

УДК 539.165:539.122:539.1.074.55:539.123:539.166

ПОИСК β^+EC И EC/EC РАСПАДОВ ^{74}Se

© 2020 г. Н. И. Рухадзе^{1, *}, А. С. Барабаш², В. Б. Бруданин¹, А. А. Клименко¹,
С. И. Коновалов², А. В. Рахимов¹, Е. Н. Рухадзе³, Ю. А. Шитов¹,
И. Штекл³, В. И. Юматов², Г. Варо⁴

¹Международная межправительственная организация
Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение “Институт теоретической и экспериментальной физики
имени А.И. Алиханова Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”, Москва, Россия

³Чешский технический университет в Праге, Институт экспериментальной и прикладной физики,
Прага, Республика Чехия

⁴Моданская подземная лаборатория, Модан, Франция

*E-mail: rukhadze@jinr.ru

Поступила в редакцию 02.03.2020 г.

После доработки 15.04.2020 г.

Принята к публикации 27.04.2020 г.

Поиск двойного бета-распада (β^+EC , EC/EC) ядра ^{74}Se проведен в Моданской подземной лаборатории (LSM, Франция, на глубине 4800 м водного эквивалента) с использованием ультра-низкофонного HPGe детектора Obelix с чувствительным объемом 600 см³ и образца природного селена с массой 1.6 кг, содержащего 0.89% (~14.24 г) ^{74}Se . Из обработки экспериментальных данных, накопленных за 135 сут измерений, получены новые экспериментальные ограничения на β^+EC и EC/EC распады ядра ^{74}Se на основное 0^+ и возбужденные состояния 2_1^+ , 596 кэВ, 2_2^+ , 1204 кэВ ядра ^{74}Ge .

DOI: 10.31857/S0367676520080268

ВВЕДЕНИЕ

Поиск безнейтринного двойного бета-распада ($\beta^-\beta^-$, $\beta^+\beta^+$, β^+EC , EC/EC) имеет большое значение в физике частиц и ядерной физике как инструмент изучения свойств нейтрино и слабого взаимодействия. Наблюдение безнейтринного двойного бета-распада ($0\nu\beta\beta$) позволит прояснить природу нейтрино (майорановское или дираковское) абсолютное значение массы нейтрино, иерархию нейтринных масс и возможное нарушение закона сохранения лептонного заряда [1]. Двухнейтринный двойной бета-распад ($2\nu\beta\beta$) — это процесс второго порядка, разрешенный в рамках стандартной модели (СМ), и его изучение дает возможность экспериментально определять ядерные матричные элементы (ЯМЭ) для процессов двойного бета-распада. Это приводит к развитию теоретических моделей расчета ЯМЭ как для $2\nu\beta\beta$, так и для $0\nu\beta\beta$ распадов. Двойной бета-распад может происходить как путем переходов на основное состояние, так и на различные возбужденные состояния дочернего ядра. В настоящее время $2\nu\beta\beta$ распад на основное состояние дочерних ядер зарегистрирован для 11 ядер (^{48}Ca , ^{76}Ge , ^{82}Se , ^{96}Zr , ^{100}Mo , ^{116}Cd , ^{128}Te , ^{130}Te , ^{136}Xe , ^{150}Nd , ^{238}U) [2]. Изу-

чение переходов на возбужденные состояния дочерних ядер позволяет получить дополнительную информацию о двойном бета-распаде. Меньшие энергии переходов на возбужденные состояния дочерних ядер приводят к существенному подавлению вероятностей двойного бета распада по сравнению с переходами на основное состояние в тех же ядрах [1, 3]. Однако такие процессы сопровождаются испусканием γ -квантов при разрядке возбужденных состояний, что облегчает детектирование этих редких процессов с помощью низкофоновых высокоэффективных HPGe детекторов. Двухнейтринный двойной бета распад ($2\nu2\beta^-$) на возбужденные состояния дочерних ядер был зарегистрирован в распадах ^{100}Mo — ^{100}Ru (0_1^+ , 1130.3 кэВ) и ^{150}Nd — ^{150}Sm (0_1^+ , 740.4 кэВ). Наиболее точное значение для периода полураспада ^{100}Mo — ^{100}Ru (0_1^+ , 1130.3 кэВ) [3] было получено в эксперименте, проведенном на спектрометре Obelix [4] в Моданской подземной лаборатории (LSM, Модан, Франция, на глубине 4800 м водного эквивалента). Высокая чувствительность спектрометра Obelix в исследованиях редких процессов, позволила провести аналогичные исследу-

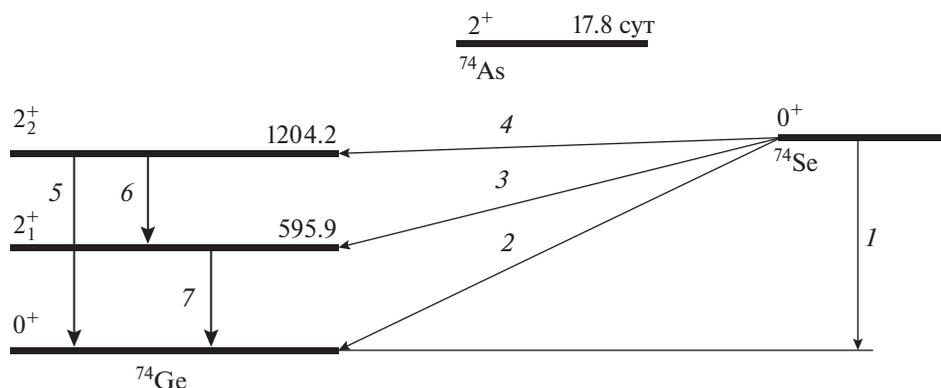


Рис. 1. Схема двойного бета-распада ядра ^{74}Se : I – энергия распада $^{74}\text{Se}-^{74}\text{Ge}$ (разность атомных масс) $Q = 1209.2$ кэВ, 2 – КК, КL, LL-захваты, и β^+ ЕС распад на основное 0^+ состояние ядра ^{74}Ge , 3 – КК, КL, LL- захваты, и β^+ ЕС распад на 2_1^+ , 595.9 кэВ состояние ядра ^{74}Ge , 4 – LL-захват на 2_2^+ , 1204.2 кэВ состояние ядра ^{74}Ge , 5 – γ -переход с энергией 1204.2 кэВ и относительной интенсивностью 31.5% , 6 – γ -переход с энергией 608.2 кэВ и относительной интенсивностью 68.5% , 7 – γ -переход с энергией 595.9 кэВ.

дования двойного бета-распады ядра ^{58}Ni на возбужденные состояния ^{58}Fe [5] и ядра ^{74}Se на основное и на возбужденные состояния ^{74}Ge .

УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследование процесса двойного бета распада (β^+ ЕС, ЕСЕС) ^{74}Se проводилось в Моданской подземной лаборатории (LSM, Франция) на глубине 4800 м водного эквивалента с использованием ультра-низкофонового детектора из сверхчистого германия (HPGe) Obelix с чувствительным объемом 600 см³ и относительной эффективностью $\sim 160\%$ [6], относительно кристалла NaI диаметром 3 дюйма и высотой 3 дюйма, с точечным источником, установленным на расстоянии 25 см от поверхности детектора для энергии гамма-квантов 1332 кэВ ^{60}Co [6]. Энергетическое разрешение детектора Obelix составляет ~ 1.2 кэВ на γ -линии 122 кэВ (^{57}Co) и ~ 2 кэВ на γ -линии 1332 кэВ (^{60}Co). Детекторная часть криостата окружена пассивной защитой из нескольких слоев археологического свинца толщиной ~ 12 см (активность менее 60 мБк \cdot кг⁻¹) и низкоактивного свинца (активность 5 – 20 Бк \cdot кг⁻¹) общей толщиной ~ 20 см, и помещена внутри герметичного стального кожуха. Для предотвращения скопления газа радона (^{222}Rn) около детектора, внутренняя часть пассивной защиты продувается воздухом с пониженным содержанием радона (концентрация ^{222}Rn в этом воздухе составляет ~ 15 мБк \cdot м⁻³) от установленной в LSM системы очистки воздуха от радона. Низкофоновые измерения основываются на сравнении измерений образца с фоном спектро-

метра. Фон спектрометра измеряется до и после основных измерений. Длительность измерений фона составляет, как правило, не менее 30 сут. Контрольные измерения фона спектрометра при исследовании ^{74}Se составляли ~ 53 сут. Интегральная скорость счета фона спектрометра для измерений селена составила 73 отсчетов \cdot кг⁻¹ \cdot сут⁻¹ в энергетическом диапазоне 30 – 2900 кэВ. Измеряемый образец из природного порошкообразного селена с массой 1.6 кг, содержащий 0.89% (~ 14.24 г) ^{74}Se , был помещен в тефлоновую коробку диаметром 115 мм, высотой 80 мм и толщиной стенок 3 мм. Коробка с природным селеном была установлена на крышке криостата детектора Obelix. Измерения проводились в течении 135 сут.

АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Поиск двойного бета-распада (безнейтринного и двухнейтринного) ядра ^{74}Se проводился ранее в работах [7, 8]. Схема этого процесса (рис. 1) составлена на основе данных, приведенных в [8]. Искомый β^+ ЕС распад ^{74}Se должен сопровождаться испусканием позитрона, который затем, после аннигиляции с электроном, образует два коррелированных гамма-кванта с энергиями по 511 кэВ. При $0\nu\text{EC/EC}$ распаде ^{74}Se возможны следующие варианты переходов: а) захват двух электронов с L-оболочки атома, при этом энергия распада равна ~ 1206.4 кэВ; б) захват одного электрона с K-оболочки, а другого с L-оболочки атома, в этом случае энергия распада ~ 1196.7 кэВ; в) захват двух электронов с K-оболочки атома, при этом энергия распада ~ 1187.0 кэВ. Перечис-

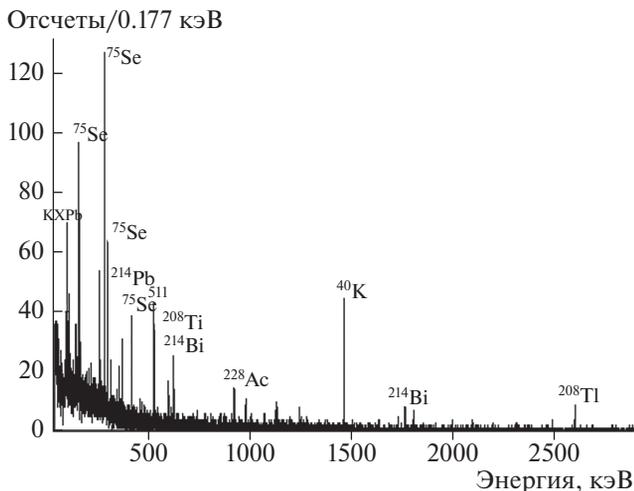


Рис. 2. Спектр природного селена, накопленный на спектрометре Obelix в течении 135 сут.

ленные ветви $0\nu\text{ECES}$ распадов на основное состояние должны сопровождаться испусканием гамма-квантов соответствующих энергий. $0\nu\text{LL}$ распад на второе 2^+ состояние ядра ^{74}Ge будет сопровождаться испусканием гамма-квантов с энергиями 1204.2 или $595.9 + 608.3$ кэВ. $0\nu\text{LL}$ распад на первое 2^+ состояние ^{74}Ge 595.9 кэВ должен сопровождаться испусканием гамма-кванта ~ 610.6 кэВ и гамма-кванта 595.9 кэВ. Учитывая, наличие в экспериментальном спектре фоновой линии 609.3 кэВ (^{214}Bi), анализ этой ветви распада проводился только по гамма-квантам 595.9 кэВ. $0\nu\text{KL}$ распад на первое 2^+ состояние ядра ^{74}Ge 595.9 кэВ должен сопровождаться испусканием гамма-кванта ~ 600.9 кэВ и гамма-кванта 595.9 кэВ. Распад $0\nu\text{KK}$ на первое 2^+ состояние ядра ^{74}Ge 595.9 кэВ должен сопровождаться испусканием гамма-кванта ~ 591.2 кэВ и гамма-кванта 595.9 кэВ. Учитывая вышеизложенное, объектами наблюдения и анализа в исследованиях двойного бета распада ядра ^{74}Se были γ -кванты с энергиями 511, 591.2, 595.9, 600.9, 1187.0, 1196.7, 1204.2 и 1206.4 кэВ, поиск которых проводился в спектре натурального селена (рис. 2), накопленного в течении 135 сут на спектрометре Obelix. Возможный EC/EC (KK, KL, LL) распад ядра ^{74}Se должен сопровождаться испусканием одного или двух гамма-квантов с вышеприведенными энергиями (рис. 1). Все эти γ -кванты могут быть с высокой эффективностью зарегистрированы детектором Obelix. Обработка экспериментальных данных, накопленных за 135 сут измерений, основана на поиске возможных пиков в вышеперечисленных областях спектра селена (рис. 2). Фитирование таких областей с максимальным энерговыделением (1187, 1196.7, 1204.2 и 1206.4 кэВ) при поиске $0\nu\text{EC}/\text{EC}$ распада

^{74}Se показано на рис. 3. Экспериментальные точки спектра на рис. 3 приведены с погрешностями. Фитирование участков спектра проводилось в предположении линейного фона (т.е. прямой линии на участке спектра). Отклонение фона от прямой линии на рис. 3в предположительно связано с возбуждением уровня 1204.2 кэВ ядра ^{74}Ge , содержащегося в самом детекторе в количестве $\sim 36.7\%$. А отклонение от прямой линии на рис. 3б вызвано флуктуацией фона в этой области спектра. Эффективность детектора Obelix для регистрации γ -квантов, вылетающих из образца природного селена, рассчитывалась с помощью симуляций проведенных на основе пакета ROOT-VMC-GEANT4 DPGE в диапазоне 0.05–5 МэВ. После чего расчетная эффективность проверялась с помощью измерений низкоактивных образцов, изготовленных на основе порошка окиси лантана (La_2O_3). Природный La в этом порошке содержит $0.0888 \pm \pm 0.0007\%$ изотопа ^{138}La с периодом полураспада $T_{1/2} = (1.02 \pm 0.01) \cdot 10^{11}$ лет, распад которого сопровождается испусканием γ -квантов с энергиями 788.7 и 1435.8 кэВ. Этот метод калибровки детектора по эффективности при низкофоновых измерениях детально описан в работе [4]. Обработка данных, полученных при измерении природного селена на спектрометре Obelix в течение 135 сут, показала отсутствие искомым пиков в областях энергий γ -квантов, сопровождающих двойной бета распад ядра ^{74}Se (рис. 3). Для определения пределов на изучаемые ветви распада ^{74}Se было определено количество исключенных событий (N_{excl}) на 90% уровне достоверности для всех возможных гамма переходов в распаде $^{74}\text{Se} \rightarrow ^{74}\text{Ge}$ (аналогично подобной процедуре в работе [5]). Эти величины составляют соответственно – 11 (591.2 кэВ), 31 (595.9 кэВ), 11 (600.9 кэВ), 9 (1187.0 кэВ), 13 (1196.7 кэВ), 18 (1204.2 кэВ), 7 (1206.4 кэВ) – см. табл. 1. Пределы на исследуемые ветви двойного бета распада ^{74}Se , в некоторых случаях, определялись по совместному анализу двух γ -переходов. В этих случаях, энергии гамма-переходов (E_γ , кэВ) объединяет знак “+” (см. табл. 1). На основе этих данных получены новые экспериментальные ограничения на периоды полураспада $\beta^+\text{EC}$, EC/EC распада ^{74}Se на основное и на возбужденные 2_1^+ , 596 кэВ и 2_2^+ , 1204 кэВ состояния ^{74}Ge . В табл. 1 также указаны возможные переходы двойного бета-распада ^{74}Se на возбужденные состояния (значения их энергий приведены в кэВ) или на основное состояние (g. s.) ^{74}Ge (Переход), энергии гамма-переходов (E_γ , кэВ) и эффективность регистрации (Эфф. %) гамма-квантов, испущенных при таких гамма-переходах вместе с коли-

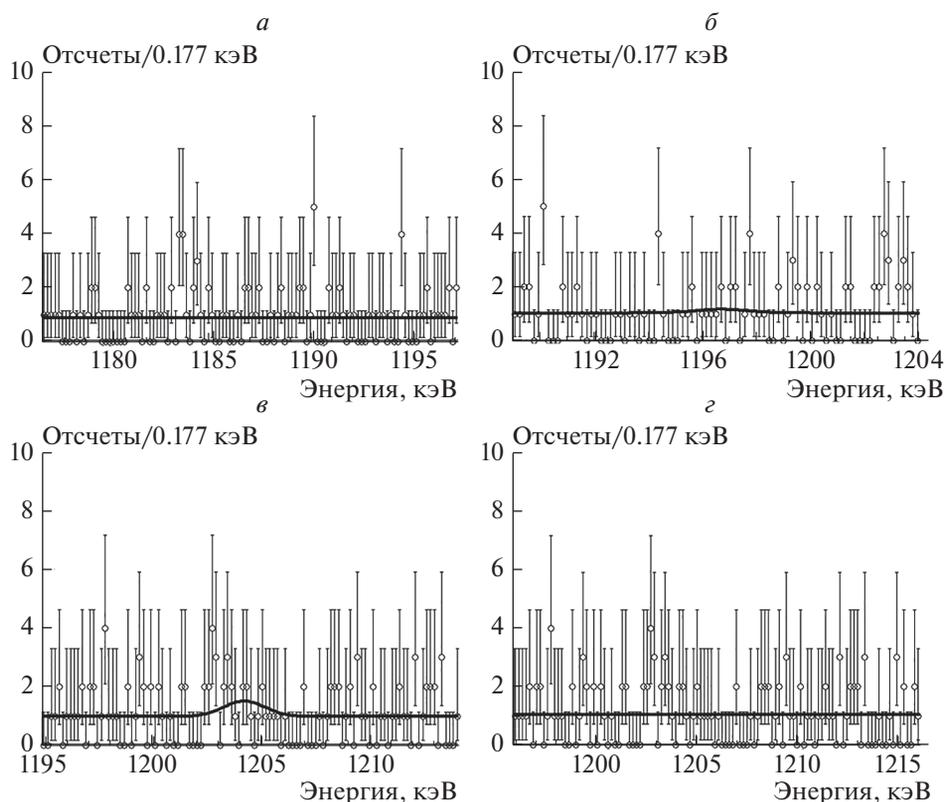


Рис. 3. Участки спектра природного селена для поиска возможных пиков с энергиями 1187.0 (а), 1196.7 (б), 1204.2 (в) и 1206.4 кэВ (г) при двойном бета-распаде ^{74}Se . Сплошными линиями на участках спектра показаны результаты фитирования фона в этих областях. Обсуждение нелинейностей фона на рис. 3в и 3б приведено в тексте статьи.

чеством исключенных событий для данной энергии перехода (N_{excl}). Для сравнения полученных результатов с существующими данными приведе-

ны также предыдущие экспериментальные ограничения на соответствующие ветви двойного бета-распада ^{74}Se , полученные в работах [7, 8]. Все пре-

Таблица 1. Экспериментальные ограничения на β^+EC и EC/EC распады ^{74}Se

Переход	E_{γ} , кэВ	Эфф. %	N_{excl}	$T_{1/2}$, 10^{19} лет	$T_{1/2}$, 10^{19} лет [7]	$T_{1/2}$, 10^{19} лет [8]
$0\nu LL \rightarrow 2_2^+$, 1204.2	595.9 + 1204.2	1.23 0.57	31 18	1.10	0.55	0.70
$0\nu LL \rightarrow 2_1^+$, 595.9	595.9	1.82	31	1.58	1.30	0.82
$0\nu LL \rightarrow g.s.$	1206.4	1.67	7	6.47	0.41	0.58
$0\nu KL \rightarrow 2_1^+$, 595.9	600.9 595.9	1.81 1.81	11 31	4.37 1.57	1.12	0.82
$0\nu KL \rightarrow g.s.$	1196.7	1.67	13	3.48	0.64	0.96
$0\nu KK \rightarrow 2_1^+$, 595.9	591.2 595.9	1.81 1.81	11 31	4.39 1.57	1.57	1.43
$0\nu KK \rightarrow g.s.$	1187.0	1.67	9	4.83	0.62	—
$2\nu EC/EC \rightarrow 2_2^+$, 1204	595.9 + 1204.2	1.23 0.57	31 18	1.10	0.55	0.70
$2\nu EC/EC \rightarrow 2_1^+$, 596	595.9	2.11	31	1.83	0.77	0.92
$(0\nu + 2\nu)\beta^+EC \rightarrow g.s.$	511	4.32	512	0.23	0.19	—

дела в табл. 1 приведены на 90% уровне достоверности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен поиск двойного бета-распада ^{74}Se на спектрометре Obelix, позволивший уточнить экспериментальные ограничения на различные ветви $\beta^+\text{EC}$, EC/EC распадов ^{74}Se на основное и на возбужденные состояния ^{74}Ge . Измерения образца природного селена на спектрометре Obelix в Моданской подземной лаборатории будет продолжено с увеличенной массой исследуемого изотопа и улучшенной геометрией измерения, обеспечивающей повышение эффективности регистрации гамма-квантов. Это должно обеспечить дальнейшее улучшение приведенных в табл. 1 экспериментальных пределов на двойной бета распад ^{74}Se .

По завершению измерений ^{74}Se планируется провести исследования двойного бета распада ^{96}Zr и ^{150}Nd на возбужденные состояния дочерних ядер. Эти исследования будут, как и исследование распада ^{74}Se , проводиться в Моданской подземной лаборатории с использованием детекторов Obelix и Idefix (коаксиальный HPGe детектор Р-типа в ультра низкофоновом криостате U-типа с чувствительным объемом и основными характеристиками аналогичными детектору Obelix). Idefix, как и Obelix, изготовлен фирмой Канберра и установлен в Моданской подземной лаборатории.

Авторы благодарят персонал LSM за техническую поддержку и помощь в проведении измерений. Настоящая работа выполнена в рамках соглашения LEA-JOULE и договора о сотрудничестве между IN2P3 (Франция) и JINR (ОИЯИ, Россия) № 15-93 и частично поддержана грантами Республики Чехия LM2015072, ERDF cz.02.1.01/0.0/0.0/16 013/0001733 и РФФИ (проект № 20-52-16201).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Haxton W.C., Stephenson G.S.* // Progr. Part. Nucl. Phys. 1984. V. 12. P. 409.
2. *Barabash A.S.* // AIP Conf. Proc. 2013. V. 1572. P. 11.
3. *Arnold R., Augier C., Barabash A.S. et al. (The NEMO-3 collaboration)* // Nucl. Phys. A. 2014. V. 925. P. 25.
4. *Brudanin V.B., Egorov V.G., Hodák R. et al.* // JINST. 2017. V. 12. P. 02004.
5. *Рухадзе Н.И., Бруданин В.Б., Клименко А.А. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2018. Т. 82. С. 786; *Rukhadze N.I., Brudanin V.B., Klimenko A.A. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2018. V. 82. P. 708.
6. https://www.aps.anl.gov/files/APS-Uploads/DET/Detector-Pool/Spectroscopic-Detectors/Canberra/Germanium_Detectors_Manual.pdf.
7. *Barabash A.S., Hubert Ph., Nachab A., Umatov V.* // Nucl. Phys. A. 2007. V. 785. P. 371.
8. *Lehnert B., Wester T., Degering D. et al.* // J. Phys. G. 2016. V. 43. Art. № 085201.