

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИЗМИРАН
кандидат физ.-мат. наук,
А.А. Абунин

«16» июня 2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова Российской академии наук**

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 Ингерман Светланы Владимировны посвящена исследованию энергетических спектров электронных антинейтрино продуктов деления изотопов ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu и ^{241}Pu в ядерном реакторе с использованием комбинированного метода определения реакторного спектра антинейтрино, который включает в себя расчет энергетических спектров антинейтрино основных делящихся изотопов урана и плутония от ядерного реактора с использованием ранее экспериментально измеренных спектров. Для отработки методики использовались данные экспериментов РОИС и Double Chooz, которые применялись для обработки и анализа данных экспериментов Daya Bay и RENO. Точное знание спектра антинейтрино от ядерного реактора позволяет проводить анализ измеряемого экспериментального спектра и осуществлять удаленный мониторинг работы ядерного реактора, измеряя мощность, энерговыработку и контроль наработки плутония в активной зоне реактора.

Основные научные результаты диссертационной работы:

1. Получены спектры электронных антинейтрино от компонент топлива ядерного реактора ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu с использованием экспериментальных спектров антинейтрино из высоко-статистических экспериментов, которые лучше

удовлетворяют экспериментальным сечениям реакции обратного бета-распада.

Отличия от экспериментальных величин составляет не более одного процента.

2. Впервые использована силовая функция для описания вероятностей ветвей бета-переходов неизвестных схем распада.
3. Впервые получен расчетный энергетический спектр антинейтрино от ядерного реактора, совпадающий с экспериментальным.
4. Впервые получены модельные схемы бета-переходов для атомных ядер, у которых отсутствуют данные о схемах распада.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы из 87 источников и предметного указателя, приложения, содержащего базу данных параметров бета-активных атомных ядер. Объем диссертации составляет 139 страниц.

Во введении изложена история экспериментов с участием нейтрино от ядерных реакторов и исследования возможности применения разработанных технологий для диагностики внутриреакторных процессов, включая возможность контроля за наработкой плутония в системе гарантий МАГАТЭ.

В первой главе рассмотрены процессы генерации электронных антинейтрино в результате распада продуктов деления тяжелых изотопов ядерного топлива. Основной поток антинейтрино в реакторе связан с бета-распадом осколком деления ядер топлива. Во время работы ядерного реактора происходит выгорание ^{235}U и накопление тяжелых делящихся изотопов ^{239}Pu и ^{241}Pu . Представлен обзор различных методов формирования энергетических спектров электронных антинейтрино.

Во второй главе представлен разработанный автором диссертации расчет спектров антинейтрино комбинированным методом для основных делящихся изотопов урана и плутония, основанный на уточненной базе данных параметров бета-активных атомных ядер. Предложен метод, который позволяет реконструировать эти спектры из измеренного спектра после преобразования его в спектр антинейтрино, взвешенного с сечением реакции обратного бета-распада (ОБР). Энергетический спектр антинейтрино от ядерного реактора представляет собой фундаментальную характеристику реактора. Вылетая из активной зоны реактора, антинейтрино проникают через все защиты и несут информацию о цепной реакции в активной зоне. Поэтому спектр антинейтрино уникален для каждого типа реактора и зависит от состава ядерного топлива. Как выше было указано, в течение кампании ядерного реактора состав активной зоны изменяется и, следовательно, меняется энергетический спектр антинейтрино.

В третьей главе уточнена база данных параметров бета-активных атомных ядер и показано, что на основе этой базы можно рассчитывать спектры антинейтрино. С помощью разработанного метода проведен анализ результатов эксперимента Double Chooz, определены исходные спектра антинейтрино и доказана эффективность разработанного метода реконструкции антинейтринных спектров.

В четвертой главе исследована точность восстановления спектров

antineutrino с помощью разработанного комбинированного метода в экспериментах POHC, Double Chooz, Daya Bay, RENO, в которых измерялся спектр позитронов в реакции обратного бета-распада. Комбинированная методика моделирования спектра антинейтрино включает в себя: метод прямого суммирования спектров, расчеты Монте–Карло, а также описанный в 1-ой главе метод SVD (определения функции оклика детектора). Разработанная методика позволяет определять деформации изотопного состава при изменении состава активной зоны реактора.

В заключении перечислены основные результаты проведенной работы:

1. Разработана комбинированная методика расчета спектра антинейтрино от ядерного реактора, которая позволяет получить энергетические спектры нейтрино основных делящихся изотопов ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu .
2. В уточненной базе ядерных данных для осколков с неизвестными схемами распадов применялась силовая функция для описания вероятностей для наилучшего описания энергетического спектра антинейтрино, полученного из ранее проведенных экспериментов POHC и Double Chooz.
3. Получена уточненная база данных параметров распада бета-активных атомных ядер, которая может быть применена для получения расчетных энергетических спектров антинейтрино изотопов урана и плутония и других делящихся ядер.
4. Впервые получены энергетические спектры антинейтрино отдельных делящихся изотопов, формирующих состав ядерного топлива: ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu с использованием комбинированного метода расчета, 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.

Следует отметить, что полученные в диссертации результаты представлены последовательно и изложены логично. Чтение диссертации существенно облегчает наличие предметного указателя.

Вместе с тем работа не лишена некоторых недостатков:

1. Каждую из глав следовало начинать с формулировки решаемых в ней задач.
2. Желательно было бы в качестве приложений предоставить коды компьютерных программ, написанных автором для решения описанных в диссертации задач.

Высказанные замечания не снижают достоинств диссертационной работы С.В. Ингерман, ее основные положения достаточно полно раскрыты в автореферате и публикациях диссертанта.

В целом, в диссертации получены результаты, имеющие большое значение для дальнейшего развития в физике элементарных частиц и в нейтринной физике, в частности.

На основе вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Тема диссертации С.В. Ингерман важна и актуальна. Работу следует отнести к специальности 1.3.15 – Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий.
2. Основные результаты диссертации являются новыми. Решен ряд достаточно трудных задач по разработке и отладке пакета программ для расчета энергетических спектров электронных антинейтрино ядерного топлива, используемого в энергетических ядерных реакторах.
3. Основные результаты диссертации изложены в 2 печатных работах, опубликованных в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Министерства науки и высшего образования РФ, и отражены в 3 свидетельствах о государственной регистрации программ для электронных вычислительных машин. Результаты диссертации апробированы на 10 Международных и Всероссийских научных конференциях.
4. В целом диссертация является завершенным научным исследованием, вносящим заметный вклад в раздел физики ядерных реакторов.
5. Автореферат диссертации полно и правильно отражает ее содержание.
6. Представленные в диссертации результаты будут востребованы в дальнейших исследованиях контроля над состоянием активной зоны действующих атомных реакторов, разрабатываемых в Национальном исследовательском ядерном университете МИФИ, Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, ИЯИ РАН, Институте ядерной физики им. Будкера СО РАН. Кроме того, представленные результаты могут служить материалом для различных университетских ядерно-физических курсов.

На основании вышеизложенного следует заключить, что диссертация Ингерман Светланы Владимировны отвечает требованиям пп. 9-11,13,14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата (доктора) наук, 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.

Результаты диссертации Ингерман С.В. были представлены, обсуждены и одобрены на семинаре Теоретического отдела Института Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской Академии наук 15 июня 2026 года.

М.С. Дворников

Подпись М.С. Дворникова заверяю,
Учёный секретарь ИЗМИРАН
кандидат физ.мат. наук А. И. Рез

Отзыв составил:
 ведущий научный сотрудник,
 доктор физико-математических наук,
 М.С. Дворников,
 и.о. заведующего теоретическим отделом
 Федерального государственного бюджетного учреждения науки
 Институт земного магнетизма, ионосферы
 и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова
 Российской академии наук (ИЗМИРАН)
 108840, Россия, г. Москва, г. Троицк, Калужское шоссе, д. 4
 e-mail: maxdvo@izmiran.ru
 Тел.: 8 (495) 851-01-20

Сведения о ведущей организации

по защите диссертации 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» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15 – Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий

Полное наименование организации в соответствии с Уставом	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук
Сокращенное наименование организации в соответствии с Уставом	ИЗМИРАН
Ведомственная принадлежность	Минобрнауки России
Почтовый индекс, адрес организации	108840, Россия, г. Москва, г. Троицк, Калужское шоссе, д. 4
Телефон	Тел. (495)851-01-20
Адрес электронной почты	izmiran@izmiran.ru
Веб-сайт	https://www.izmiran.ru/

Список основных публикаций работников организации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет :

1. Дворников М.С. Evolution of Mirror Axion Solitons // P. M. Akhmetiev and M. S. Dvornikov, Theoretical and Mathematical Physics, 2025. – **225**. – 2017–2029.
2. Дворников М.С. Low mode approximation in the axion magnetohydrodynamics // M. S. Dvornikov, International Journal of Modern Physics D, 2025. – **00**. – 2541001.
3. Дворников М.С. Invariants of magnetic lines for Yang-Mills solutions // P. M. Akhmet'ev and M. S. Dvornikov, Journal of Geometry and Physics, 2024. – **198**. – 105102.
4. Абунина М.А ., Белов А.В ., Шлык Н.С., Абунин А.А ., Мелкумян А.А., Прямушкина И.И., Оленева В.А., Янке В.Г. Основные временные характеристики вариаций космических лучей и сопутствующих параметров в магнитных облаках // Геомагнетизм и аэрономия. 2024. - Т . 64. -№ 1. - С. 29-38.
5. Zirakashvili V.N., Ptuskin V.S., Rogovaya S.I. Contribution from nearby sources to the observed spectra and anisotropy of ultrahigh-energy cosmic rays // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2023. -Т. 87. -№ 7. -С. 890-892.
6. Zirakashvili V.N., Ptuskin V.S., Rogovaya S.I., Ultra high energy cosmic rays from past activity of Andromeda galaxy // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters. 2022. - Т. 519. - № 1. -С. LS-L9.
7. Дворников М.С. Impact of hypermagnetic fields on relic gravitational waves, neutrino oscillations and baryon asymmetry // International Journal of Modern Physics D, 2023. – **32**. – 2250141.
8. Дворников М.С. Interaction of inhomogeneous axions with magnetic fields in the early universe // Physics Letters B, 2022. – **829**. – 137039.
9. Дворников М.С. Gravitational waves generation in turbulent hypermagnetic fields before the electroweak phase transition // Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 2022. – **01**. – 021.
10. Дворников М.С. Influence of the hypermagnetic field noise on the baryon asymmetry generation in the symmetric phase of the early universe // M. Dvornikov and V. B. Semikoz, The European Physical Journal C: Particles and Fields, 2021. – **81**. – 1001.
11. Zirakashvili V.N., Ptuskin V.S., Rogovaya S.I., мGalactic origin of ultrahigh energy cosmic rays // Physical Review D. 2024. -Т. 110. -No. 2 - С. 023016.
12. Птускин В.С., Зиракашвили В.Н., О диффузии космических лучей с обратным влиянием на каскад магнитозвуковых волн в межзвездной среде// Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2021. - Т . 85. -№ 4. -С. 490-493.