

ПОИСК ДВОЙНОГО БЕТА-РАСПАДА ^{82}Se НА ВОЗБУЖДЕННЫЕ СОСТОЯНИЯ ^{82}Kr НА УСТАНОВКЕ OBELIX

А. С. Барабаш^{1,*}, *Г. Варот*², *С. Нагорный*³,
Л. Пагнанини^{4,5}, *С. Пирро*⁴, *Д. В. Пономарев*⁶,
*С. В. Розов*⁶, *Н. И. Рухадзе*⁶, *Ю. А. Шитов*⁷, *И. Штекл*⁷,
Т. К. Хусаинов^{6,8}, *В. И. Юматов*¹, *Е. А. Якушев*⁶

¹ Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва

² Подземная лаборатория Модан, CNRS/CEA, Франция

³ Королевский университет Кингстон, Кингстон, Онтарио, Канада

⁴ Национальная лаборатория Гран-Сассо, Ассерджи, Италия

⁵ Научный институт Гран-Сассо, Л'Аквила, Италия

⁶ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

⁷ Институт экспериментальной и прикладной физики,
Чешский технический университет в Праге, Прага

⁸ Институт ядерной физики Министерства энергетики Республики Казахстан,
Алматы, Казахстан

Проведен поиск процессов двойного бета-распада ^{82}Se на возбужденные состояния ^{82}Kr с помощью установки OBELIX. Измерения проводились на HPGe-детекторе объемом 600 см³. Детектор был окружен 6,5 кг обогащенного селена (содержание ^{82}Se составило $\sim 92,5\%$). Приводятся данные за 17524,6 ч измерений. В результате достигнута лучшая в мире чувствительность к такого рода переходам. В частности, получено указание на существование двухнейтринного распада ^{82}Se на первое 0^+ возбужденное состояние ^{82}Kr с периодом полураспада $4,4^{+1,6}_{-0,9} \cdot 10^{22}$ лет.

A search for processes of double beta decay of ^{82}Se into excited states of ^{82}Kr was carried out using the OBELIX installation. The measurements were carried out with a 600 cm³ HPGe detector. The detector was surrounded by 6.5 kg of enriched selenium (^{82}Se content was $\sim 92.5\%$). Data for 17524.6 h of measurements have been analyzed. As a result, the world's best sensitivity to such transitions has been achieved. In particular, an indication to the existence of a two-neutrino decay of ^{82}Se into the first 0^+ excited state of ^{82}Kr with a half-life of $4.4^{+1.6}_{-0.9} \cdot 10^{22}$ y has been obtained.

PACS: 23.40.—s; 14.60.Pq

* E-mail: barabash@itep.ru

ВВЕДЕНИЕ

Поиск безнейтринного двойного бета-распада является одной из актуальнейших задач в ядерной физике и физике элементарных частиц (см. недавние обзоры [1–3]). Обнаружение этого процесса автоматически приведет к двум фундаментальным выводам: 1) закон сохранения лептонного числа нарушается и 2) нейтрино является майорановской частицей. Кроме того, это даст информацию о таких фундаментальных вопросах, как абсолютная шкала масс нейтрино, тип иерархии и, при определенных обстоятельствах, о нарушении СР-четности в лептонном секторе. Обнаружение процесса с испусканием майорона приведет к открытию новой элементарной частицы — майорона (одного из кандидатов на темную материю). Все это, в свою очередь, вызовет важнейшие следствия в физике и астрофизике.

Большой интерес представляет также прецизионное изучение процессов двухнейтринного двойного бета-распада как на основное, так и на возбужденные состояния дочерних ядер, что позволяет улучшить точность расчетов ядерных матричных элементов (ЯМЭ) как для 2ν -, так и для 0ν -распада. А точные расчеты ЯМЭ (0ν), в свою очередь, позволяют точно определять значение эффективной массы майорановского нейтрино.

В настоящее время двухнейтринный двойной бета-распад на основное состояние дочернего ядра зарегистрирован для 11 ядер [4]. Переходы на первое возбужденное 0_1^+ -состояние зарегистрированы только для двух ядер — ^{100}Mo и ^{150}Nd (см. [4]). Это связано с тем, что энергия 2β -перехода в этом случае существенно меньше, чем для перехода на основное 0_{gs}^+ -состояние, а вероятность 2ν -распада пропорциональна энергии перехода в 11-й степени. В связи с этим наиболее перспективными ядрами для поиска таких переходов являются ядра с большой энергией 2β -распада на 0_1^+ возбужденное состояние дочернего ядра — ^{150}Nd (2630,9 кэВ), ^{96}Zr (2208,0 кэВ) и ^{100}Mo (1904,1 кэВ) (впервые это

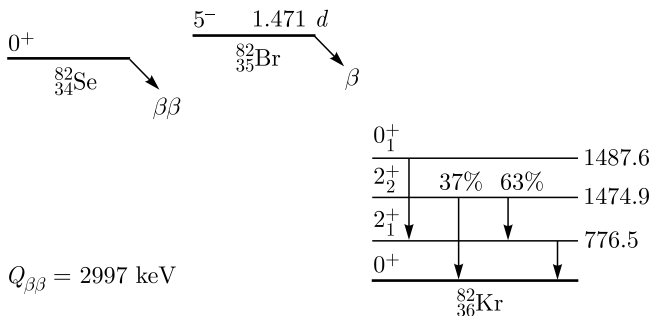


Рис. 1. Схема распада

обсуждалось в работе [5]). Следующим ядром в этом ряду стоит ^{82}Se с энергией перехода 1510,3 кэВ. Настоящая работа как раз и посвящена поиску двойного бета-распада ^{82}Se на возбужденные состояния ^{82}Kr (2_1^+ , 2_2^+ , 0_1^+). Схема распада показана на рис. 1. Измерения проводились с помощью HPGe-детектора по поиску γ -квантов, которые сопровождают соответствующий переход.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперимент проводится в подземной лаборатории LSM (Франция, 4800 м в.э.). Образец обогащенного ^{82}Se измерялся на детекторе OBELIX [6].

Низкофоновый HPGe-детектор представляет собой германиевый кристалл Р-типа с чувствительным объемом $\sim 600 \text{ см}^3$. Масса детектора $\sim 3,2 \text{ кг}$, а его относительная эффективность составляет 160 %. Кристалл смонтирован в сверхнизкофоновом криостате U-типа. Энергетическое разрешение детектора составляет $\sim 1,2 \text{ кэВ}$ (FWHM) при энергии 122 кэВ (^{57}Co) и $\sim 2 \text{ кэВ}$ (FWHM) при энергии 1332 кэВ (^{60}Co).

Детектор окружен пассивной защитой, состоящей из двух слоев свинца, — 12 см археологического свинца и 20 см низкорadioактивного свинца. Детальное описание установки и всех ее характеристик приведено в [6].

На детектор установлен сосуд Маринелли, содержащий 6,51 кг обогащенного ^{82}Se (среднее обогащение составляет 92,5 %, полный вес ^{82}Se равен 6,02 кг). Используемый обогащенный селен был произведен в рамках экспериментальной программы LUCIFER [7] и переведен в состояние мелких ($\sim 1\text{--}5 \text{ мм}$) кусочков. Дополнительную информацию об используемом образце обогащенного селена можно найти в [8].

В настоящей работе мы представляем результаты измерений за 17 524,6 ч. Поиск 2β -переходов ^{82}Se на возбужденные состояния ^{82}Kr велся по регистрации γ -квантов, сопровождающих соответствующий переход (см. схему распада на рис. 1).

АНАЛИЗ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Спектры γ -квантов в области интересующих нас энергий представлены на рис. 2. Стрелками обозначены положения искомых пиков. Фоновая кривая (1) проведена с помощью пакета программ ROOT. Красным цветом (2) обозначены пики при искомых энергиях, которые соответствуют эффекту с периодом полураспада $\sim 5 \cdot 10^{22} \text{ лет}$. Соседняя линия от ^{214}Bi использовалась для фиксации энергетического разрешения в этой области энергий.

2β -распад ^{82}Se на 0_1^+ возбужденное состояние ^{82}Kr . Этот переход сопровождается испусканием двух γ -квантов с энергиями 711,1

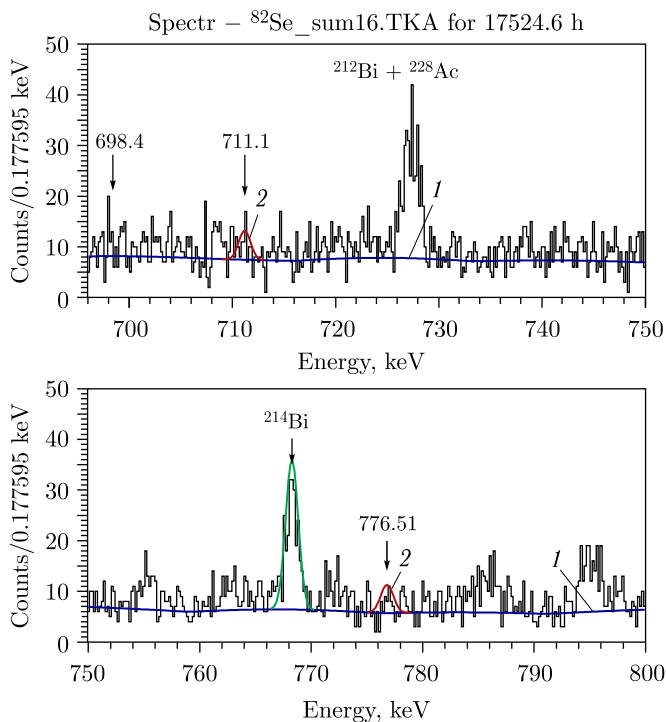


Рис. 2 (цветной в электронной версии). γ -спектры в исследуемой области энергий. Сплошная синяя линия — оценка фона (см. текст)

и 776,5 кэВ. На рис. 2 видны небольшие превышения над фоном при этих энергиях. Эффект составил $(23,0 \pm 8,6)$ событий $(2,7\sigma)$ для линии 711,1 кэВ и $(19,6 \pm 7,6)$ событий $(2,6\sigma)$ для линии 776,5 кэВ. Суммарный эффект составил $(42,6 \pm 11,5)$ события $(3,7\sigma)$. Для улучшения соотношения эффект/фон исследовалась область $\pm 1,1\sigma$ вокруг максимумов указанных выше пиков. Пересчет на полное количество полезных событий дает $(31,6 \pm 11,8)$, $(26,9 \pm 10,4)$ и $(58,4 \pm 15,8)$ событий соответственно. Эффективность регистрации γ -квантов составила 2,13% (711,1 кэВ) и 2,08% (776,5 кэВ). Эти значения были получены с помощью расчетов Монте-Карло. В расчетах учитывались угловые корреляции между γ -квантами, испускаемыми в каскаде. В табл. 1 приведены результаты, полученные для отдельных пиков, и суммарный результат. Учитывая время измерения, количество ядер ^{82}Se , число полезных событий и эффективность регистрации γ -квантов, получаем следующее значение для периода полураспада ^{82}Se на возбужденное 0_1^+ -состояние ^{82}Kr :

$$T_{1/2} = 4,4_{-0,9}^{+1,6} \cdot 10^{22} \text{ лет.} \quad (1)$$

Таблица 1. Оценка периода полураспада ^{82}Se на 0_1^+ -уровень $^{82}\text{Kг.}$ E_i — энергия исследуемого пика

Исследуемый пик	Количество событий		Эффективность регистрации, %	$T_{1/2}$, 10^{22} лет
	$E_i \pm 1,1\sigma$	Полный пик		
711,1 кэВ	$23,0 \pm 8,6$	$31,6 \pm 11,8$	2,13	$4,14^{+2,47}_{-1,13}$
776,5 кэВ	$19,6 \pm 7,6$	$26,9 \pm 10,4$	2,08	$4,75^{+2,99}_{-1,32}$
Сумма	$42,6 \pm 11,5$	$58,4 \pm 15,8$	4,21	$4,43^{+1,64}_{-0,94}$

Приведены только статистические ошибки. В нашем эксперименте мы не можем различить 0ν - и 2ν -распады, поскольку оба перехода приводят к одному и тому же каскаду γ -квантов. Но, в нашем случае, можно с уверенностью говорить об указании на наблюдение именно 2ν -распада, поскольку имеется более сильное ограничение на 0ν -распад ($T_{1/2} > 1,8 \times 10^{23}$ лет [9]).

Данные теоретических расчетов периода полураспада для этого перехода сильно разнятся — от $(1,3-3,3) \cdot 10^{21}$ лет в рамках QRPA-модели [10, 11] до $(0,5-20) \cdot 10^{22}$ лет в рамках расчетов «эффективной теории» [12]. Более точные предсказания можно получить, используя экспериментальную информацию, полученную для ^{100}Mo и ^{150}Nd , для которых были зарегистрированы распады как на основное, так и на возбужденные состояния дочерних ядер. Эти эксперименты показали, что ЯМЭ для переходов на 0_1^+ -состояние примерно на 20 % меньше соответствующих значений для переходов на основное 0_{gs}^+ -состояние. Предполагая такое же соотношение ЯМЭ для ^{82}Se и используя известное значение ЯМЭ для распада на основное состояние [4] и отношение фазовых объемов из работы [13] ($G_{gs}/G_{0+1} = 377$), получаем $\sim 4,6 \cdot 10^{22}$ лет. Данная оценка и полученный экспериментальный результат хорошо согласуются друг с другом.

Распады ^{82}Se на 2_1^+ и 2_2^+ возбужденные состояния $^{82}\text{Kг.}$ Результаты поиска 2β ($0\nu + 2\nu$)-распадов ^{82}Se на 2_1^+ и 2_2^+ возбужденные состояния дочернего ядра приведены в табл. 2. Поиск распада на 2_1^+ возбужденное состояние велся по линии 776,5 кэВ. Эффективность регистрации такого одиночного γ -кванта была рассчитана методом Монте-Карло и составила 2,42 %. В результате был получен предел $T_{1/2} > 4 \cdot 10^{22}$ лет (90 % С.Л.). Поиск распада на 2_2^+ -уровень велся по двум γ -квантам (776,5 и 1474,9 кэВ) с учетом схемы распада (см. рис. 1). В результате был получен предел $T_{1/2} > 2,7 \cdot 10^{22}$ лет (90 % С.Л.). В таблице также приведены ограничения из работы [7]. Видно, что наши ограничения примерно в 3 раза лучше. Недавно коллаборация CUPID-0 опубликовала новые пределы для 0ν -распада ^{82}Se на возбужденные состояния дочернего ядра. В частности, для перехода на 2_1^+ - и 2_2^+ -уровни получены огра-

Таблица 2. Пределы на $2\beta(0\nu + 2\nu)$ -распад ^{82}Se на 2_1^+ и 2_2^+ возбужденные состояния дочернего ядра ^{82}Kr (90% С. Л.)

Уровень ^{82}Kr	Энергия γ -кванта (эффективность регистрации)	Предел, 90% С. Л.	
		OBELIX	[7]
2_1^+ (776,5 кэВ)	776,5 кэВ (2,42%)	$> 4 \cdot 10^{22}$	$> 1,3 \cdot 10^{22}$
2_2^+ (1474,9 кэВ)	776,5 кэВ (1,34%) + + 1474,9 кэВ (0,76%)	$> 2,72 \cdot 10^{22}$	$> 1,0 \cdot 10^2$

ничения $> 3,0 \cdot 10^{23}$ и $> 3,2 \cdot 10^{23}$ лет соответственно [9]. Это означает, что в нашем эксперименте получены лучшие в мире ограничения лишь для 2ν -распада для этих переходов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На низкофоновой установке OBELIX проведен поиск процессов двойного бета-распада ^{82}Se на возбужденные состояния ^{82}Kr . Полное время измерений составило 17 524,6 ч. Впервые получено указание на наблюдение двухнейтринного двойного бета-распада ^{82}Se на 0_1^+ возбужденное состояние ^{82}Kr с периодом полураспада $4,4^{+1,6}_{-0,9} \cdot 10^{22}$ лет. Получены также лучшие в мире ограничения для 2ν -распадов на 2_1^+ и 2_2^+ возбужденные состояния ^{82}Kr ($> 4 \cdot 10^{22}$ и $> 2,7 \cdot 10^{22}$ лет соответственно). Эксперимент продолжается. Мы надеемся повысить уровень достоверности результата для 2ν -распада на 0_1^+ возбужденное состояние ^{82}Kr до значений $> 3\sigma$ для каждого пика и $> 4,5\sigma$ для суммарного эффекта.

Благодарности. Авторы благодарят сотрудников подземной лаборатории в Модане за помощь в проведении эксперимента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Agostini M. et al.* Toward the Discovery of Matter Creation with Neutrinoless Double-Beta Decay // *Rev. Mod. Phys.* 2023. V. 95. P. 025002.
2. *Adams C. et al.* Neutrinoless Double Beta Decay. arXiv:2212.11099 [nucl-ex].
3. *Шимковиц Ф.* Нейтрино: массы, взаимодействия и лабораторные эксперименты // *УФН.* 2021. Т. 191. С. 1307–1332.
4. *Barabash A. S.* Precise Half-Life Values for Two-Neutrino Double- β Decay: 2020 Review // *Universe.* 2020. V. 6. P. 159.
5. *Барабаш А. С.* Об одной экспериментальной возможности наблюдения двухнейтринного двойного бета-распада // *Письма в ЖЭТФ.* 1990. Т. 51. С. 181–183.
6. *Brudanin V. B. et al.* Development of the Ultra-Low Background HPGe Spectrometer OBELIX at Modane Underground Laboratory // *J. Instrum.* 2017. V. 12. P. P02004.
7. *Beeman J. W. et al.* Double-Beta Decay Investigation with Highly Pure Enriched ^{82}Se for the LUCIFER Experiment // *Eur. Phys. J. C.* 2015. V. 75. P. 591.

8. *Balabanov S. S. et al.* High-Efficiency Recovery of ^{82}Se from Enriched Zn^{82}Se Scintillating Bolometer Crystals // *J. Instrum.* 2023. V. 18. P. P04035.
9. *Azzolini O. et al.* Final Result on the Neutrinoless Double Beta Decay of ^{82}Se with CUPID-0 // *Phys. Rev. Lett.* 2022. V. 129. P. 111801.
10. *Aunola M., Suhonen J.* Systematic Study of Beta and Double Beta Decay to Excited Final States // *Nucl. Phys. A.* 1996. V. 602. P. 133–166.
11. *Toivanen J., Suhonen J.* Study of Several Double-Beta-Decaying Nuclei Using the Renormalized Proton–Neutron Quasiparticle Random-Phase Approximation // *Phys. Rev. C.* 1997. V. 55. P. 2314–2323.
12. *Coello Perez E. A., Menendez J., Schwenk A.* Gamow–Teller and Double- β Decays of Heavy Nuclei within an Effective Theory // *Phys. Rev. C.* 2018. V. 98. P. 045501.
13. *Mirea M., Pahomi T., Stoica S.* Values of the Phase Space Factors Involved in Double Beta Decay // *Rom. Rep. Phys.* 2015. V. 67. P. 872–889.