : дублеты (0 кэВ, $3/2^-$ —105,31 кэВ, $3/2^+$), ($60,0$ кэВ, $5/2^-$ —86,55 кэВ, $5/2^+$), ($146,07$ кэВ, $7/2^-$ —118,00 кэВ, $7/2^+$) и сравнительно быстрые $E1$ -переходы между ними. Поэтому расчеты свойств ^{155}Gd по модели аксиально-несимметричного ротатора представляют большой интерес для ядерной физики.

Литература

1. Helmer R. G., Browne E., Be M.-M. // J. Nucl. Sci. Techn. — 2002. — Suppl. 2. — V. 1. — P. 455.
2. Оцененные значения ядерно-физических характеристик радиоактивных нуклидов, применяемых в народном хозяйстве. / Справ. пособие. / Ю. В. Хольнов и др. — М.: Энергоиздат, 1982.
3. Egorov A. G., Chechev V. P. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. — 1994. — V. A339. — P. 248.
4. Chechev V. P., Egorov A. G., Shchukin G. E. // Appl. Radiat. Isotop. — 1996. — V. 47. — P. 329.
5. Coursey B. M. e. a. // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. — 1994. — V. A339. — P. 26.
6. Chechev V. P., Egorov A. G. // Appl. Radiat. Isotop. — 2000. — V. 52. — No. 3. — P. 601.
7. Audi G., Wapstra A. H. // Nucl. Phys. — 1995. — V. A595. — P. 409.
8. Schmidt H. H. e. a. // J. Phys. (London). — 1986. — V. G12. — P. 411.
9. Hatch E. N., Boehm F. // Z. Phys. — 1959. — V. 155. — P. 609.
10. Foin C., Oms J., Barat J.-L. // J. Phys. (Paris). — 1967. — V. 28. — P. 861.
11. Meyer R. A., Meadows J. W. T. // Nucl. Phys. — 1969. — V. A132. — P. 177.
12. Reiersen J. D., Nelson G. C., Hatch E. N. // Nucl. Phys. — 1970. — V. A153. — P. 109.
13. Raeside D. E. // Nucl. Instrum. Meth. — 1970. — V. 87. — P. 7.