

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук Дербина Александра Владимировича на диссертационную работу Ингерман Светланы Владимировны «Энергетические спектры антинейтрино продуктов деления ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu и ^{241}Pu в ядерном реакторе, рассчитанные с использованием экспериментальных данных», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15 – Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий.

Диссертационная работа С.В. Ингерман посвящена проблемам спектра реакторных нейтрино, которые продолжают оставаться **актуальными**, начиная с момента первой регистрации нейтрино от ядерного реактора. Последние 15 лет особый интерес к потоку и форме спектра был вызван так называемой «реакторной» аномалией, которая, наряду с результатами ускорительных экспериментов и другой, «галлиевой» аномалией, стимулировала проведение интересных экспериментов по поиску осцилляций нейтрино в стерильное состояние. Как результат, диссертационная работа С.В. Ингерман, выполненная в Институте ядерных исследований РАН и посвященная получению расчетных спектров нейтрино от четырех основных делящихся изотопов урана и плутония, является **своевременной и актуальной**.

В диссертации используется комбинированный метод получения спектра нейтрино, который включает в себя как расчет энергетических спектров нейтрино для основных компонент ядерного топлива реактора, так и использование экспериментальных спектров позитронов, измеренных ранее в экспериментах на реакторах Ровенской АЭС в Советском Союзе и Double Chooz во Франции. При расчете спектров нейтрино применялся метод прямого суммирования с использованием уточненной соискателем базой ядерных данных, в которую включены дополнительные короткоживущие изотопы с неизвестными схемами распадов. Для описания вероятностей ветвей бета-переходов ядер с неизвестными схемами бета-распада использовалась гауссова функция, параметры которой подгонялись таким образом, чтобы обеспечить наилучшее описание энергетического спектра нейтрино, полученного в вышеуказанных экспериментах.

Прецизионное знание спектра реакторных нейтрино важно для целого ряда фундаментальных и прикладных задач. В первую очередь для изучения нейтринных осцилляций и определения иерархии масс нейтрино, для выделения сигнала в экспериментах по регистрации гео-нейтрино, в которых нейтрино от ядерного реактора является фоном. **Практическая значимость** работы состоит в том, что точное знание спектра нейтрино от ядерного реактора позволяет проводить анализ измеряемого экспериментально спектра и осуществлять удаленный мониторинг работы ядерного реактора, а именно измерять мощность, энерговыработку и контроль наработки плутония в активной зоне реактора. Прецизионное определение формы бета-спектров позволяет прогнозировать остаточное тепловыделение в ядерном топливе, что важно для безопасности нынешних и будущих реакторов.

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и одного приложения, списка рисунков и таблиц, и списка сокращений и условных обозначений. Полный объем диссертации составляет 139 страниц, включая 35 рисунков и 18 таблиц и список литературы из 87 наименований.

Во **введении** изложены цель и задачи диссертационной работы, обосновывается актуальность выбранной темы, подчеркивается научная новизна и практическая

значимость разработанного метода вычисления спектра нейтрино от ядерного реактора. Отмечается, что изотопный анализ ядерного топлива по нейтринному излучению, основанный на различии спектров нейтрино для изотопов урана и плутония, был предложен Л.А. Микаэляном в Курчатовском институте еще в 1978 году. Задача продолжает оставаться актуальной и в настоящее время.

В первой главе дан краткий обзор основных методов получения спектра реакторных нейтрино. В диссертации используются два основных метода - расчетный метод суммирования спектров нейтрино, который требует знания схем распада осколков основных делящихся изотопов и метод извлечения спектра из экспериментально измеренного спектра позитронов, который требует знания функции отклика детектора.

Вторая глава посвящена расчету спектров реакторных нейтрино комбинированным методом с использованием данных детектора РОНС в эксперименте, проведенном в нейтринной лаборатории Курчатовского института на Ровенской АЭС в 80-е годы прошлого столетия. Описана методика расчета спектров антинейтрино основных делящихся изотопов урана и плутония, основанная на модернизированной автором базе данных осколков деления. Для описания вероятностей бета-переходов в ядрах с неизвестными схемами распадов применялась гауссова функция, при этом среднеквадратичное отклонение фиксировалось в 20% от математического ожидания, которое являлось свободным параметром при сравнении с экспериментальным спектром и измеренным сечением реакции ОБР.

Получена уточненная база ядерных данных продуктов деления, которые формируют полный энергетический спектр антинейтрино от реактора, и которая включает в себя также оцененные и неизвестные осколки деления. Сечения реакции ОБР для расчетных спектров, полученные комбинированным методом, согласуются, в пределах экспериментальных ошибок, с экспериментально измеренными при учете поправок на состав активной зоны реактора. Проведено сравнение расчетных спектров антинейтрино со спектрами, полученными в других работах. Важно, что отношение сечений реакции ОБР, вычисленное для расчетных спектров ^{235}U и ^{239}Pu , дают такое же значение, которое получено группой В.И. Копейкина в Курчатовском институте.

В третьей главе комбинированный метод применяется к экспериментальным данным, полученным с ближним детектором в эксперименте Double Chooz. С использованием процедуры минимизации из измеренного спектра позитронов получены расчетные спектры антинейтрино урана и плутония, которые лучшим образом описывают экспериментальный спектр.

Особо следует отметить обновленную базу из почти 1000 ядер, испытывающих бета-распад, частично приведенную в таблицах 17 и 18 в приложении. В таблицах указан период полураспада, значение Q-распада и максимальная энергия бета-электронов. На основе приведенных данных вычислено сечение реакции обратного бета-распада, которое оказалось в пределах одного стандартного отклонения от экспериментально измеренного значения.

В четвертой главе вычислены энергетические спектры антинейтрино основных делящихся изотопов урана и плутония на основе данные четырех реакторных экспериментов (РОНС, Double Chooz, Daya Bay и Reno) в которых был измерен спектр позитронов в реакции обратного бета-распада. Полученные спектры антинейтрино хорошо описывают экспериментальные спектры, измеренные для конкретного состава активной зоны. Спектр ^{235}U оказывается в хорошем согласии с полученным в эксперименте PROSPECT, ориентированном на поиск осцилляций нейтрино в стерильное

состояние. Рассчитанные сечения реакции обратного бета-распада для спектров антинейтрино урана и плутония сравниваются в таблице 12 и на рис. 4.6 с сечениями, измеренными в четырех вышеотмеченных экспериментах.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе. **В приложении** приведена созданная автором полезная база данных бета-активных ядер.

По представленной работе можно сделать некоторые **рекомендации и замечания**.

1) В диссертации неоднократно упоминается возможное влияние отработанного ядерного топлива, находящегося в хранилище, на низкоэнергетическую часть спектра нейтрино которое, согласно рисунку 2.15, может увеличивать спектр нейтрино при энергиях менее 3 МэВ до 1.5 раз по сравнению с расчетным. По этой причине, для описания экспериментальных спектров расчетными спектрами, была выбрана область энергий выше 3.5 МэВ, исключая низкоэнергетическую часть спектра (рис. 2.11). Возможно, в работе стоило привести приблизительную количественную оценку ожидаемого вклада в нейтринный спектр от долгоживущих изотопов в отработанном ядерном топливе, таких как ^{144}Ce , ^{106}Ru и ^{90}Y , исходя из реальной активности и расстояния между хранилищем и детектором. В диссертации отмечается, что «их интегральный вклад по сравнению с потоком антинейтрино от работающего реактора составляет величину менее 0.1 %». Видимо, это вклад в число событий реакции обратного бета-распада.

2) Для вычисления спектра нейтрино от ядер с неизвестными схемами бета-распада в качестве силовой функции бета-распада выбран гауссиан со средним значением энергии электронов равным некоторой доле от Q-распада и среднеквадратичным отклонением (корнем из дисперсии), равным 20% от средней энергии. Возможно, стоило бы пояснить с чем связано такое соотношение между средней энергией и дисперсией и как изменится результат при другом соотношении. Возможно ли оставить дисперсию свободным параметром или применить другую подобную функцию, например, Брейта-Вигнера вместо гауссовой?

3) При вычислениях спектра нейтрино используется форма бета-спектров только для разрешенных бета-переходов, что конечно является упрощением. В диссертации отсутствует упоминание о запрещенных бета переходах, форма которых существенно отличается от разрешенных переходов. Вклад запрещенных переходов в спектр реакторных нейтрино, в зависимости от энергии, сравним, и даже может превышать вклад от разрешенных переходов. Варианты учета таких переходов представлены, например, в работах, опубликованных в Phys. Rev. D 100, 053005 (2019) и Phys. Rev. C 108, 055501 (2023). Делать какие-либо выводы о влиянии функции Ферми до включения в анализ запрещенных переходов и исследования используемой силовой функции бета-распада представляется преждевременным. Можно надеяться, что проведенные в диссертации вычисления спектра нейтрино получат дальнейшее развитие. Отметим, что планируемый к запуску экспрессный лазерноядерный комплекс ИРИНА на реакторе ПИК позволит измерять характеристики конкретных короткоживущих нейтроноизбыточных ядер для задач ядерной физики и астрофизики.

4) Полученное в диссертации отношение сечений обратного бета распада для расчетных спектров ^{235}U и ^{239}Pu , вычисленных на основе данных детектора РОНС, составляет $\sigma_f(^{235}\text{U}) / \sigma_f(^{239}\text{Pu}) = R = 1.45$. Это значение сравнивается с результатом, полученным в работе Курчатовского института [Phys. Rev. D 104, L071301 (2021)], который равняется $R = 1.45 \pm 0.03$, что находится в хорошем согласии с комбинированным результатом экспериментов Daya Bay и RENO – $R = 1.44 \pm 0.10$. Для понимания насколько

важно полученное в диссертации согласие R с упомянутыми работами, стоило бы оценить ошибку для значения R. Это относится и к таблице 14, в которой без ошибок приведены спектры антинейтрино для изотопов ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu и ^{241}Pu , полученные в данной работе.

5) В целом работа написана и оформлена хорошо, хотя имеются синтаксические (например, стр. 4 формула 5; стр.8 пункт 1 в разделе «научная новизна», стр.85 пункт 2 в «заключении») и стилистические небрежности (подписи к рис. 2.9 и 2.10, стр. 47, стр. 76, «заключение» пункт 1). Рекомендуется использовать прилагательное «низкоэнергетическую» вместо «низкоэнергетичную» (стр. 40), дисперсия σ^2 это квадрат стандартного отклонения (стр. 38). На рисунках рис 2.11, 3.4, 3.9, демонстрирующих согласие расчета и эксперимента можно было бы привести их разницу (или отношение) в единицах стандартного отклонения, что упростило бы понимание степени схождения. Это же относится к рисункам 4.2 - 4.5, где приведено сравнение со спектрами экспериментов Double Chooz, Daya Bay, RENO и PROSPECT. В таблицах 12, 13, 14 и 9 хотелось бы видеть ошибки для определенных сечений реакции ОБР и спектра нейтрино. Помимо ссылки на работу A. Strumia, F. Vissani // PL B 564, 42 (2003), в которой приведен результаты вычисления сечения реакции ОБР можно было бы дополнительно указать ссылки на их более поздние работы J. High Energy Phys. 08 (2022) 212. и arXiv: 2502.17343v1. Рисунок 2.6 лучше бы сделать цветным и привести отношение выхода осколков ^{238}U , ^{239}Pu и ^{241}Pu по отношению к ^{235}U .

Отмеченные недостатки не меняют в целом **положительной оценки** диссертационной работы С.В. Ингерман. В работе получены **новые и важные** для реакторных экспериментов результаты, среди которых можно выделить следующие:

1) Разработана комбинированная методика вычисления спектра антинейтрино от ядерного реактора с использованием ранее экспериментально измеренных спектров позитронов и уточненной базы данных ядер, испытывающих бета-распад, в которую включены ядра с неизвестными схемами распадов, к которым применялась силовая функция.

2) Получены новые спектры антинейтрино для основных четырех компонент ядерного топлива, на основе измеренных спектров позитронов в экспериментах на Ровенской АЭС и Double Chooz, которые хорошо описывают экспериментальные данные с учетом состава активной зоны реактора.

В целом диссертация производит положительное впечатление, она выполнена на высоком научном уровне и понятно написана. Основные результаты диссертационной работы являются **новыми, обоснованными и достоверными** и получены впервые. Основные результаты по теме диссертации изложены в 2 печатных работах, опубликованных в журнале «Ядерная Физика», который входит в список ВАК, переводная версия индексируется базой Scopus, и в трех свидетельствах о государственной регистрации программ для электронных вычислительных машин. Результаты диссертации были доложены автором лично на 10-ти международных и российских конференциях. Стоит отметить, что С.В. Ингерман, с учетом работы в коллаборации ALICE, имеет более 30 публикаций, на которые почти 800 ссылок, ее индекс Хирша $h=16$ (РИНЦ). **Автореферат правильно и полно отражает** содержание диссертации.

Диссертационная работа Ингерман Светланы Владимировны «Энергетические спектры антинейтрино продуктов деления ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu и ^{241}Pu в ядерном реакторе, рассчитанные с использованием экспериментальных данных», полностью соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени

кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15 – физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий.

30 августа 2026 г.

Официальный оппонент

Заведующий лабораторией низкофоновых измерений,

заведующий Отделом п/п ядерных детекторов,

Петербургского института ядерной физики

НИЦ "Курчатовский институт"

доктор физико-математических наук по специальности

01.04.16 - физика атомного ядра и элементарных частиц

А.В. Дербин

derbin_av@pnpi.nrcki.ru, +7(81371) 46327

188300 Ленинградская область, г. Гатчина

Орлова роща, ПИЯФ НИЦ КИ

Подпись Дербина А.В. удостоверяю:

Ученый секретарь ПИЯФ НИЦ КИ

кандидат физико-математических наук

С.И. Воробьев

Сведения об официальном оппоненте

Дербин Александр Владимирович

Доктор физико-математических наук по специальности 01.04.16 - физика атомного ядра и элементарных частиц, тел. +7(81371) 46327, адрес электронной почты: derbin_av@npri.nrcki.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение “Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова” Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”, Отделение нейтронных исследований, Отдел полупроводниковых ядерных детекторов, заведующий отделом.

Список основных публикаций по теме рецензируемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

- 1) **A.V. Derbin**, I.S. Drachnev, D.V. Ivanov, I.M. Kotina, V.N. Muratova, N.V. Niyazova, D.A. Semenov, M.V. Trushin, E.V. Unzhakov, Electron-antineutrino spectrum from precision measurements of ^{144}Pr -decay, Phys. Rev. (2025) D 112, 112008 (12)
- 2) **А.В. Дербин**, И.С. Драчнев, И.С. Ломская, В.Н. Муратова, Д.А. Семенов, М.В. Трушин, Е.В. Унжаков, Новые ограничения на время жизни ^{12}C по отношению к ядерным переходам с нарушением принципа Паули на основе данных детектора Бorexино, Письма в ЖТФ, (2026), том 52, вып. 4, с.29-32
- 3) **А.В. Дербин**, "Detecting Solar CNO-Neutrinos Using the Borexino Detector", Physics of Particles and Nuclei, (2025), Vol. 56, No. 3, pp. 835–842
- 4) **A.V. Derbin**, I.S. Drachnev, D.V. Ivanov, V.N. Muratova, M.V. Trushin, E.V. Unzhakov, and A.S. Vorobyev, A New Precision Measurements of ^{71}Ge Lifetime, Physics of Atomic Nuclei, (2025) 88, No. 1, 52-56
- 5) D. Basilico,...**A.V. Derbin**.. et al., (Borexino Coll.), Search for high energy 5.5 MeV solar axions with the complete Borexino dataset, Eur. Phys. J. (2025) C 85, 1182-1189
- 6) **А.В. Дербин**, И.С. Драчнев, Ю.М. Гаврилюк, А.М. Гангапшев, В.В. Казалов, В.В. Кузьминов, В.Н. Муратова, Д.А. Семенов, Д.А. Текуева, М.В. Трушин, Е.В. Унжаков, С.П. Якименко, Поиск неупругого рассеяния частиц темной материи на ядрах ^{83}Kr с возбуждением низколежащего ядерного уровня, Письма в ЖТФ, 2025, т. 51, в. 24, с. 4-7
- 7) D. Basilico,... **A.V. Derbin**..et al., (Borexino coll.), Final results of Borexino on CNO solar neutrinos, Phys. Rev. (2023) D 108 10, 102005(15)
- 8). D. Basilico,... **A.V. Derbin**.. et al.,(Borexino coll.), Borexino’s search for low-energy neutrinos associated with gravitational wave events from GWTC-3 database, Eur. Phys. J. C (2023) 83:5381(12)
- 9) **А.В.Дербин**, И.С.Драчнев, В.Н.Муратова, Д.А.Семенов, М.В.Трушин, Е.В.Унжаков, Поиск солнечных аксионов с энергией 8.4 кэВ, излучаемых в $M1$ -переходе ядер ^{169}Tm , Письма в ЖЭТФ, (2023) том 118, вып. 3, с. 154 – 158
- 10) S.V. Bakhlanov, **A.V. Derbin**, I.S. Drachnev, I.S. Lomskaya, I.M. Kotina, V.N. Muratova, N.V. Niyazova, M.V. Trushin, and E.A. Chmel’, Precision Measurement of

^{144}Ce – ^{144}Pr Beta Spectrum by Means of Semiconductor Spectrometer, Physics of Atomic Nuclei, (2022), 85, No. 6, pp. 936–941.