

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента Литвиновича Евгения Александровича 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 нейтринного ускорительного эксперимента с длинной базой T2K.

### **Актуальность темы исследования**

3D сегментированный сцинтилляционный детектор СуперFGD, представляющий собой полностью активную мишень для нейтринных взаимодействий, разработан, создан и запущен в работу на нейтринном канале T2K в J-PARC в рамках программы модернизации ближнего детектора ND280. Модернизация направлена на повышение чувствительности T2K к CP-нечетной фазе за счет снижения систематических погрешностей осцилляционного анализа, обусловленных сечениями взаимодействия нейтрино с нуклонами и легкими ядрами. Поиск CP-нарушения в нейтринном секторе является на данный момент несомненно актуальной задачей для объяснения такого фундаментального явления, как барионная асимметрия Вселенной.

### **Практическая значимость**

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 ~2 млн. сцинтилляционных элементов, имеют практическую значимость для методики ядерно-физического 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 несет в себе несомненную практическую ценность при его использовании в качестве нейтринной мишени в ближнем детекторе ND280 эксперимента T2K.

### **Теоретическая значимость**

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, измерение которой будет способствовать более глубокому пониманию фундаментальной проблемы барионной асимметрии Вселенной;
- измерить сечения нейтринных взаимодействий через заряженные и нейтральные токи, что важно для разработки и оптимизации теоретических моделей взаимодействия нейтрино с нуклонами и легкими ядрами;
- повысить точность измерения «атмосферных» параметров матрицы смешивания нейтрино, что важно для понимания механизма смешивания активных нейтрино.

### **Научная новизна**

Детектор СуперFGD является принципиально новым ближним нейтринным детектором для ускорительных осцилляционных экспериментов с длинной базой за счет его полностью активной трехмерной структуры. Впервые зарегистрированные взаимодействия мюонных нейтрино в детекторе СуперFGD, который был установлен и запущен в работу в рамках развития проекта T2K, отражают научную новизну диссертационной работы.

### **Оценка содержания диссертации**

Диссертация состоит 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. Приведен обзор и результаты экспериментов, нацеленных на поиск осцилляций нейтрино и измерение параметров смешивания, 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 наиболее актуальные ограничения T2K для атмосферных параметров осцилляций, реакторного угла смешивания и CP-нечетной фазы. Представлены результаты T2K по измерению сечений взаимодействия нейтрино с веществом и ограничение на параметр  $\sin^2\theta_{24}$  для модели “3+1” с одним 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. Также приведены результаты тестов сцинтилляционных элементов СуперFGD с космическими мюонами.

**В четвертой главе** представлены результаты измерений основных параметров кубических сцинтилляторов СуперFGD: световой выход, временное разрешение и оптическая связь между кубическими сцинтилляторами. Результаты получены с использованием данных тестов прототипов СуперFGD на пучках заряженных частиц в ЦЕРН.

**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 восстановлению и исследованию свойств треков атмосферных мюонов и остановившихся в СуперFGD протонов, образованных в результате квазиупругого рассеяния мюонных нейтрино в веществе детектора через заряженный ток.

**В заключении** представлены результаты и сформулированы выводы диссертационной работы. Результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, получены автором лично, либо при его непосредственном участии.

#### **Замечания по диссертации**

1. 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.

2. 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.

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

4. В работе измерена оптическая связь (crosstalk) между кубическими сцинтилляторами СуперFGD (стр. 77-78, 98). Какой вид имеет ее зависимость от энерговыделения в кубике?

5. 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. Какой вид имеет зависимость разности  $t_2 - t_1$  от энергии нейтрона? Была ли она измерена? На каком из двух прототипов измерено полное сечение взаимодействия нейтронов на углеводородах? Следует ли из измерений, проведенных на прототипах детектора, способность СуперFGD измерять начальную энергию нейтрона?

6. Отмечу небольшое количество англицизмов и неточностей:

- crosstalk, pedestal, wave-форма;

- 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%.

- Стр. 57: «Установка, схема которой показана на Рисунке 4.1...». Имеется в виду рисунок 3.5?

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

### **Заключение**

Диссертация А.Е. Дергачевой «Разработка и создание 3D сегментированного сцинтилляционного детектора нейтрино СуперFGD» представляет собой завершённую научно-квалификационную работу. Отмеченные недостатки не снижают ее высокую научную и практическую значимость. Диссертационная работа основана на результатах, представленных в виде устных докладов на всероссийских и международных

конференциях, и опубликованных в научных изданиях, индексируемых в международных наукометрических базах 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 на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук полностью удовлетворяет всем требованиям «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».

Официальный оппонент:

Кандидат физико-математических наук  
по специальности 01.04.16 — «Физика атомного ядра  
и элементарных частиц»,  
Ведущий научный сотрудник  
НИЦ «Курчатовский институт»  
Литвинович Евгений Александрович

\_\_\_\_\_

26.05.2025

Контактная информация:

Адрес: 123182 Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1  
Телефон: +7 (499) 196-76-12  
Электронная почта: Litvinovich\_EA@nrcki.ru

**Подпись Литвиновича Е.А. заверяю:**

Первый заместитель главного ученого секретаря  
НИЦ «Курчатовский институт»

\_\_\_\_\_ Борисов К.Е.

## Сведения об оппоненте

Литвинович Евгений Александрович,  
кандидат физико-математических наук по специальности 01.04.16 — «Физика атомного ядра и элементарных частиц».

Список основных публикаций по теме рецензируемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. A. Fedorov, .., E. Litvinovich, *et al.* Evaluation of new  $Li_2CaSiO_4:Eu$ /scintillation plastic phoswich for combined alpha-beta and gamma-neutron detectors// Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A, 2024. — 1069. — 169983.
2. И. Н. Жутиков, Е. А. Литвинович, В. А. Хватов. Влияние учета детальной геометрии активной зоны на поток антинейтрино от реактора ВВЭР-1000// Письма в ЖЭТФ, 2024. — 119(3). — 158-165.
3. D. Basilico, .., E. Litvinovich, *et al.* (Borexino Collaboration). Directionality measurement of CNO neutrinos with Borexino detector// Proceedings of Science, 2024. — TAUP2023. — 158.
4. D. Basilico, .., E. Litvinovich, *et al.* (Borexino Collaboration). Final results of Borexino on CNO solar neutrinos// Physical Review D, 2023. — 108. — 102005.
5. D. Basilico, .., E. Litvinovich, *et al.* (Borexino Collaboration). Borexino's search for low-energy neutrinos associated with gravitational wave events from GWTC-3 database: Borexino Collaboration// The European Physical Journal C, 2023. — 83. — 538.
6. A. Abramov, .., E. Litvinovich, *et al.* Antineutrino Signal in the iDREAM Detector at Kalinin NPP// Physics of Atomic Nuclei, 2023. — 86. — 1389-1393.
7. А. В. Абрамов, .., Е. А. Литвинович, *и др.* Оптическая и химическая стабильность жидкого сцинтиллятора детектора iDREAM на Калининской атомной электростанции// Письма в ЖТФ, 2023. — 49. — 29.
8. A. Abramov, .., E. Litvinovich, *et al.* iDREAM: industrial Detector of REactor Antineutrinos for Monitoring at Kalinin nuclear power plant// Journal of Instrumentation, 2022. — 17. — P09001.
9. M. Agostini, .., E. Litvinovich, *et al.* (Borexino Collaboration). Correlated and integrated directionality for sub-MeV solar neutrinos in Borexino// Physical Review D, 2022. — 105(5). — 052002.
10. M. Agostini, .., E. Litvinovich, *et al.* (Borexino Collaboration). First directional measurement of sub-MeV solar neutrinos with Borexino// Physical Review Letters, 2022. — 128. — 091803.