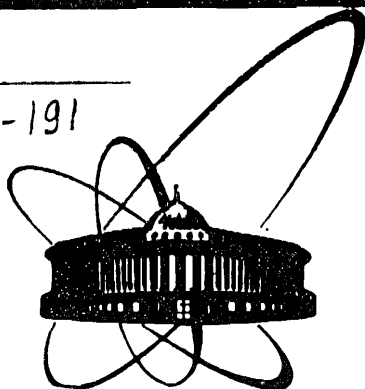


B-191



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

P6-86-850

С.К.Васильев¹, С.Бацев², Ш.Бриансон³,
В.Б.Бруданин, В.М.Горожанкин, Ц.Вылов,
В.Н.Покровский, Н.И.Рухадзе⁴

РАСПАД ^{174}Lu И ВОЗМОЖНОСТЬ ОЦЕНКИ
МАССЫ ЭЛЕКТРОННОГО НЕЙТРИНО

Направлено на XXXVII Совещание по ядерной
спектроскопии и структуре атомного ядра,
Юрмала, апрель 1987 года

¹ Радиевый институт им. В.Г.Хлопина АН СССР,
Ленинград

² ИЯИЯЭ БАН, София

³ ЦЯСМС, Орсе, Франция

⁴ Тбилисский государственный университет

1986

I. Введение

Как известно, одной из принципиальных возможностей оценки массы электронного нейтрино (m_ν) является изучение вероятности электронного захвата и/или внутреннего тормозного излучения (см., например, /1/). При малых величинах m_ν практически интерес представляют лишь процессы с малой энергией распада (разностью масс) Q , т.е. с малой полной энергией испускаемого в них нейтрино: только в этом случае можно надеяться на достижение малых верхних границ оценки m_ν , не выдвигая чрезмерно жестких требований к точности определения исследуемых характеристик.

С экспериментальной точки зрения наиболее "чистой" (но не обязательно наиболее легкой) ситуацией является изучение электронного захвата, идущего между основными состояниями ядер. В течение нескольких лет ряд групп (подробнее см., например, /1/) занимался изучением распада ^{163}Ho , привлекательного тем, что в этом случае полная энергия нейтрино, по-видимому, минимальна и составляет около 500 эВ. В результате проведенных исследований удалось примерно на порядок снизить верхнюю границу m_ν , доводя ее до уровня нескольких сотен эВ. Для дальнейшего понижения оценки m_ν требуется, видимо, столь существенное улучшение точности измерений, в частности, величины Q , что это вряд ли удастся достичь в ближайшем будущем.

Ввиду отсутствия удобных для изучения нуклидов с простейшими схемами распада и достаточно малыми значениями Q , представляет интерес поиск низкоэнергетических ветвей, например, К-захвата на возбуждаемые состояния ядер, когда

$$E_K = Q - E^* - \varepsilon_K, \quad (I)$$

где E_K - полная энергия нейтрино, E^* - энергия возбужденного состояния, ε_K - энергия связи К-электрона в конечном атоме. Интерес к этому направлению исследований был подогрев сообщением Рагхавана /2/ о существовании подобной ветви с $E_K = 156 \pm 17$ эВ в распаде ^{158}Tl . Впрочем, последующие работы (см., например, /3-5/) показали ошибочность этого результата: существование такой ветви запрещено по энергетическим соображениям.

Следующими кандидатами для поиска К-захвата с малыми энергиями нейтрино E_K являются, по-видимому, нуклиды ^{174}Lu и ^{241}Cm /1/. В настоящей работе мы остановимся на изучении распада ^{174}Lu .

2. Распад ^{174}Lu

Схема распада ^{174}Lu (рис.1) довольно проста, и основные ее характеристики были установлены ранее /6/. С точки зрения поиска К-захвата с малыми E_K интерес представляет распад ^{174g}Lu на уровень I318 кэВ. Как следует из таблиц масс изотопов /7/, в этом случае $E_K = (-3,6 \pm 1,8)$ кэВ, что не полностью исключает возможность существования такой ветви.

На первом этапе мы провели уточнение характеристик схемы распада, поскольку, например, относительные интенсивности рентгеновского и мягкого γ -излучения при распаде $^{174m,g}\text{Lu}$ были известны с большой погрешностью.

Радиоактивные источники получались с помощью химического выделения и масс-сепарации из танталовой мишени, облученной протонами с энергией 660 МэВ. Перед измерением спектра ^{174g}Lu проводилась выдержка в течение 5-8 лет, так что примесь ^{174m}Lu была пренебрежимо мала.

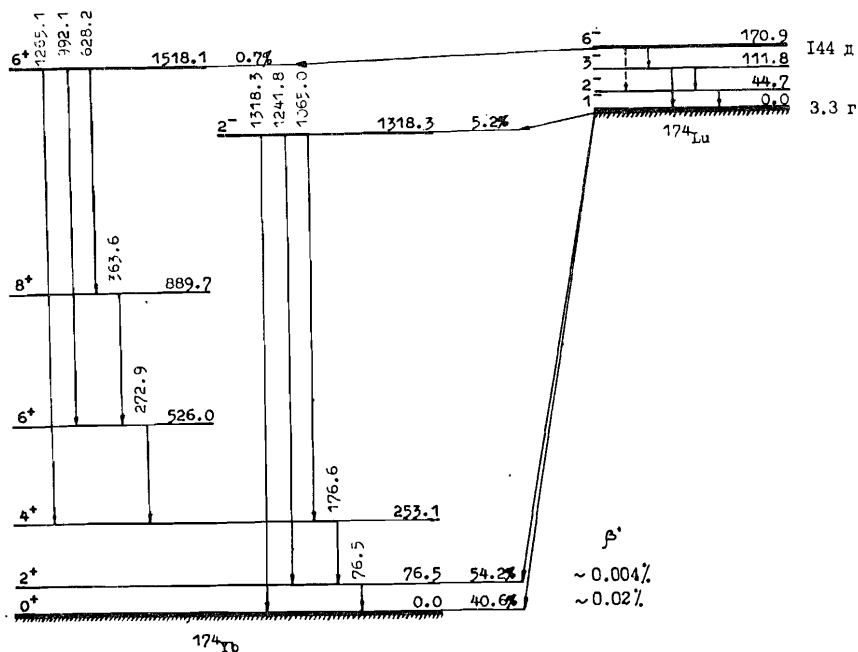


Рис.1. Схема распада ^{174}Lu .

Низкоэнергетическая ($E_\gamma \leq 400$ кэВ) часть γ -спектра измерялась с помощью $\text{Ge}(\text{Li})$ -детектора размером $200 \text{ мм}^2 \times 5 \text{ мм}$, энергетическое разрешение которого составляло 550 эВ на линии 122 кэВ ^{57}Co . Высокоэнергетическая область γ -спектра исследовалась на $\text{Ge}(\text{Li})$ -детекторе с объемом 38 см^3 и разрешением 1,9 кэВ на линии 1332 ^{60}Co .

Для калибровки спектрометров использовались нормали энергий /8/ и относительных интенсивностей /9/ эталонных источников. Измерения и обработка проводились по методике, изложенной в работе /10/. Полученные нами данные приведены в таблицах 1, 2.

Таблица 1. Сведения об электромагнитных переходах, возникающих при распаде ^{174m}Lu

E_γ , кэВ	I_γ , отн.ед.	Мульти.	Размещение в схеме	Уровни
44,683(3)	229I(50)	M1+E2	45-0	^{174}Lu
52,965	K_{d2} 3840(90)			
54,070	K_{d1} 6578(134)			
59,08(2)		M3	I7I-II2	
61,3	$K_{\beta'1}$ 2153(117)			
63,0	$K_{\beta'1}$ 574(18)			
67,058(3)	I336(27)	M1+E2	II2-45	
III,762(7)	55,0(I5)	(E2)	II2-0	
I26,2		(E4)	I7I-45	
76,468(2)	I6(I2)	(E2)	76-0	^{174}Yb
I76,653(2)	86,2(2I)	E2	253-76	
272,9I4(I2)	I00,8(3I)	E2	526-253	
363,64(5)	2,88(I8)	(E2)	889-526	
628,2I(8)	2,65(3I)	(E2)	I5I8-889	
992,077(3I)	I00,0(2I)	E2	I5I8-526	
I264,98(7)	3,02(23)		I5I8-253	

Таблица 2. Сведения об электромагнитных переходах, возникающих при распаде ^{174g}Lu

E_γ , кэВ	I_γ , отн.ед.	Мульти.	Размещение в схеме
5I,354	K_{d2} 468(9)		
52,389	K_{d1} 82I(I5)		
59,4	$K_{\beta'1}$ 260(5)		
6I,0	$K_{\beta'2}$ 66,4(I3)		
76,468(2)	II5,3(52)	E2	76-0
I76,653(2)	0,2I0(I0)	E2	2I3-76
I065,04(8)	0,32(4)	E3	I3I8-253
I24I,847(6)	I00,0(2I)	EI	I3I8-76
I3I8,296(I0)	0,69(5)	M2	I3I8-0

Сведения о мультипольности наблюдаемых переходов указываются, в основном, из сравнения теоретических значений коэффициентов конверсии на К-оболочке /II/ с экспериментальными. Для их получения мы воспользовались данными /6/ об I_K и связывали шкалы интенсивностей, нормируя α_K на теоретические значения для переходов, подчеркнутых в таблицах I и 2. Мультипольности слабых переходов, вытекающие из принятой схемы распада, заключены в скобки. Мультипольности мягких переходов при распаде ^{174m}Lu на уровни ^{174}Lu взяты из работ /12/, где они были оценены по сравнению теоретических и экспериментальных отношений интенсивностей конверсии на L-подоболочках.

Отметим, что данные об интенсивностях КХ-излучения при распаде ^{174m}Lu позволили нам найти α_K перехода 67 кэВ. Учитывая вклад в I_K от перехода III кэВ (вклад остальных переходов пренебрежимо мал, либо К-конверсия для них запрещена) и тот факт, что К-захват на уровень I5I8 кэВ не происходит, из данных таблицы I легко найти $\alpha_K(67) = 10,30(26)$. При этом предполагалось, что $\omega_K = 0,952(20)$ /I3/ и $\alpha_K(III) = 0,79$, как для чистого E2-перехода /II/. Найденное значение $\alpha_K(67)$ согласуется с данными других авторов: 10,25(58) /I4/ и 11,04(44) /I5/.

Полученные в результате балансировки схемы распада, проводившейся с учетом интенсивности рентгеновского излучения, заселенности состояний приведены на рис. I. Ветви распада основного состояния ^{174g}Lu с конфигурацией $f^{-}\{p[404]4 - n[512]4\}$ на основной и первый возбужденный уровни полосы основного состояния ^{174}Yb характеризуются $l_g ft = 9,8$ и $9,7$ соответственно, а на октупольное (2^-)-состояние I3I8 кэВ - $l_g ft = 7,1$. Хотя в последнем случае в конфигурацию состояния подавляющий вклад (90%) вносит двухквaziчастичный компонент $\{n[624]4 - n[512]4\}$,

соответствующий β^- -переход сильно заторможен из-за запрета по асимптотическим квантовым числам. Бета-распад изомерного состояния ^{174m}Lu с конфигурацией $6^{-}\{p[404]4 + n[512]4\}$ идет на уровень I5I8 кэВ с конфигурацией $6^{+}\{p[514]4 + n[512]4\}$. Значение $l_g ft = 6,2$ хорошо согласуется с величинами, характерными для незадержанных β^- -переходов первого порядка запрещения.

Отметим, что принимаемые нами средние значения энергий возбужденных состояний составляют 44,683(3); III,747(10); I70,89 кэВ для ^{174}Lu и 76,468(2); 253,121(3); 526,039(19); 889,68(5); I3I8,3I4(10); I5I8,10(5) кэВ для ^{174}Yb .

3. Поиск К-захвата на уровень I3I8 кэВ

Хотя ранее /6/ К-захват на уровень I3I8 кэВ обнаружен не был, систематика масс ядер, как отмечалось выше, оставляет надежду на существование подобной малоинтенсивной ветви. С целью поиска такой ветви К-захвата мы попытались обнаружить совпадения КХ- γ I3I8 кэВ.

Спектры КХ- γ -совпадений измерялись с помощью спектрометра трехмерных $\gamma\gamma t$ -совпадений /I6/. В стартовом γ -канале был использован HPGe-детектор объемом 70 см³, а в стоповом X-канале - 0,8 см³ (200 мм² x 5 мм) Ge(Li)-детектор. Для предотвращения случайного суммирования γ -квантов I24I и 76 кэВ, которое может имитировать искомый эффект, перед HPGe-детектором ставился слоистый фильтр Ta (I мм) + Cd (0,5 мм) + Cu (0,5 мм), а для снижения загрузки от Lx-квантов перед Ge(Li)-детектором ставился слой Al (I мм) - рис. 2.

В таких условиях можем записать

$$C_{KX, 1318} = S_{1318} \cdot P_K(1318) \cdot \omega_K \cdot \eta_K \quad (2)$$

$$C_{KX, 1241} = S_{1241} \cdot \frac{\alpha_K}{1 + \alpha} \cdot \omega_K \cdot \eta_K, \quad (3)$$

где $C_{KX, \gamma}$ - число совпадений $KX-\gamma$, S_{γ} - площадь фотопика в спектре самосовпадений (что учитывает энергетическую зависимость эффективности совпадений), P_K - относительная вероятность K -захвата на данный уровень, ω_K - выход флуоресценции, η_K - фотоэффективность регистрации рентгеновских квантов в X -детекторе, α_K , α - коэффициенты конверсии перехода 76 кэВ (на K -оболочке и полный соответственно). Предполагая $P_K(I318) \ll 1$, в соотношении (3) мы ограничиваемся членом, связанным с совпадениями $\gamma I24I$ с KX -квантами, возникающими при конверсии перехода 76 кэВ. Это же предположение, наряду с наличием Ta фильтра, позволило исключить члены, учитывающие потерю событий в пиках совпадений за счет суммирования с сопутствующим каскадным излучением.

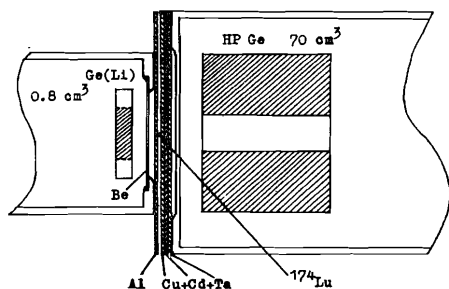


Рис.2. Схема расположения источника ^{174}Lu и детектирующей системы.

Из соотношений (2) и (3) получаем

$$P_K(I318) = \frac{C_{KX, I318}}{C_{KX, I24I}} \cdot \frac{S_{I24I}}{S_{I318}} \cdot \frac{\alpha_K}{1 + \alpha} \quad (4)$$

Подставляя значения $\alpha_K = 1,622$ и $\alpha = 9,4I$ для чистого $E2$ -перехода, найдем выражение $P_K(I318)$ через экспериментально определяемые величины

$$P_K(I318) = 0,16 \frac{C_{KX, I318}}{C_{KX, I24I}} \cdot \frac{S_{I24I}}{S_{I318}} \quad (5)$$

В эксперименте использовался источник ^{174}Lu активностью 4,4 кБк, причем с момента облучения мишени прошло около 8 лет. Одиночные спектры и спектры самосовпадений для каждого из каналов спектрометра приведены на рис.3, 4. Отношение площадей S_{I24I}/S'_{I318} составило 174(4). Примесь ^{173}Lu на момент измерения составила $< 0,5\%$. Накопление спектров $KX-\gamma$ -совпадений проводилось в течение 70 дней. На магнитную ленту записывались коды событий, совпадающих в пределах 500 нс. Интегральные спектры совпадений показаны на рис.5. Отметим, что полуширина конверторного пика составляла 12 нс, энергетическое разрешение - 2,2 кэВ для линии I24I кэВ (γ -канал) и 500 эВ для линии 76 кэВ (X -канал), а площадь пика I24I кэВ - около $5 \cdot 10^5$ импульсов.

При обработке из полученного трехмерного массива выбирались сечения, соответствующие пику γ -линии, фону слева и справа

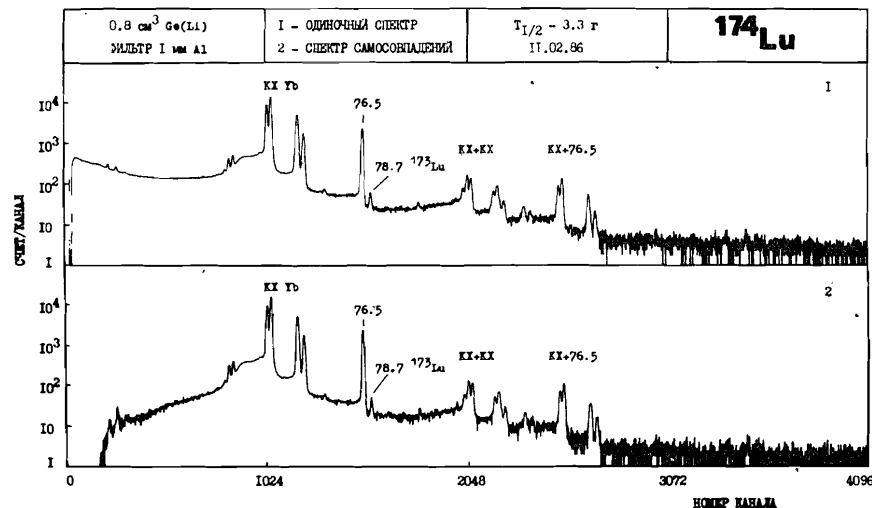


Рис.3. Аппаратурные спектры γ -квантов ^{174}Lu , измеренные с помощью 0,8 см³ Ge(Li)-детектора.

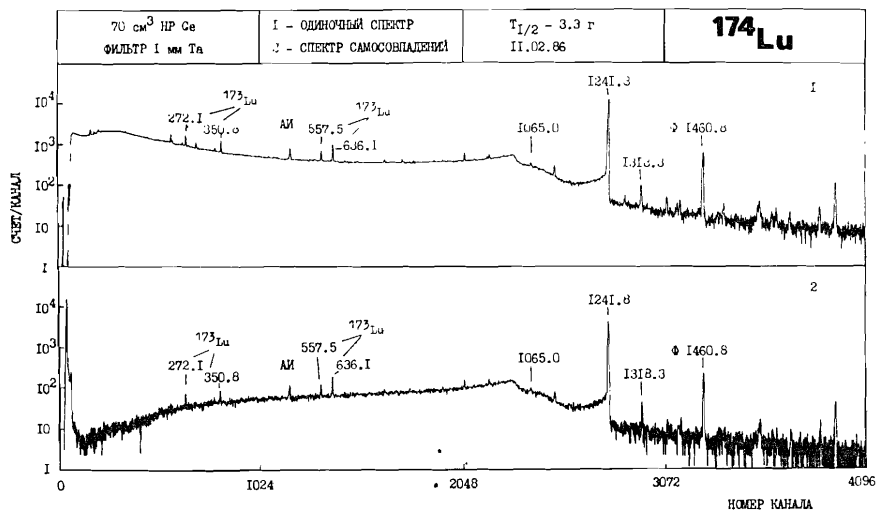


Рис.4. Аппаратурные спектры γ -квантов ^{174}Lu , измеренные с помощью 70 см^3 HPGe-детектора.

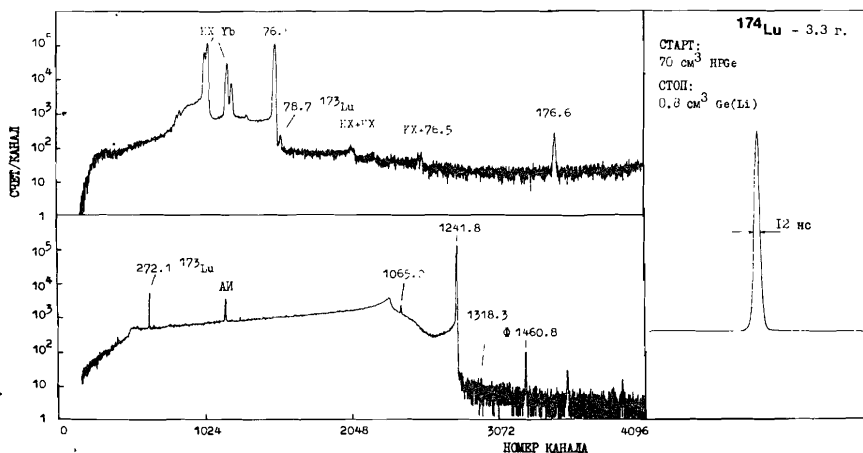


Рис.5. Интегральные спектры совпадений X-, Y- и Z-каналов.

ва от нее во временных интервалах (50 нс) истинных (пик) и случайных совпадений (слева и справа от пика). Получаемый в итоге результат для интенсивности совпадений учитывал все 9 сечений. Кроме того, проводилась т.н. обратная сортировка, при которой энергетические окна выбирались в X-канале и в ответе получались γ -спектры.

В результате обработки из данных прямой сортировки было получено $C_{\text{КХ},1241} = 178303(430)$ и $C_{\text{КХ},1318} = -0,5(75)$, что не противоречит гипотезе об отсутствии ветви K-захвата на уровень 1318 кэВ. С помощью соотношения (5) можно получить оценку

$$P_K(1318) \leq 1,1 \cdot 10^{-3} \quad (83\% \text{ CL}). \quad (6)$$

Аналогичную оценку можно получить, найдя граничное значение $C_{\text{КХ},1318}$ с помощью критерия отношения правдоподобий $/I7/$ из разностного спектра обратной сортировки (см. рис.6). Таким образом, было найдено

$$P_K(1318) \leq 1,5 \cdot 10^{-3} \quad (68\% \text{ CL}). \quad (7)$$

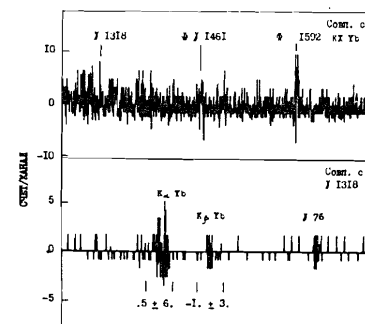


Рис.6. Участки разностных спектров совпадений для обратной (1) и прямой (2) сортировок (см. текст).

4. Некоторые выводы

Как отмечалось выше, в результате исследования спектров излучений ^{174}Lu были уточнены энергии и заселенности уровней ^{174}Yb . Что касается К-захвата на уровень I3I8 кэВ, то полученные нами данные о совпадениях К-рентгеновского излучения и I3I8 говорят о том, что если эта ветвь распада существует, ее интенсивность $\leq 10^{-3}$. Для улучшения оценки потребуются источники заметно большей активности.

На рис.7 изображена зависимость относительной вероятности К-захвата на уровень I3I8 кэВ от энергии $Q_K = Q - I3I8$, так что значение $Q_K = 61,3$ кэВ соответствует энергетическому порогу (энергии связи электронов К-оболочки). Для построения этой зависимости использовались значения амплитуд радиальных волновых функций и множителей, учитывающих эффекты обмена и перекрытия, из работ /I3, I8/.

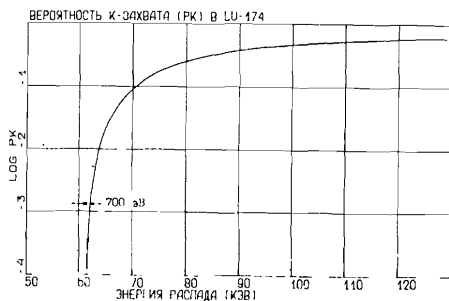


Рис.7. Зависимость вероятности К-захвата в ^{174}Lu от энергии распада Q_K .

Указанная выше верхняя граница для P_K (6) соответствует $E_K \sim 700$ эВ. Уменьшение E_K ведет к резкому уменьшению P_K , так что если возлагать надежды на существование вет-

ви К-захвата с малыми E_K , то нужно быть готовым к измерению P_K на уровне 10^{-4} и лучше.

Отметим в этой связи, что с ростом Z исследуемого ядра, вследствие увеличения разности между энергиями связи электронов на К- и L-оболочках, происходит уменьшение P_K при постоянном E_K , или, что то же, возрастание E_K при постоянном P_K . Так, величине $P_K = 10^{-5}$ в случае ^{158}Tb соответствует значение $E_K \sim 58$ эВ, в случае ^{174}Lu — ~ 74 эВ, а в случае ^{241}Cm — ~ 176 эВ. Иными словами, поиски ветвей К-захвата с малыми энергиями нейтрино в области тяжелых ядер сопряжены с повышением требований к чувствительности используемой методики постановки эксперимента и надежности способов обработки получаемых данных.

Литература

1. Ц.Вялов и др. Сообщение ОИЯИ Р6-86-476, Дубна, 1986.
2. R.S.Raghavan.—Phys.Rev.Lett., 51 (1983) 975.
3. V.B.Brudanin et al.—J.Phys.G: Nucl.Phys., 11 (1985) L119; В.М.Горожанкин и др. Сообщение ОИЯИ Р6-85-792, Дубна, 1985.
4. J.LoSecco et al.—Phys.Rev.Lett., 54 (1985) 2317.
5. Von Dincklage R.—D. et al.—Nucl.Phys., A445 (1985) 113.
6. Схемы распада радиоактивных ядер $A = I7I+I74$./Под ред. Б.С.Джелепова/. Л.: Наука, 1977.
7. A.N.Warstra, G.Audi.—Nucl.Phys., A432 (1985) 1.
8. В.М.Горожанкин и др. Сообщение ОИЯИ Р6-85-268, Дубна, 1985.
9. С.Л.Галкин и др. Энергия, относительная и абсолютная интенсивности гамма-излучения для радионуклидов ^{56}Co , ^{75}Se , ^{110m}Ag , ^{133}Ba , ^{152}Eu , ^{182}Ta , ^{192}Ir . М.: Изд-во стандартов, 1985.
10. Ц.Вялов и др.—ЗЧАЯ, т.9, вып.6, 1985, с.1350.
11. R.S.Nager, E.S.Seltzer.—Nucl.Data Tables, v.4, 1968, p.1.

12. В.М.Карташов и др. Программа и тезисы докладов XXII совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. Л.: Наука, 1972, с.141.
13. W.Bambynek.-Rev.Mod.Phys., 44 (1972) 716.
14. A.Visvanathan et al.-Z.Phys., 271 (1974) 339.
15. H.Kirschner, A.Ok.-Z. Naturforsch, A272 (1975) 287.
16. В.Б.Бруданин и др. Сообщение ОИЯИ I3-82-747, Дубна, 1983.
17. В.Н.Покровский и др. Сообщение ОИЯИ P10-86-311, Дубна, 1986.
18. Б.С.Джелепов и др. Бета-процессы. Л.: Наука, 1972.

Рукопись поступила в издательский отдел
30 декабря 1986 года.

Васильев С.К. и др.
Распад ^{174}Lu и возможность оценки
массы электронного нейтрино

P6-86-850

Проведено уточнение энергий и заселенностей возбужденных состояний ^{174}Yb при распаде ^{174}Lu . Сделана попытка обнаружить низкоэнергетическую ветвь К-захвата при распаде ^{174}Lu на уровень 1318 кэВ ^{174}Yb , наличие которой дало бы потенциальную возможность для оценки массы электронного нейтрино. С этой целью проведено измерение совпадений КХ-квантов с гамма-квантами 1318 кэВ и получена оценка для вероятности такого процесса $\leq 1.1 \cdot 10^{-3}$.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1986

Перевод авторов

Vasiljev S.K. et al.
Decay of ^{174}Lu and Possibility
of Electron Neutrino Mass Estimation

P6-86-850

The energies and population probabilities of ^{174}Yb excited levels were revised in γ -ray measurements of ^{174}Lu decay. The attempt to discover K-capture low energy branch in decay of ^{174}Lu at the 1318 keV level of ^{174}Yb was made. Existence of such branch would give the opportunity for estimation of electron neutrino mass. With this aim KX-ray measurements in coincidence with 1318 keV γ -ray have been carry out. Relative probability of this process was estimated to be $\leq 1.1 \cdot 10^{-3}$.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1986