

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 539.1.074

КРЕМНИЕВЫЙ 4π -СПЕКТРОМЕТР ЭЛЕКТРОНОВ β -РАСПАДА
С ЭНЕРГИЕЙ ДО 3 МэВ

© 2021 г. И. Е. Алексеев^b, С. В. Бахланов^a, А. В. Дербин^{a,*}, И. С. Драчнев^a,
И. М. Котина^a, В. Н. Муратова^a, Н. В. Ниязова^a, Д. А. Семенов^a,
М. В. Трушин^a, Е. В. Унжаков^a, Е. А. Чмель^a

^a Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова
Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”
Россия, 188300, Гатчина Ленинградской обл., Орлова роща

^b Радиевый институт им. В.Г. Хлопина
Россия, 194021, Санкт-Петербург, 2-й Мурунский просп., 28

*e-mail: derbin_av@pnpi.nrcki.ru

Поступила в редакцию 18.07.2020 г.

После доработки 11.08.2020 г.

Принята к публикации 21.08.2020 г.

Бета-спектрометр состоит из двух Si(Li)-детекторов с толщиной чувствительной области более 8 мм и обладает 4π -геометрией. Спектрометр полного поглощения позволяет провести прямое измерение β -спектров, не требующее поправок функции отклика на обратное рассеяние электронов от поверхности кристалла. Для измерения β -спектров при переходах на возбужденные состояния дочерних ядер используется дополнительный ВГО-детектор, регистрирующий γ -кванты и включенный в совпадения с парой Si(Li)-детекторов.

DOI: 10.31857/S0032816221010225

ВВЕДЕНИЕ

Прецизионное знание формы β -спектров ряда изотопов является обязательным условием определения осцилляционных параметров в экспериментах с реакторными нейтрино и с искусственными источниками нейтрино. Положительный результат эксперимента LSND [1], который появился почти 20 лет назад, результаты калибровок радиохимических Ga–Ge-детекторов солнечных нейтрино [2, 3] и новые расчеты спектра реакторных нейтрино, известные как “реакторная аномалия” [4], поставили вопрос о существовании стерильного нейтрино, связанного, в основном, с массовым состоянием нейтрино, отстоящим от трех известных массовых состояний на величину $\delta m_{14}^2 \sim 1 \text{ эВ}^2$ и с эффективным углом смешивания $\sin^2(2\theta_s) \sim 0.1$.

Помимо ряда реакторных и ускорительных экспериментов по поиску осцилляций нейтрино в стерильное состояние существуют проекты с использованием искусственных источников нейтрино. Среди искусственных излучателей электронных антинейтрино наиболее перспективным является источник $^{144}\text{Ce} - ^{144}\text{Pr}$, использовать который планировалось с детекторами KamLand [5] и Bogexino [6]. К сожалению, наиболее продвину-

тый проект Bogexino_SOX_Ce был остановлен, в том числе и по причинам, не имеющим отношения к технической стороне планируемого эксперимента.

Одна из конкретных задач, которая должна быть решена в эксперименте с источником $^{144}\text{Ce} - ^{144}\text{Pr}$, состоит в прецизионном измерении β -спектров данных ядер с целью определения интенсивности и формы спектра антинейтрино. Это очень важная задача, поскольку требуемая чувствительность эксперимента к осцилляционным параметрам δm_{14}^2 и $\sin^2(2\theta_s)$ может быть достигнута при условии, что коэффициент, связывающий тепловую мощность и активность источника, и ожидаемая скорость счета реакции обратного β -распада, которая определяется спектром антинейтрино, будут определены с необходимой (лучше, чем 1.5% для проекта Bogexino_SOX) точностью.

Измерения β -спектров ядер $^{144}\text{Ce} - ^{144}\text{Pr}$ и ^{210}Bi с использованием кремниевого полупроводникового β -спектрометра в классической схеме “мишень–детектор” были проведены нами ранее в работах [7–9].

В данной статье описаны основные характеристики специально разработанного полупроводникового β -спектрометра на основе Si(Li)-детек-

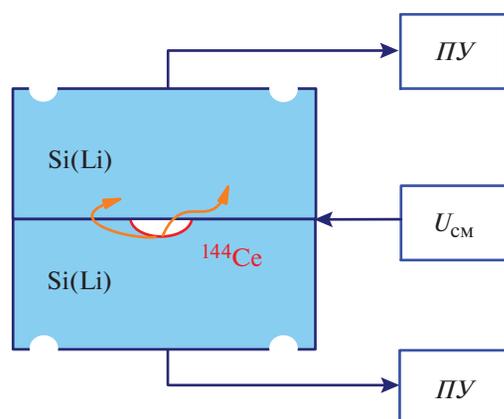


Рис. 1. Схема β -спектрометра с двумя Si(Li) -детекторами. ^{144}Ce – измеряемый источник, ПУ – преусилители, $U_{\text{см}}$ – напряжение смещения.

торов, обладающего 4π -геометрией. Спектрометр регистрирует полную энергию электрона и решает проблему обратного рассеяния электронов от поверхности кристалла, вероятность которого, в зависимости от энергии электрона и угла падения, может достигать десятков процентов. Предварительные результаты измерения β -спектров ^{144}Ce – ^{144}Pr с парой Si(Li) -детекторов с толщиной i -области 5 мм опубликованы в работе [10].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Кремнийлитиевые детекторы были специально изготовлены для этого эксперимента из монокристаллического кремния p -типа проводимости с удельным сопротивлением $4 \text{ кОм} \cdot \text{см}$ и временем жизни носителей 800 мкс по стандартной технологии, хорошо отработанной в ПИЯФ. Характеристики таких детекторов описаны в работах [8, 9, 11].

Два Si(Li) -детектора с толщиной чувствительной области $>8 \text{ мм}$, которая превышает пробег электронов с энергией 3 МэВ , были изготовлены в форме “грибка” с внешним диаметром 27 и 23 мм, высотой 9 мм и диаметром чувствительной области 20 и 18 мм. Детекторы имели разные внешние диаметры для удобства сборки спектрометра из двух Si(Li) -детекторов, состыкованных вплотную.

Характеристики изготовленных детекторов были проверены в отдельном вакуумном криостате с помощью γ - и рентгеновского излучений и конверсионных и оже-электронов от источника ^{207}Bi . Энергетическое разрешение FWHM, измеренное для конверсионных электронов с энергией 482 кэВ , составило 2.0 кэВ для обоих детекторов. Определенная толщина нечувствительного слоя Si(Li) -детектора, вклад в которую дают напыленные слои палладия и золота и поверхностный слой

кремния, составляет около 500 нм по кремнию. При прохождении такой толщины электроны с энергиями 20 кэВ и 3 МэВ теряют около 1 кэВ и 0.1 кэВ соответственно.

Сравнение измеренных интенсивностей рентгеновских $K_{\alpha 1}$ -, $K_{\alpha 2}$ - и $K_{\beta 123}$ -пиков свинца с результатами расчетов по методу Монте-Карло с использованием пакета Geant4 позволило установить толщину чувствительной i -области детектора. Определенная таким образом толщина у обоих детекторов превышает 8.5 мм , что обеспечивает, без учета обратного рассеяния, полное поглощение электронов с энергией $<3.3 \text{ МэВ}$. Нечувствительная область с тыльной стороны диффузного литиевого контакта составила около 0.4 мм .

В центре одного из детекторов вышлифована лунка $\varnothing 5$ и глубиной 1 мм . Изучаемый β -источник (^{144}Ce , ^{210}Pb) наносится в лунку непосредственно на золотое покрытие Si(Li) -детектора. На детектор с лункой без какого-либо промежутка накладывается второй детектор, и на образовавшийся общий n^+ -контакт подается напряжение смещения (рис. 1).

Вся конструкция располагается внутри вакуумного криостата и охлаждается до температуры жидкого азота. Оба Si(Li) -детектора имеют свой зарядочувствительный преусилитель с резистивной обратной связью и охлаждаемым полевым транзистором. Для обработки сигналов используются два комплекта электроники. В стандарте САМАС спектрометрические каналы содержат усилитель БУИ-3К и 12-разрядный аналого-цифровой преобразователь (а.ц.п.) поразрядного взвешивания на 4000 каналов. В стандарте VME/VXI сигналы после преусилителей оцифровываются 8-канальным 14-разрядным а.ц.п. V1725С фирмы SAEN с частотой выборки 250 МГц . Использование двух комплектов электроники позволяет сравнить эффективность отбора совпадающих сигналов и энергетическое разрешение аналогового и цифрового трактов.

В схему измерений включен сцинтилляционный $3''$ ВГО-детектор с целью выделения β -распадов ядер (^{144}Ce – ^{144}Pr) на возбужденные уровни дочерних ядер. Выбор сравнительно небольшого ВГО-детектора обусловлен желанием иметь высокую эффективность регистрации γ -квантов при низком уровне фона случайных совпадений. ВГО-детектор располагался на расстоянии 25 мм от общей поверхности Si(Li) -детекторов, фактически от измеряемого источника, обеспечивая, таким образом, геометрическую эффективность для вылетающих γ -квантов 20% . Данные о зарегистрированных событиях представляют собой последовательные записи временных и амплитудных сигналов с двух Si(Li) -детекторов и ВГО-детектора. Сборка Si(Li) - и ВГО-детекторов окружена небольшим слоем пассивной защиты (около 30 г/см^2)

для уменьшения фона естественной радиоактивности.

Выбранная схема включения детекторов на (анти)совпадения позволяет провести прямое измерение β-спектров, не требующее сложных дополнительных поправок на обратное рассеяние электронов от поверхности детектора. Отличие функции отклика спектрометра от гауссовой функции связано с потерями энергии электроном в конечной толщине мишени и нечувствительном слое детектора, а также с вылетом тормозного излучения электронов за пределы детектора.

Изготовление тонких мишеней — это отдельная тема, выходящая за рамки данной статьи. Отметим, что наличие в изучаемом источнике дополнительной α-активности позволяет более надежно определить толщину (или распределение толщины) источника.

Вклад радиационных потерь увеличивается с ростом энергии электрона. В кремнии для электронов с энергиями 1 и 3 МэВ они составляют 0.8% и 2.3%. Дифференциальные радиационные потери dE/dx также растут от 1.5% до 4.7% соответственно. Поправки спектра на вылет тормозного излучения могут быть вычислены путем Монте-Карло-симуляций с использованием спектра событий, совпадающих с сигналом ВГО-детектора.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

После установки Si(Li)-детекторов в криостат энергетическая калибровка была выполнена с помощью источника ^{207}Bi , который устанавливался на бериллиевое окно вакуумного криостата. Хотя калибровка проводилась при нанесенном источнике ^{144}Ce , на измеренном спектре хорошо видны пики полного поглощения рентгеновских (75–85 кэВ) и γ-квантов (570 кэВ, 1063 кэВ), а также резкие края комптоновского рассеяния (рис. 2). Эти особенности спектра использовались для энергетической калибровки детекторов.

На рис. 3 показан спектр совпадающих событий пары Si(Li)-детекторов. Наклонные линии соответствуют суммарной энергии края комптоновского рассеяния γ-квантов с энергиями $E_\gamma = (570, 1063 \text{ и } 1770) \text{ кэВ}$. Максимальная энергия электрона, в случае рассеяния γ-кванта назад, составляет $E_C = 2E_\gamma^2 / (2E_\gamma + m_e)$, для указанных энергий γ-квантов $E_C = (394, 857 \text{ и } 1547) \text{ кэВ}$. Совпадения сигналов Si(Li)-детекторов, в основном, вызваны комптоновскими электронами, прошедшими из верхнего детектора в нижний. Прямоугольниками выделены события, когда γ-кванты с энергиями 570 кэВ и 1064 кэВ, испущенные в каскаде, испытали комптоновское рассеяние в двух разных детекторах.

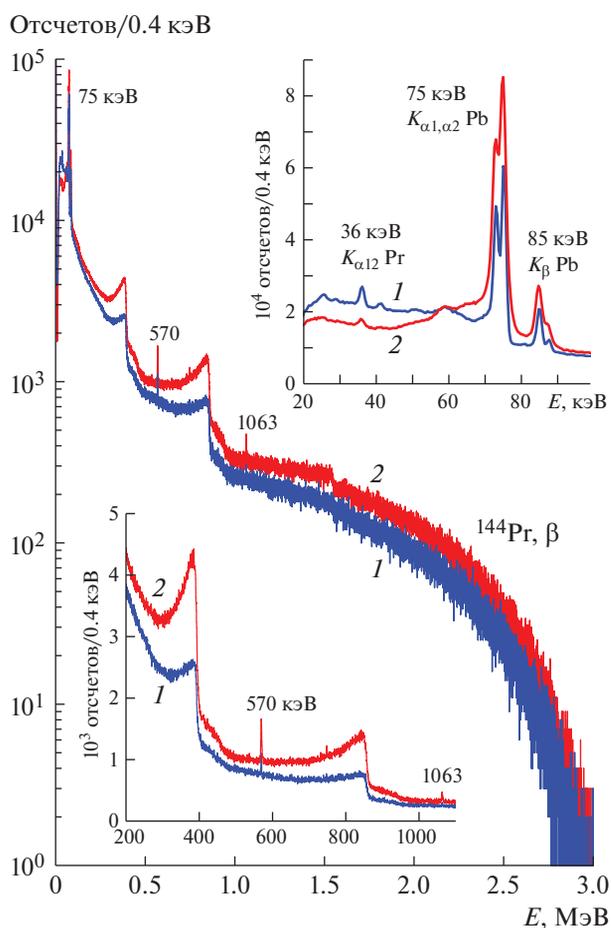


Рис. 2. Калибровочные спектры (1 и 2) пары Si(Li)-детекторов, измеренные с внешним источником ^{207}Bi (2 — спектры детектора с лункой). На верхней вставке показана низкоэнергетическая часть спектра, а на нижней — часть спектра, обусловленная комптоновским рассеянием γ-квантов с энергией 570 кэВ и 1063 кэВ.

На рис. 4 показаны энергетические спектры электронов, возникающие при β-распадах ядер ^{144}Ce – ^{144}Pr и зарегистрированные одним и двумя Si(Li)-детекторами. Доля 1 МэВ электронов, испытавших отражение от поверхности детектора, составляет 28%. Эта величина уменьшается до 20% при увеличении энергии электрона до 2.5 МэВ, что определяется конкретной геометрией нанесенного источника. Отметим, что спектр зарегистрированной энергии в случае, если электрон отражается от поверхности (спектр 4 на рис. 4), кардинально отличается от спектра действительной энергии электрона (спектр 3). Полный β-спектр является суммой спектров 2 и 3, таким образом решается проблема функции отклика детектора, связанная с обратным рассеянием электронов от поверхности детектора.

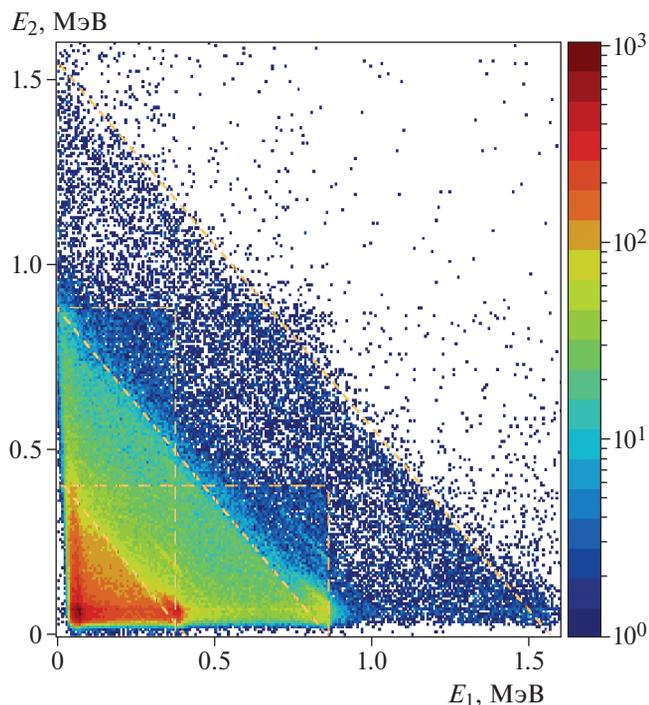


Рис. 3. Двумерный спектр совпадающих событий пары Si(Li)-детекторов, измеренный с ^{207}Bi (E_1 – энергия детектора с лункой). Наклонные линии соответствуют рассеянию γ -квантов с энергиями 570, 1064 и 1770 кэВ назад. Прямоугольниками выделены события от каскада γ -квантов.

Спектр электронов, измеренный с функцией отклика, близкой к гауссовой, позволяет определить спектр антинейтрино исходя из соотношения $Q_\beta = E_e + E_\nu$. Для источника $^{144}\text{Ce}-^{144}\text{Pr}$ это возможно при энергии нейтрино < 2.7 МэВ (разности граничных энергий β -спектров ^{144}Pr и ^{144}Ce). При энергиях электронов < 300 кэВ измеренный спектр является суммой β -спектров ^{144}Pr и ^{144}Ce и спектр антинейтрино должен быть определен исходя из теоретических поправок к β -спектру и параметров функции форм-фактора, найденных при подгонке спектра ^{144}Pr в интервале 0.3–3.0 МэВ.

Измерения спектров Si(Li)-детекторов в совпадении с сигналом ВГО-детектора позволяют выделить β -спектры, соответствующие переходам на возбужденные состояния дочернего ядра. В случае ^{144}Pr это очень важная часть измерений, поскольку β -переход $1^- \rightarrow 0^-$ на уровень ядра ^{144}Nd с энергией 2186 кэВ является разрешенным, его форма хорошо определена и не требует введения функции форм-фактора при подгонке. Соответствие формы измеренного спектра форме разрешенного β -перехода является важным критерием правильности проведенных измерений, используемой функции отклика и процедуры подгонки.

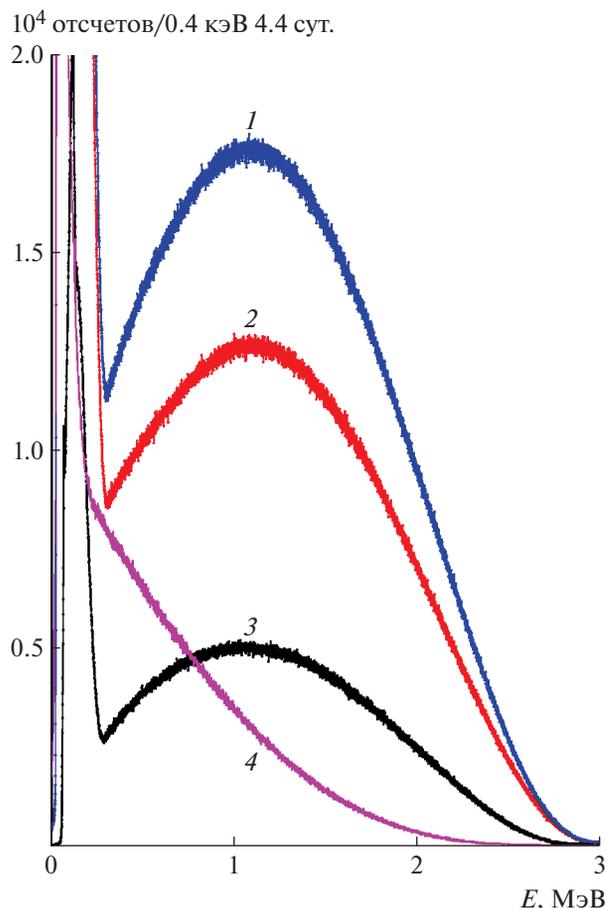


Рис. 4. Спектры источника $^{144}\text{Ce}-^{144}\text{Pr}$, измеренные 4 π - β -спектрометром: 1 – спектр полной зарегистрированной энергии; 2 – спектр событий только в одном детекторе; 3 – спектр событий, зарегистрированных двумя детекторами; 4 – спектр совпадающих событий с одного детектора.

Уровень 0^- (2186 кэВ) ядра ^{144}Nd разряжается при прямом переходе на основное состояние и при переходе через промежуточный уровень 2^+ испусканием γ -квантов с энергиями 2186 кэВ (0.69%) и 1489 кэВ и 697 кэВ (0.28%), как показано на вставке рис. 5. На этом же рисунке показан энергетический спектр всех событий ВГО-детектора и событий, зарегистрированных в совпадении с сигналом β -спектрометра. В полном спектре хорошо видны пики полного поглощения γ -квантов с энергиями 1460 кэВ и 2614 кэВ, связанные с распадами изотопов ^{40}K и ^{208}Tl из семейства естественной радиоактивности ^{232}Th .

Спектр совпадающих событий (рис. 5, спектр 2) содержит пики с энергиями 697 кэВ и 2186 кэВ, соответствующие β -переходам на возбужденные уровни ядра ^{144}Nd . Для отбора разрешенных β -переходов на уровень 1^- использовалось условие, что

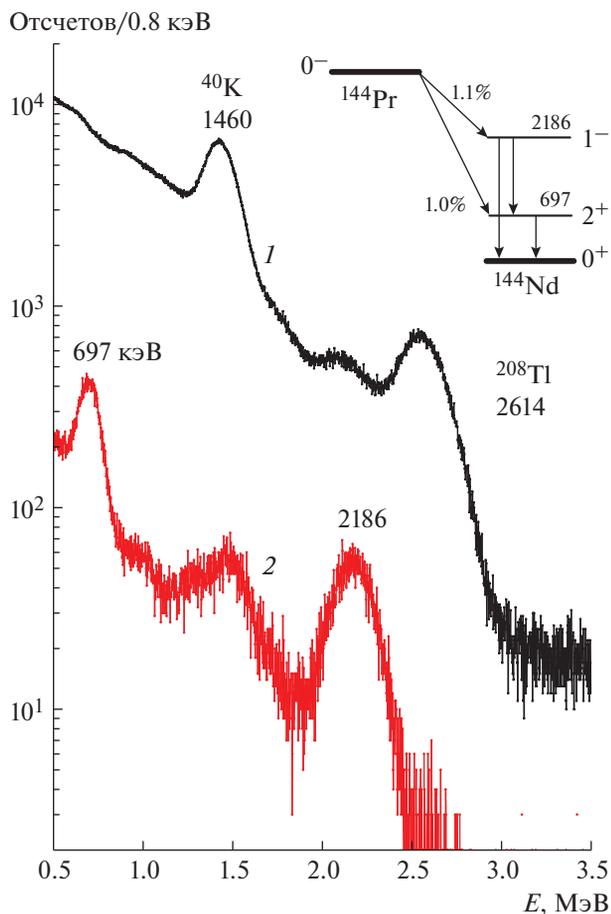


Рис. 5. Спектры BGO-детектора: 1 – фоновый спектр; 2 – спектр в совпадении с сигналом Si(Li)-спектрометра.

энергия γ -квантов, зарегистрированная BGO-детектором, превышает 1 МэВ. Условие выполняется для пика полного поглощения и части спектра комптоновского рассеяния. Данное условие позволяет исключить β -переходы на уровень 2^+ , которые сопровождаются одним 697-кэВ γ -квантом.

Спектр β -спектрометра, измеренный в совпадении с сигналами BGO-детектора с энергией более 1 МэВ, показан на рис. 6. Он состоит из β -спектра, соответствующего переходу на возбужденный уровень, и спектра случайных совпадений. Спектр хорошо описывается теоретической формой разрешенного β -перехода с граничной энергией 812 кэВ, что подтверждает гауссову форму функции отклика 4 π - β -спектрометра. На том же рисунке приведен полный зарегистрированный спектр, который, в основном, связан с β -переходом на основное состояние.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описаны характеристики нового спектрометра для измерения β -спектров ядер искусственной

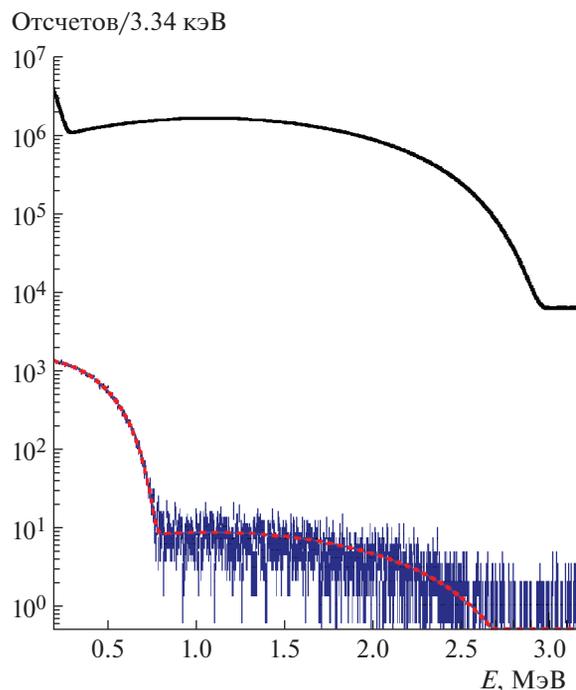


Рис. 6. Спектр разрешенного β -перехода $^{144}\text{Pr} (0^-) \rightarrow ^{144}\text{Nd} (1^-)$ ($Q_\beta = 0.812$ МэВ), измеренный в совпадении с сигналом BGO-детектора (внизу), в сравнении с β -спектром для перехода на основное состояние ($Q_\beta = 3.0$ МэВ). Штриховой линией показан результат подгонки.

и естественной радиоактивности с граничной энергией до 3 МэВ. Спектрометр состоит из двух Si(Li)-детекторов с толщиной чувствительного слоя >8 мм и сцинтилляционного кристалла для изучения переходов на возбужденные состояния. Функция отклика спектрометра близка к гауссовой и не содержит части, связанной с обратным рассеянием электронов от поверхности кристалла, что позволяет провести прямое измерение энергии электронов в β -распаде и соответственно определить спектр электронных антинейтрино. В комбинации с сцинтилляционным BGO-детектором спектрометр используется для измерения β -спектров, соответствующих переходам на возбужденные состояния дочерних ядер. Созданный спектрометр уже использовался для измерения β -спектров ядер ^{144}Ce – ^{144}Pr и ^{210}Bi .

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 19-02-00097, № 20-02-00571) и Российского научного фонда (проект № 17-12-01009).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *LSND Collaboration* // Phys. Rev. Lett. 1998. V. 81. P. 1774.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.81.1774>
2. *SAGE Collaboration* // Phys. Rev. 1999. V. C59. P. 2246.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevC.59.2246>
3. *GALLEX Collaboration* // Phys. Lett. 1999. V. B447. P. 127.
[https://doi.org/10.1016/S0370-2693\(98\)01579-2](https://doi.org/10.1016/S0370-2693(98)01579-2)
4. *Mention G., Fechner M., Lasserre Th., Mueller Th.A., Lhuillier D., Cribier M., and Letourneau A.* // Phys. Rev. 2011. V. D83. P.073006.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevD.83.073006>
5. *KamLand Collaboration* // arXiv:1312.0896v2.
<https://arxiv.org/pdf/1312.0896.pdf>
6. *Borexno Collaboration* // JHEP. 2013. V. 08. P. 038.
[https://doi.org/10.1007/JHEP08\(2013\)038](https://doi.org/10.1007/JHEP08(2013)038)
7. *Базлов Н.В., Бахланов С.В., Дербин А.В., Драчнев И.С., Еремин В.К., Котина И.М., Муратова В.Н., Пилипенко Н.В., Семенов Д.А., Унжиков Е.В., Чмель Е.А.* // ПТЭ. 2018. № 3. С. 5.
<https://doi.org/10.7868/S0032816218030199>
8. *Alekseev I.E., Bakhlanov S.V., Bazlov N.V., Chmel E.A., Derbin A.V., Drachnev I.S., Kotina I.M., Muratova V.N., Pilipenko N.V., Semenov D.A., Unzhakov E.V., Yeregin V.K.* // Nucl. Instrum. and Methods. 2018. V. A890. P. 64.
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.02.031>
9. *Alekseev I.E., Bakhlanov S.V., Derbin A.V., Drachnev I.S., Kotina I.M., Lomskaya I.S., Muratova V.N., Niyazova N.V., Semenov D.A., Trushin M.V., Unzhakov E.V.* // arXiv:2005.08481. <https://arxiv.org/pdf/2005.08481.pdf>
10. *Bakhlanov S.V., Derbin A.V., Drachnev I.S., Kotina I.M., Lomskaya I.S., Muratova V.N., Pilipenko N.V., Semenov D.A., Unzhakov E.V.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. V. 1390. P. 012117.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1390/1/012117>
11. *Bazlov N.V., Derbin A.V., Drachnev I.S., Gicharevich G.E., Kotina I.M., Konkov O.M., Pilipenko N.V., Chmel E.A., Abolmasov S.N., Terukov E.I., Unzhakov E.V.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. V. 1400. P. 055056.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1400/5/055056>