

Минобрнауки России

«УТВЕРЖДАЮ»

**Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки**

**ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
им. Г.И. Будкера
Сибирского отделения Российской академии
наук
(ИЯФ СО РАН)**

ВРИО Директора Федерального
государственного бюджетного учреждения
науки Института ядерной физики им. Г. И.
Будкера Сибирского отделения
Российской академии наук

доктор физико-математических наук,
Логашенко Иван Борисович

**Проспект ак. Лаврентьева, д. 11, г.
Новосибирск, 630090
телефон: (383) 329-47-60, факс: (383) 330-71-63
<http://www.inp.nsk.su>, e-mail: inp@inp.nsk.su
ОКПО 03533872 ОГРН 1025403658136
ИНН/КПП 5408105577 / 540801001**

« 26 » мая 2025 г.

от 26 май 2025 № 15311 – 39/11-38/1338

на № _____ от _____

О направлении отзыва на диссертацию

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

**Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения
Российской академии наук (ИЯФ СО РАН)
на диссертацию**

**Дергачевой Анны Евгеньевны
«Разработка и создание 3D сегментированного сцинтилляционного
детектора нейтрино СуперFGD»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности 1.3.2. Приборы и методы
экспериментальной физики.**

Диссертация Дергачевой Анны Евгеньевны, выполненная в
Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте
ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН), посвящена
разработке, созданию и первым измерениям с мюонными нейтрино 3D

сегментированного сцинтилляционного детектора СуперFGD (Супер Fine-Grained Detector), который является ключевым элементом модернизированного комплекса ближних детекторов ND280 в эксперименте с длинной базой T2K (Япония).

Актуальность темы исследования

В настоящее время эксперимент T2K нацелен на поиск CP-нарушения в нейтринных осцилляциях и измерение CP-нечетной фазы δ_{CP} . Явление нейтринных осцилляций, в основе которых лежит механизм смешивания нейтрино трех ароматов, представляет особый интерес в качестве нового источника CP-нарушения для объяснения такого актуального вопроса физики высоких энергий, как барионная асимметрия Вселенной, через механизм лептогенезиса в случае отличного от нуля $\sin \delta_{CP}$.

Для повышения чувствительности T2K к CP-нарушению необходимо снизить систематические погрешности осцилляционного анализа, связанные с сечениями взаимодействия нейтрино, что послужило мотивацией к запуску проекта по модернизации ближнего детектора ND280 эксперимента T2K. Создание нового 3D сегментированного сцинтилляционного детектора нейтрино для эксперимента T2K позволит улучшить точность определения параметров CP-смешивания почти в 2 раза, что делает ее особенно актуальной.

Научная новизна

3D сегментированный детектор нейтрино СуперFGD, описываемый автором, является принципиально новым нейтринным детектором для ускорительных осцилляционных экспериментов. Высокая гранулированность полностью активной трехмерной структуры позволяет с высокой точностью измерять спектр и состав нейтринного пучка. Использование этого детектора в качестве ближнего нейтринного детектора эксперимента T2K позволяет существенно уменьшить систематические погрешности и улучшить точность измерения параметров осцилляции нейтрино.

Впервые были зарегистрированы взаимодействия мюонных нейтрино в 3D сегментированном сцинтилляционном детекторе СуперFGD, установленном на нейтринном канале T2K в J-PARC и восстановлены треки вторичных мюонов и протонов, рожденных от нейтринных взаимодействий в полном телесном угле.

Оценка содержания диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи работы, описаны методы исследования, научная новизна, практическая и теоретическая значимость, приведены положения, выносимые на защиту, личный вклад автора и данные об апробации работы.

Первая глава посвящена истории открытия и феноменологии осцилляций нейтрино с отдельно рассмотренным случаем смешивания нейтрино двух типов в вакууме. Обобщены результаты экспериментов, нацеленных на поиск осцилляций нейтрино и измерение параметров смешивания, полученные в экспериментах с солнечными, атмосферными, реакторными и ускорительными нейтрино.

Вторая глава посвящена описанию эксперимента T2K и его основных элементов, также выделены преимущества используемой в эксперименте концепции внеосевого пучка нейтрино. Приведены последние ограничения T2K для параметров осцилляций θ_{23} и Δm^2_{23} , описывающих осцилляции атмосферных нейтрино, $\sin^2 2\theta_{13}$ и Δm^2_{13} , характеризующие осцилляции в реакторных экспериментах и CP-нечетной фазы δ_{CP} . Представлены результаты T2K по измерению сечений взаимодействия нейтрино и ограничение на параметр $\sin^2 \theta_{24}$ для модели “3+1” с легким стерильным нейтрино.

Третья глава посвящена физической мотивации создания детектора СуперFGD в рамках программы модернизации ND280. Рассмотрены новые возможности конфигурации детекторов в модернизированном ND280 по сравнению с его предыдущей версией. Приведен состав и параметры кубических сцинтилляторов СуперFGD, изготовленных компанией “Унипласт” (г.Владимир, Россия). Показаны результаты тестов сцинтилляционных элементов СуперFGD с космическими мюонами с короткими спектросмещающими волокнами длиной 35 см.

В четвертой главе представлены результаты измерений основных параметров кубических сцинтилляторов СуперFGD: световой выход, временное разрешение и световые наводки между соседними кубическими сцинтилляторами. Результаты получены с использованием данных тестов

прототипов СуперFGD на пучках заряженных частиц в ЦЕРН. Описана считывающая электроника и методы ее калибровки. Представлены алгоритмы восстановления треков мюонов и протонов в прототипе СуперFGD, состоящем из ~10000 сцинтилляционных элементов. Приведены результаты измерений сечения взаимодействия нейтронов на углеводороде в тестах прототипов СуперFGD на пучках нейтронов в LANL.

В пятой главе описаны этапы работ по монтажу детектора СуперFGD, а также его основные компоненты: механический контейнер, печатные платы с микропиксельными счетчиками фотонов, оптические волокна со сдвигом длины волны, система калибровки на основе световодной пластины и считывающая электроника на основе чипа CITIROC. Показан детектор СуперFGD, установленный в магнит ND280 и подготовленный к запуску в работу на нейтринном канале T2K в J-PARC.

Шестая глава посвящена регистрации первых взаимодействий мюонных нейтрино в детекторе СуперFGD, установленном на нейтринном канале T2K в J-PARC в составе ближнего детектора ND280. Представлены результаты по измерению световыхода в центральном объеме СуперFGD $20 \times 20 \times 56 \text{ см}^3$ с использованием восстановленных треков космических мюонов. Показаны результаты по измерению световыхода в точке остановки космических мюонов и протонов, образованных по реакции квазиупругого рассеяния мюонных нейтрино в веществе детектора через заряженный ток.

В заключении представлены результаты и выводы диссертационной работы.

Достоверность и обоснованность результатов

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждается измерениями проведенными на тестовых пучках заряженных частиц в ЦЕРН и на пучке нейтронов в LANL, согласием параметров сигналов наблюдаемых на тестовых пучках с предварительными измерениями. Так же результаты работы представлялись на международных конференциях и опубликованы в ведущих реферируемых журналах.

Личный вклад автора

Установки для современных экспериментов в физике высоких энергий не могут быть созданы одним человеком, а требуют участия большого количества специалистов. Однако из текста диссертации и опубликованных работ видно, что результаты, выносимые на защиту, получены автором

лично, либо при его непосредственном активном участии.

Работа не лишена некоторых недостатков:

1. В работе описана конструкция детектора СуперFGD, однако не приводится объяснения почему выбран размер кубика 1 см^3 .
2. В нескольких местах диссертации приводится величина среднего измеренного световыхода, но для характеристики качества счетчиков важно приводить и величину разброса индивидуальных значений.
3. Величины среднего световыхода, полученные при тестах сцинтилляционных элементов (44.1 ф.э./волокно), на тестовом пучке (41 ф.э./волокно) и на детекторе (33 ф.э./волокно) – различаются и не приводится объяснение причин этого отличия.
4. На рисунке 4.37 в зависимости среднего световыхода от координаты вдоль трека наблюдается заметная нерегулярность и не приводятся причины ее возникновения.
5. На рисунках 4.32, 4.33, 4.34 в распределении энергии по X наблюдаются провалы и нет объяснения причин их возникновения.
6. В диссертации используются жаргоны «crosstalk», «солнечные параметры смешивания», «атмосферные параметры смешивания», «реакторные параметры смешивания».
7. В диссертации имеется ряд неточностей. Так в формуле 1.8 опущен множитель с общей фазой, на рисунках 3.7, 3.9 приведенные ошибки явно нестатистические, на стр.75 приведена ссылка на рисунок 4.3 вместо 4.16.

Однако, отмеченные замечания не снижают научную значимость и практическую ценность работы.

Заключение

Диссертация А.Е. Дергачевой «Разработка и создание 3D сегментированного сцинтилляционного детектора нейтрино СуперFGD» представляет собой завершенную научно-квалификационную работу. Отмеченные недостатки не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы и не снижают ее научной ценности. Диссертационная работа основана на результатах, представленных в виде устных докладов на всероссийских и международных конференциях, и опубликованных в научных изданиях, индексируются базами данных Web of Science и/или Scopus. Текст диссертации написан грамотным языком и содержит достаточное количество иллюстративного материала. Автореферат полно и правильно отражает содержание диссертации. Тема и содержание

диссертации соответствуют паспорту специальности 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики.

Диссертация А.Е. Дергачевой «Разработка и создание 3D сегментированного сцинтилляционного детектора нейтрино СуперFGD» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук полностью удовлетворяет всем требованиям и критериям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Дергачева Анна Евгеньевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики.

Диссертация А.Е. Дергачевой заслушана на семинаре Лаборатории 3-3 ИЯФ СО РАН 23 мая 2025 г.. Отзыв на диссертацию рассмотрен и одобрен на заседании Ученого Совета ИЯФ СО РАН 26 мая 2025 г., протокол №20.

Отзыв составил:

доктор физико-математических наук
по специальности 01.04.16 — Физика атомного ядра и элементарных частиц,
главный научный сотрудник Лаборатории 3-3 Федерального
государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики
им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук (ИЯФ СО
РАН)

Кузьмин Александр Степанович

Тел. 8 (913) 016-75-80,

адрес электронной почты: a.s.kuzmin@inp.nsk.su

« 26 » мая 2025 г.

_____ А.С. Кузьмин

Подпись Кузьмина Александра Степановича удостоверяю:

Ученый секретарь ИЯФ СО РАН

кандидат физико-математических наук

_____ Резниченко Алексей Викторович

телефон (383) 329-47-99

электронная почта: A.V.Reznichenko@inp.nsk.su

Сведения о ведущей организации

Полное наименование организации в соответствии с Уставом	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук
Сокращенное наименование организации в соответствии с Уставом	ИЯФ СО РАН
Ведомственная принадлежность	Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Почтовый индекс, адрес организации	630090, Российская Федерация, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 11.
Телефон	+7 (383) 329-47-60 факс: (383) 330-71-63
Адрес электронной почты	inp@inp.nsk.su
Веб-сайт	https://www.inp.nsk.su

Список основных публикаций работников организации по теме диссертации соискателя в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. A. Y. Barnyakov, V. S. Bobrovnikov, A. R. Buzykaev, A. V. Chepelev, A. F. Danilyuk, R. A. Efremov, A. A. Katcin, E. A. Kravchenko, I. A. Kuyanov, I. V. Ovtin, K. G. Petrukhin, et al. Status and R&D of ASHIPH-SiPM option for PID// International Journal of Modern Physics A, 2024. — 39(26n27). — 2442005.
2. A. Y. Barnyakov, V. S. Bobrovnikov, A. R. Buzykaev, A. V. Chepelev, A. F. Danilyuk, R. A. Efremov, A. A. Katcin, E. A. Kravchenko, I. A. Kuyanov, I. V. Ovtin, K. G. Petrukhin, V.V. Porosev, et al. R&D status of FARICH option for PID// International Journal of Modern Physics A, 2024. — 39(26n27). — 2442012.
3. N.S. Kremnev, M.I. Bryzgunov, A.V. Bubley, V.M. Konstantinov, V.Ya. Korchagin, V.B. Reva, S.I. Ruvinsky, V.M. Panasyuk, V.V. Parkhomchuk, S.P. Pospolita, A.A. Putmakov, S.V. Shiyankov.

- Magnetic System Design of High-Voltage Electron Cooling System for the NICA Collider// *Physics of Particles and Nuclei Letters*, 2024. — 21. — 284-290.
4. I.Yu. Basok, V.S. Bobrovnikov, A.V. Bykov, D.A. Kyshtymov, V.G. Prisekin, K.Yu. Todyshev. The spatial resolution measurements on the small prototype of the Super Charm-Tau Factory drift chamber// *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2024. — 1064. — 169419.
5. A. Barnyakov, V. Bobrovnikov, S. Kononov, D. Kyshtymov, D. Maksimov, G. Razuvaev, A. Sukharev, K. Todyshev, V. Vorobyev, A. Zhadan, D. Zhadan, et al. Fast Simulation for the Super Charm-Tau Factory Detector// *Computing and Software for Big Science*, 2024. — 8(1). — 1.
6. М.Н. Ачасов, В.Е. Блинов, А.В. Бобров, Д.А. Бодров, А.Е. Бондарь, В.С. Воробьев, В.П. Дружинин, Д.А. Епифанов, А.С. Кузмин, И.Б. Логашенко, Д.В. Матвиенко и др. Эксперименты на Супер чарм-тау фабрике// *Успехи физических наук*, 2024. — 194(1). — 60-76.
7. A.A. Korol, M.N. Achasov, A.Yu. Barnyakov, K.I. Beloborodov, A.V. Berdyugin, A.G. Bogdanchikov, A.A. Botov, T.V. Dimova, V.P. Druzhinin, L.V. Kardapoltsev, A.G. Kharlamov, D.P. Kovrizhin, A.S. Kupich, N.A. Melnikova, A.E. Obrazovsky, E.V. Pakhtusova, K.V. Pugachev, S.I. Serednyakov, D.A. Shtol, Z.K. Silagadze, I.K. Surin, Yu. V. Usov, V.N. Zabin. Recent SND experiment results on e^+e^- annihilation to hadrons// *International Journal of Modern Physics: Conference Series*, 2023. — 51. — 2361005.
8. A.Yu. Barnyakov, V.S. Bobrovnikov, S.A. Kononov, M.V. Chadeeva, et al. Calibration and Reconstruction Algorithm for FARICH System of the Detector at Super Charm-Tau Factory// *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, 2023. — 50. — 534-539.
9. A. Garmash, A.L. Ivanova, E. Kravchenko, A. Sokolov, et al. Status of the TAIGA Experiment: Gamma Astronomy// *Physics of Atomic Nuclei*, 2023. — 86(9). — 2096-2102.
10. A. Garmash, E. Kravchenko, et al. The Tunka-Grande scintillation array: Current results// *SciPost Physics Proceedings*, 2023. — 13. — 011. 11.
- A. Garmash, A.L. Ivanova, E. Kravchenko, A. Sokolov, A. Vaidyanathan, et al (TAIGA Collaboration). Optimisation studies of the TAIGA-Muon scintillation detector array// *Journal of Instrumentation*, 2022. — 17(06). — P06022. 12. A.
- A. Garmash, A.L. Ivanova, E. Kravchenko, A. Sokolov, A. Vaidyanathan, V. Vorobyov, et al (TAIGA Collaboration). Identification of electromagnetic and hadronic EASs using neural network for TAIGA scintillation detector array// *Journal of Instrumentation*, 2022. — 17(05). — P05023.
13. V. Oleynikov, et al. The Recoil Directionality (ReD) Experiment// *Journal of Physics: Conference Series*, 2022. — 2374. — 012162. 14.
- A. Bondar, E. Borisova, A. Buzulutskov, E. Frolov, V. Oleynikov, A. Sokolov, et al (DarkSide 20k Collaboration). Sensitivity of future liquid argon dark matter search experiments to core-collapse supernova neutrinos// *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2021. — JCAP03. — 043.
15. V.V. Zhulanov, A.S. Kuzmin, D.V. Matvienko, M.A. Remnev, Yu. V. Usov. Data Acquisition System for the Calorimeter of the Belle II Detector// *Physics of Atomic Nuclei*, 2021. — 84. — 42-44.