

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 **19.06.2025** г. № **30/8**

О присуждении **Дергачевой Анне Евгеньевне**, гражданке Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Разработка и создание 3D сегментированного сцинтилляционного детектора нейтрино СуперFGD» по специальности 1.3.2 — «Приборы и методы экспериментальной физики» принята к защите 13.02.2025 г., протокол № 24/2 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 Дергачева Анна Евгеньевна 1995 года рождения. В 2019 году соискатель с отличием освоила программу магистратуры Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» по направлению подготовки 14.04.02 — Ядерные физика и технологии (диплом № 107704 0259375, выдан 04.07.2019 г.). В 2023 г. окончила аспирантуру Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН) по направлению подготовки 03.06.01 – «Физика и астрономия», по специальности 1.3.2 – «Приборы и методы экспериментальной физики» (свидетельство № 2699122 11-07-969). В настоящее время работает в должности младшего научного сотрудника отдела физики высоких энергий Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук.

Диссертация выполнена в отделе физики высоких энергий Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор (член-корреспондент РАН с 30.05.2025 г.), **Куденко Юрий Григорьевич**, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН), отдел физики высоких энергий, главный научный сотрудник, заведующий отделом физики высоких энергий и лабораторией физики электрослабых взаимодействий отдела физики высоких энергий.

Официальные оппоненты:

Соколов Анатолий Александрович, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение "Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова Национального исследовательского центра "Курчатовский институт" (НИЦ "Курчатовский институт" - ИФВЭ), отделение экспериментальной физики, ведущий научный сотрудник,

Литвинович Евгений Александрович, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение "Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт" (НИЦ "Курчатовский институт"), отделение физики нейтрино, ведущий научный сотрудник, **дали положительные отзывы** на диссертацию.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук (ИЯФ СО РАН) (г. Новосибирск), в своем **положительном заключении**, подписанном Кузьминым Александром Степановичем, доктором физико-математических наук, главным научным сотрудником Лаборатории 3-3 ИЯФ СО РАН, и утвержденном вр.и.о. директора ИЯФ СО РАН, доктором физико-математических наук, членом-корреспондентом РАН, Логашенко Иваном Борисовичем, указала, что работа 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.

Соискатель имеет 7 работ по теме диссертации, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК.

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

Список работ по результатам диссертационного исследования:

1. Scintillator cubes for 3D neutrino detector SuperFGD / S. Fedotov, A. Dergacheva, A. Filik, M. Khabibullin, A. Khotjantsev, Yu. Kudenko, O. Mineev, N. Yershov // J. Phys. Conf. Ser. — 2022. — Vol. 2374, no. 1. — P. 012106.
2. 3D SuperFGD detector for the T2K experiment / A. Dergacheva, A. Khotjantsev, Y. Kudenko, A. Mefodiev // Nucl. Instrum. Meth. A. — 2022. — Vol. 1041. — P. 167219.
3. SuperFGD prototype time resolution studies / I. Alekseev, T. Arihara, V. Baranov, L. Bartoszek, L. Bernardi, A. Blondel, A.V. Boikov, M. Buizza-Avanzini, F. Cadoux, J. Capó, J. Cayo, J. Chakrani, P.S. Chong, A. Chvirova, M. Danilov, Yu.I. Davydov, A. Dergacheva, N. Dokania, D. Douqa, O. Drapier, A. Eguchi, Y. Favre, D. Fedorova, S. Fedotov, Y. Fujii, F. Gastaldi, A. Gendotti, V. Glagolev, R. Guillaumat, K. Iwamoto, M. Jakkapu, C. Jesu's-Valls, C.K. Jung, H. Kakuno, S.P. Kasetti, M. Khabibullin, A. Khotjantsev, H. Kikutani, T. Kobayashi, S. Kodama, A. Korzenev, U. Kose, Y. Kudenko, T. Kutter, D. Last, B. Li, Z. Li, L.S. Lin, S. Lin, M. Louzir, T. Lux, L. Maret, S. Martynenko, T. Matsubara, C. Mauger, C. McGrew, A. Mefodiev, O. Mineev, T. Nakadaira, K. Nakagiri, J. Nanni, L. Nicola, E. Noah, V. Paolone, S. Parsa, R. Pellegrino, M.A. Ramirez, M. Reh, C. Ricco, A. Rubbia, K. Sakashita, F. Sanchez, D. Sgalaberna, A. Shvartsman, N. Skrobova, I.A. Suslov, S. Suvorov, D. Svirida, A. Teklu, V.V. Tereshchenko, M. Tzanov, I.I. Vasilyev, K. Wood, G. Yang, N.Yershov, M. Yokoyama, Y. Yoshimoto, X. Zhao,

- P. Zilberman, E. D. Zimmerman // Journal of Instrumentation. — 2023. — Vol. 18, no. 1. — P01012.
4. Total neutron cross-section measurement on CH with a novel 3D-projection scintillator detector / A. Agarwal, H. Budd, J. Capo, J. Chaves, P. Chong, G. Christodoulou, M. Danilov, A. Dergacheva, A. De Roeck, N. Dokania, D. Douqa, K. Dugas, S. Fedotov, S. Gwon, R. Howell, K. Iwamoto, C. Jesus-Valls, C. K. Jung, S. P. Kasetti, M. Khabibullin, A. Khotjantsev, T. Kikawa, U. Kose, Y. Kudenko, S. Kuribayashi, T. Kutter, D. Last, S. Lin, T. Lux, S. Manly, D. A. Martinez Caicedo, S. Martynenko, T. Matsubara, C. Mauger, K. McFarland, C. McGrew, A. Mefodiev, O. Mineev, T. Nakadaira, E. Noah, A. Olivier, V. Paolone, S. Palestini, A. Paul-Torres, M. A. Ramirez, C. Riccio, J. Rodriguez Rondon, F. Sanchez, D. Sgalaberna, W. Shorrock, A. Sitraka, K. Siyeon, N. Skrobova, S. Suvorov, A. Teklu, M. Tzanov, Y. Uchida, C. Wret, G. Yang, N. Yershov, M. Yokoyama, P. Zilberman // Phys. Lett. B. — 2023. — Vol. 840. — P. 137843.
 5. Current status of the novel 3D SuperFGD detector for the T2K experiment/ A. Dergacheva, D. Chernov, A. Chvirova, G. Erofeev, D. Fedorova, S. Fedotov, M. Khabibullin, A. Khotjantsev, Y. Kudenko, A. Mefodiev, O. Mineev, N. Yershov // Physics (Switzerland). — 2023. — Vol. 5, no. 3. — Pp. 690–703.
 6. Новый высокосегментированный нейтринный детектор SuperFGD для эксперимента T2K / С.А. Федотов, А.Е. Дергачева, Н.В. Ершов, Ю.Г. Куденко, А.В. Мефодьев, О.В. Минеев, Д.В. Федорова, М.М. Хабибуллин, А.Н. Хотянцев, А.А. Чвирова // Ученые записки физического факультета Московского университета. — 2023. — Т. 2. — С. 2320205.
 7. Ближний нейтринный детектор SuperFGD эксперимента T2K / А.Е. Дергачева, М.А. Колупанова, А.В. Мефодьев, Ю.Г. Куденко, А.Н. Хотянцев, Д.В. Федорова, С.А. Федотов, А.А. Чвирова, А.С. Шварцман // Физика элементарных частиц и атомного ядра (ЭЧАЯ). — 2025. — Т. 56, вып. 3.

Автореферат полно и правильно отражает содержание диссертации.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы оппонентов и ведущей организации, в которых отмечено, что диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу и 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.

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:

- В Главе 4 (раздел 4.2.3) достаточно подробно описан алгоритм восстановления треков мюонов и остановившихся протонов в прототипе СуперFGD. Однако, не показана эффективность применения такого алгоритма к восстановлению треков. В диссертации не упомянуто, сколько треков было отобрано с использованием мюонного/адронного триггера.

- В детекторе СуперFGD прямые треки космических мюонов были восстановлены только в центральном объеме (раздел 6.1). В диссертации не обсуждается, с чем связано такое ограничение.

- На рисунке 6.7 показан восстановленный в трех плоскостях трек остановившегося космического мюона (Рис. 6.7). В работе не объясняется причина отсутствия на рисунке электрона, образовавшегося при распаде этого мюона, а также не сказано, наблюдаются ли такие события в детекторе.

- Было бы интересно провести измерение коэффициента Биркса в детекторе СуперFGD с использованием треков остановившихся протонов (раздел 6.5).

- При обсуждении экспериментальных исследований, направленных на поиск и изучение параметров нейтринных осцилляций (Глава 1), напрашивается рассмотрение ускорительных экспериментов не только с длинной, но и с короткой базой, среди которых важнейшие результаты по изучению переходов $\tilde{\nu}_\mu \rightarrow \tilde{\nu}_e$ были получены в эксперименте LSND.

- На рис. 3.2 (стр. 53) представлена полученная при помощи моделирования методами Монте-Карло эффективность восстановления мюонных треков до и после модернизации ND280. Было бы интересно посмотреть на результаты измерений эффективности, полученные не на модельных, а на реальных данных ND280.

- На стр. 57-60 идет речь о внесении поправок на температуру при измерении световыхода во время контроля качества произвольной выборки кубиков из разных партий. В диссертации не сказано, осуществляется ли контроль температуры и коррекция измеренной энергии в оригинальном СуперFGD.

- В работе измерена оптическая связь (crosstalk) между кубическими сцинтилляторами СуперFGD (стр. 77-78, 98). Не приведена ее зависимость от энерговыделения в кубике.

- В разделе 4.3 (стр. 98-99) идет речь о восстановлении начальной энергии нейтрона, образующегося в антинейтринных взаимодействиях, методом времени пролета; делается вывод о способности СуперFGD к детектированию нейтронов. Материал этого раздела изложен не вполне ясно. Так, не описано, какой вид имеет зависимость разности $t_2 - t_1$ от энергии нейтрона, а также была ли она измерена. Не ясно, на каком из двух прототипов измерено полное сечение взаимодействия нейтронов на углеводородах и следует ли из измерений, проведенных на прототипах детектора, способность СуперFGD измерять начальную энергию нейтрона.

- В работе имеется небольшое количество англицизмов и жаргонных выражений: crosstalk, pedestal, wave-форма, «солнечные параметры смешивания», «атмосферные параметры смешивания», «реакторные параметры смешивания». Также имеется ряд неточностей:

- На стр. 50: «Таким образом, мы ожидаем достичь снижения ошибок осцилляционного анализа с 3-4% до 6-7% в эксперименте T2K». Имеется в виду с 6-7 до 3-4%.

- На стр. 57: «Установка, схема которой показана на Рисунке 4.1...». Вероятно, имеется ввиду рисунок 3.5.

- На стр. 129: должно быть в феврале 2024 года, а не 2023-го.

- 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.

- В работе описана конструкция детектора СуперFGD, однако не приводится объяснения почему выбран размер кубика 1 см^3 .

- В нескольких местах диссертации приводится величина среднего измеренного световыхода, но для характеристики качества счетчиков важно приводить и величину разброса индивидуальных значений.

- 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.

- На рисунке 4.37 в зависимости среднего световыхода от координаты вдоль трека наблюдается заметная нерегулярность и не приводятся причины ее возникновения.

- На рисунках 4.32, 4.33, 4.34 в распределении энергии по X наблюдаются провалы и нет объяснения причин их возникновения.

Текст диссертации написан грамотным языком и содержит достаточное количество иллюстративного материала. Отмеченные замечания не снижают научную значимость и практическую ценность работы, а также не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы. Соискатель Дергачева А.Е. ответила на заданные в ходе защиты вопросы и высказанные замечания.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- Разработан алгоритм измерения светового выхода кубических сцинтилляторов и выполнен контроль за его стабильностью в процессе изготовления с использованием данных, полученных в тестах на стенде из 24 сцинтилляционных элементов с короткими спектросмещающими волокнами.

- Выполнены измерения и анализ основных параметров кубических сцинтилляторов СуперFGD: световой выход, временное разрешение и оптическая связь с использованием данных, полученных в тестах двух прототипов СуперFGD на пучках заряженных частиц в ЦЕРН.

- Разработан алгоритм восстановления треков мюонов с импульсом 2 ГэВ/с и треков остановившихся протонов с импульсом 0.8 ГэВ/с в магнитном поле 0.2 Тл на основе данных, полученных в тестах прототипа СуперFGD, состоящего из ~10000 сцинтилляционных элементов объемом 1 см³ каждый. Измерен

световыход релятивистских мюонов и остановившихся протонов в кубических сцинтилляторах.

- Выполнена сборка из $\sim 2 \times 10^6$ кубических сцинтилляторов, объемом 1 см^3 каждый, в сегментированный детектор СуперFGD объемом $\sim 200 \times 200 \times 60 \text{ см}^3$ со спектросмещающими волокнами и микропиксельными лавинными фотодиодами в количестве ~ 56000 . Выполнен монтаж детектора в магните ND280 и запуск в работу на нейтринном канале T2K для набора статистики на пучке мюонных нейтрино.

- Восстановлены треки космических мюонов, в том числе остановившихся, в детекторе СуперFGD. Выполнены измерения и анализ параметров сцинтилляционных элементов СуперFGD с использованием космических мюонов: средний световыход и временное разрешение.

- Зарегистрированы взаимодействия мюонных нейтрино в детекторе СуперFGD в измерениях с нейтринным пучком T2K в первом сеансе в 2024 году.

- Восстановлены треки вторичных частиц: мюонов и остановившихся протонов, образованных в результате квазиупругого рассеяния мюонных нейтрино через заряженный ток в полной конфигурации СуперFGD. Измерены световыход вдоль треков остановившихся протонов и средний световыход в точке остановки протонов.

Теоретическая и практическая значимость исследования обоснована тем, что:

- Технология изготовления кубических сцинтилляторов, разработанная для создания детектора СуперFGD, а также уникальный метод их сборки в изотропную структуру, обеспечивающую 3D считывание сигнала с каждого из $\sim 2 \times 10^6$ сцинтилляционного элемента, представляет собой практическую значимость для методики эксперимента, разработки и создания новых детекторов в области нейтринной физики.

- Детектор СуперFGD в составе модернизированного ND280 способен обеспечить полный телесный угол для регистрации заряженных частиц от нейтринных взаимодействий, регистрацию коротких треков протонов и пионов, детектирование нейтронов от антинейтринных взаимодействий, а также

идентификацию электронов и гамма-квантов. Таким образом, СуперFGD представляет собой практическую ценность при использовании его в качестве нейтринной мишени в ближнем детекторе ND280 эксперимента T2K.

- Теоретическая значимость использования детектора СуперFGD в составе модернизированного ND280 состоит в том, что снижение систематических погрешностей осцилляционного анализа в эксперименте T2K, а также в будущем проекте Гипер-Камиоканде, позволит повысить чувствительность эксперимента к поиску CP-нарушения и к CP-нечетной фазе, измерить сечения нейтринных взаимодействий через заряженные и нейтральные токи, а также повысить точность измерения осцилляционных параметров в области атмосферных нейтрино.

Научная новизна заключается в том, что:

- Разработанный и созданный 3D сегментированный детектор нейтрино СуперFGD является принципиально новым ближним нейтринным детектором для ускорительных осцилляционных экспериментов с длинной базой за счет его полностью активной трехмерной структуры, созданной на основе $\sim 2 \times 10^6$ кубических сцинтилляторов объемом 1 см^3 с тремя ортогональными отверстиями, что позволяет выполнять считывание сигнала с каждого сцинтиллятора в трех направлениях посредством спектросмещающих оптоволокон.
- Детектор СуперFGD является центральным детектором модернизированного комплекса ND280 эксперимента T2K и позволяет:
 - повысить точность измерения спектра и состава нейтринного пучка до осцилляций;
 - повысить точность измерения сечений мюонных и электронных нейтрино и антинейтрино;
 - существенно уменьшить систематические погрешности и повысить чувствительность к CP-нарушению в нейтринных осцилляциях, а также повысить точность измерения осцилляционных параметров.
- Впервые зарегистрированы взаимодействия мюонных нейтрино в полностью активном 3D сегментированном сцинтилляционном детекторе

СуперFGD, установленном и запущенном в работу на нейтринном канале T2K в J-PARC. Восстановлены треки вторичных заряженных частиц, а именно мюонов и протонов, рожденных от нейтринных взаимодействий в полном телесном угле.

Оценка достоверности результатов выявила:

- Параметры кубических сцинтилляторов, измеренные в тестах двух прототипов на пучках заряженных частиц в ЦЕРН, обеспечивают возможность регистрации мюонных нейтрино в СуперFGD с использованием восстановленных треков мюонов и остановившихся протонов.
- Результаты тестов прототипов СуперFGD на пучке нейтронов в LANL (США) показывают способность СуперFGD к регистрации и восстановлению энергии нейтронов от взаимодействий мюонных антинейтрино в детекторе.
- Восстановленные в СуперFGD треки мюонов и протонов, образованные в результате взаимодействий мюонных нейтрино через заряженный ток, подтверждают возможность использования разработанного и созданного детектора в качестве нейтринной мишени в модернизированном ND280 эксперимента T2K.
- Результаты диссертационной работы были представлены в виде устных докладов на всероссийских и международных конференциях и опубликованы в научных изданиях, индексируемых базами данных Web of Science и/или Scopus.

Все результаты, выносимые на защиту, получены автором лично, либо при его непосредственном участии.

На заседании 19 июня 2025 года диссертационный совет принял решение присудить Дергачевой Анне Евгеньевне ученую степень кандидата физико-математических наук за вклад в разработку и создание нового 3D сегментированного детектора нейтрино СуперFGD, а именно за разработку алгоритмов измерения параметров кубических сцинтилляторов СуперFGD и методов восстановления взаимодействий мюонных нейтрино в детекторе СуперFGD, установленном на нейтринном канале T2K.

При проведении тайного голосования, диссертационный совет в количестве **21** человека, из них **9** докторов наук по специальности 1.3.2 — Приборы и

методы экспериментальной физики, участвовавших в заседании, из **27** человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту **0** человек, проголосовали: за – **21**, 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.

19.06.2025 г.

М.П.