



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
**ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

Адрес: ИЯИ РАН, проспект 60-летия Октября, 7а, Москва, 117312

Телефоны: 8(499) 135-77-60, 8(495) 850-42-01,

8 (495) 850-42-16, 8(916)139-29-97(общий отдел)

Факс: 8(499) 135-22-68, 8(495) 850-42-28

Электронная почта: inr@inr.ru; Интернет: www.inr.ru



УТВЕРЖДАЮ

Зам. директора ИЯИ РАН

А.Г.Панин

«26» марта 2024 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

Федерального бюджетного учреждения науки «Института ядерных исследований РАН»

на диссертацию Коновалова Алексея Михайловича

**«Обнаружение процесса упругого когерентного рассеяния нейтрино на атомном ядре
и определение его сечения на ядрах Cs и I»,**

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

Диссертация Коновалова Алексея Михайловича посвящена экспериментальному исследованию процесса упругого когерентного рассеяния нейтрино на ядре атома (УКРН) и определение его сечения на ядрах Cs и I. Актуальность работы определяется первым в мире наблюдением и измерением сечения данной реакции. Сложность экспериментальной регистрации упругого когерентного рассеяния нейтрино на ядре заключается в очень низкой энергии ядра отдачи менее 50 кэВ. В основе проведенных автором обработки и анализа данных детектора CsI[Na] лежат оптимизация отборов для выделения сигналов от УКРН и калибровка кристалла CsI[Na] нейтронным пучком для измерения *квенчинг фактора*, который является отношением светового выхода сцинтиллятора от ядра отдачи к световому выходу от электрона отдачи. Автор лично провел обработку и анализ данных, полученных в 2015-2019 годах, и получил экспериментальные распределения сигналов детектора CsI[Na], позволившие сделать заключение о первой регистрации процесса УКРН и измерить его сечение на ядрах атомов CsI. Достоверность полученных результатов подтверждается совпадением результатов параллельного анализа группы из США и группы из России, в которой ведущую роль играл автор диссертации.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав основного текста, заключения, библиографии из 194 наименований и пяти приложений. Полный объем диссертации составляет 169 страниц, включая 87 рисунков и 14 таблиц.

Во **введении** кратко описаны особенности процесса УКРН, которому посвящена диссертация,

Во **введении** кратко описаны особенности процесса УКРН, которому посвящена диссертация, обосновывается актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цели и задачи диссертации, научная новизна и практическая значимость работы, приведены основные положения, выносимые на защиту, отражен личный вклад автора в полученные результаты. Там же показана достоверность обнаружения эффекта УКРН в детекторе CsI[Na].

В **первой главе** описывается физика процесса УКРН и трудности его регистрации, хотя этот процесс был теоретически предсказан еще в 1974 году и он является доминирующим в области низких энергий нейтрино. Также описаны источники нейтрино, которые можно использовать для исследования УКРН, и приведен обзор перспективных экспериментов с описанием возможных технологий.

Вторая глава описывает коллаборацию COHERENT и ее экспериментальную программу. Изложен механизм образования нейтрино на ускорителе Spallation Neutron Source (SNS) и приведены энергетические и временные спектры мюонных и электронных нейтрино. Затем обсуждаются детекторы COHERENT для исследования УКРН и заряженного тока на различных ядрах, начиная от самых легких на основе детектора NaI[Tl], второй по массе ядра детектор на основе жидкого аргона, германиевых детекторов и CsI[Na] детектора.

Третья глава посвящена детектору CsI[Na]. Приведена схема детектора с окружающей его пассивной защитой от нейтронного фона из последовательных слоев воды, свинца, низкофонового свинца и полиэтилена высокой плотности. Для защиты от гамма фона детектор окружен панелями мюонного вето на основе пластического сцинтиллятора. Здесь также обсуждается схема электроники и система сбора данных. В последних двух параграфах обсуждается калибровка светового выхода кристалла CsI[Na] при помощи линии 59.5 кэВ ^{241}Am и комптоновского рассеяния гамма-квантов ^{133}Ba на малые углы.

В **четвертой главе** описывается анализ данных, полученных на SNS в 2015-2017 годах. Прежде всего обсуждаются временная привязка триггера установки, ограничения на качество данных и описаны критерии отбора для выделения событий УКРН. Также описана дополнительная калибровка с использованием нейтронного источника ^{252}Cf и по линиям ^{214}Pb для подтверждения проведенной ранее калибровки на ^{241}Am . Анализ разностных временных спектров и их интеграла позволил сделать вывод о первом в мире экспериментальном наблюдении процесса УКРН. Зарегистрированное количество событий УКРН 132 ± 22 согласуется с оценкой на основе Стандартной модели 152 ± 43 . Достоверность полученного результата составила 7.2σ .

Пятая глава посвящена измерению квенчинг фактора ядер отдачи в CsI[Na] в четырех измерениях COHERENT-1/2/3/4. В первых двух параграфах обсуждаются нейтронные пучки Triangle University Nuclear Laboratory, использовавшиеся для калибровок, и экспериментальные установки каждой из четырех калибровок. Далее описана калибровка энергетической шкалы кристалла CsI[Na] гамма-квантами 59.5 кэВ ^{241}Am и ее верификация по 57.6 кэВ гамма-линии от $^{127}\text{I}(n,n'\gamma)$. Был также проведен повторный анализ измерений COHERENT-1 и COHERENT-2 по причине расхождения их результатов. После анализа измерений COHERENT-3 и COHERENT-4 была проведена аппроксимация доступных данных и получена зависимость отклика CsI[Na] от энергии ядра отдачи.

В **шестой главе** приведены результаты измерения сечения УКРН на ядрах CsI, использующие полную экспозицию детектора в 2015-2019 годах. Вначале было проведено исследование систематических эффектов и рассмотрены изменения и коррекции, внесенные в процедуру анализа, по сравнению с первоначальным анализом данных 2015-2017 годов. В результате анализа полной статистики было зарегистрировано 306 ± 20 событий УКРН с достоверностью 11.6σ , что согласуется с оценкой 341 ± 43 Стандартной модели. Измеренное сечение УКРН, усредненное по энергии нейтрино от SNS и вкладу ядер Cs и I, составило $(165^{+30}_{-25}) \times 10^{-40} \text{ см}^2$, что согласуется с предсказанием Стандартной модели $(189 \pm 6) \times 10^{-40} \text{ см}^2$.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Приложения содержат детальное описание некоторых процедур анализа и калибровки.

Результаты диссертации были опубликованы в 4 статьях в рецензируемых журналах, рекомендуемых ВАК. Они были доложены на научных семинарах и международных конференциях.

Полученные результаты могут быть использованы при измерении электрослабого угла смешивания $\sin^2\theta_W$ в области переданного импульса порядка десятков МэВ, слабого ядерного форм-фактора и поиска стерильных нейтрино. Также возможно использование УКРН для мониторинга состава топлива ядерных реакторов.

В качестве **замечаний** можно отметить следующее:

- Процедура учета систематических ошибок описана не совсем ясно. Ошибки полученных экспериментальных результатов обычно представляются как сумма двух последовательных величин: статистической и систематической ошибок. В данной работе для зарегистрированного числа событий и сечения УКРН указана только одна ошибка, а в тексте описывается каким образом учтена систематика. В таблице 4.1 главы 4 достоверность зарегистрированного числа событий 7.2σ указана как полученная из статистического анализа. В то же время суммарный учет вклада систематических ошибок дает неопределенность теоретического предсказания 28%. Как видно из рисунка 6.17 главы 6, ошибка измерения сечения УКРН, скорее всего, является суммой статистической и систематической ошибок, хотя явно это не указано.

- На странице 66 для более ясного понимания процедуры статистического анализа было бы хорошо привести формулу для двумерной функции плотности вероятности (ФПВ).

- В подписи к рисунку 4.10 не указано, что закрашенные гистограммы являются предсказанием в рамках Стандартной модели.

- В подписи к рисунку 5.7 лучше заменить “штрихованной красной и синей линиями” на “штрихованной красной и сплошной синей линиями”.

- Во второй строке бокса статистики рисунка 4.4 ошибочно указано “295 кэВ амплитуда” вместо “242 кэВ амплитуда”.

Перечисленные замечания не влияют на общую высокую оценку диссертации, представляющей собой законченное исследование. Диссертационная работа Коновалова Алексея Михайловича «Обнаружение процесса упругого когерентного рассеяния нейтрино на атомном ядре и определение его сечения на ядрах Cs и I» выполнена в соответствии с критериями «Положения

о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года №842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Автореферат диссертации полностью отражает ее содержание. Автор диссертации несомненно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15 – Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий.

Отзыв составил старший научный сотрудник Отдела физики высоких энергий ИЯИ РАН, кандидат физико-математических наук Кравцов Владимир Иванович. Отзыв обсуждался и был утвержден на заседании научно-технического совета Отдела физики высоких энергий ИЯИ РАН.

Ученый секретарь Научно-технического совета
Отдела физики высоких энергий ИЯИ РАН,
старший научный сотрудник,
кандидат физ.-мат. наук

Хабибуллин М. М.

Старший научный сотрудник
Отдела физики высоких энергий ИЯИ РАН,
кандидат физ.-мат. наук

Кравцов В. И.

Подпись Кравцова Владимира Ивановича заверяю

Заведующая Отделом кадров ИЯИ РАН



Горшкова Е.А.

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН)
Адрес: ИЯИ РАН, проспект 60-летия Октября 7а, Москва 117312
Адрес электронной почты: inr@inr.ru

Список основных публикаций сотрудников ведущей организации Института ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН) по тематике диссертации Коновалова Алексея Михайловича «Обнаружение процесса упругого когерентного рассеяния нейтрино на атомном ядре и определение его сечения на ядрах Cs и I» в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

- 1) K. Abe, ..., M. Khabibullin, ... et al. (T2K Collaboration). Measurements of the ν_μ and $\bar{\nu}_\mu$ - induced coherent charged pion production cross sections on ^{12}C by the T2K experiment. *Phys.Rev.D* – 2023. – V. 108, No. 9. – P. 092009. – <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.108.092009> (arXiv: 2308.16606 [hep-ex]).
- 2) K. Abe, ..., M. Khabibullin, ... et al. (T2K Collaboration). Simultaneous measurement of the muon neutrino charged-current cross section on oxygen and carbon without pions in the final state at T2K. *Phys.Rev. D101* (2020) 11, 112004; DOI: 10.1103/PhysRevD.101.112004 (arXiv:2004.05434 [hep-ex]).
- 3) K. Abe, ..., M. Khabibullin, ... et al. (T2K Collaboration). Measurement of the charged-current electron (anti-)neutrino inclusive cross-sections at the T2K off-axis near detector ND280. *JHEP* 10 (2020) 114; DOI: 10.1007/JHEP10(2020)114 (arXiv:2002.11986 [hep-ex]).
- 4) K. Abe, ..., M. Khabibullin, ... et al. (T2K Collaboration). First combined measurement of the muon neutrino and antineutrino charged-current cross section without pions in the final state at T2K. *Phys.Rev. D101* (2020) 11, 112001; DOI: 10.1103/PhysRevD.101.112001 (arXiv:2002.09323 [hep-ex]).
- 5) K. Abe, ..., M. Khabibullin, ... et al. (T2K Collaboration). Search for electron antineutrino appearance in a long-baseline muon antineutrino beam. *Phys.Rev.Lett.* 124 (2020) 16, 161802; DOI: 10.1103/PhysRevLett.124.161802 (arXiv:1911.07283 [hep-ex]).
- 6) K. Abe, ..., M. Khabibullin, ... et al. (T2K Collaboration). Constraint on the matter–antimatter symmetry-violating phase in neutrino oscillations. *Nature* 580 (2020) 7803, 339-344, *Nature* 583 (2020) 7814, E16 (erratum). DOI: 10.1038/s41586-020-2177-0, 10.1038/s41586-020-2415-5 (erratum).
- 7) V.Kravtsov, V.Kurshetsov. INT- contribution to form factors of $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \gamma$ decay in ОКА experiment. *Physics of Atomic Nuclei*, 2023, Vol. 86, No. 5, pp. 775–781.
- 8) Поляруш А.Ю. и другие. Измерение T-нечетной корреляции в радиационном распаде $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu_e \gamma$ с помощью установки ОКА. *Письма в ЖЭТФ* 116 (2022) № 9-10, 586.
- 9) A.Yu.Polyarush et al. Study $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu \gamma$ decay with ОКА setup. *Eur.Phys.J.C* 81 (2021) 2, 161.
- 10) В.С.Буртовой и другие. Когерентное образование $K^+ \pi^0$ – системы на ядрах меди в пучке заряженных каонов на установке ОКА. *ЖЭТФ* 158 (2020) вып. 6 (12), 1070, *J.Exp.Theor.Phys.* 131 (2020) 6, 928.
- 11) V.I.Kravtsov et al. Measurement of the $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \gamma$ decay form factors in the ОКА experiment. *Eur.Phys.J.* C79 (2019) no.7, 635.
- 12) М.М.Шапкин et al. Study of the decay $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+ \gamma$ in the ОКА experiment. *Eur.Phys.J.* C79 (2019) no.4, 296.