

РЕВИЗИЯ КУМУЛЯТИВНЫХ СПЕКТРОВ БЕТА-ЧАСТИЦ ПРОДУКТОВ ДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ ^{235}U , ^{239}Pu И ^{238}U ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЙ ОТНОШЕНИЯ СПЕКТРОВ $^{235}\text{U}/^{239}\text{Pu}$

© 2025 г. В. И. Копейкин¹⁾, Д. В. Попов^{1),2),*}

Поступила в редакцию 04.10.2024 г.; после доработки 04.10.2024 г.; принята к публикации 15.10.2024 г.

На базе новых измерений отношения кумулятивных спектров β -частиц $^{235}\text{U}/^{239}\text{Pu}$, выполненных в НИЦ “Курчатовский институт” (КИ), проведены ревизия и уточнение кумулятивных спектров β -частиц продуктов деления ^{235}U , ^{239}Pu и ^{238}U . Представленные спектры β -частиц ^{235}U и ^{239}Pu КИ сопоставлены с аналогичными спектрами группы ILL, а спектр β -частиц ^{238}U КИ — с данными измерений Технического университета Мюнхена (TUM). Подтверждено, что отношение спектров β -частиц $^{235}\text{U}/^{239}\text{Pu}$ группы ILL ошибочно завышено на $\approx 5.4\%$.

Ключевые слова: кумулятивные спектры, β -частицы, ^{235}U , ^{239}Pu , ^{238}U

DOI: 10.31857/S0044002725010016, **EDN:** GSZDYI

1. ВВЕДЕНИЕ

Точное знание спектра реакторных $\bar{\nu}_e$ является необходимым условием правильной интерпретации результатов нейтринных экспериментов на ядерных реакторах. В области энергий, превышающих порог процесса обратного β -распада ОБР ($E_{\text{thr}} = 1.8$ МэВ)

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+, \quad (1)$$

служащего основным инструментом в нейтринных реакторных экспериментах, спектр $\bar{\nu}_e$ наиболее распространенных ядерных реакторов ВВЭР (PWR) формируется от β -распадов продуктов деления изотопов топлива ^{235}U , ^{239}Pu , ^{238}U и ^{241}Pu . При этом вклад в полное число делений и энерговыделение в активной зоне первых трех ядер ^{235}U , ^{239}Pu , ^{238}U составляет 95%. Наиболее точно кумулятивные спектры $\bar{\nu}_e$ делящихся изотопов реконструируются методом конверсии соответствующих экспериментальных спектров β -частиц.

Тщательное моделирование спектров $\bar{\nu}_e$ продуктов деления ^{235}U , ^{239}Pu и ^{241}Pu было проведено в 2011 г. [1, 2] (Huber-Mueller, НМ-модель) по данным уникальных измерений кумулятивных спектров β -частиц этих изотопов, выполненных в 1980-ых гг. на пучке тепловых нейтронов группой института Лауэ–Ланжевена (ILL) [3–7].

Спектр $\bar{\nu}_e$ ^{238}U НМ-модели был получен с помощью расчета [2]. Из-за трудностей измерения кумулятивного спектра β -частиц продуктов деления ^{238}U на пучке быстрых нейтронов эксперимент был выполнен лишь в 2013 г. для части диапазона спектра β -частиц, и по нему восстановлен соответствующий участок $\bar{\nu}_e$ -спектра ^{238}U [8]. Особенность этого опыта состоит также в том, что абсолютная калибровка спектра β -частиц ^{238}U опирается на данные калибровки спектра β -частиц ^{235}U группы ILL.

Оказалось [9], что измеренный выход реакции ОБР (1) меньше ожидаемого по НМ-модели на $\approx 5.7\%$. Эта аномалия (“Reactor Antineutrino Anomaly”) спустя десятилетие получила объяснение после первых измерений на исследовательском реакторе ИР-8 НИЦ “Курчатовский институт” (КИ) отношения кумулятивных спектров β -частиц $^{235}\text{U}/^{239}\text{Pu}$ [10], проведения на этой базе анализа и нахождения новых конверсионных спектров $\bar{\nu}_e$ ^{235}U и ^{238}U [11]. В настоящей статье приведены обновленные данные отношения кумулятивных спектров β -частиц $^{235}\text{U}/^{239}\text{Pu}$, и на их основе получены кумулятивные спектры β -частиц и $\bar{\nu}_e$ для ^{235}U , ^{239}Pu и ^{238}U .

2. ИЗМЕРЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ КУМУЛЯТИВНЫХ СПЕКТРОВ $^{235}\text{U}/^{239}\text{Pu}$

Суть проводимого в КИ эксперимента подробно описана в работе [10] и заключается в следующем. Мишени урана и плутония размером 2×3 см² и толщиной 39 мг/см² в тонких защит-

¹⁾ НИЦ “Курчатовский институт”, Москва, Россия.

²⁾ НИЯУ МИФИ, Москва, Россия.

* E-mail: Popov_DV@nrcki.ru

ных оболочках прикреплены вдоль обода вращающегося (10 об/с) диска (диаметр 60 см) из дюралюминия. Мишени занимают по 1/3 окружности диска. На оставшейся трети размещаются пустые оболочки мишеней для измерения фона. С одной стороны от центра диска проводится облучение пучком тепловых нейтронов мишеней урана и плутония и пустых оболочек. С противоположной стороны с помощью низкофонового β -спектрометра осуществляется регистрация β -частиц от мишеней и регистрация фона. Связь скорости счета регистрируемых спектрометром β -частиц n_β [1/с] и числом β -частиц, испускаемых в расчете на один акт деления ρ_β [1/дел], для мишеней ^{235}U или ^{239}Pu в интервале энергий $E, E + \Delta E$, можно описать одним выражением

$$n_\beta^{5,9} = \varepsilon \sigma^{5,9} F N^{5,9} \rho_\beta^{5,9}, \quad (2)$$

где $n_\beta^{5,9}$ обозначает скорость счета регистрируемых β -частиц от ^{235}U или ^{239}Pu , ε — эффективность регистрации β -частиц, а произведение $\sigma^{5,9} F N^{5,9}$ [1/с] выражает число делений в секунду, где σ — сечение деления ядер нейтронами, F — плотность потока нейтронов, N — число ядер в мишенях. Особенностью эксперимента [10] является то, что работа в своей основной части сводится к относительным измерениям. Это позволяет измерить отношение спектров $\rho_\beta^5/\rho_\beta^9$ с высокой точностью, поскольку, как видно из записи (2), не возникает проблем с абсолютной нормализацией этого отношения.

Обновленные данные отношения спектров β -частиц $R^{5,9} = \rho_\beta^5/\rho_\beta^9$ КИ в сравнении с аналогичными данными ILL представлены на рис. 1. В целом они подтверждают наш результат, полученный ранее [11], — кривая ILL лежит выше кривой КИ на $\approx 5.4\%$. В жесткой области спектра (вблизи ≈ 8 МэВ) различия заметны, лежат в пределах ошибок измерений и, вероятно, связаны с недостатком статистики.

3. КУМУЛЯТИВНЫЕ СПЕКТРЫ β -ЧАСТИЦ ^{235}U , ^{238}U И ^{239}Pu

Для нахождения кумулятивных спектров β -частиц делящихся изотопов и интерпретации полученного результата была использована следующая информация:

1. Измерения формы спектра β -частиц ^{235}U , проведенные группой ILL в серии экспериментов [3–5], хорошо совпадают в пределах статистической ошибки $\approx 1\%$ в основной части спектра [7]. При этом специфи-

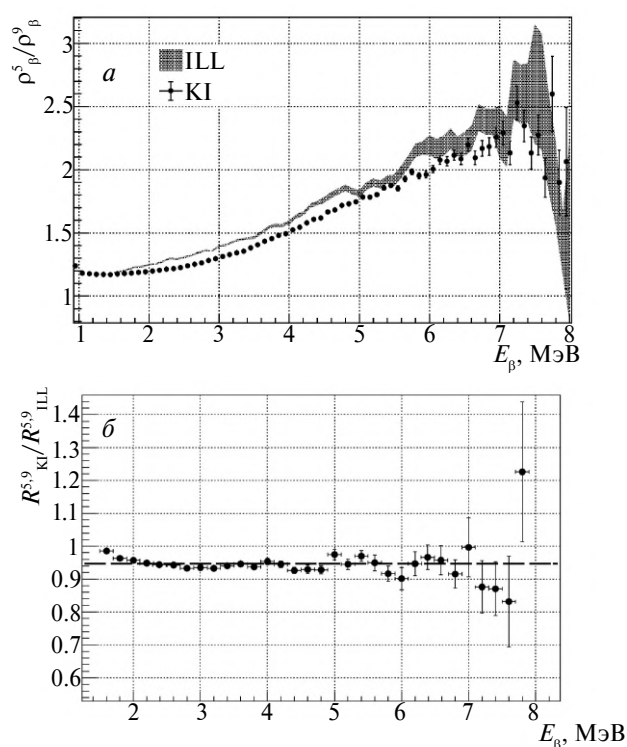


Рис. 1. Отношение кумулятивных спектров β -частиц $^{235}\text{U}/^{239}\text{Pu}$, измеренных группой КИ (НИЦ “Курчатовский институт”) и группой ILL (институт Лауэ–Ланжевена). *a* — отношение спектров β -частиц КИ и ILL, *b* — сопоставление отношения спектров КИ настоящей работы и отношения спектров ILL (штриховая линия соответствует среднему значению 0.946).

ка завершающего измерения ILL спектра β -частиц ^{235}U [5] состояла в том, что калибровка спектра велась при стандартной мощности реактора ($W = 57$ МВт), а форма спектра для уменьшения фона измерялась при пониженной мощности ($W = 4$ МВт) и с существенно более толстой мишенью ^{235}U . В этой же работе [5] при нормализации спектра $(\rho_\beta^5)_{\text{ILL}}$ было учтено отклонение сечения деления ^{235}U от закона $1/\nu$, что в работе [3] было проигнорировано. Это привело к коррекции ранее опубликованного [3] спектра $(\rho_\beta^5)_{\text{ILL}}$ на $\approx 3\%$, что, тем не менее, полностью не объясняет различие нормировок спектров [3] и [5], составившее $\approx 6\%$.

2. В недавно вышедших работах [12, 13] было отмечено, что при нормализации спектра $(\rho_\beta^5)_{\text{ILL}}$ в работах [3, 5] группа ILL использовала завышенное на $\approx 10\%$ сечение реакции $^{207}\text{Pb}(n_{\text{th}}, \gamma)^{208}\text{Pb}$. При этом в публикации [4] спектра $(\rho_\beta^9)_{\text{ILL}}$ калибровка с ^{207}Pb не упомянута. Используемые группой ILL дан-

ные по другим калибровочным источникам согласуются с современными значениями в пределах ошибок [12].

3. В работе [13] с использованием экспериментальных данных по тепловыделению делящихся изотопов и современных ядерных баз данных также отмечена возможная ошибка при нормализации спектра $(\rho_\beta^5)_{ILL}$.
4. В эксперименте Daya Bay после многолетнего набора статистики получены выходы σ_f^i [см² дел⁻¹] реакции ОБР (1), взвешенные по спектрам антинейтрино ρ_ν^i [МэВ⁻¹ дел⁻¹] продуктов деления изотопов ²³⁵U и ²³⁹Pu [14, 15]:

$$\sigma_f^i = \int \rho_\nu^i(E_\nu) \sigma_{OBR}(E_\nu) dE_\nu, \quad (3)$$

где $\sigma_{OBR}(E_\nu)$ [см²] — сечение реакции (1) для моноэнергетических $\bar{\nu}_e$. Оказалось, что измеренный выход σ_f^5 существенно меньше предсказанного НМ-моделью, а величины измеренного и ожидаемого выходов σ_f^9 совпадают. Подобный результат получен также коллаборацией RENO [16].

5. В работе [17] расчетом выявлена корреляционная зависимость между кумулятивными спектрами β -частиц ρ_β^i и антинейтрино ρ_ν^i делящихся в реакторе изотопов урана и плутония, где индексы $i = 5, 9, 8, 1$ относятся соответственно к изотопам ²³⁵U, ²³⁹Pu, ²³⁸U и ²⁴¹Pu, см. также работы [5, 18].
6. При исследовании в расчетах [19] метода конверсии была установлена прямая сильная корреляция между отношениями спектров β -частиц $\rho_\beta^5/\rho_\beta^9$ и антинейтрино ρ_ν^5/ρ_ν^9 и, как следствие этого, отношением выходов σ_f^5/σ_f^9 . Это было подтверждено в работе [10] при рассмотрении различных конверсионных моделей спектров реакторных антинейтрино.
7. Расчетom установлено, что отношения спектров $\rho_\beta^5/\rho_\beta^9$ и ρ_ν^5/ρ_ν^9 , представленные в полных энергиях частиц, в пределах ошибки $\pm 1.5\%$ совпадают; то же относится к $\rho_\beta^5/\rho_\beta^1$ и ρ_ν^5/ρ_ν^1 и т.п. [10, 20–23].

Учитывая представленную информацию, в частности, в пунктах 1–4, следует признать, что кривая $(\rho_\beta^5)_{ILL}$ ошибочно завышена на $\approx 5.4\%$ (см. рис. 1). Так как спектр $\bar{\nu}_e$ ²³⁵U получен путем конверсии спектра β -частиц, то он также должен быть изменен на эту величину (см. пункты 5–7). Это же относится и к спектрам β -частиц и $\bar{\nu}_e$

²³⁸U (TUM), нормировка которых основана на нормировке спектра β -частиц ²³⁵U.

Условия измерений отношения кумулятивных спектров β -частиц ²³⁵U/²³⁹Pu в проводимом нами эксперименте таковы, что позволяют определить величину $R^{5,9} = \rho_\beta^5/\rho_\beta^9$ с прецизионной точностью [10]. Надежность и тщательность измерений формы спектра β -частиц ²³⁵U группой ILL также не вызывает сомнений (см. пункт 1). По этим данным легко уточнить спектр β -частиц ²³⁹Pu:

$$(\rho_\beta^9)_{KI} = \frac{(\rho_\beta^5)_{KI}}{R_{KI}^{5,9}} = \frac{(\rho_\beta^5)_{ILL}/1.054}{R_{KI}^{5,9}}. \quad (4)$$

В Приложении представлены скорректированные данные по спектрам β -частиц изотопов ²³⁵U, ²³⁹Pu, ²³⁸U в расширенном диапазоне энергий 1.75–8.50 МэВ.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-12-00219).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. P. Huber, Phys. Rev. C **84**, 024617 (2011).
2. Th. A. Mueller, D. Lhuillier, M. Fallot, A. Letourneau, S. Cormon, M. Fechner, L. Giot, T. Lasserre, J. Martino, G. Mention, A. Porta, and F. Yermia, Phys. Rev. C **83**, 054615 (2011).
3. K. Schreckenbach, H. R. Faust, F. Feilitzsch, A. A. Hahn, K. Hawerkamp, and J. L. Vuilleumier, Phys. Lett. B **99**, 251 (1981).
4. F. Feilitzsch, A. A. Hahn, and K. Schreckenbach, Phys. Lett. B **118**, 162 (1982).
5. K. Schreckenbach, G. Colvin, W. Gelletly, and F. Von Feilitzsch, Phys. Lett. B **160**, 325 (1985).
6. A. Hahn, K. Schreckenbach, W. Gelletly, F. von Feilitzsch, G. Colvin, and B. Krusche, Phys. Lett. B **218**, 365 (1989).
7. N. Haag, F. von Feilitzsch, L. Oberauer, W. Potzel, K. Schreckenbach, and A. A. Sonzogni, arXiv: 1405.3501 [nucl-ex].
8. N. Haag, A. Gutlein, M. Hofmann, L. Oberauer, W. Potzel, K. Schreckenbach, and F. M. Wagner, Phys. Rev. Lett. **112**, 122501 (2014); arXiv: 1312.5601 [nucl-ex].
9. G. Mention, M. Fechner, Th. Lasserre, Th. A. Mueller, D. Lhuillier, M. Cribier, and A. Letourneau, Phys. Rev. D **83**, 073006 (2011).
10. В. И. Копейкин, Ю. Н. Панин, А. А. Сабельников, ЯФ **84**, 3 (2021) [Phys. At. Nucl. **84**, 1 (2021)].
11. V. Kopeikin, M. Skorokhvatov, and O. Titov, Phys. Rev. D **104**, L071301 (2021).
12. A. Onillon and A. Letourneau, in *Proceedings of the Applied Antineutrino Physics 2018* (2019); arXiv: 1911.06834 [hep-ex].

13. A. A. Sonzogni, R. J. Lorek, A. Mattera, and E. A. McCutchan, Phys. Rev. C **108**, 024617 (2023).
14. F. P. An *et al.* (Daya Bay Collab.), Phys. Rev. Lett. **118**, 251801 (2017); arXiv: 1704.01082 [hep-ex].
15. D. E. Jaffe *et al.* (Daya Bay Collab.), arXiv: 2106.07700 [hep-ex].
16. G. Bak *et al.* (RENO Collab.), Phys. Rev. Lett. **122**, 232501 (2019); arXiv: 1806.00574v4 [hep-ex].
17. А. А. Боровой, В. И. Копейкин, Л. А. Микаэлян, С. В. Толоконников, ЯФ **36**, 400 (1982).
18. А. И. Афонин, С. Н. Кетов, В. И. Копейкин, Л. А. Микаэлян, М. Д. Скорыхватов, С. В. Толоконников, ЖЭТФ **94**, 1 (1988).
19. A. C. Hayes, G. Jungman, E. A. McCutchan, A. Sonzogni, G. Garvey, and X. Wang, Phys. Rev. Lett. **120**, 022503 (2018); arXiv: 1707.07728 [nucl-th].
20. P. Vogel, G. K. Schenter, F. M. Mann, and R. E. Schenter, Phys. Rev. C **24**, 1543 (1981).
21. H. V. Klapdor and J. Metzinger, Phys. Lett. B **112**, 22 (1982).
22. В. Г. Алексанкин, С. В. Родичев, П. М. Рубцов и др., *Бета- и антинейтринное излучение радиоактивных ядер* (Энергоатомиздат, Москва, 1989).
23. В. И. Копейкин, ЯФ **75**, 165 (2012) [Phys. At. Nucl. **75**, 143 (2012)].

ПРИЛОЖЕНИЕ

Кумулятивные спектры β -частиц ρ_β [МэВ⁻¹ дел⁻¹] продуктов деления ²³⁵U, ²³⁹Pu и ²³⁸U КИ. Приведены только статистические (CL = 68%) ошибки

E_β , МэВ	ρ_β^5	δ_β^5 , %	ρ_β^9	δ_β^9 , %	ρ_β^8	δ_β^8 , %
1.75	1.08	0.2	9.07×10^{-1}	0.2	1.37	≈ 3
2.00	8.84×10^{-1}	0.2	7.39×10^{-1}	0.2	1.21	≈ 3
2.25	7.32×10^{-1}	0.2	6.03×10^{-1}	0.3	1.05	≈ 3
2.50	6.01×10^{-1}	0.2	4.88×10^{-1}	0.3	8.88×10^{-1}	3.2
2.75	4.95×10^{-1}	0.2	3.92×10^{-1}	0.3	7.15×10^{-1}	3.0
3.00	4.02×10^{-1}	0.2	3.08×10^{-1}	0.3	5.88×10^{-1}	2.4
3.25	3.21×10^{-1}	0.2	2.39×10^{-1}	0.3	4.79×10^{-1}	2.3
3.50	2.54×10^{-1}	0.3	1.82×10^{-1}	0.4	3.86×10^{-1}	2.4
3.75	2.01×10^{-1}	0.3	1.38×10^{-1}	0.4	3.07×10^{-1}	2.4
4.00	1.55×10^{-1}	0.3	1.03×10^{-1}	0.5	2.42×10^{-1}	2.7
4.25	1.19×10^{-1}	0.3	7.51×10^{-2}	0.5	1.88×10^{-1}	2.9
4.50	9.19×10^{-2}	0.3	5.60×10^{-2}	0.6	1.43×10^{-1}	3.5
4.75	7.19×10^{-2}	0.4	4.19×10^{-2}	0.7	1.12×10^{-1}	3.9
5.00	5.44×10^{-2}	0.4	3.09×10^{-2}	0.7	8.74×10^{-2}	4.5
5.25	4.12×10^{-2}	0.4	2.28×10^{-2}	0.9	6.27×10^{-2}	5.5
5.50	3.15×10^{-2}	0.4	1.69×10^{-2}	1.0	4.57×10^{-2}	6.8
5.75	2.34×10^{-2}	0.5	1.18×10^{-2}	1.2	3.27×10^{-2}	9.7
6.00	1.72×10^{-2}	0.5	8.71×10^{-3}	1.5	2.58×10^{-2}	12
6.25	1.25×10^{-2}	0.6	6.06×10^{-3}	1.9	2.44×10^{-2}	12
6.50	8.79×10^{-3}	0.6	4.11×10^{-3}	2.3	1.78×10^{-2}	13
6.75	5.85×10^{-3}	0.6	2.70×10^{-3}	2.9	9.36×10^{-3}	19
7.00	3.64×10^{-3}	0.8	1.60×10^{-3}	3.9	5.10×10^{-3}	28
7.25	2.23×10^{-3}	1.0	8.83×10^{-4}	5.3	3.78×10^{-3}	
7.50	1.24×10^{-3}	1.3	5.61×10^{-4}	6.6	2.45×10^{-3}	
7.75	5.80×10^{-4}	2.1	2.25×10^{-4}	12	1.44×10^{-3}	
8.00	2.28×10^{-4}	3.9	1.26×10^{-4}	26	6.93×10^{-4}	
8.25	1.19×10^{-4}	6.4	6.3×10^{-5}	66	4.80×10^{-4}	
8.50	5.34×10^{-5}	12	2.7×10^{-5}	78	3.00×10^{-4}	

**THE REVISION OF CUMULATIVE SPECTRA OF BETA PARTICLES
FROM ^{235}U , ^{239}Pu AND ^{238}U FISSION PRODUCTS BASED
ON THE UPDATED MEASUREMENTS OF THE RATIO
OF SPECTRA $^{235}\text{U}/^{239}\text{Pu}$**

© 2025 V. I. Kopeikin¹⁾, D. V. Popov^{1),2)}

¹⁾*NRC “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia*

²⁾*NRNU MEPhI, Moscow, Russia*

Based on new measurements of the ratio of cumulative spectra of β -particles $^{235}\text{U}/^{239}\text{Pu}$, performed at the Kurchatov Institute (KI), the cumulative spectra of β -particles fission products of ^{235}U , ^{239}Pu and ^{238}U isotopes have been updated. The presented β -particles spectra ^{235}U , ^{239}Pu and ^{238}U KI are compared with similar spectra measured at the Institute Laue–Langevin (ILL), and the spectrum of β -particles ^{238}U KI – with the measurements performed at the Technical University of Munich (TUM). It is shown that the ILL ratio of β -particles spectra $^{235}\text{U}/^{239}\text{Pu}$ is mistakenly overestimated by $\approx 5.4\%$.