

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

3738/2-80

11/8-80

P6-80-346

И.Адам, З.Гонс, М.Гонусек, В.Г.Калинников,
В.В.Кузнецов, Т.М.Муминов, Ф.Пражак,
Р.Р.Усманов

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПАДА ^{163}Lu
($T_{1/2} = 4,1$ мин)

1980

1. ВВЕДЕНИЕ

Изотоп ^{163}Lu с периодом полураспада $T_{1/2} = 4,1/2/$ мин впервые был обнаружен в продуктах ядерных реакций расщепления вольфрама и тантала протонами с энергией 1 ГэВ ^{/1/}. Авторы исследовали спектры γ -излучения ^{163}Lu и отнесли к его распаду 37 гамма-переходов. Исходя из систематики основных состояний изотопов иттербия и характера бета-распада основному состоянию ^{163}Yb авторами работы ^{/2/} приписаны квантовые характеристики $3/2^- / 521/$. Возбужденные состояния ^{163}Yb исследовались Рихтером и др. ^{/3/} в реакциях с тяжелыми ионами $^{152}\text{Sm}(^{18}\text{O}, 7\text{пэ}^-)^{163}\text{Yb}$ и $^{154}\text{Sm}(^{18}\text{O}, 7\text{пэ}^-)^{163}\text{Yb}$ методами e^-e^- - и $e^- \gamma$ -совпадений. Авторами работы ^{/3/} обнаружены уровни ротационной полосы основного состояния $3/2^- / 521/$ вплоть до $J^\pi = 29/2^-$, полосы $5/2^- / 523/$ вплоть до $J^\pi = 45/2^-$ и состояния сильносмешанной полосы положительной четности с головным уровнем $9/2^+$. Энергия уровня $9/2^+$ ими не была установлена.

Нами исследованы спектры γ -лучей, электронов внутренней конверсии $/ЗВК/$, $\gamma\gamma$ - и $e\gamma$ -совпадений, измерено время жизни уровня ^{163}Yb с энергией 53,9 кэВ.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

2.1. Приготовление радиоактивных источников

Радиоактивные источники ^{163}Lu / $T_{1/2} = 4,1$ мин / получались методом непосредственного разделения продуктов ядерных реакций расщепления тантала протонами с энергией 660 МэВ ^{/4/}. Танталовая фольга толщиной $50 \div 100$ мкм и весом $\sim 0,5$ г облучалась на выведенном пучке протонов синхроциклотрона ОИЯИ / $J_p \sim 0,1$ мкА / в течение $5 \div 10$ мин. После облучения мишень транспортировалась при помощи пневмопочты к электромагнитному масс-сепаратору ^{/5/} и загружалась в ионный источник масс-сепаратора ^{/6/}. При нагреве трубчатого ионного источника происходила поверхностная ионизация продуктов ядерных реакций, и шло разделение ионов редкоземельных элементов по массам в сепараторе.

Радиоактивные ионы изобары $A=163$ внедрялись в танталовые фольги толщиной 5 мкм на коллекторе масс-сепаратора. Для обогащения радиоактивных источников изотопом ^{163}Lu использовал-

Таблица 1

Значения энергии и относительных интенсивностей γ -лучей при распаде ^{183}Lu

| $E_\gamma(\Delta E_\gamma)$ | $I_\gamma(\Delta I_\gamma)$ | $I_\gamma(\Delta I_\gamma)/I/$ | $E_\gamma(\Delta E_\gamma)$ | $I_\gamma(\Delta I_\gamma)$ | $I_\gamma(\Delta I_\gamma)/I/$ |
|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| 53,9I(3) | 92(I2) | 88(8) | 449,29(5) | I7(I) | 30(5) |
| 58,18(4) | 5I(7) | - | 453,56(6) | IO,0(8) | I7(3) |
| 70,99(9) ^{a)} | I,6(5) | - | 456,93(8) ^{a)} | 6(I) | II(3) |
| 74,89(6) ^{a)} | 3,0(7) | - | 46I,06(7) | 8,0(7) | I6(3) |
| 79,27(9) ^{a)} | 4,6(9) | 5,4(I0) | 465,II(II) ^{a)} | 4,0(9) | - |
| 93,42(5) ^{a)} | 7(I) | - | 474,26(8) | IO(I) | - |
| 94,28(3) | I5(2) | I2,0(20) | 482,57(I8) | 7(I) | - |
| 96,63(3) | I3(2) | 9,6(I8) | 484,43(8) | I7(2) | 32(6) |
| 98,19(6) | 7(I) | 5,4(I0) | 499,3I(6) | I4(I) | 24(5) |
| IOI,79(I2) ^{a)} | 7(2) | - | 525,03(I3) | 4,2(9) | - |
| IO2,28(9) ^{a)} | II(3) | 7,4(I5) | 538,60(I4) | I3(2) | I6(3) |
| II8,79(4) ^{a)} | II(2) | - | 553,17(9) | 2I(2) | 32(5) |
| I50,72(4) | 35(3) | 45,0(50) | 562,50(9) | IO(I) | I6(3) |
| I52,89(I6) | 6(I) | - | 564,63(I8) | 5,0(7) | I6(3) |
| I63,08(3) | IO0(7) | IO0,0(IO0) | 567,02(36) | 6,0(6) | II(2) |
| I67,23(5) | I9(2) | 22,0(30) | 586,08(II) | 6,0(6) | - |
| 206,4I(I3) | 6(I) | 8,2(20) | 615,28(27) | 2,2(6) | - |
| 22I,I8(3) | 22(2) | I8,0(40) | 620,68(II) | 9,0(9) | - |
| 227,57(20) ^{a)} | 4(I) | - | 624,0I(20) | 3,I(7) | - |
| 239,7I(8) | 24(2) | - | 633,55(II) | 7(2) | I4(4) |
| 244,06(II) | 6,0(6) | 6,2(I5) | 643,89(6) | I4(I) | I8(3) |
| 252,98(09) | 5,0(6) | 7,I(I5) | 682,06(2I) | 4,3(9) | - |
| 285,37(I7) ^{a)} | I,5(5) | - | 7I7,55(2I) | 3,9(8) | - |
| 302,86(4) | 20(I) | 28(4) | 748,79(IO) | 8,0(9) | - |
| 3I3,46(I6) | 2I(2) | 24(3) | 870,98(24) | 5(I) | 23(4) |
| 3I7,43(4) | IO(I) | II(3) | 952,39(27) | 4,0(9) | - |
| 334,26(I9) | 2,5(5) | - | 98I,24(I9) | IO(I) | - |
| 338,38(29) | I,6(5) | - | II30,I7(I2) ^{a)} | IO(2) | - |
| 357,5I(36) | 4,0(6) | - | I374,I8(20) | 7(4) | - |
| 37I,96(4) | 40(2) | 62(IO) | I397,28(I9) | 8(3) | - |
| 380,46(22) | 4,0(8) | - | I404,39(30) | 5(I) | - |
| 382,I2(I4) | 7,0(9) | - | I460,00(I9) ^{a)} | 6(I) | - |
| 39I,I7(7) | II(I) | 20(3) | I526,02(I4) | I2(I) | - |
| 396,70(4) | 4I(2) | 63(7) | | | |
| 400,43(7) | I3(I) | I6(2) | | | |
| 44I,25(8) | 6,0(7) | - | | | |

Примечание. ^{a)} γ -переходы, интенсивность γ -лучей которых спадала с $T_{1/2} = 10$ мин.

Таблица 2

Относительные интенсивности ЗВК переходов, сопровождающих распад ^{183}Lu

| E_γ , кэВ | I_e , отн.ед. | Мультипольность |
|------------------|-----------------|-----------------|
| 19,9 | E_e | 75 |
| 53,9I | L_I | 245 |
| | L_{II} | |
| | L_{III} | |
| | ΣM | 9 |
| 58,18 | ΣM | 70 |
| | ΣM | IO4 |
| | ΣM | 37 |
| 79,27 | K | 26 |
| 93,42 | K | 28 |
| 94,28 | K | 50 |
| 96,63 | K | IO |
| 98,19 | K | I6 |
| II8,79 | K | 9 |
| I50,74 | K | 27 |
| I52,89 | K | 5 |
| I63,I4 | K | I4 |
| I67,23 | K | 7 |

Примечание. Погрешности в определении относительных интенсивностей ЗВК составляют 20% для сильных ($I_e \geq 10$) и достигают ~50% для слабых ($I_e \leq 10$) по интенсивности электронов.

как примесь /<0,5%/. На рис. 1 и 2 показаны спектры γ -лучей, а в табл. 1 приведены результаты их анализа.

Спектры ЗВК исследовались при помощи безжелезного бета-спектрометра с тороидальным магнитным полем 10 . На рис. 3 приведен участок одного из измеренных спектров низкоэнергетических электронов. Результаты анализа спектров ЗВК приведены в табл. 2. В этой же таблице приведены выводы о мультипольности γ -переходов ^{183}Lu , полученные на основе сравнения экспери-

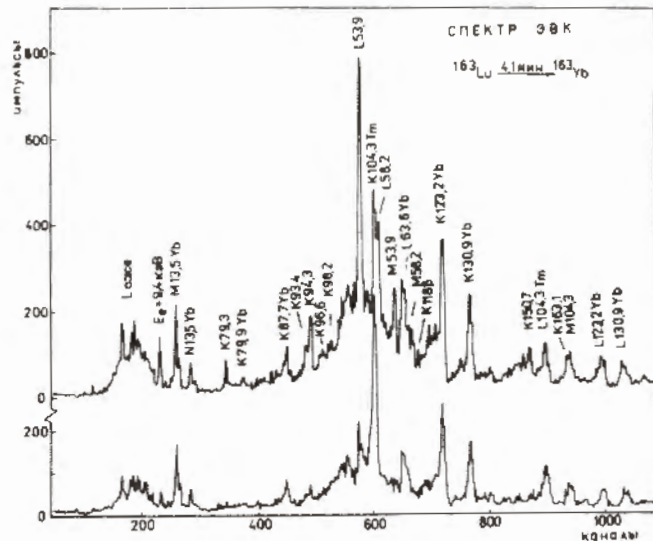


Рис.3. Участок спектра ЭВК ^{163}Lu , измеренный с экспозицией на каждой точке $\Delta t = 0,5$ с. Внизу - вторая серия измерений, полученная через 10 мин после начала измерения первой серии.

ментальных отношений $L_I + L_{II} / L_{III}$ /для перехода 53,9 кэВ/ и J_K / J_Y , J_L / J_Y /для остальных переходов/ с соответствующими теоретическими значениями ^{11/}. Для связи шкал относительных интенсивностей ЭВК и γ -лучей использовано значение коэффициента внутренней конверсии для перехода 53,9 кэВ с мультипольностью $M1 + < 0,4\% E2$.

2.3. Исследования спектров $e\gamma$ - и $\gamma\gamma$ -совпадений

Измерения спектров $e\gamma$ -совпадений проводились на установке ^{12/}, созданной на базе безжелезного бета-спектрометра с тороидальным магнитным полем и спектрометра с Ge(Li) -детектором. Измерены совпадения γ -лучей с ЭВК: L53,9; K93,4 и K94,3 ^{163}Lu . В качестве примера на рис.4 приведены спектр γ -лучей и спектр (L53,9- γ)-совпадений.

Спектры $\gamma\gamma$ -совпадений измерялись в режиме трехмерного анализа на установке ^{13/} с использованием двух Ge(Li) -детекторов. На рис.5 в качестве примера показан спектр ($\gamma^{163}\text{Lu}$ - γ)-совпадений, полученный при сортировке многомерного спектра.

Рис.4. Спектр γ -лучей и (L53,9- γ)-совпадений.

Результаты анализа спектров $e\gamma$ - и $\gamma\gamma$ -совпадений приведены в табл.3 и 4.

2.4. Измерение времени жизни уровня 53,9 кэВ ^{163}Yb

На установке ^{14/}, созданной на базе магнитно-линзового бета-спектрометра и спектрометра со сцинтилляционным детектором, измерено временное распределение совпадений электронов внутренней конверсии L53,9 с γ -лучами при распаде ^{163}Lu /рис.6/. В спектре электронов, измеренном на магнитно-линзовом бета-спектрометре ($\Delta H_p / H_p = 5\%$), L53,9 ^{163}Lu полностью не отделялись от K104,3 ^{163}Tm /на вставке

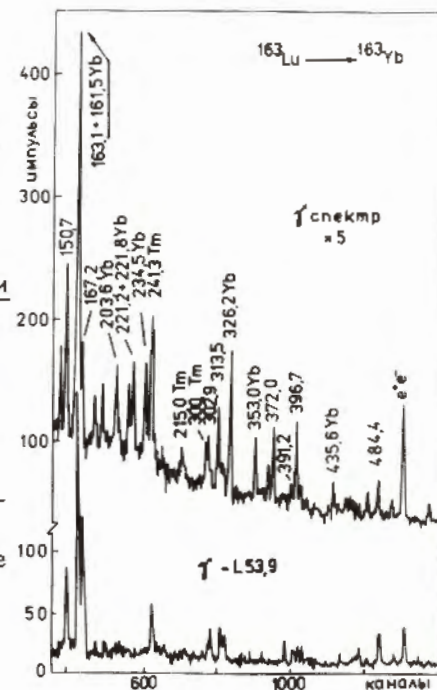


рис.6 приведен участок спектра ЭВК изобары $A = 163$, полученный при разрешении $\Delta H_p / H_p \approx 0,8\%$ на бета-спектрометре с тороидальным магнитным полем/. В связи с этим в измеренном временном распределении нами наблюдаются два компонента: один с $T_{1/2} = 0,50/5 \cdot 10^{-9}$ с, обусловленный временем жизни уровня 104,3 кэВ ^{163}Er , другой с $T_{1/2} = 3,6/4 \cdot 10^{-9}$ с, определяющий время жизни уровня 53,9 кэВ ^{163}Yb . Значение времени жизни для уровня 104,3 кэВ ^{163}Er хорошо согласуется с определенным ранее в работе ^{15/} значением $T_{1/2} = 0,52/5 \cdot 10^{-9}$ с.

3. СХЕМА РАСПАДА

На рис.7 приведена схема распада $^{163}\text{Lu} \rightarrow ^{163}\text{Yb}$, построенная нами на основе анализа спектров γ -лучей, ЭВК, $e\gamma$ - и $\gamma\gamma$ -совпадений. Справа приведены нижние состояния ротационных полос, наблюдаемых в реакциях ^{18/}.

Уровень с энергией 53,9 кэВ наблюдается ранее в ядерных реакциях и идентифицирован авторами работы ^{12/} как одночастичное состояние $5/2^- / 523/$.

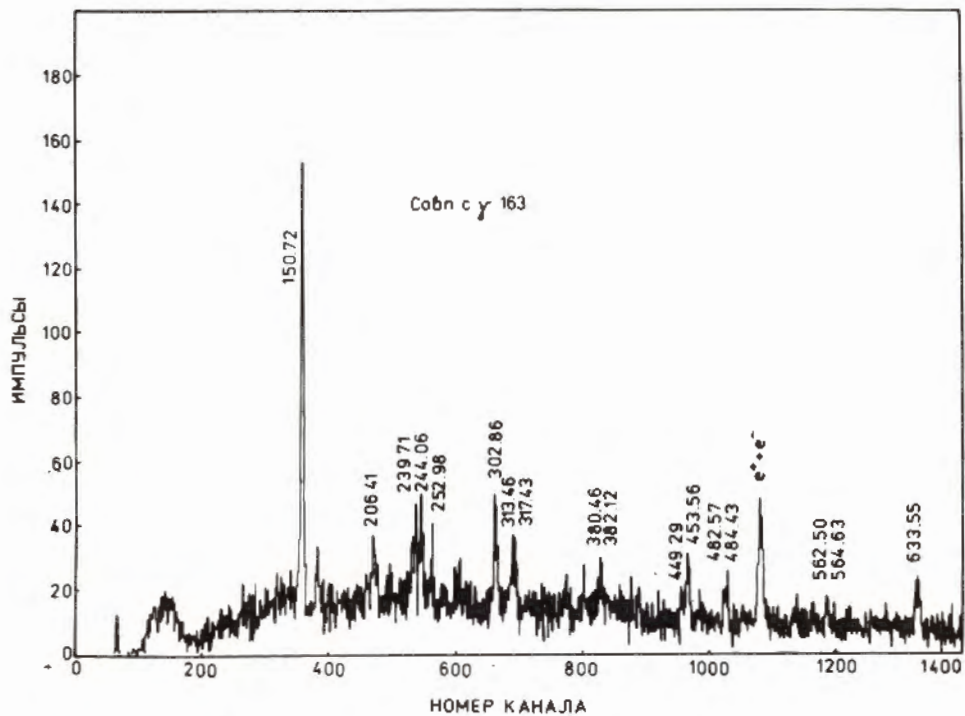


Рис. 5. Спектр (γ - ^{163}Lu) -совпадений.

Уровни с энергиями 58,2 и 221,2 кэВ введены на основе наблюдения совпадений $L_{53,9}-\gamma_{163,1}$ /ослабл./ и $L_{53,9}-\gamma_{167,2}$ и существования γ -перехода 221,2 кэВ. Анализ этих совпадений указывает на то, что должен существовать γ -переход с энергией 4,3 кэВ с интенсивностью $I_{\text{полн.}} = 75/20$ /относительных единиц.

Уровень с энергией 372,0 кэВ. Результаты наблюдения совпадений ($L_{53,9}-\gamma_{150}$, γ_{313} /ослаблены за счет ветвления/); ($L_{58,2}-\gamma_{150,7}$) и ($\gamma_{163,1}-\gamma_{150,7}$), а также наблюдения γ -перехода 372,0 кэВ указывают на то, что существует этот уровень.

Уровень с энергией 436,0 кэВ введен на основе наблюдения ($L_{53,9}-\gamma_{382,1}$) -совпадений. Вследствие анализа спектров ($K_{93,4}-\gamma$) -совпадений и ($\gamma_{244,1}-\gamma_{163,1}$, $\gamma_{167,2}$) -совпадений введен уровень с энергией 465,2 кэВ, а уровень 474,2 кэВ - на основе совпадений ($\gamma_{102,3}-\gamma_{150,7}$, $\gamma_{163,1}$, $\gamma_{372,0}$ кэВ), а также ($\gamma_{253,0}-\gamma_{163,1}$ кэВ).

Уровень с энергией 499,3 кэВ введен вследствие наблюдения прямого перехода 499,3 кэВ и подкрепления его ослабленными

Таблица 3

Результаты анализа спектров $e\gamma$ -совпадений при распаде ^{163}Lu

| Э перех. ($E_{\text{ур.}}$) кэВ | E_{γ} совп. кэВ | $a_{\text{экср.}}^{\text{сх.}}$ $\times 100(\Delta a)$ | $I_{e\gamma}(\Delta I_{e\gamma})$ экср. | $I_{e\gamma}(\Delta I_{e\gamma})$ речс. |
|--------------------------------------|---------------------------|---|--|--|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 53,9 | 150,7 | 46(4) | 16,1(15) | 19(2) |
| (53,9) | 152,9 | 25(8) | 1,5(5) | 2,6(6) |
| | 163,1 | 39(2) | * | - |
| | 167,2 | 102(9) | 19(3) | 19(2) |
| | 244,0 | 38(6) | 2,3(4) | 3,2(3) |
| | 253,0 | 35(6) | 1,8(4) | 2,7(4) |
| | 302,9 | 48(6) | 9,6(12) | 12(2) |
| | 313,5 | 41(5) | 8,6(11) | 8,4(8) |
| | 317,4 | 64(11) | 6,4(10) | 5,4(6) |
| | 357,5 | + | + | - |
| | 382,1 | 115(25) | 8(2) | 7,0(9) |
| | 391,2 | 73(15) | 8(2) | - |
| | 396,7 | + | + | - |
| | 400,4 | 57(11) | 7,4(14) | - |
| | 441,3 | ≤ 64 | $\leq 3,8$ | 2,4(3) |
| | 453,6 | + | + | - |
| | 456,9 | ≤ 27 | $\leq 1,6$ | - |
| | 461,1 | 42,8 | 3,4(6) | - |
| | 484,4 | 89(15) | 15(3) | 17(2) |
| | 525,0 | + | + | - |
| | 564,6 | + | + | - |
| | 567,0 | + | + | - |
| | 633,6 | + | + | - |
| 58,2 | 150,7 | + | + | - |
| (58,2) | 163,1 | + | + | - |
| 93,4 | 150,7 | 100(13) | 35(5) | 35(3) |
| (465,25) | 152,9 | ≤ 125 | $\leq 7,5$ | 6(1) |
| | 163,1 | 50(4) | 50(8) | 54(6) |
| | 167,2 | 52(15) | 10(3) | 10(2) |
| | 313,5 | + | + | - |
| | 372,0 | + | + | - |

Таблица 3 /продолжение/

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-----------------|---|--|---|----------------|
| 94,3 (712,6) | 118,8 150,7 152,9 206,4 244,1 317,4 564,6 | + 16(2) 100(17) 23(6) 40(9) 29(7) 92(31) | + 5,6(5) 6,0(15) 1,4(4) 2,4(6) 2,9(8) 4,7(17) | - - 6(1) |

Примечание. Знаком "+" обозначены наблюдаемые совпадения, количественная оценка которых не проведена из-за малой статистики.

* По значениям $\alpha_{\text{экс.}} = \frac{S_{\text{ex}}}{S_{\text{y}}}$ определены полная относительная интенсивность γ -перехода с энергией 4,3 кэВ, $I_{\text{полн.}} = 75/20$ /отн.ед.

совпадениями L53,9 с γ 441,2 кэВ. Совпадения (L53,9 - γ 484,4, γ 317,4 /осл./), (γ 163,1 - γ 317,4) и прямой переход позволяют ввести уровень с энергией 538,5 кэВ.

Уровень 578,7 кэВ вводится нами на основе наблюдения совпадений (L53,9 - γ 525,0), (γ 206,4 - γ 150,7, γ 163,1, γ 372,0). Результаты наблюдения совпадений (K93,4 - γ 152,9) и (L53,9 - γ 564,7) позволяют ввести уровень 618,5 кэВ, а (γ 163,1 - γ 302,9 /осл./, γ 453,6) и (γ 150,7 - γ 302,9) - уровень 674,8 кэВ.

Уровни с энергией 712,8; 768,7; 854,7 и 938,9 кэВ введены в схеме распада на основе баланса энергий /на рис.7 переходы отмечены пунктиром/ и наблюдения совпадений с γ -лучами только одного перехода. Таким образом, при распаде ^{163}Lu нами наблюдалось, кроме введенного в работе /2/ уровня с энергией 53,9 кэВ, $5/2^- 5/2^- /523/$, еще 15 возбужденных состояний ^{163}Yb . Экстрем и др. /16/ измерили спин основного состояния ^{165}Lu и согласно /17/ предложили его квантовые характеристики $1/2^+ /411/$. Авторы /17/ показали, что орбитали $7/2^+ /404/$, $1/2^+ /411/$ и $5/2^+ /402/$ являются нижайшими протонными состояниями в ядре ^{165}Lu . Следует ожидать, что для ^{163}Lu нижайшими состояниями должны быть те же орбитали, хотя трудно предсказать, какое из ожидаемых состояний должно быть основным для ^{163}Lu . Однако тот факт, что нам не удалось при бета-распаде ^{163}Lu обнаружить состояния $7/2^- /523/$ и $5/2^- /521/$ ^{163}Yb , наблюдаемые в ядерных реакциях, говорит в пользу квантовых характеристик $1/2^+ /411/$ основного состояния ^{163}Lu . Анализ полученных значений α_{X} и выводы о мультипольностях γ -переходов позволяют лишь сде-

Таблица 4

Результаты анализа спектров $\gamma\gamma$ -совпадений при распаде ^{163}Lu

| $E_{\gamma 1}$ ($E_{\text{ур.}}$) кэВ | $E_{\gamma 2}$ кэВ | $I_{\gamma\gamma}(\Delta I_{\gamma\gamma})$ эксп. | $I_{\gamma\gamma}(\Delta I_{\gamma\gamma})$ расч. |
|--|---|---|---|
| 163,1 (221,2) | 102,3 150,7 206,4 244,1 253,0 302,9 313,5 317,4 453,6 562,5 633,6 | 4,4(12) 35(3) 4,2(12) 7,2(18) 4,0(16) 13,1(23) 5,7(22) 5,5(25) 11,6(32) 5,6(3) 13,8(42) | 5,9(17) 35(3) 3,2(6) 6,0(6) 5,0(6) 10,8(6) 11(1) 10(1) 10,0(8) - 7(2) |
| 167,2 (221,2) | 150,7 244,1 302,9 | 7,2(19) 3,4(14) 4,9(16) | 6,7(6) 1,2(11) 3,8(2) |
| 221,2 (221,2) | 150,7 302,9 | 11,2(18) 5,2(18) | 7,7(4) 4,4(3) |
| 150,7 (372,0) | 102,3 163,1 167,2 206,4 221,2 302,9 | 1,8(9) 28,1(27) 7,7(16) 3,0(10) 9,3(14) 6,7(18) | 3,9(11) 35(3) 6,7(7) 2,1(4) 7,7(8) 7,0(4) |
| 313,5 (372,0) | 102,3 206,4 302,9 396,7 | 6,8(32) 9,8(29) 34,4(56) 14,9(4) | 4,2(3) 2,4(4) 8,0(4) 16,4(8) |

лать заключение об отрицательной четности состояний ^{163}Yb с энергиями 58,1; 221,2; 371,3; 465,2 и 618,5 кэВ.

В спектре ЭВК /рис.3/ наблюдаются электроны с $E_{\text{e}} = 9,4$ кэВ, приписанные нами к ^{163}Lu . Эти электроны можно идентифицировать как $L_{1,19,9}(M1)$ или $K_{70,7}(M2)$. Значение энергии и мультипольность γ -перехода 19,9 кэВ позволяют сделать предположение о возможном возбуждении при бета-распаде ^{163}Lu

5. Музиоль Г., Райко В.И., Тыррофф Х. ОИЯИ, Р6-4487, Дубна, 1969.
6. Beyer S. et al. Nucl.Instr. and Meth., 1971, 96, p.437.
7. Beyer G.-J., Novgorodov A.F., Khaikin V.A. Radiokhimiya, 1978, XX, p.589.
8. Андерт К. и др. ОИЯИ, Р6-8564, Дубна, 1974.
9. Strusny H. et al. Jahresbericht ZfK-Rossendorf, ZfK-283, 1974, p.37.
10. Гасиор М. и др. ОИЯИ, Р6-7094, Дубна, 1973.
11. Hager R.S., Seltzer E.C. Nucl.Data, 1968, A4, p.1.
12. Кузнецов В.В. и др. ОИЯИ, Р13-12810, Дубна, 1979.
13. Тонусек М. и др. ОИЯИ, Р13-12422, Дубна, 1979.
14. Аликов Б.А. и др. ОИЯИ, Р13-10911, Дубна, 1977.
15. Andreitsceff W. et al. Nucl.Phys., 1974, A220, p.438.
16. Ekstrom C. et al. Phys.Scr., 1974, 10, p.301.
17. Ekstrom C. Phys.Scr., 1976, 13, p.217.

Рукопись поступила в издательский отдел
13 мая 1980 года.