

## О Т З Ы В

официального оппонента на диссертацию Федотова Сергея Андреевича «Разработка и создание детекторов заряженных частиц для каонных и нейтринных экспериментов», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики.

### **Актуальность темы диссертации**

Физика нейтрино является одной из тем исследования, где в последние годы сделано много открытий. Результаты, получаемые в эксперименте T2K, позволяют значительно продвинуть наше понимание физики нейтринных осцилляций. Создание нового высокогранулированного счетчика для эксперимента T2K является одной из частей диссертации. Этот детектор позволит существенно улучшить характеристики ближнего детектора ND280 и даст возможность заметно уменьшить систематическую ошибку в анализе нейтринных осцилляций.

Вторая часть диссертации посвящена исследованию характеристик годоскопа заряженных частиц NewCHOD – системы сцинтилляционных счетчиков эксперимента NA62. Целью этого эксперимента является измерение вероятности сверхредкого каонного распада  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ . Наблюдение результата отличного от предсказаний Стандартной Модели является проявлением Новой физики.

Пластиковые сцинтилляционные детекторы заряженных частиц со съемом света спектросмещающими волокнами, которые используются в этих работах, широко применяются в современных экспериментах по физике высоких энергий и физике элементарных частиц. Основными преимуществами данных детекторов являются относительная дешевизна, достаточно высокая радиационная стойкость и возможность варьирования формы и размеров детектирующих сегментов в большом диапазоне. Развитие этой методики может быть использовано в будущих экспериментах.

### **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Полученные в данной работе результаты и сформулированные выводы надежно обоснованы путем подробного описания экспериментальных методик, условий измерений и проведения расчетов с помощью метода Монте Карло. При выполнении данной работы автор продемонстрировал знание экспериментальных методов, используемых в физике элементарных частиц.

### **Достоверность и новизна полученных результатов**

В данной работе описывается создание первого в мире высокосегментированного трехмерного сцинтилляционного детектора нейтрино SuperFGD для эксперимента T2K. Данный детектор позволит значительно уменьшить существующие систематические погрешности с текущего уровня в 6–7% до 3–4% для эксперимента T2K, а также может использоваться в проекте Hyper-Kamiokande для поиска CP-нарушения в лептонном секторе. Кроме того создан новый однослойный сегментированный сцинтилляционный детектор NewCHOD для эксперимента NA62 и измерены его характеристики.

Достоверность полученных результатов обеспечивается проведением многих измерений и подтверждается соответствием результатов в независимых тестах, сравнением экспериментальных результатов с теоретическими моделями и с результатами, полученными в других исследованиях. Результаты данной работы были опубликованы в статьях в ведущих научных журналах и представлены на конференциях.

### **Теоретическая и практическая значимость полученных автором результатов**

Итогом работы явилось создание нового высокосегментированного детектора нейтрино SuperFGD в рамках эксперимента T2K. Практической ценностью обладает разработанный метод сборки многих тысяч сцинтилляционных кубиков в трехмерную структуру детектора SuperFGD. Метод сбора массива кубиков основан на использовании калиброванной лески, которая формирует трехмерную каркасную структуру, определяющую положение каждого из кубиков. После данного этапа сборки детектора лески по одной заменяются на спектросмещающие волокна. Данный метод сборки может быть использован для создания близких по характеристикам высокосегментированных сцинтилляционных детекторов.

Использование новой однослойной сегментированной сцинтилляционной структуры детектора NewCHOD в эксперименте NA62 позволяет достигнуть почти в три раза лучшего временного разрешения, чем временное разрешение детектора CHOD, обладающего двухслойной стриповой структурой. Также структура детектора NewCHOD позволяет избавиться от проблемы, вызванной высокой загрузкой в центральной области детектора.

### **Оценка содержания диссертации, её завершенность**

Диссертация представляет собой завершенное исследование. Ее содержание и структура соответствуют заявленной специальности и цели исследования.

Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения. Во введении изложены цели и методы проведенного исследования, практическая ценность работы, представлены актуальность, научная новизна темы исследования и личный вклад автора.

В первой главе приводится краткая историческая справка развития нейтринной физики. Описывается краткая история экспериментального изучения нейтринных осцилляций, рассматриваются актуальные вопросы физики нейтрино. Приводятся основные постулаты Стандартной нейтринной Модели. Приведена общая классификация экспериментов по изучению нейтринных осцилляций.

Вторая глава содержит описание ускорительного нейтринного эксперимента с длинной базой T2K, основной целью которого является измерение параметров нейтринных осцилляций. Основными элементами экспериментальной установки являются дальний детектор SK, расположенный в 295 км от мишени и ближний комплекс детекторов, расположенный на расстоянии 280 м от мишени. Этот комплекс состоит из двух детекторов: детектора INGRID, который находится на оси пучка, и детектора ND280, расположенного под углом 2.5 градуса относительно оси пучка. Приведена история основных результатов, полученных в этом эксперименте, описана модернизация эксперимента T2K и будущий детектор Hyper-Kamiokande.

В третьей главе описан процесс разработки и создания нового высокосегментированного сцинтилляционного детектора SuperFGD, являющегося главной частью проекта по модернизации ближнего нейтринного детектора ND280 эксперимента T2K. Детектор будет состоять из  $192 \times 56 \times 184 = 1978368$  сцинтилляционных кубиков с размером грани в 1 см. Считывание света с каждого кубика осуществляется

три спектросмещающими волокнами в трех взаимно перпендикулярных направлениях. В работе приведен метод изготовления и подготовки кубиков и метод сборки детектора. Представлены результаты физических и механических тестов различных элементов детектора SuperFGD. Также в этой главе приведены описания прототипов детектора  $5 \times 5 \times 5$  и  $24 \times 8 \times 48$  кубиков, исследование их характеристик и результаты измерения на тестовом пучке в CERN. Среднее значение световыхода с одного кубика на одно волокно составило около 58 ф.э./МIP, а временное разрешение на одно волокно составило около 1.14 нс. Было также осуществлено исследование ослабления сигнала в оптических волокнах Kuraray Y11. Волокна такого типа будут использоваться для снятия сигнала в детекторе SuperFGD. Были получены зависимости световыхода от расстояния до микропиксельного фотодиода MPPC при различных способах обработки противоположных от MPPC торцов волокна.

Четвертая глава посвящена теоретической и экспериментальной части изучения сверхредких каонных распадов  $K^+ \rightarrow \pi^+ \tilde{\nu} \tilde{\nu}$  и  $K_L \rightarrow \pi^0 \tilde{\nu} \tilde{\nu}$ . Рассмотрены свойства унитарной матрицы Кабиббо-Кобаяши-Маскавы, редкие процессы, идущие за счет нейтральных токов с изменением ароматов, и их роль в рамках поиска CP-нарушений в распадах каонов. Приводятся описания и основные результаты специализированных экспериментов по поиску сверхредких каонных распадов.

В пятой главе описан эксперимент NA62, проводимый в CERNe. Основной целью эксперимента NA62 является измерение с точностью около 10 % вероятности сверхредкого каонного распада  $K^+ \rightarrow \pi^+ \tilde{\nu} \tilde{\nu}$ . Рассмотрены результаты, полученные в эксперименте с 2016 по 2018 год. Проведено моделирование прохождения гало каонного пучка вдоль экспериментальной линии NA62, в результате которого было показано, что основным источником гало являются мюоны, образованные из распадов пионов и каонов, а также из неупругих взаимодействий пучка первичных протонов с материалом мишени. Рассмотрены пути модернизации детектора для подавления фона.

Шестая глава посвящена работам с годоскопом заряженных частиц NewCHOD для эксперимента NA62, разработанного для модернизации детектора. Он представляет собой однослойный сегментированный сцинтилляционный годоскоп, симметричный относительно оси пучка, с различными размерами сегментов на периферии детектора и в центральной области. Однослойная структура детектора и меньший размер сегментов в центральной области позволяют улучшить работоспособность детектора при высокой нагрузке. В процессе создания детектора NewCHOD было проведено исследование характеристик применяемых в нем фотосенсоров, для которых были получены основные параметры: наводки с канала на канал, темновой ток и эффективность регистрации фотонов. В работе описан стенд, используемый для испытания фотосенсоров, и приведены результаты измерений. После установки годоскопа в экспериментальный зал по набранным данным были определены основные параметры и характеристики счетчиков, которые приведены в диссертации.

В заключении представлены основные выводы и результаты диссертационной работы.

### **Достоинства и недостатки в содержании и оформлении диссертации**

Исследования, представленные в диссертации, выполнены на высоком уровне. В диссертации эти исследования описаны ясно, хорошим языком. В целом, диссертация оставляет хорошее впечатление.

Диссертация содержит обзор истории экспериментов и теоретических моделей по теме исследования, описана большая и работа, которую проделал автор. Федотов С.А. участвовал в разработке и создании нового высокосегментированного трехмерного сцинтилляционного нейтринного детектора SuperFGD, являющегося важной системой эксперимента T2K. Он принимал активное участие в тесте прототипа детектора SuperFGD на пучке заряженных частиц в CERN и в определении параметров сцинтилляционных кубиков. Им проводилось тестирование на космических мюонах сцинтилляционных кубиков и исследовалось ослабление сигнала в спектросмещающих волокнах. Федотов С.А. провел тестирование микропиксельных фотосенсоров для детектора NewCHOD и принимал участие в определении основных физических параметров детектора NewCHOD после его установки в экспериментальном холле NA62 и контроле за стабильностью работы детектора NewCHOD во время сеансов по набору данных. Кроме того, он провел моделирование прохождения мюонного гало пучка вдоль линии эксперимента NA62 и определил загрузки мюонами гало различных элементов экспериментальной установки NA62. Диссертация содержит подробное описание экспериментальных установок, технологии изготовления счетчиков и методик используемых для измерений их характеристик. Приведено много результатов измерения детекторов и их свойств.

В работе, однако, есть определенные недостатки. Не всегда приведены выводы, следующие из результатов измерений. Так на странице 63 показано, что при использовании фотодетекторов третьего типа временное разрешение несколько хуже, но не говорится будут ли в установке использованы фотодетекторы всех типов и по какому критерию будет проходить выбор. На странице 66 приведены длины затухания света в волокнах, которые различны для волокон разной длины,. Было бы уместно привести возможное объяснение этого эффекта, а так же прокомментировать какое влияние эта длина поглощения будет оказывать на характеристики счетчика. На странице 70 показана зависимость световыхода счетчиков от времени. Было бы полезно экстраполировать полученные данные и привести максимальный эффект, который можно ожидать за время работы эксперимента. На странице 111 описывается увеличение темного тока со временем, которое объясняется радиационным повреждением фотосенсоров и отмечается, что радиационная нагрузка, полученная в эксперименте, заметно ниже, чем доза, которая может вызвать такое увеличение темного тока. Казалось бы, этот вопрос достаточно важный и требует дополнительного пояснения и разбирательства. Связано ли наблюдаемое несоответствие с неправильной оценкой фона в области фотосенсоров или с большей чувствительностью фотодетекторов к радиационной нагрузке?

В рассматриваемой работе имеются также мелкие неточности и опечатки. Например, на Рис.43 а) во второй диаграмме вместо кварковой линии (u,c,t) показана линия W-бозона, слово «сверхредкий» в нескольких местах написано отдельно. Так как работа написана на русском языке вместо термина crosstalk правильнее использовать выражение на русском, например: наводка с канала на канал.

Перечисленные замечания не снижают общей высокой оценки диссертации, представляющей собой законченное исследование. Достоверность выводов и результатов диссертации, а также их новизна и актуальность не вызывают сомнений.

#### **Соответствие автореферата основному содержанию диссертации**

Автореферат диссертации правильно и полно отражает содержание диссертации.

#### **Заключение**

Диссертация Федотова Сергея Андреевича на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук является научно-квалификационной работой, посвященной разработке, созданию и испытаниям детекторов заряженных частиц для нейтринного эксперимента T2K и эксперимента по поиску редких распадов каонов NA62, что имеет существенное значение для экспериментальных исследований в физике элементарных частиц. Результаты выполненных исследований, их новизна и значимость, а также степень обоснованности выводов характеризуют представленную диссертацию как законченную научную работу. Разработанные автором методики могут быть использованы в других экспериментах по физике ядра и элементарных частиц.

Вынесенные на защиту результаты получены автором лично, либо при его определяющем участии. Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 8 печатных работах, входящих в список ВАК и были доложены на 12-ти российских и международных конференциях.

Считаю, что диссертация Федотова С.А. соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики.

Официальный оппонент

Кузьмин Александр Степанович,

доктор физико-математических наук

по специальности 01.04.16 - физика атомного ядра и элементарных частиц,

630090, Новосибирск, пр. акад. Лаврентьева д.11

тел. +7-383-329833, e-mail: a.s.kuzmin@inp.nsk.su

главный научный сотрудник лаб.3-3 ИЯФ СО РАН

13.09.2021

А.С.Кузьмин

Подпись Кузьмина А.С. заверяю

ученый секретарь ИЯФ СО РАН

к.ф.-м.н.

e-mail: A.S.Arakcheev@inp.nsk.su

А.С. Аракчеев

Кузьмин Александр Степанович,  
доктор физико-математических наук  
по специальности 01.04.16 - физика атомного ядра и элементарных частиц.

1. V. E. Shebalin,.. A. S. Kuzmin,.. et al., "Barrel calorimeter of the CMD-3 detector," Phys. Atom. Nucl. 78 (2015) no.13, 1544 [Yad. Fiz. 5 (2014) 839]. doi:10.1134/S1063778815130311
2. V. E. Shebalin,.. A. S. Kuzmin,.. et al., "Calorimetry of the CMD-3 detector," Nucl. Instrum. Meth. A 824 (2016) 710. doi:10.1016/j.nima.2015.11.128
3. A. V. Anisenkov,.. A. S. Kuzmin,.. et al., "Energy calibration of the barrel calorimeter of the CMD-3 detector," JINST 12 (2017) no.04, P04011. doi:10.1088/1748-0221/12/04/P04011
4. I. Chakin, M. Golkovskiy, A. Kuzmin, D. Matvienko, E. Sedov and B. Shwartz, "Radiation hardness study of CsI(Tl) scintillation crystals for the Belle II calorimeter," JINST 12 (2017) no.06, C06034. doi:10.1088/1748-0221/12/06/C06034
5. C. Cecchi,.. A. S. Kuzmin,.. et al., "The BELLE Electromagnetic Calorimeter and its Upgrade to BelleII," JINST 12 (2017) no.07, C07032. doi:10.1088/1748-0221/12/07/C07032
6. R. R. Akhmetshin,.. A. S. Kuzmin,.. et al., [CMD-3 Collaboration], "Z-chamber of the CMD-3 detector in the reconstruction of the track longitudinal coordinate," JINST 12 (2017) no.07, C07044. doi:10.1088/1748-0221/12/07/C07044
7. V. Aulchenko,.. A. S. Kuzmin,.. et al., "Time and energy reconstruction at the electromagnetic calorimeter of the Belle-II detector," JINST 12 (2017) no.08, C08001. doi:10.1088/1748-0221/12/08/C08001
8. R. R. Akhmetshin,.. A. S. Kuzmin,.. et al., "Calorimetry of the CMD-3 detector," J. Phys. Conf. Ser. 928 (2017) no.1, 012011. doi:10.1088/1742-6596/928/1/012011
9. S. Longo, J. M. Roney, C. Cecchi, S. Cunliffe, T. Ferber, H. Hayashii, C. Hearty, A. Hershenhorn, A. Kuzmin and E. Manoni, et al., "CsI(Tl) pulse shape discrimination with the Belle II electromagnetic calorimeter as a novel method to improve particle identification at electron-positron colliders," Nucl. Instrum. Meth. A 982 (2020), 164562 doi:10.1016/j.nima.2020.164562 [arXiv:2007.09642 [physics.ins-det]].
10. V. V. Zhulanov, A. S. Kuzmin, D. V. Matvienko, M. A. Remnev and Y. V. Usov, "Data Acquisition System for the Calorimeter of the Belle II Detector," Phys. Atom. Nucl. 84 (2021) no.1, 42-44 doi:10.1134/S1063778821010257