



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

P6-88-563

И. Улам¹, Ж.Т. Желев², Д. Закоуцки¹, В. Крацик¹,
И. Шенев²

ГАММА ЛУЧИ ПРИ РАСПАДЕ $^{147}\text{Eu} \rightarrow ^{147}\text{Sm}$

Направлено в "Известия АН СССР, сер. физ."

¹ИЯФ, Рязань, СССР

²ИЯЯЭ-БАН, София

Экспериментальные сведения о возбужденных состояниях ^{147}Sm , полученные до конца 1977 года, рассмотрены в работе^{/1/}. Затем продолжались исследования по кулоновскому возбуждению уровней ^{147}Sm ^{/2/}, изучались высокоспиновые состояния в реакциях $(\alpha, 3n)$ и $(^3\text{He}, 4n\gamma)$ ^{/3/}, возбуждались уровни в прямых ядерных реакциях $(^3\text{He}, \alpha)$ ^{/4,5/}, (p, d) ^{/5/} и реакции $(n, p\gamma)$ ^{/6,7/}. С 1978 года нами опубликовано несколько работ по бета-распаду ^{147}Eu , результаты которых более подробно рассмотрены в данной публикации. Предварительные результаты нашей работы были представлены на конференции в Юрмале^{/8/}.

Радиоактивный источник ^{147}Eu получен в реакции глубокого расщепления при облучении эрбиевой мишени /весом примерно 3 г/ пучком протонов с интенсивностью 2,5 мкА. Протоны ускорялись до энергии 660 МэВ на синхроциклотроне Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ. Фракция европия выделялась из облученной мишени хроматографическим методом^{/9/}, после чего на масс-сепараторе^{/10/} производилось разделение фракции по изотопам. Мы использовали 2 источника ^{147}Eu и один источник ^{147}Gd , который спустя 115 дней после облучения содержал лишь ^{147}Eu , накопленный при распаде ^{147}Gd / $T_{1/2} = 1,6$ дн./.

Гамма-лучи, соответствующие распаду ^{147}Eu , измерялись антикомптоновским спектрометром^{/11/}, включающим в себя Ge(Li)-детектор объемом 40 см³ с относительной эффективностью 6% и энергетическим разрешением $\Delta E_{\gamma} = 2,25$ кэВ при $E_{\gamma} = 1332$ кэВ (отношение пик/комpton - 20 для ^{60}Co), а также защитный NaI(Tl) сцинтиллятор размерами ϕ (254 мм x 200 мм), разделенный на две половины. Измерения проводились во внешней геометрии, когда радиоактивный источник находился на расстоянии 22 см от центра Ge(Li)-детектора вне NaI(Tl) кристалла, и во внутренней геометрии, когда источник размещался непосредственно над Ge(Li)-детектором внутри сцинтилляционного кристалла^{/11/}.

Во внешней геометрии одновременно регистрировались 3 спектра: антикомптоновский /АКС/ - основной, спектр одиночных и двойных совпадений /остаточный - /ОС// и парный /ПС/. В основном спектре комптоновская подложка гамма-лучей ^{60}Co подавлялась /,5 раз, при этом пики одиночного и двойного вылета подавлялись /,5 раз и 56 раз соответственно; интенсивность пика полного поглощения практически не изменялась. В парном спек-

ре регистрировались только пики двойного вылета с эффективностью, равной 35% от их интенсивности, полученной в детекторе, и случайные совпадения с интенсивностью 0,01%, повторяющие простой спектр. Остаточный спектр содержит остальные импульсы, зарегистрированные Ge(Li)-детектором, которые не попали в антикомптоновский и парный спектры, т.е. 87% и 65% интенсивности пика одиночного и двойного вылета вместе с 0,7% интенсивности пика полного поглощения. Анализ всех трех спектров позволяет однозначно идентифицировать пики полного поглощения одиночного и двойного вылета. Такой анализ очень важен в случае сложного гамма-спектра, когда происходит наложение пиков разного типа.

Антикомптоновский спектрометр окружен свинцовой защитой толщиной 100 мм, которая вместе с режимом антисовпадений Ge(Li)-NaI(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, чем фон, регистрируемый тем же Ge(Li)-детектором без защиты. Результаты тщательных измерений фона нашего спектрометра приведены в работах^{/12,13/}.

Точность определения энергии гамма-переходов существенно увеличена /примерно на порядок/ путем установления дифференциальной нелинейности всего электронного тракта с помощью измерения спектра стандартных импульсов - /ССИ/^{/14/}, произведенного одновременно с измерением гамма-лучей ^{147}Eu и гамма-лучей калибровочных источников /см. табл. 1, измерения № 2, 3, 4, 5/. Все энергии гамма-квантов даны по отношению к нормальным 411,80411 кэВ - распаду ^{198}Au ^{/15/}.

Относительные интенсивности гамма-лучей определялись с помощью кривой эффективности регистрации гамма-квантов Ge(Li)-детектором, которая описывается функцией:

$$\eta(E_{\gamma}) = \exp(A_0 + A_1 \log E_{\gamma} + A_2 (\log E_{\gamma})^2 + A_3 E_{\gamma}^4).$$

Значения параметров A_0, A_1, A_2, A_3 и A_4 получены путем измерения калибровочных источников $^{24}\text{Na}, ^{56}\text{Co}, ^{60}\text{Co}, ^{75}\text{Se}, ^{140m}\text{Ag}, ^{133}\text{Ba}, ^{153}\text{Gd}, ^{169}\text{Yb}, ^{187}\text{Ta}, ^{241}\text{Am}$ ^{/17/}.

Гамма-лучи распада ^{147}Eu исследовались нами с использованием трех радиоактивных источников, условия измерений указаны в табл. 1. Общее время измерения составило /40 ч, при этом во внешней геометрии измерения продолжались примерно 430 ч.

* Энергии переходов калибровочных источников см. также в работе^{/16/}.

Таблица 1

| Источники Номер измерения [ИМН] | Геометрия | Спектры | Экспозиция [ч] | Нагрузка [имп./с] | Изотоп |
|---------------------------------|-----------|------------|----------------|-------------------|---|
| 1-1 | ВНЕ | АКС+СС+МС | 140 | 1200 | ¹⁴⁷ Eu |
| 1-2 | ВНЕ | АКС + ССИ | 86 | / | ¹⁴⁷ Eu, ²⁴¹ Am, ¹⁷⁰ Tm, ⁷⁵ Se, ^{110m} Ag, ⁶⁰ Co |
| 1-3 | ВНЕ | АКС + ССИ | 87 | / | ¹⁴⁷ Eu |
| 1-4 | ВНЕ | АКС + ССИ | 46 | / | ¹⁴⁷ Eu, ⁶⁰ Co, ¹⁹² Ir, ²⁴¹ Am, ^{110m} Ag |
| 1-5 | ВНЕ | АКС + ССИ | 66 | / | " - " |
| 1-6 | ВНУТРИ | АКС+СС+МС | 103 | 2800 | ¹⁴⁷ Eu |
| 1-7 | ВНУТРИ | АКС+СС+СМС | 21 | 2600 | ¹⁴⁷ Eu |
| 1-8 | ВНУТРИ | АКС+СС+СМС | 110 | 650 | ¹⁴⁷ Eu |
| 1-9 | ВНУТРИ | АКС+СС+СМС | 73 | 1900 | ¹⁴⁷ Eu |

1 - время от поступления источника до измерения

- 1-1 - ВНЕКОМПЬЮТЕРНЫЙ СПЕКТР
- 1-2 - КОМПЬЮТЕРНЫЙ СПЕКТР
- 1-3 - КОМПЬЮТЕРНЫЙ СПЕКТР
- 1-4 - КОМПЬЮТЕРНЫЙ СПЕКТР
- 1-5 - СПЕКТР СТЕРИЛИЗУЕМЫХ ИМПРЕССОВ
- 1-6 - СПЕКТР СТЕРИЛИЗУЕМЫХ

Гамма-переходы при распаде ¹⁴⁷Eu → ¹⁴⁷Sm

Таблица 2

| E _γ [кэВ] | I _γ | d _K [10 ³] | Мульти- польность | уровень | |
|--------------------------|----------------|-----------------------------------|---------------------------|---------|----|
| | | | | i | f |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 76,073(10) | 34,4(11) | 1820(200) | M1+30(3)% E2 ^a | 3 | 2 |
| 121,220(17) | 670(30) | 760(40) | M1+11(2)% E2 ^a | 2 | 1 |
| 155,558(28) | 0,418(26) | | | 14 | 8 |
| 197,299(12) | 1000(30) | 139(8) | E2 | 3 | 1 |
| 212,40(15) | 0,052(9) | | | | |
| 244,832(17) | 0,90(3) | | | 7 | 5 |
| 254,09(3) | 0,360(22) | | | 9 | 6 |
| 255,64(15) | 0,076(12) | | | 8 | 5 |
| 253,95(15) | 0,038(10) | | | 17 | 8 |
| 267,74(3) | 0,435(22) | 140(80) | M1 (E2) | 10 | 6 |
| 273,14(16) | 0,062(16) | | | 20 | 13 |
| 278,352(14) | 1,95(6) | 74(7) | M1 | 10 | 5 |
| 286,262(20) | 0,504(19) | | | 18 | 9 |
| 295,40(6) | 0,123(15) | | | 18 | 8 |
| 325,828(13) | 1,39(5) | 25(7) | M1 | 23 | 14 |
| 366,360(12) | 2,25(5) | 41(4) | M1 | 23 | 13 |
| 366,83(25) | 0,334(10) | | | 24 | 14 |
| 421,39(10) | 0,034(10) | | | 19 | 9 |
| 429,90(8) | 0,150(11) | | | 20 | 9 |
| 430,62(4) ^б | 0,334(11) | | | 24 | 13 |
| 431,064(17) ^б | 0,23(14) | | | 14 | 5 |
| 431,21(7) | 0,127(20) | | | 24 | 12 |
| 471,000(12) | 1,2(7) | 1,9(14) | M1 | 23 | 10 |
| 490,27(20) | 0,12(17) | | | | |
| 494,81(16) | 1,2(7) | 9(6) | M1 | 23 | 8 |
| 503,121(11) | 3,51(11) | 2,8(4) | E1 | 23 | 7 |
| 511,019(2) | 1,0(1) | 1(3) | M1 | 1 | 5 |
| 511,01(1) | 1,90(12) | | | | |
| 512,03(9) | 1,2(6) | | | 24 | 9 |
| 601,120(4) | 1(1) | 1,3(7) | M1 | 5 | 3 |
| 654,53(11) | 1,0(10) | | | 10 | 5 |
| 677,516(1) | 0,3(11) | 9,4(5) | M1 | 5 | 2 |

Таблица 2 /продолжение/

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--------------|-----------|----------|--------------|----|---|
| 668,15(4) | 0,389(28) | | | 6 | 2 |
| 716,45(5) | 0,289(22) | | | 4 | 1 |
| 732,33(5) | 0,291(22) | | | 19 | 4 |
| 749,895(17) | 9,8(3) | 2,1(4) | E1 | 23 | 5 |
| 798,729(5) | 183(6) | 3,65(19) | E2 | 5 | 1 |
| 809,380(16) | 1,56(6) | 6,3(9) | M1 | 6 | 1 |
| 846,242(11) | 2,61(9) | 4,8(6) | M1 | 7 | 3 |
| 856,929(5) | 102(3) | 1,24(8) | E1 | 8 | 3 |
| 879,761(6) | 7,42(23) | 4,51(27) | M1 | 10 | 3 |
| 922,36(12) | 0,097(21) | | | 7 | 2 |
| 933,005(8) | 130(4) | 1,11(7) | E1 | 8 | 2 |
| 942,177(7) | 6,95(21) | 1,60(21) | E1 | 9 | 2 |
| 955,832(5) | 145(4) | 3,63(21) | M1+16(13)+E2 | 10 | 2 |
| 982,97(5) | 0,336(19) | | | 13 | 3 |
| 985,34(12) | 0,148(13) | | | 11 | 2 |
| 1022,47(4) | 0,344(19) | | | 14 | 3 |
| 1054,35(24) | 0,66(5) | | | 8 | 1 |
| 1059,041(12) | 2,75(9) | | | 13 | |
| 1063,30(9) | 1,91(12) | 0,56(10) | E1 | 9 | 1 |
| 1077,043(6) | 33(7) | 2,79(15) | M1 | 10 | 1 |
| 1106,363(17) | 1,18(5) | | | 11 | 1 |
| 1120,867(9) | 0,91(11) | 2,6(6) | M1 | 15 | 1 |
| 1152,330(76) | 0,320(15) | | | 16 | 3 |
| 1172,03(6) | 0,151(11) | | | 17 | 1 |
| 1180,31(10) | 0,36(11) | 0,66(10) | E1 | 13 | 1 |
| 1196,15(11) | 1,3(3) | 1,90(10) | E1 (E1) | 17 | 2 |
| 1228,54(15) | 0,09(7) | | | 18 | |
| 1251,643(4) | 1,9(10) | | | 19 | 1 |
| 1272,03(7) | 4,4(9) | 1,3(6) | | 6 | |
| 1311,90(11) | 1,6(3) | 0,9(9) | | 7 | 1 |
| 1317,35(13) | 5,99(17) | 2,7(9) | M1 | 16 | 1 |
| 1327,94(9) | 0,9(7) | | | 15 | 1 |
| 1331,97(13) | 1,3(4) | 1,1(5) | E1 | 6 | 1 |
| 1350,196(14) | 5,24(16) | 1,43(9) | M1 (E1) | 21 | 2 |
| 1427,43(17) | 4,41(14) | 1,4(4) | M1 (E1) | 23 | 2 |
| 1449,166(12) | 9,24(6) | 1,6(3) | M1 | 19 | 1 |

Таблица 2 /продолжение/

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-------------|-----------|---|---|----|---|
| 1453,24(4) | 0,96(4) | | | 20 | 1 |
| 1471,90(4) | 0,110(5) | | | 22 | 1 |
| 1479,71(3) | 0,161(6) | | | 24 | 2 |
| 1520,57(13) | 0,016(3) | | | 25 | 2 |
| 1548,50(16) | 0,017(3) | | | 23 | 1 |
| 1601,00(5) | 0,308(12) | | | 24 | 1 |
| 1641,98(7) | 0,050(3) | | | 25 | 1 |

а/ значение коэффициента смеси из '25';
 б/ в спектре гамма-лучей обнаружен пик, соответствующий неразрешенному дублету двух переходов; интенсивности переходов определены из интенсивностей дифференциально-интегральных совпадений и энергии переходов из схемы распада;
 в/ для переходов с $E_{\gamma} \geq 1180$ кэВ использована другая связь шкал интенсивностей I_K и I_{γ} .

Результаты определения E_{γ} и I_{γ} - переходов, принадлежащих распаду ^{147}Eu , даны в табл. 2. По сравнению с работами [18] и [19] нами обнаружено 24 и 37 новых переходов соответственно. Принадлежность новых переходов к распаду ^{147}Eu мы проверяли по скорости уменьшения их интенсивности. Наблюдалось 2 малоинтенсивных пика положения с энергией 317 и 394 кэВ. Энергия пиков положения примерно на 1 кэВ ниже соответствующей суммы энергий, форма пиков имеет более сложный вид. Интенсивность остальных возможных пиков положения значительно ниже предела обнаружения пиков. Мы рассчитали также положение комptonовского края интенсивных пиков, на этих участках спектра анализ пропущен с особым вниманием.

При распаде ^{160}Tb (20%), ^{143}Eu (21) и ^{148}Eu (22) нами обнаружен малоинтенсивный пик с энергией 1022 кэВ. Существование этого пика мы объясним образованием электрон-позитронной пары с помощью гамма-лучей с $E_{\gamma} = 1022$ кэВ в нечувствительной центральной части Ge(Li) детектора. Электрон тормозится в р-части, и оба гамма-кванта 511 кэВ, возникающие при аннигиляции позитрона, регистрируются Ge(Li) детектором. При распаде ^{142}Eu обнаружен гамма-переход 1022,47/4/ кэВ, энергии которого выше на 460 эВ. По значению суммы энергий 2511/1511/. Нами рассчитан предел интенсивности пика 1022 кэВ, появившего в результате описанного выше эффекта, интенсивность наблюдаемого перехода превышает этот предел в 1000 раз.

Энергия наблюдаемого перехода 1172,63/6/ кэВ [1] = 0,151 [18] отвечает на 610 эВ = 10% от значения энергии перехода в ^{60}Co . Вторым интенсивным переходом ^{60}Co перекрывает переходом

Таблица 2 /продолжение/

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--------------|-----------|----------|-------------|----|---|
| 688,15(4) | 0,389(28) | | | 6 | 2 |
| 716,45(5) | 0,289(22) | | | 4 | 1 |
| 732,33(5) | 0,291(22) | | | 19 | 4 |
| 749,895(17) | 9,8(3) | 2,1(4) | E1 | 23 | 5 |
| 798,729(5) | 183(6) | 3,65(19) | E2 | 5 | 1 |
| 809,380(16) | 1,56(6) | 6,3(9) | M1 | 6 | 1 |
| 846,242(11) | 2,61(9) | 4,8(6) | M1 | 7 | 3 |
| 856,929(5) | 102(3) | 1,24(8) | E1 | 8 | 3 |
| 879,761(8) | 7,42(23) | 4,51(27) | M1 | 10 | 3 |
| 922,36(12) | 0,097(21) | | | 7 | 2 |
| 933,005(8) | 130(4) | 1,11(7) | E1 | 8 | 2 |
| 942,177(7) | 6,95(21) | 1,60(21) | E1 | 9 | 2 |
| 955,832(5) | 145(4) | 3,63(21) | M1+16(13)E2 | 10 | 2 |
| 982,97(5) | 0,336(19) | | | 13 | 3 |
| 985,34(12) | 0,146(13) | | | 11 | 2 |
| 1022,47(4) | 0,344(19) | | | 14 | 3 |
| 1054,35(24) | 0,05(5) | | | 8 | 3 |
| 1059,041(12) | 2,75(9) | | | 13 | 3 |
| 1063,80(9) | 1,91(12) | 0,56(10) | E1 | 9 | 2 |
| 1077,043(6) | 33(7) | 2,79(15) | M1 | 10 | 1 |
| 1106,363(17) | 1,16(5) | | | 11 | 1 |
| 1126,867(9) | 0,91(11) | 2,03(6) | M1 | 15 | 1 |
| 1157,130(26) | 0,320(15) | | | 16 | 1 |
| 1177,036(6) | 0,151(16) | | | 12 | 1 |
| 1180,111(16) | 0,36(11) | 0,66(16) | E1 | 13 | 1 |
| 1196,255(11) | 1,1(3) | 1,00(15) | E1 (E1) | 17 | 2 |
| 1228,54(12) | 0,09(17) | | | 18 | 1 |
| 1251,641(14) | 1,01(10) | | | 19 | 1 |
| 1277,03(12) | 4,4(9) | 1,1(10) | | 6 | 1 |
| 1311,95(24) | 1,1(8) | 1,1(10) | | 10 | 1 |
| 1317,25(11) | 5,09(17) | 1,2(10) | M1 | 16 | 1 |
| 1337,93(9) | 0,9(7) | | | 15 | 1 |
| 1344,97(11) | 1,1(8) | 1,1(10) | E1 | 6 | 1 |
| 1350,190(14) | 5,24(16) | 1,43(12) | M1 (E1) | 21 | 2 |
| 1377,43(17) | 4,41(11) | 1,4(11) | M1 (E1) | 23 | 2 |
| 1449,106(12) | 0,24(16) | 1,6(11) | M1 | 19 | 1 |

Таблица 2 /продолжение/

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-------------|-----------|---|---|----|---|
| 1453,24(4) | 0,96(4) | | | 20 | 1 |
| 1471,90(4) | 0,110(5) | | | 22 | 1 |
| 1479,71(3) | 0,161(6) | | | 24 | 2 |
| 1520,57(13) | 0,016(3) | | | 25 | 2 |
| 1548,50(16) | 0,017(3) | | | 23 | 1 |
| 1601,00(5) | 0,308(12) | | | 24 | 1 |
| 1641,98(7) | 0,050(3) | | | 25 | 1 |

- а/ значение коэффициента смеси из '25';
 б/ в спектре гамма-лучей обнаружен пик, соответствующий неразрешенному дублету двух переходов; интенсивности переходов определены из интенсивностей дифференциально-интегральных совпадений и энергии переходов из схемы распада;
 в/ для переходов с $E_{\gamma} \geq 1180$ кэВ использована другая связь шкал интенсивностей I_{α} и I_{γ} .

Результаты определения E_{γ} и I_{γ} -переходов, принадлежащих распаду ^{147}Eu , даны в табл. 2. По сравнению с работами [18] и [19] нами обнаружено 24 и 37 новых переходов соответственно. Принадлежность новых переходов к распаду ^{147}Eu мы проверяли по скорости уменьшения их интенсивности. Наблюдалось 2 малоинтенсивных пика наложения с энергией 317 и 394 кэВ. Энергия пиков наложения примерно на 1 кэВ ниже соответствующей суммы энергий, форма пиков имеет более сложный вид. Интенсивность остальных возможных пиков наложения значительно ниже предела обнаружения пики. Мы рассчитали также положение комптоновского края интенсивных пики, на этих участках спектра анализа проведены с особым вниманием.

При распаде ^{180}Tb (20%), ^{145}Eu (21) и ^{148}Eu (22) нами обнаружен малоинтенсивный пик с энергией 1022 кэВ. Существование этого пика мы объясним образованием электрон-позитронной пары с помощью гамма-лучей с $E_{\gamma} = 1022$ кэВ и нечувствительной центральной р-части Ge(Li) детектора. Электрон тормозится в р-части, и оба гамма-кванта 511 кэВ, возникающие при аннигиляции позитрона, регистрируются Ge(Li) детектором. При распаде ^{147}Eu обнаружен гамма-переход 1022,47/4/ кэВ, энергия которого выше на 460 эВ По значению суммы энергии 7511 кэВ. Нами рассчитан предел интенсивности пика 1022 кэВ, возникающего в результате описанного выше эффекта, интенсивность наблюдаемого перехода превышает этот предел в 1000 раз.

Энергия наблюдаемого перехода 1172,63/6/ кэВ /1, 0,15,1 /18// отличается на 610 эВ = 10% от значения энергии перехода в ^{60}Co . Вторым интенсивным переходом ^{60}Co является переходом

^{147}Eu с $E_\gamma = 1331,977/13/$ кэВ, $I_\gamma = 12,4/4/$. В предположении, что интенсивность линий ^{60}Co и ^{40}K в фоне не меняется, мы определили долю интенсивности линии ^{60}Co в интенсивности наблюдаемого перехода 1172,63 кэВ, она равна 3%. Скорость уменьшения интенсивности рассматриваемого перехода указывает также на то, что большая часть его интенсивности принадлежит распаду ^{147}Eu .

Кроме переходов, принадлежащих распаду ^{147}Eu , мы обнаружили в спектрах гамма-квантов переходы с энергиями 893; 1658; 1997 и 241; 414; 550; 553; 611; 629; 1033; 1621; 1650; 1678 кэВ, принадлежащие распаду ^{145}Eu или ^{148}Eu , соответственно. Отношение I_γ (197 кэВ; ^{147}Eu)/ I_γ (893 кэВ; ^{145}Eu) = $1,2 \cdot 10^4$ и I_γ (197 кэВ; ^{147}Eu)/ I_γ (550 кэВ; ^{148}Eu) = $1,3 \cdot 10^3$. Только переход 1460 кэВ (^{40}K) с интенсивностью 0,042/4/ в единицах табл. 2 мы обнаружили как фоновый. В столбцах 5 и 6 табл. 2 приведено размещение перехода в схеме распада; нумерация уровней соответствует табл. 1^{29/}.

В табл. 3 дана верхняя граница интенсивности 30 переходов, которые в работах^{18,19,23,24/} были приписаны распаду ^{147}Eu , но нами не были обнаружены или были приписаны примесям.

Очевидно, переходы 76,073 и 121,220 кэВ имеют мультипольность $M1+3/3/2$ и $M1+1/1+2/2/2$ соответственно, в согласии с работой^{25/}, где эти данные получены из отношений интенсивностей L-конверсионных электронов. Мультипольность некоторых следующих переходов мы установили /см. табл. 2/, используя данные об интенсивностях K-конверсионных электронов, приведенных в работах^{18,19,26/}. Следует заметить, что значения I_K для переходов 601; 798; 955; 1255 и 1427 кэВ, указанные в работе^{18/}, точно совпадают с соответствующими значениями более ранней работы^{19/}. Предполагаем, что эти значения были использованы в работе^{18/} для построения кривой эффективности регистрации электронов Si(Li)-детектором, помещенным в однородное магнитное поле. Поэтому для I_K этих переходов принимаем среднее значение из работ^{19,26/}. Считаем, что для перехода 368 кэВ имеем $I_K = 0,90/6/$, т.е. на порядок больше, чем дано в табл. 1^{18/}. Очевидно, что здесь произошла опечатка; это следует из рис. 3^{18/}, где близкие линии K-320 / $I_K = 0,85/6/$ и K-368 имеют примерно одинаковую высоту. Коэффициент связи шкал относительных интенсивностей I_K и I_γ мы вычислили в предположении, что переход 197 кэВ имеет I_2 мультипольность, 601 кэВ - M1, 798 кэВ - I_2 , 933 кэВ - I_1 , 955 кэВ - M1 и 1077 кэВ - M1; он равен 0,139/4/. В таком случае установленные нами мультипольности 25 переходов с энергией ниже 1150 кэВ соответствуют мультипольностям, определенным при исследовании углового распределения гамма-квантов ориентированных ядер^{27/}.

Таблица 3

Предел интенсивности не наблюдаемых нами гамма-переходов, которые указаны в работах^{18,19,23,24/}

| Работа | E [кэВ] | I_γ | $I_{\gamma, \text{пред}}$ | Работа | E [кэВ] | I_γ | $I_{\gamma, \text{пред}}$ |
|---------|------------|-------------------|---------------------------|---------|-------------|-------------------|---------------------------|
| [24] | 160,80(20) | 3,0(5) | 0,04 | [18] | 1006,85(25) | 0,07(4) | 0,06 |
| [24] | 166,3(3) | 1,0(1) | 0,05 | [24] | 1029,0(3) | 3(1) | 0,06 |
| [18] | 313,77(39) | 0,23(6) | 0,09 | [18] | 1074,65(12) | 9,1(10) | a |
| [18] | 336,27(18) | 0,10(6) | 0,04 | [18] | 1096,77(17) | 0,09(3) | 0,04 |
| [18] | 478,50(19) | 0,18(9) | 0,06 | [18] | 1118,00(23) | 0,27(5) | a |
| [18] | 520,67(40) | 0,12(7) | 0,07 | [23] | 1158 | 1,0 ^a | 0,03 |
| [24] | 553,3(15) | 54,0(8) | ^{148}Eu | [18] | 1215,31(22) | 0,25(4) | 0,03 |
| [24] | 611,35(11) | 53,0(50) | ^{148}Eu | [18] | 1347,00(42) | 0,020(5) | a |
| [18] | 675,69(9) | 14,8(15) | a | [18] | 1384,97(19) | 0,08(3) | 0,016 |
| [24] | 738,2 | 30(10) | 0,07 | [18] | 1508,78(22) | 0,05(2) | 0,007 |
| [23] | 828,9 | 0,54 ^a | 0,07 | [23] | 1542 | 0,58 ^a | 0,007 |
| [19,23] | 867,9 | 0,85(30) | 0,25 ^b | [18] | 1588,18(16) | 0,045(9) | 0,006 |
| [23] | 885,7 | 1,2 ^a | 0,07 | [18] | 1629,87(39) | 0,019(9) | 0,006 |
| [18] | 931,03(8) | 5,8(4) | a | [18] | 1649,75(27) | 0,03(1) | ^{148}Eu |
| [24] | 930,6(2) | 11,0(12) | a | [18,23] | 1658,38(13) | 0,07(2) | ^{145}Eu |
| [23] | 963,9 | 0,51 ^a | 0,06 | | | | |

- a/ передний фронт интенсивного перехода;
- b/ комитонный край перехода 1077 кэВ;
- и/ интенсивность гамма-переходов уменьшена из интенсивности конверсионных электронов при предположении, что мультипольность перехода - M1.

С другой стороны, для ряда переходов с энергией выше 1150 кэВ, это согласие нарушается, и, как минимум, четырем переходам /1317,853; 1331,997; 1427,408; 1449,106 кэВ/ на основе сравнения $a_K^{\text{эксп}}$ и $a_K^{\text{теор}}$ нужно приписать M2-мультипольность, в то время как в работе^{27/} всем четырем переходам приписан дипольный характер. Возникшие противоречия можно объяснить следующим способом. Конверсионные электроны в работе^{28/} измерялись с помощью магнитного спектрометра одноканальным способом с применением нескольких радиоактивных источников. Отдель

ные измерения "сшивались" по интенсивности определенной линии, которая была измерена хотя бы в двух сериях измерений. Можно предположить, что при "сшивании" области спектра от 1150 кэВ и выше с областью спектра низших энергий была допущена тривиальная ошибка. В таком случае для области энергий выше ≈ 1150 кэВ проведем связь шкалы относительных интенсивностей I_k и I_y в предположении, что переход 1180 кэВ имеет мультипольность $E1^{27}$. Получим значение коэффициента связи, равное $0,075/13/$, которое используем при вычислении $a_k^{эксп}$ для переходов с энергией выше 1180 кэВ. Сравнение полученных $a_k^{эксп}$ с теоретическими значениями $a_k^{теор}$ приводит к согласию в определении мультипольности переходов у нас и в работе ²⁷. В табл. 2 мультипольности переходов определены путем сравнения $a_k^{эксп}$ и $a_k^{теор}$; если в рамках двух ошибок величины $a_k^{эксп}$ существуют и другие возможные мультипольности перехода, то они указаны в скобках.

Важные сведения о размещении гамма-переходов в схеме распада можно получить посредством измерений во внутренней геометрии расположения радиоактивного источника в антикомptonовском спектрометре /см. табл. 1, измерения № 6, 7, 8, 9/. Радиоактивный источник помещался в оловянную коробочку толщиной 1 мм, которая в 140 раз уменьшает интенсивность рентгеновских лучей, возникающих при распаде ¹⁴⁷Eu. Во внутренней геометрии кроме комptonовских рассеянных лучей подавляются и пики полного поглощения каскадных переходов. Количественный расчет интенсивности дифференциально-интегральных совпадений (д-и) - NaI(Tl) производится по формулам, приведенным в работе ²⁸. Сравнением экспериментальных и вычисленных значений интенсивностей, дифференциально-интегральных совпадений переходов можно определить размещение этих переходов в схеме распада и проверить всю схему распада.

Интенсивность дифференциально-интегральных совпадений переходов зависит от $I_1(i)$, $I(i)$ /полная интенсивность i того перехода/ и $\Omega_y(j)$ /эффективность регистрации j того гамма-перехода в NaI(Tl) детекторе/. Все эти величины получены с определенной точностью, поэтому должна быть указана ошибка вычисленной интенсивности совпадений. Сначала мы пренебрегли корреляцией переменных $I_1(i)$, $I(i)$ и $\Omega_y(j)$ и величину ошибку интенсивности совпадений по известным правилам для функции от независимых величин. Это приближение оказалось слишком грубым, ошибка вычисленной интенсивности совпадений оказалась завышенной /см. например, работу ²¹/. После этого мы стали учитывать корреляцию между $I_1(i)$ и $I(i)$ /ошибками $\Omega_y(j)$ пренебрегли/ методом Монте-Карло, так как корреляционную матрицу ошибок построить нам не удалось. Полученные ошибки в некото-

рых случаях пренебрежимо малы /см., например, ²²/. В этой работе мы впервые рассчитали ошибки интенсивности совпадений с учетом корреляции между $\Omega_y(j)$ и $I_y(i)$, $I(i)$. Экспериментальные и вычисленные значения интенсивностей дифференциально-интегральных совпадений переходов ¹⁴⁷Eu указаны в табл. 4.

Таблица 4

Относительные интенсивности двойных и тройных дифференциально-интегральных гамма-гамма-совпадений ¹⁴⁷Eu \rightarrow ¹⁴⁷Sm

| E [кэВ] | Уровни | | $\Gamma_z^{эксп}$ [%] | $\Gamma_z^{расч}$ [%] | $\Gamma_z^{эксп}$ [%] | $\Gamma_z^{расч}$ [%] |
|---------|--------|----|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | i | j | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 76,07 | 3 | 2 | 42,0(22) | 31,2(9) | 4,2(10) | 1,54(9) |
| 121,22 | 2 | 1 | 38,2(3) | 33,6(9) | 3,50(10) | 0,242(9) |
| 165,56 | 14 | 8 | 100(8) | 95,1(10) | 46(4) | 35,2(25) |
| 197,30 | 3 | 1 | 24,90(20) | 22,5(7) | 2,30(10) | 0,204(9) |
| 244,83 | 7 | 5 | 100(4) | 97,2(6) | 45,7(21) | 38,9(16) |
| 254,09 | 9 | 6 | 70(8) | 83,1(9) | 0(11) | 3,02(16) |
| 255,64 | 8 | 5 | | 85,9(8) | | 7,73(18) |
| 263,95 | 17 | 9 | | 85,5(7) | | 10,22(22) |
| 267,74 | 16 | 6 | 77(6) | 82,3(10) | 0(13) | 1,18(9) |
| 273,14 | 20 | 13 | | 78,5(4) | | 1,87(9) |
| 278,35 | 10 | 5 | 82(3) | 85,0(8) | 13,2(7) | 7,59(18) |
| 286,28 | 18 | 8 | 78(3) | 81,0(7) | 9,4(24) | 3,33(16) |
| 295,40 | 19 | 8 | 100(18) | 85,5(7) | 34(16) | 10,22(22) |
| 328,83 | 23 | 14 | 85(5) | 93,5(5) | 33,5(20) | 30,4(12) |
| 368,36 | 23 | 13 | 78,4(5) | 78,5(4) | 8,7(5) | 1,87(9) |
| 380,83 | 24 | 14 | | 93,5(7) | | 30,4(12) |
| 385,69 | 19 | 9 | | 81,0(7) | | 3,33(16) |
| 389,90 | 20 | 9 | | 81,0(7) | | 3,33(16) |
| 420,69 | 24 | 13 | 85,3(25) ^a | 78,5(4) | 22(3) ^a | 1,87(9) |
| 421,06 | 14 | 5 | | 95,2(10) | | 33,4(26) |
| 429,24 | 24 | 12 | | 77,2(4) | | 0,00(77) |
| 471,60 | 23 | 10 | 80,0(11) | 79,9(8) | 7,5(7) | 2,33(11) |
| 494,42 | 23 | 8 | 81(4) | 85,5(7) | 12,0(15) | 10,22(22) |
| 505,12 | 23 | 7 | 87,8(10) | 80,4(4) | 23,7(13) | 20,9(4) |
| 519,26 | 15 | 5 | 95,9(29) | 85,7(8) | 9(8) | 7,41(18) |
| 527,22 | 24 | 9 | | 91,0(7) | | 3,33(16) |
| 601,45 | 5 | 2 | 41,3(3) | 43,0(9) | 1,40(10) | 0,384(13) |
| 654,55 | 20 | 5 | | 85,7(8) | | 7,41(18) |

Таблица 4 /продолжение/

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---------|----|---|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 677,52 | 5 | 2 | 12,0(3) | 13,3(6) | 0,50(10) | 0,151(6) |
| 689,15 | 6 | 2 | 28(8) | 38,2(19) | 0(17) | 2,13(17) |
| 716,45 | 4 | 1 | 71(8) | 83(9) | | 0 |
| 732,33 | 19 | 4 | 100(30) | 92,7(10) | 0(50) | 0 |
| 749,90 | 23 | 5 | 90,5(5) | 55,7(9) | 12,10(20) | 7,41(18) |
| 793,73 | 5 | 1 | 2,9(3) | 1,54(4) | 0,30(5) | 0,063(4) |
| 809,32 | 6 | 1 | 26,7(19) | 29,3(21) | 0(5) | 0,37(3) |
| 846,24 | 7 | 3 | 37,9(11) | 29,7(22) | 19,9(9) | 16,9(9) |
| 856,93 | 9 | 3 | 41,00(20) | 42,5(9) | 1,20(20) | 0,195(8) |
| 879,76 | 10 | 3 | 40,4(5) | 42,4(9) | 1,20(20) | 0,107(4) |
| 922,36 | 7 | 2 | | 83(3) | | 4,8(4) |
| 933,01 | 8 | 2 | 11,30(20) | 12,7(6) | 0,40(10) | 0,073(4) |
| 942,18 | 9 | 2 | 14,6(4) | 16,4(5) | 1,00(20) | 0,298(20) |
| 955,93 | 10 | 2 | 11,3(3) | 12,4(6) | 0,30(10) | 0,028(1) |
| 982,97 | 13 | 3 | 56(6) | 58,2(12) | 0(14) | 5,9(4) |
| 985,34 | 11 | 2 | 0(14) | 12,0(6) | 0(23) | 0 |
| 1022,47 | 14 | 3 | 82(4) | 91(4) | 16(4) | 14,0(15) |
| 1054,35 | 8 | 1 | 2,2(9) | 0,78(3) | 0,0(12) | 0,029(3) |
| 1059,04 | 13 | 2 | 33,8(12) | 36,5(14) | 2,2(4) | 1,67(12) |
| 1083,38 | 9 | 1 | 5,7(3) | 4,98(30) | 0,0(12) | 0 |
| 1077,04 | 10 | 1 | 1,8(3) | 0,463(17) | 0,20(5) | 0 |
| 1106,86 | 11 | 1 | 0,0(13) | 0 | 0,0(21) | 0 |
| 1120,39 | 15 | 3 | 40,5(4) | 42,1(9) | 1,20(10) | 0,010(2) |
| 1152,33 | 18 | 3 | 41(7) | 42,1(9) | 0(8) | 0,010(2) |
| 1172,63 | 12 | 1 | 57 | 71(17) | 18 | 0 |
| 1180,23 | 13 | 1 | 27,9(5) | 27,9(16) | 1,80(20) | 0 |
| 1198,86 | 17 | 2 | 11,0(3) | 12,0(6) | 0,20(5) | 0 |
| 1228,54 | 18 | 2 | 0(40) | 12,0(6) | 0(40) | 0 |
| 1251,84 | 19 | 3 | 39,7(8) | 42,1(9) | 1,2(3) | 0,010(2) |
| 1255,93 | 20 | 3 | 40,30(20) | 42,1(9) | 0,3(10) | 0,010(2) |
| 1274,59 | 22 | 3 | 40,9(7) | 42,1(9) | 1,9(3) | 0,010(2) |
| 1317,85 | 16 | 1 | 1,7(3) | 0 | 0,0(10) | 0 |
| 1327,98 | 19 | 2 | 17,8(23) | 12,0(6) | 0(11) | 0 |
| 1332,00 | 20 | 2 | 11,40(10) | 12,0(6) | 0,30(10) | 0 |
| 1350,20 | 21 | 2 | 11,90(20) | 12,0(6) | 0,40(10) | 0 |
| 1417,41 | 23 | 2 | 10,6(3) | 12,0(6) | 0,50(10) | 0 |
| 1449,11 | 19 | 1 | 1,5(5) | 0 | 0,0(22) | 0 |
| 1453,24 | 20 | 1 | 2,80(20) | 0 | 0(4) | 0 |

Таблица 4 /продолжение/

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---------|----|---|----------|---------|-------|---|
| 1471,90 | 22 | 1 | 0(4) | 0 | 0(5) | 0 |
| 1479,71 | 24 | 2 | 14,0(20) | 12,0(6) | 0(7) | 0 |
| 1520,57 | 25 | 2 | 0(40) | 12,0(6) | 0(40) | 0 |
| 1548,30 | 23 | 1 | 0(3) | 0 | 0(4) | 0 |
| 1601,00 | 24 | 1 | 0,9(20) | 0 | 0(4) | 0 |
| 1641,38 | 25 | 1 | 0(9) | 0 | 0(13) | 0 |

n/ - экспериментальные значения $T_2^{\text{эксп}}$ и $T_3^{\text{эксп}}$ отвечают неразрешенному дублету переходов 420,69 кэВ и 421,06 кэВ.

На основе полученных экспериментальных данных о распаде ^{147}Eu , ^{147}Sm построена схема возбужденных состояний ^{147}Sm , что описано в работе [29].

ЛИТЕРАТУРА

1. Harmatz B., Iwbank W.B. - Nucl. Data Sheets, 1978, 25, 113.
2. Paar V. et al. - Nucl. Phys., 1980, A350, 139.
3. Kowacki J. et al. - Nucl. Phys., 1980, A337, 464.
4. Reksad U. et al. - Nucl. Phys., 1980, A348, 93.
5. Gates S. et al. - Nucl. Phys., 1983, A398, 19.
6. Анчугов В.Д. и др. - Изв. АН СССР /сер. физ./, 1983, 4/, 851.
7. Баскова К.А. и др. - Изв. АН СССР /сер. физ./, 1984, 48, 1903.
8. Адам И. и др. Тезисы докладов XXXVII совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. Юрмала, 1987, "Наука", П., с.105.
9. Мольнар Ф., Хашин В.А., Херманн Э. - ЮАЯ, 1973, вып. 4, 1077.
10. Афанасьев В.П. и др. ОИЯИ, 13 4/63, Дубна, 1969.
11. Адам И. и др. Прикладная ядерная спектроскопия, 1982, 11, 26.
12. Adam J., Fracik B., Kufner A. Proc. of the Second Int. Conf. on "Low Radioactivities 80". Bratislava: VEDA, 1982.
13. Adam J., Fracik B., Hofman J. Jadrna energie, 1984, 30, 41.
14. Adam J. et al. Прикладная ядерная спектроскопия, 1979, 9, 33.

15. Kessler E.G. et al. - Phys.Rev.Lett., 1978, 40, 171.
16. Lorenz A. Nuclear Decay Data for Radionuclides used as Calibration Standards, INDC/NDS - 145/GE1.
17. Ignatowicz V. - Nucl.Instr. and Meth., 1979, 161, 151.
18. Вылов Ц. и др. ОИЯИ, Р6-11848, Дубна, 1978.
19. Адам И. и др. - Болг.физ.журнал 111, 1976, 26.
20. Адам И. и др. Тезисы докладов XXXVI совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. Харьков, "Наука", Л., с.119.
21. Adam J. et al. - Czech.Phys., 1986, B36, 1143.
22. Адам И. и др. - Изв. АН СССР /сер. физ./, 1987, 51, 1933.
23. Adam J., Toth K.S., Meyer R.A. - Phys.Rev., 1969, 159, 985.
24. Heath R.L. Gamma-Ray Spectrum Catalogue, ANCR-100-2, 1974.
25. Авотина М.П. и др. - Изв. АН СССР /сер.физ./, 1966, 30, 1292.
26. Василева Н., Желев Ж., Цолов Р. - Болг.физ.журнал, 1981, 8, 547.
27. Дерюга В.А. и др. - Изв. АН СССР /сер.физ./, 1982, 46, 867.
28. Адам И., Крацик Б., Куглер Л. Прикладная ядерная спектроскопия, 1982, 11, 34.
29. Адам И. и др. ОИЯИ, Р6-88-562, Дубна, 1988.

Рукопись поступила в издательский отдел
25 июня 1988 года

Адам И. и др.

Р6-88-563

Гамма-лучи при распаде $^{147}\text{Eu} \rightarrow ^{147}\text{Sm}$

Гамма-лучи при распаде ^{147}Eu исследованы при помощи антикомптоновского низкофонового γ -спектрометра. По сравнению с предыдущими работами обнаружено более 24 новых γ -переходов, а для 30 переходов, ранее приписанных к распаду ^{147}Eu , установлено, что они не относятся к распаду ^{147}Eu . На основе дифференциально-интегральных совпадений γ -переходов получены важные сведения об их размещении в схеме распада.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1988

Перевод авторов.

Adam I. et al.

Р6-88-563

Gamma-Rays at the $^{147}\text{Eu} \rightarrow ^{147}\text{Sm}$ Decay

Using an suppressed-compton spectrometer an investigation of γ rays from the decay of ^{147}Eu is performed. More than 24 new γ -transitions have been identified in the decay of ^{147}Eu and about 30 γ transitions have been shown not to belong to this decay. New information is obtained about the placement of γ rays into the decay scheme of ^{147}Eu on the basis of the integral differential γ -coincidence measurements.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1988