

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.163.01
НА БАЗЕ Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН)
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА
НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от **01.10.2026 г. № 48/10**

О присуждении **Ингерман Светлане Владимировне**, гражданке Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация “Энергетические спектры антинейтрино продуктов деления ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu и ^{241}Pu в ядерном реакторе, рассчитанные с использованием экспериментальных данных” по специальности 1.3.15 – «Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий», принята к защите 04.06.2026 г., протокол № 46/8 диссертационным советом 24.1.163.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН), 117312, г. Москва, пр-т 60-летия Октября, 7а., приказ Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 823/нк от 20 апреля 2023 года.

Соискатель Ингерман Светлана Владимировна 1984 года рождения. Окончила Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ» (НИЯУ МИФИ) по направлению/специальности «Физика атомного ядра и частиц» специализации «Физика элементарных частиц и космология» в 2010 году. В период с 22 мая по 07 июля 2020 года была зачислена в качестве экстерна для прохождения промежуточной аттестации в аспирантуру НИЦ «Курчатовский институт» по направлению подготовки 03.06.01 - Физика и астрономия, по направленности 01.04.16 - Физика атомного ядра и элементарных частиц. В период прикрепления в качестве экстерна сданы следующие кандидатские экзамены: история и философия науки (физико-математические науки), иностранный язык

(английский язык). Кандидатский экзамен по специальности 1.3.15 сдан Ингерман С.В. при прикреплении к аспирантуре ИЯИ РАН.

Диссертация выполнена в лаборатории гамма-астрономии и реакторных нейтрино отдела экспериментальной физики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук. В период подготовки диссертации, Ингерман С.В. работала в должности ведущего инженера лаборатории гамма-астрономии и реакторных нейтрино отдела экспериментальной физики ИЯИ РАН.

Научный руководитель – Синев Валерий Витальевич, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук, отдел экспериментальной физики, лаборатория гамма-астрономии и реакторных нейтрино, ведущий научный сотрудник.

Официальные оппоненты:

Дербин Александр Владимирович, д.ф.-м.н., Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Отделение нейтронных исследований, отдел полупроводниковых ядерных детекторов, заведующий отделом,

Лютостанский Юрий Степанович, д.ф.-м.н., доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Отделение ядерно-физических технологий, Курчатовский комплекс фундаментальных исследований, заместитель руководителя Отделения ядерно-физических технологий.

Ведущая организация - Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН), (г. Москва, г. Троицк),

в своём положительном заключении, подписанном Дворниковым Максимом Сергеевичем, доктором физ.-мат. наук, и.о. заведующего теоретическим отделом, и утверждённом директором Федерального

государственного бюджетного учреждения науки Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук, кандидатом физ.-мат. наук Абуниным Артёмом Анатольевичем, указала, что работа отвечает требованиям “Положения о присуждении ученых степеней”, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а её автор Ингерман Светлана Владимировна заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15 – «Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий».

Соискатель имеет 2 работы по теме диссертации, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК, 3 свидетельства о государственной регистрации программ для электронных вычислительных машин.

Представленные соискателем сведения об опубликованных им работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации, достоверны. Текст опубликованных работ полностью соответствует тематике диссертации, они написаны либо при решающем участии соискателя, либо им самостоятельно.

Список основных работ по результатам диссертационного исследования:

1. New Antineutrino Spectra of Nuclear-Reactor Fissile Isotopes: Experiment and Calculations / S. V. Silaeva [et al.] // Phys. Atom. Nucl. — 2022. — Vol. 85, no. 6. — P. 690—700. — DOI: 10.1134/S1063778823010611. — arXiv: 2210.00836 [nucl-ex].
2. Antineutrino Spectra of $^{235,238}\text{U}$ and $^{239,241}\text{Pu}$ Taken from the Double Chooz Experiment / S. V. Ingerman [et al.] // Phys. Atom. Nucl. — 2023. — Vol. 86, no. 6. — P. 1178—1188. — DOI: 10.1134/S1063778824010599.
3. *Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ. Формирование энергетического спектра антинейтрино от реактора (AnuReactorSpectrum) [Text]* / В. В. Синев, С. В. Ингерман (Российская Федерация); Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных

исследований Российской академии наук. — No. 2025685416; 11/09/2025 ; Бюл. №10, 2025684069 (Российская Федерация). — URL: <https://fips.ru/EGD/af3421f6-2ba6-4d35-8efc-68b72104ffd1>.

4. *Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ. Распределение вероятностей ветвей бета-переходов бета-активных ядер для двух баз ядерных данных (Probability_view) [Text]* / В. В. Синев, С. В. Ингерман (Российская Федерация); Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук. — No. 2025685395; 11/09/2025 ; Бюл. № 10, 2025684067 (Российская Федерация). — URL: <https://fips.ru/EGD/d1fd19b1-4a3c-4a97-84ae-e6040522aa24>.
5. *Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ. Отображение спектров антинейтрино продуктов деления с учетом всех ветвей бета-распада (Chain_view) [Text]* / В. В. Синев, С. В. Ингерман (Российская Федерация); Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук. — No. 2025685415 ; Бюл. № 10 ; 11/09/2025, 2025683946 (Российская Федерация). — URL: <https://fips.ru/EGD/f948f02c-a08b-42ed-87f1-3a2d4ae2289d>.

Аннотация полно и правильно отражает содержание диссертации.

На диссертацию и аннотацию поступили отзывы оппонентов и ведущей организации, в которых отмечено, что диссертация обладает внутренним единством, содержит важные физические и методические результаты, имеющие большое научное значение и ценность. Диссертация полностью отвечает всем требованиям к кандидатским диссертациям, предъявляемым Положением о порядке присуждения ученых степеней, утвержденным Постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается высокой квалификацией оппонентов и сотрудников ведущей организации и наличием работ высокого научного уровня по близкой тематике.

В отзывах оппонентов и ведущей организации были высказаны следующие критические замечания и пожелания:

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 реальных 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. Из текста диссертации не ясно, 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 сходства. Это же относится к рисункам 4.2 - 4.5, где приведено сравнении 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 , ^{39}Pu и ^{241}Pu по отношению к ^{235}U .

6. На некоторых рисунках подписи осей выполнены на английском языке.

7. На рис.3.10 наблюдается “горб” в спектре около 12 МэВ. Автор никак не комментирует его наличие.

8. Не ясно, чем объясняются разные сечения ^{235}U (в Таблице 4 – 6.24, а в Таблице 6 – 6.06 и в Таблице 13 – 5.87) при похожести спектров, полученных из данных экспериментов Ровно и Double Chooz.

9. На рисунках 4.2 - 4.5 показаны спектры антинейтрино нескольких экспериментов в сравнении со спектрами, предсказываемыми автором. Не приводятся отношения этих спектров, что дало бы лучшее представление об их сходстве.

10. Каждую из глав следовало начинать с формулировки решаемых в ней задач.

11. Желательно было бы в качестве приложений предоставить коды компьютерных программ, написанных автором для решения описанных в диссертации задач.

В целом, диссертация написана четким и понятным языком, но не лишена небольшого количества опечаток, грамматических и стилистических ошибок. Сделанные замечания не влияют на общую высокую оценку работы. Соискатель Ингерман С. В. ответила на заданные в ходе защиты вопросы и высказанные замечания.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

1. Разработан комбинированный метод расчета спектра антинейтрино от ядерного реактора включающий метод прямого суммирования и силовой функции, который позволяет получить энергетические спектры антинейтрино основных делящихся изотопов, входящих в состав ядерного топлива: ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu и ^{241}Pu .

2. Разработана силовая функция описывающая вероятности бета-переходов ядер для продуктов деления с неизвестными схемами распадов.
3. Получена уточненная база данных параметров бета-активных атомных ядер подтверждающая схемы распадов некоторых короткоживущих осколков с использованием экспериментальных данных, которые ранее были получены только теоретическим путем.
4. С использованием разработанной комбинированной методики расчета получены энергетические спектры антинейтрино основных делящихся изотопов: ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu и ^{241}Pu из экспериментальных данных Ровенского и Double Chooz экспериментов.
5. Получен энергетический спектр антинейтрино от ядерного реактора при среднем составе ядерного топлива по числу делений за время измерения. В рамках комбинированного метода устранено несоответствие формы спектра антинейтрино в области 6 МэВ.

Теоретическая и практическая значимость исследования обоснована следующим:

- С использованием разработанного метода получена уточненная база вероятностей ветвей бета-переходов атомных ядер, которая включает 1165 ядер. Из них 278 с неизвестными схемами распада, далекие от линии бета-стабильности. Полученные силовые функции (распределение вероятностей ветвей бета-перехода) для короткоживущих ядер могут быть проверены и уточнены методами ядерной физики.
- Сравнивая детектированный энергетический спектр нейтрино при помощи расчетного, можно определить, какие изотопы делятся в момент измерения в активной зоне ядерного реактора, и, следовательно, оценить состояние и состав топливной загрузки. Удаленный мониторинг реактора при помощи нейтрино позволит в режиме реального времени отслеживать выгорание урана в ядерном топливе и накопление плутония. Впервые появилась возможность определения состава активной зоны по количеству делений изотопов ядерного топлива за счет точного описания суммарного зарегистрированного спектра антинейтрино при помощи расчета.

- Полученная уточненная база данных параметров распада бета-активных атомных ядер может быть применена для получения расчетных энергетических спектров антинейтрино основных делящихся изотопов урана и плутония для определения экспериментального спектра в любом эксперименте на ядерном реакторе при известном составе активной зоны.
- Знание точных спектров реакторных нейтрино, когда они являются фоном, позволит выделять редкие события, изучаемые в подземных низкофоновых лабораториях. Например, реакторные нейтрино являются фоном при поиске гео-нейтрино, потоков нейтрино от солнца, диффузного потока космических нейтрино и определения иерархии нейтринных масс при исследовании осцилляций с высоким энергетическим разрешением.

Представленные в диссертации научные результаты являются новыми, обоснованными и достоверными. Достоверность полученных результатов подтверждается следующим: достигнуто согласие полученных расчетных спектров с экспериментальными спектрами антинейтрино от ядерного реактора в экспериментах РОНС, Double Chooz. Все полученные результаты были опубликованы в рецензируемых научных журналах и представлены на международных и российских научных конференциях. Представленные в диссертации результаты будут востребованы в дальнейших исследованиях по физике реакторных нейтрино, а также для контроля над состоянием активной зоны действующих атомных реакторов, и могут быть использованы в исследованиях, которые ведутся в Национальном исследовательском ядерном университете МИФИ, Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, ИЯИ РАН, НИЦ Курчатовский институт, Институте ядерной физики им. Будкера СО РАН.

Все изложенные в диссертации результаты получены лично автором, либо при его определяющем участии. В частности, автором были составлены каталоги бета-активных атомных ядер в диапазоне массовых значений $A = 58 \div 184$, формирующих исходную базу данных Nuclide, состоящей из порядка 1000 продуктов деления; разработан и отлажен пакет программ для расчета энергетического спектра антинейтрино, а также для расчета сечений и анализа модельных схем распада; проведен расчет энергетических спектров

antineutrino методом рекуррентного суммирования, основанный на уточненной базе данных параметров бета-активных атомных ядер; проведено сравнение расчетных энергетических спектров антинейтрино и ряда экспериментальных спектров; разработан программный код и проведен анализ исходной базы ядерных данных Nuclide с уточненной базой, в котором сравнивались модельные схемы распада для оцененных продуктов деления с исходными данными.

На заседании 01 октября 2026 года диссертационный совет принял решение присудить **Ингерман Светлане Владимировне** ученую степень кандидата физико-математических наук за разработку нового метода расчета спектра антинейтрино от ядерного реактора с использованием метода прямого суммирования, а также силовой функции и создание уточненной базы данных параметров бета-активных атомных ядер.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве **22** человек, из них **6** докторов наук по специальности 1.3.15. – Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий, участвовавших в заседании, из **26** человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за – **22**, против - 0, недействительных бюллетеней - 0.

Председатель

диссертационного совета 24.1.163.01

доктор техн. наук, чл.-корр. РАН

_____ Кравчук Л. В.

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.1.163.01

кандидат физ.-мат. наук

_____ Демидов С. В.

01.10.2026

М.П.