

ПРЕЦИЗИОННОЕ ИЗМЕРЕНИЕ БЕТА-СПЕКТРА ^{144}Ce — ^{144}Pr ПРИ ПОМОЩИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СПЕКТРОМЕТРОВ

© 2023 г. С. В. Бахланов¹⁾, А. В. Дербин¹⁾, И. С. Драчев^{1)*}, И. С. Ломская¹⁾, И. М. Котина¹⁾, В. Н. Муратова¹⁾, Н. В. Ниязова¹⁾, М. В. Трушин¹⁾, Е. А. Чмель¹⁾

Поступила в редакцию 15.09.2022 г.; после доработки 15.09.2022 г.; принята к публикации 17.09.2022 г.

Точное измерение бета-спектров всегда имело большое значение в некоторых фундаментальных физических задачах, включая физику нейтрино. В этой работе мы представляем результаты измерения спектра источника ^{144}Ce — ^{144}Pr , выполненного с помощью установок двух типов с точностью, которая была существенно увеличена по сравнению с предыдущими исследованиями. Корректность теоретической подгонки была проверена формой разрешенного бета-перехода $^{144}\text{Pr} (0^-) \rightarrow ^{144}\text{Nd} (1^-)$.

DOI: 10.31857/S0044002723010063, EDN: QZKSMQ

1. ВВЕДЕНИЕ

Точное знание формы бета-спектров имеет большое значение как для физики атомного ядра, так и для практического применения в физике элементарных частиц, где бета-спектр часто выступает в качестве компоненты радиоактивного фона экспериментальной установки. Знание бета-спектров искусственного источника нейтрино ^{144}Ce — ^{144}Pr , исследуемого в этой работе, оказывается необходимым при исследованиях, направленных на поиск стерильного нейтрино [1, 2]. Источник ^{144}Ce — ^{144}Pr является перспективным источником электронных антинейтрино, поскольку граничная энергия бета-перехода ядра ^{144}Pr на основное состояние ^{144}Nd наиболее высока для долгоживущих нуклидов (3 МэВ), в то время как порог реакции обратного бета-распада на водороде составляет 1.8 МэВ и сечение реакции возрастает с увеличением энергии нейтрино. Эксперименты с источником ^{144}Ce — ^{144}Pr планировались на нейтринных детекторах KamLand [1] и Bogexino [2], но не были проведены по причинам, связанным не только с техническими аспектами. Тем не менее использование источника ^{144}Ce — ^{144}Pr представляется перспективным в будущих экспериментах. Точное знание формы спектра нейтрино, испускаемого в бета-распаде ^{144}Pr , является одним из наиболее существенных условий снижения систематической ошибки эксперимента.

Полупроводниковые Ge- и Si-детекторы имеют хорошую линейность в широком диапазоне энергий, что совместно с высоким энергетическим разрешением делает их достойной альтернативой магнитным и электростатическим спектрометрам при решении задач прецизионной бета-спектрометрии. Основным минусом полупроводникового спектрометра является сложность интеграции бета-источника непосредственно в детектор, что ведет к нетривиальной функции отклика спектрометра для бета-частиц. В частности, существует высокая вероятность обратного рассеяния электронов от поверхности кристалла, что ведет к неполному выделению энергии в чувствительном объеме детектора. Для решения этой проблемы предлагается точное моделирование функции отклика спектрометра или использование специальной геометрии установки из двух детекторов, способной регистрировать обратно рассеянные бета-частицы.

Схема последовательных распадов $^{144}\text{Ce} \rightarrow ^{144}\text{Pr} \rightarrow ^{144}\text{Nd}$ содержит шесть основных бета-переходов. В распаде $^{144}\text{Ce} \rightarrow ^{144}\text{Pr}$ присутствуют три запрещенных бета-перехода первого порядка с граничными энергиями 185, 238 и 319 кэВ с коэффициентами ветвления 19.6, 3.9 и 76.5% соответственно. При распаде ^{144}Pr 97.9% бета-переходов с граничной энергией 2997 кэВ идет на основное состояние ^{144}Nd . Дополнительно имеются два бета-перехода с показателями ветвления около 1%: один разрешенный с граничной энергией 812 кэВ, а второй — уникальный запрещенный переход первого порядка с граничной энергией 2301 кэВ. Разрешенный переход сопровождается

¹⁾Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт” — ПИЯФ, Гатчина, Россия.

*E-mail: drachnev_is@npni.nrcki.ru

испусканием гамма-кванта с энергией 2185 кэВ, либо каскада из гамма-квантов с энергиями 679 и 1489 кэВ и может быть выделен по совпадению бета-частиц с указанными гамма-квантами.

Спектры источника ^{144}Ce – ^{144}Pr были измерены на двух установках: с использованием бета-спектрометра в классической схеме “мишень-детектор” [3, 4] и с помощью оригинального 4π -спектрометра полного поглощения, состоящего из пары Si(Li)-детекторов [5]. Проведенные измерения соответствуют применению двух подходов к определению функции отклика детектора: точное моделирование методом Монте-Карло и использование функции отклика детектора, которая близка к гауссовой. При этом основное внимание уделялось изучению бета-перехода ^{144}Pr на основное состояние ядра ^{144}Nd , который дает основной вклад в спектр электронных антинейтрино с энергией выше 1.8 МэВ.

2. СПЕКТРОМЕТР ТИПА “МИШЕНЬ-ДЕТЕКТОР”

Спектрометр типа “мишень-детектор” был создан на основе полупроводникового Si(Li)-детектора толщиной 10.2 мм и диаметром чувствительной области 20 мм, имевшего форму “гриба” (геометрию типа “top-hat”). Толщина нечувствительного слоя диффузного лития с тыльной стороны детектора определялась по соотношению площадей пиков полного поглощения для гамма-линий с энергиями 26.2 и 59.6 кэВ источника ^{241}Am , она составила 0.42 мм. Детектор был помещен в оправку и оснащен вольфрамовым коллиматором диаметром 12 мм. Источник ^{144}Ce в виде высушенной капли коллоидного раствора помещался на поверхности лавсановой подложки толщиной 50 мкм. Подложка закреплялась в дельриновом кольце и размещалась на поддерживающей структуре на расстоянии 8.9 мм от поверхности детектора. Вся установка была помещена в вакуумный криостат, охлаждаемый до температуры жидкого азота. Распределение толщины по пятну высушенного источника ^{144}Ce определялось из измеряемого энергетического спектра альфа-частиц, возникающих при распадах ядер ^{241}Am и ^{244}Cm , которые сохранились в мишени в виде примесей после очистки источника ^{144}Ce . Средняя толщина источника ^{144}Ce составила 1 мкм.

Детектор оснащался зарядочувствительным предусилителем с полевым транзистором, размещенным внутри вакуумного криостата и охлаждаемым до азотной температуры. Сигнал с зарядочувствительного предусилителя подавался на оцифровщик CAEN v1725, где оцифровывался

с частотой дискретизации в 250 МГц. Дальнейшие преобразования с сигналом выполнялись в цифровом виде, причем временная привязка и решение о записи события формировались на основе сигнала после цифрового CR-2RC формирования, а амплитудный анализ выполнялся при помощи треугольного формирования. Запись сигналов велась пособытийно, для каждого события записывались временная привязка и амплитуда. Измерения велись непрерывно в течение 5415 ч, с кратковременными технологическими остановками. Большая длительность измерений была обусловлена низкой активностью источника ^{144}Ce , которая составляла ~ 15 Бк.

В состав установки входил сцинтилляционный детектор на основе кристалла ортогерманата висмута (BGO) массой 2.5 кг, выход которого был подключен к каналу оцифровщика. Для сигнала BGO-детектора записывалась временная и амплитудная информация, что позволило провести анализ время-амплитудных совпадений для выделения спектра разрешенного перехода $^{144}\text{Pr}(0^-) \rightarrow ^{144}\text{Nd}(1^-)$. Временное разрешение спектрметрических трактов составило порядка ~ 100 нс.

Энергетическая калибровка производилась по пикам полного поглощения для гамма-квантов с энергиями 570 и 1063 кэВ источника ^{207}Bi . Дрейф коэффициента усиления спектрметрического канала Si(Li)-детектора при длительных измерениях компенсировался перекалибровкой по пику конверсионных электронов с энергией 91.5 кэВ при распадах ^{144}Ce и альфа-пику ^{244}Cm , которые присутствовали в измеренных спектрах.

Спектрометр типа “мишень-детектор” обладает рядом несомненных достоинств, в частности, он позволяет производить измерения различных бета-спектров при помощи одного и того же детектора и оперативно заменять источники.

3. СПЕКТРОМЕТР ТИПА “ 4π ”

Оригинальный спектрометр с 4π -геометрией был создан на основе двух Si(Li)-детекторов с толщиной чувствительной области более 8 мм, которая превышает пробег электронов с энергией 3 МэВ. Детекторы были специально произведены для этого эксперимента и были изготовлены в форме top-hat с внешними диаметрами 27 и 23 мм, высотой 10 мм и диаметрами чувствительной области 20 и 18 мм. Si(Li)-детекторы имели разные внешние диаметры для удобства сборки спектрометра из двух детекторов, состыкованных вплотную. Характеристики изготовленных детекторов были проверены в отдельном вакуумном криостате с помощью гамма- и рентгеновского излучений и конверсионных и Оже-электронов

от источника ^{207}Bi . Энергетическое разрешение FWHM (Full width at half maximum), измеренное для конверсионных электронов с энергией 482 кэВ источника ^{207}Bi , составило 2.0 кэВ для обоих детекторов.

Определенная величина нечувствительного слоя Si(Li)-детектора, вклад в которую дают напыленные слои палладия и золота и поверхностный слой кремния, соответствует толщине около 500 нм по кремнию. При прохождении такой толщины электроны с энергиями 20 кэВ и 3 МэВ теряют около 1 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 полезная толщина обоих детекторов превышает 8.5 мм, что обеспечивает, без учета обратного рассеяния, полное поглощение электронов с энергией менее 3.3 МэВ. Нечувствительная область с тыльной стороны диффузного литиевого контакта составила около 0.4 мм.

В центре одного из детекторов вышлифована маленькая лунка диаметром 5 мм и глубиной 1 мм. Изучаемый β -источник ^{144}Ce наносился в лунку непосредственно на золотое покрытие планарного Si(Li)-детектора. На детектор с лункой, без какого-либо промежутка, накладывался второй детектор, и на образовавшийся общий n^+ -контакт подавалось напряжение смещения. Сборка помещалась в вакуумный криостат и охлаждалась до температуры жидкого азота. Спектрометрические каналы были полностью аналогичны тракту, использовавшемуся в спектрометре типа “мишень-детектор”, и включали в себя предусилители с охлаждаемыми полевыми транзисторами, выходы предусилителей подключались к оцифровщику CAEN v1725.

4. АНАЛИЗ ДАННЫХ СПЕКТРОМЕТРА ТИПА “МИШЕНЬ-ДЕТЕКТОР”

Анализ данных эксперимента осложнялся большим возрастом ^{144}Ce источника, что проявилось в значительной активности и сложном составе фоновых компонент в измеренном спектре. Для решения этой проблемы результаты длительных измерений были разбиты на две последовательные части. Анализ разности первой и второй частей набора данных позволил существенно сократить вклад фоновых компонент ценой потери статистики от распадов ^{144}Ce и ^{144}Pr . В результате измерений были отобраны 2024 часовых серии, которые были разделены на две равные части. Спектр, соответствующий первой части, подгонялся суммой

спектра для второй части, бета-спектров ^{144}Ce и ^{144}Pr и дополнительных фоновых компонент.

Бета-спектр описывался как

$$S(W) = F(Z, W)C(W)PW(W - W_0)^2, \quad (1)$$

где P и T — импульс и кинетическая энергия электрона, $W = T/mc^2 + 1$ — полная энергия электрона, $F(Z, W)$ — функция Ферми, описывающая электромагнитное взаимодействие электрона с атомом, которая рассчитывалась в соответствии с [6], $C(W)$ — ядерный формфактор, который и является искомой функцией в задаче по измерению формы бета-спектра. Формфактор параметризовался аналогично работе [7]:

$$C(W) = 1 + C_1W + C_2W^{-1}, \quad (2)$$

где C_1 и C_2 — свободные параметры.

Измеренный спектр представляет собой свертку бета-спектра (1) и функции отклика детектора $R(E, W)$ на электрон с полной энергией W , здесь E — энергия, регистрируемая спектрометром. Отклик детектора $R(E, W)$ моделировался методом Монте-Карло при помощи пакета GEANT4.10.6 с использованием пакета электромагнитных взаимодействий G4EmStandardPhysics_option4, специально созданного для подробного учета электромагнитных взаимодействий при низких энергиях. Симуляция производилась с подробным описанием геометрии установки и дополнительной настройкой суммарных толщин нечувствительных слоев детектора и распределения толщины мишени, воспроизводящегося по форме спектра альфа-частиц ^{244}Cm и ^{241}Am . В качестве дополнительной степени свободы было введено варьируемое отношение площадей функции отклика для электрона с энергией W ниже и выше значения T — 25 кэВ. Основная фоновая компонента, присутствующая в измеренном спектре, оказалась связана с активностью изотопа ^{154}Eu . Ожидаемый спектр от распадов ^{154}Eu симулировался методом Монте-Карло.

Подгонка измеренного спектра осуществлялась методом максимального правдоподобия с использованием функции χ^2 (см. рис. 1). В результате анализа было получено следующее выражение для функции формфактора:

$$C(W) = 1 + (-0.0226 \pm 0.054)W + (-0.1657 \pm 0.0918)W^{-1}. \quad (3)$$

Спектр разрешенного перехода, подгонявшийся аналогично с фоновой компонентой случайных совпадений, показал хорошее согласие модели с экспериментом (рис. 2). Точность полученного результата ограничена слабой активностью возрастного источника ^{144}Ce , которая требует небольшого расстояния от детектора до мишени, что приводит к

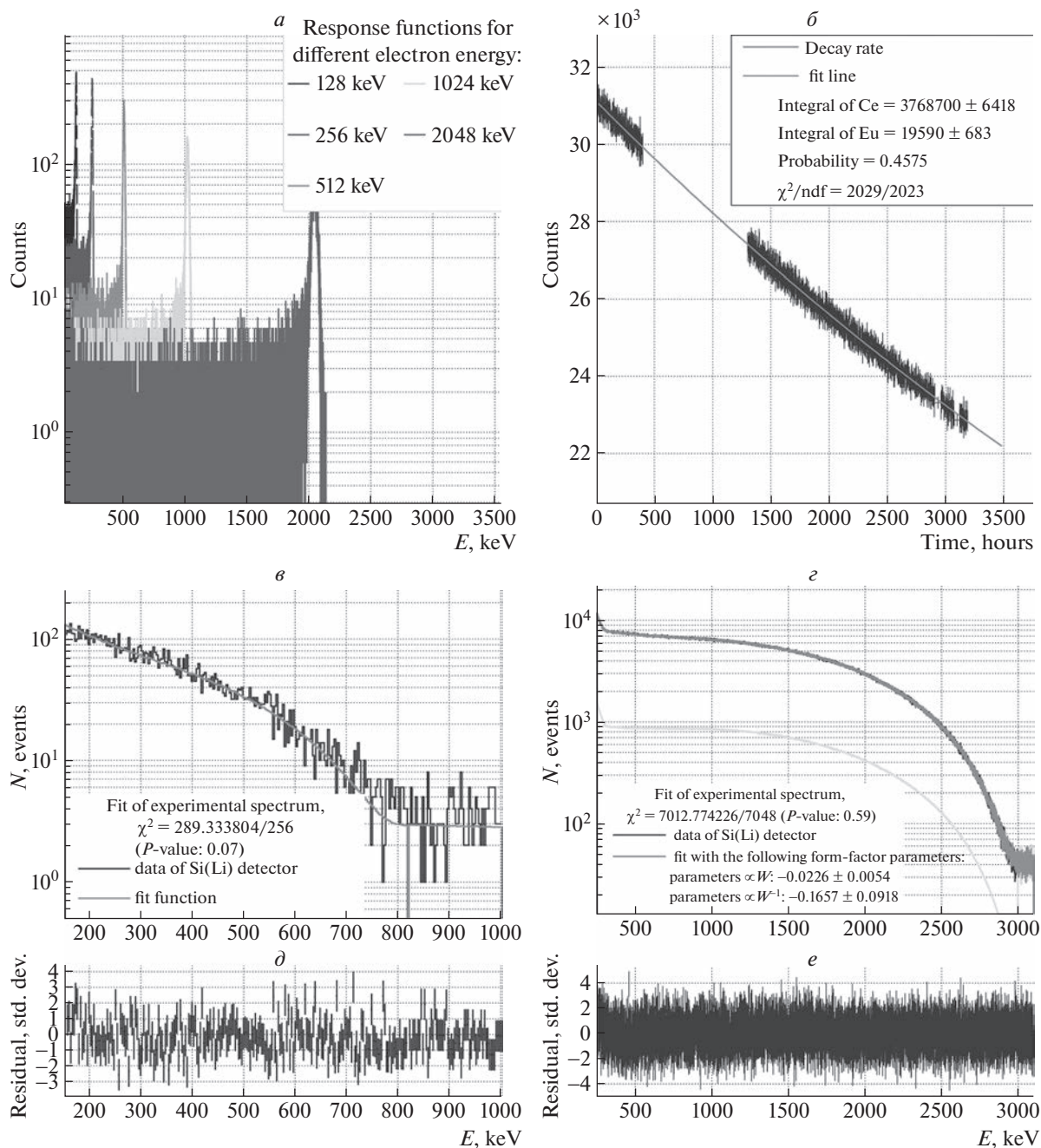


Рис. 1. Для спектрометра типа “мишень-детектор” функции отклика для электронов, вычисленные методом Монте-Карло (*a*), временное распределение скорости счета, подогнанное двумя экспонентами для оценки скорости счета ^{144}Ce (*б*), подгонка перехода $0^- \rightarrow 1^-$ в ^{144}Pr (*в*), подгонка спектра ^{144}Ce – ^{144}Pr (*г*) и разности в терминах стандартных отклонений (*д*, *е* соответственно). Нижняя кривая на (*г*) соответствует компоненте бета-спектра, распавшейся за время проведения эксперимента.

большим углом падения электронов на поверхность кристалла, вносящим дополнительные неопределенности при анализе экспериментальных данных. Точность в определении параметров C_1 и C_2 ядерного формфактора может быть существенно повышена при использовании более активного источника.

5. АНАЛИЗ ДАННЫХ СПЕКТРОМЕТРА ТИПА “4 π ”

Эксперимент со спектрометром типа “4 π ” проводился с более активным источником, нанесенным на детектор непосредственно перед измерениями. Используемая 4 π -геометрия позволяет измерить реальный спектр электронов и, в идеале, позволяет

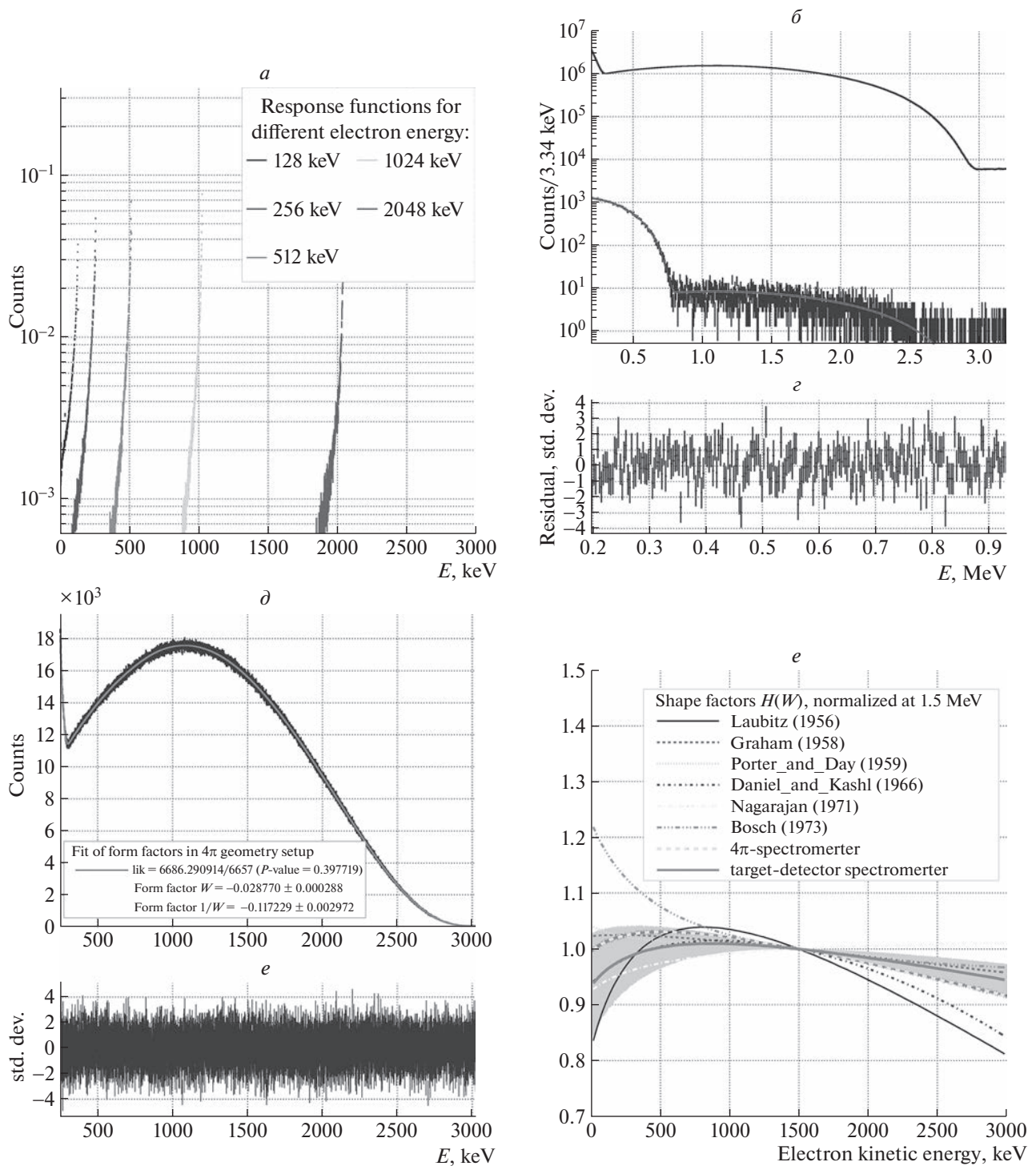


Рис. 2. Для 4π бета-спектрометра функции отклика для электронов, вычисленные методом Монте-Карло (*a*), подгонка перехода $0^- \rightarrow 1^-$ в ^{144}Pr (*б*) и разности в терминах стандартных отклонений (*в*), подгонка спектра $^{144}\text{Ce} \rightarrow ^{144}\text{Pr}$ (*г*) и разности в терминах стандартных отклонений (*е*), полученные формфакторы в сравнении с результатами предыдущих измерений [7–12] и спектрометра “мишень-детектор” (*д*). Закрашенные области на (*д*) соответствуют статистической неопределенности с одним стандартным отклонением. Можно видеть, что результаты измерений для обоих спектрометров согласуются в пределах статистических неопределенностей.

напрямую определить спектр антинейтрино из измеренного спектра электронов без использования подгоночной функции $S(W)$.

Хотя отклик 4π -спектрометра близок к дельта-функции, он должен учитывать прохождение электроном нечувствительных слоев источника и детекторов. Для учета этих эффектов функция отклика описывалась в аналитическом виде

$$R(E, W) = \exp(P_0(W) + E/P_1(W)) \times \theta(-(E - (W - m_0c^2))). \quad (4)$$

Значение параметра $P_0(W)$ определялось из условия сохранения полного интеграла функции отклика, а $P_1(W)$ определялся среднеквадратичным отклонением для этой функции, которое параметризовалось как $\sigma_R(W) = \sigma_{MC} \times (1 + p_1W + p_2W^2)$, где σ_{MC} — среднеквадратичное отклонение для функции отклика, посчитанной методом Монте-Карло, а p_1, p_2 — свободные параметры. Подгонка осуществлялась методом максимального правдоподобия с функцией χ^2 с формой бета-спектра $S(W)$, аналогичной используемой при анализе данных спектрометра “мишень-детектор”.

В результате анализа были получены следующие значения параметров C_1 и C_2 функции ядерного формфактора (см. рис. 2):

$$C(W) = 1 + (-0.02877 \pm 0.000288)W + (-0.117229 \pm 0.002972)W^{-1}. \quad (5)$$

Из (3) и (5) можно видеть, что результаты для параметров C_1 и C_2 , полученные на двух различных бета-спектрометрах, согласуются друг с другом в пределах ошибок. Достигнутая точность определения C_1 и C_2 в измерениях с 4π -спектрометром значительно выше, чем на установке “мишень-детектор”. Подгонка измеренного спектра разрешенного перехода показала хорошее согласие используемой теоретической модели с экспериментом, как и в случае измерений на установке “мишень-детектор”.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Бета-спектры источника ^{144}Ce — ^{144}Pr были исследованы с помощью двух спектрометров на основе полупроводниковых $\text{Si}(\text{Li})$ -детекторов. Спектры были измерены с использованием бета-спектрометра в классической схеме “мишень-детектор” и с помощью оригинального 4π -спектрометра полного поглощения, состоящего из пары $\text{Si}(\text{Li})$ -детекторов. Модели функции отклика бета-спектрометров, рассчитанные на основе симуляции методом Монте-Карло, были проверены при подгонке спектра разрешенного бета-перехода

$^{144}\text{Pr}(0^-) \rightarrow ^{144}\text{Nd}(1^-)$ и показали хорошее согласие для теоретических и экспериментальных спектров. Определенная функция ядерного формфактора бета-перехода ^{144}Pr на основное состояние ядра ^{144}Nd имеет вид $C(W) = 1 + (-0.02877 \pm 0.000288)W + (-0.117229 \pm 0.002972)W^{-1}$. Достигнутая точность в определении параметров ядерного формфактора C_1 и C_2 позволяет снизить систематическую погрешность, связанную с неопределенностью спектра электронных антинейтрино, до уровня 1% в будущих экспериментах по поиску стерильного нейтрино с источником ^{144}Ce — ^{144}Pr .

Работа была поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проекты 19-02-00097 и 20-02-00571) и Российским научным фондом (проекты 17-12-01009 и 21-12-00063).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. M. P. Decowski (KamLAND Collab.), Nucl. Phys. B **908**, 52 (2016); <https://www.science-direct.com/science/article/pii/S0550321316300529>
2. G. Bellini (Borexino-SOX Collab.), J. High Energy Phys. **1308**, 038 (2013).
3. I. E. Alekseev, S. V. Bakhlanov, N. V. Bazlov, E. A. Chmel, A. V. Derbin, I. S. Drachnev, I. M. Kotina, V. N. Muratova, N. V. Pilipenko, D. A. Semyonov, E. V. Unzhakov, and V. K. Yeregin, Nucl. Instrum. Methods A **890**, 64 (2018); <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900218301852>
4. I. E. Alekseev, S. V. Bakhlanov, A. V. Derbin, I. S. Drachnev, I. M. Kotina, I. S. Lomskaya, V. N. Muratova, N. V. Niyazova, D. A. Semenov, M. V. Trushin, and E. V. Unzhakov, Phys. Rev. C **102**, 064329 (2020); <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.102.064329>
5. S. V. Bakhlanov, A. V. Derbin, I. S. Drachnev, I. M. Kotina, V. N. Muratova, N. V. Niyazova, D. A. Semenov, M. V. Trushin, E. V. Unzhakov, E. A. Chmel', and I. E. Alekseev, Instrum. Exp. Techn. **64**, 190 (2021); <https://doi.org/10.1134/S002044122101019X>
6. H. Behrens and W. Bühring, Nucl. Phys. A **162**, 111 (1971); <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0375947471904891>
7. M. J. Laubitz, Proc. Phys. Soc. A **69**, 789 (1956); <https://doi.org/10.1088/0370-1298/69/11/301>
8. R. L. Graham, J. S. Geiger, and T. A. Eastwood, Can. J. Phys. **36**, 1084 (1958); <https://doi.org/10.1139/p58-115>
9. F. T. Porter and P. P. Day, Phys. Rev. **114**, 1286 (1959); <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.114.1286>

10. H. Daniel and S. A. A. Zaidi, *Ann. Phys. (Berlin)* **472**, 33 (1966);
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/andp.19664720104>
11. T. Nagarajan, M. Ravindranath, and K. Venkata Reddy, *Il Nuovo Cimento A* **3**, 699 (1971);
12. H. E. Bosch, M. Behar, M. C. Cambiaggio, G. G. Bermudez, and L. Szybisz, *Can. J. Phys.* **51**, 2260 (1973);
<https://doi.org/10.1139/p73-295>

PRECISION MEASUREMENT OF ^{144}Ce — ^{144}Pr BETA-SPECTRUM

S. V. Backlanov¹⁾, A. V. Derbin¹⁾, I. S. Drachnev¹⁾, I. S. Lomskaya¹⁾, I. M. Kotina¹⁾,
V. N. Muratova¹⁾, N. V. Niyazova¹⁾, M. V. Trushin¹⁾, E. A. Chmel'¹⁾

¹⁾*National Research Center “Kurchatov Institute” — PNPI, Gatchina, Russia*

Precision beta-spectra measurement always had a great importance in some fundamental physics problems including neutrino physics. In this work we present the results of ^{144}Ce — ^{144}Pr spectrum measurement performed with two setups of different types and controlled with the shape of an allowed $0^- \rightarrow 1^-$ transition in ^{144}Pr , providing precision that was substantially increased with respect to the previous studies of these beta-spectra.