

ОТЗЫВ

официального оппонента Соколова Анатолия 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 выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН). Диссертационная работа посвящена разработке, созданию и первым измерениям мюонных 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.

Актуальность темы исследования

В настоящее время перед экспериментом T2K стоит такая актуальная задача, как поиск CP-нарушения в нейтринных взаимодействиях и измерение CP-нечетной фазы δ_{CP} в нейтринных осцилляциях. Принимая во внимание тот факт, что эффект CP-нарушения в лептонном секторе на три порядка выше по сравнению с кварковым сектором, наряду с отличными от нуля углами смешивания нейтрино, явление нейтринных осцилляций, в основе которых лежит механизм смешивания нейтрино трех ароматов, представляет особый интерес в качестве нового источника CP-нарушения для объяснения барионной асимметрии Вселенной.

Для повышения чувствительности T2K к CP-нарушению необходимо снизить систематические погрешности осцилляционного анализа, обусловленные, в частности, неопределенностью сечений взаимодействия нейтрино с нуклонами и легкими ядрами. В связи с чем был запущен проект по модернизации ближнего детектора ND280 эксперимента T2K. В качестве ключевого элемента модернизированного ND280 был выбран 3D сегментированный сцинтилляционный детектор СуперFGD, выполняющий роль полностью активной мишени для нейтринных взаимодействий.

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 $\sim 2 \times 10^6$ сцинтилляционных элементов, является практически значимой для методики эксперимента, разработки и создания новых детекторов в области нейтринной физики.

СуперFGD в составе модернизированного ND280 способен обеспечить регистрацию заряженных частиц от нейтринных взаимодействий, регистрацию коротких треков низкоэнергетичных протонов и пионов, детектирование нейтронов от антинейтринных взаимодействий, а также идентификацию электронов и гамма-квантов в полном телесном угле. Таким образом, создание детектора СуперFGD и его использование в качестве нейтринной мишени в ближнем детекторе ND280 является критически важным для успешного проведения эксперимента T2K.

Теоретическая значимость

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

Научная новизна

СуперFGD — это принципиально новый тип ближнего нейтринного детектора для ускорительных экспериментов с длинными базами, характеризующийся уникальной полностью активной трёхмерной структурой. Конструкция детектора основана на применении около двух миллионов кубических сцинтилляционных элементов объёмом один кубический сантиметр каждый, оснащённых тремя взаимно перпендикулярными каналами для оптического волокна. Такая архитектура позволяет получать сигнал от каждого отдельного сцинтилляционного элемента одновременно по трём направлениям, что существенно увеличивает качество реконструкции события.

Научная новизна исследования заключается в первой успешной регистрации взаимодействий мюонных нейтрино именно в таком инновационном 3D-сегментированном сцинтилляционном детекторе, успешно введённом в эксплуатацию на нейтринном пучке эксперимента T2K в исследовательском центре J-PARC.

Оценка содержания диссертации

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

Во введении представлены аргументы, подтверждающие актуальность выбранной темы исследования. Четко обозначены цель и конкретные задачи работы. Описаны использованные научные подходы и методы исследования. Определена научная новизна предложенного решения, раскрыта его теоретическая и практическая значимость. Формулируются ключевые положения, вынесенные на защиту, подчеркивается личный вклад автора в разработку данной тематики, а также приводятся сведения о проведенных мероприятиях по обсуждению результатов исследования.

Первая глава раскрывает историю обнаружения феномена нейтринных осцилляций, подробно рассматривая случай смешивания нейтрино двух типов в условиях вакуума. Глава включает обзор ключевых экспериментов, направленных на выявление нейтринных осцилляций и определение параметров смешивания, выполненных с участием солнечных, атмосферных, реакторных и ускорительных 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 атмосферных нейтрино, реакторных нейтрино 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 легким стерильным нейтрино.

Третья глава освещает физическую мотивацию разработки детектора СуперFGD в рамках проекта модернизации установки ND280. Рассматриваются технологические аспекты производства, структура и характеристики кубических сцинтилляторных элементов СуперFGD. Представлены итоги испытаний сцинтилляционных компонентов СуперFGD с использованием космических мюонов.

В четвертой главе представлены результаты измерений основных параметров кубических сцинтилляторов СуперFGD: световой выход, временное разрешение и оптическая связь между кубическими сцинтилляторами, полученные с использованием данных тестов прототипов СуперFGD на пучках заряженных частиц в ЦЕРН. Приведены результаты восстановления и измерения параметров треков мюонов и остановившихся протонов в прототипе СуперFGD, состоящем из ~10000 сцинтилляционных элементов.

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 космических мюонов и остановившихся в СуперFGD протонов, образованных в реакции квазиупругого рассеяния мюонных нейтрино в веществе детектора.

В заключении представлены результаты и сформулированы выводы диссертационной работы.

Личный вклад автора

Результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, получены автором лично, либо при его непосредственном участии.

Замечания по диссертации

1. 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. Сколько треков было отобрано с использованием мюонного/адронного триггера?

2. В детекторе СуперFGD прямые треки космических мюонов были восстановлены только в центральном объеме (раздел 6.1). С чем связано такое ограничение?

3. На рисунке 6.7 показан восстановленный в трех плоскостях трек остановившегося космического мюона (Рис. 6.7). Объясните причину отсутствия на рисунке электрона, образовавшегося при распаде этого мюона. Наблюдаются ли такие события в детекторе?

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

Заключение

Диссертация А.Е. Дергачевой «Разработка и создание 3D сегментированного сцинтилляционного детектора нейтрино СуперFGD» представляет собой завершённую научно-квалификационную работу. Отмеченные недо-

статки 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, индексируемых 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 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,

Соколов Анатолий Александрович,

доктор физико-математических наук

по специальности 01.04.23 — «Физика высоких энергий».

142281, Московская область, город Протвино, площадь Науки, дом 1,

Тел. (4967) 71-35-28, адрес электронной почты: sokolov_a@ihep.ru

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.

« 30 » мая 2025 г.

_____ А.А. Соколов

Подпись (Соколова Анатолия Александровича) удостоверяю:

Учёный секретарь

НИЦ "Курчатовский институт"- ИФВЭ

_____ Н.Н. Прокопенко

Сведения об оппоненте

Соколов Анатолий Александрович, доктор физико-математических наук по специальности 01.04.23 — «Физика высоких энергий».

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

1. V.N. Goryachev, ..., A. Sokolov, et al. Modeling of the Neutrino Tagging System for the Near Detector in the P2O Experiment// Physics of Atomic Nuclei, 2024. — 87(6). — 799-809.
2. I. Adachi, ..., A. Sokolov, et al (Belle-II Collaboration). Measurement of the energy dependence of the $e^+e^- \rightarrow B\bar{B}, B\bar{B}^*$, and B^*B^* cross sections at Belle II// Journal of High Energy Physics, 2024. — 10. — 114.
3. I. Adachi, ..., A. Sokolov, et al (Belle-II Collaboration). Test of light-lepton universality in τ decays with the Belle II experiment// Journal of High Energy Physics, 2024. — 08. — 205.
4. M. Nayak, ..., A. Sokolov, et al (Belle Collaboration). Search for a heavy neutral lepton that mixes predominantly with the tau neutrino// Physical Review D, 2024. — 109(11). — 11.
5. I. Adachi, ..., A. Sokolov, et al (Belle-II Collaboration). Search for a $\mu^+\mu^-$ resonance in four-muon final states at Belle II// Physical Review D, 2024. — 109(11). — 112015.
6. I. Adachi, ..., A. Sokolov, et al (Belle-II Collaboration). Measurement of the τ -lepton mass with the Belle II experiment// Physical Review D, 2023. — 108(3). — 032006.
7. I. Adachi, ..., A. Sokolov, et al (Belle-II Collaboration). Search for a long-lived spin-0 mediator in $b \rightarrow s$ transitions at the Belle II experiment// Physical Review D, 2023. — 108(11). — L111104.
8. D. Liventsev, ..., A. Sokolov, et al (Belle Collaboration). Search for a Heavy Neutrino in τ Decays at Belle// Physical Review Letters, 2023. — 131(21). — 211802.
9. F. Abudinén, ..., A. Sokolov, et al (Belle-II Collaboration). Measurement of the branching fraction and CP asymmetry of $B^0 \rightarrow \pi^0\pi^0$ decays using $198 \times 10^6 B\bar{B}$ pairs in Belle II data// Physical Review D, 2023. — 107. — 112009.
10. H. Hirata, ..., A. Sokolov, et al (Belle Collaboration). Study of the line-shape of $X(3872)$ using B decay to $D^0\bar{D}^{*0}K$ // Physical Review D, 2023. — 107. — 112011.