

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора по научной работе
НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ

№ 24

« 27 » августа 2021 г.

_____ д.ф.-м.н. **В.В. Воронин**

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» на диссертацию **Сергея Андреевича Федотова «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».

Основной целью диссертационной работы Федотова С.А. является разработка и создание детекторов заряженных частиц для каонных и нейтринных экспериментов. Эти детекторы используются и в ближайшем будущем будут использоваться в каонном эксперименте NA62 (CERN) и в нейтринном эксперименте с длинной базой T2K (Япония).

Основными целями ускорительного нейтринного эксперимента с длинной базой T2K являются точное измерение параметров нейтринных осцилляций и поиск CP-нарушения в лептонном секторе. В 2017 году коллаборацией T2K был запущен проект по модернизации ближнего детектора эксперимента, основной целью которого является уменьшение систематических погрешностей осцилляционных измерений, что необходимо для повышения чувствительности

эксперимента к нарушению CP инвариантности. Также будет улучшена точность измерений сечений мюонных нейтрино и антинейтрино. Главной частью данной модернизации является создание нового высокосегментированного детектора SuperFGD. Детектор состоит из около двух миллионов сцинтилляционных кубиков с размером грани в 1 см. Каждый из кубиков имеет три ортогональные отверстия, в которые вставлены спектросмещающие волокна для осуществления 3D-снятия сигнала.

Еще одним путем для поиска новой физики за пределами Стандартной Модели является изучение сверхредкого каонного распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \tilde{\nu}$. Вероятность этого распада в Стандартной Модели предсказывается с высокой точностью, поэтому его точное экспериментальное измерение позволит либо подтвердить Стандартную Модель, либо отнести это явление к области новой физики. Основной целью эксперимента NA62 CERN является измерение вероятности распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \tilde{\nu}$ с точностью около 10%. В связи с тем, что вероятность данного распада крайне мала, в эксперименте NA62 используется большое количество вето-детекторов и многоуровневая триггерная система. Одним из вето-детекторов является годоскоп заряженных частиц NewCHOD – система сцинтилляционных счетчиков с сегментированной структурой, охватывающая область вокруг пучка после распадного объема. Детектор был установлен в экспериментальном холле и включен в триггерную систему эксперимента в 2016 году.

Диссертационная работа Федотова С.А. посвящена разработке, созданию и изучению параметров сцинтилляционных детекторов заряженных частиц, а именно: разработке и созданию нового высокосегментированного 3D сцинтилляционного нейтринного детектора SuperFGD для эксперимента T2K; контролю за стабильностью и изучению основных параметров сцинтилляционного годоскопа заряженных частиц NewCHOD для эксперимента NA62. Таким образом, **важность и актуальность** темы диссертационной работы не вызывает сомнений.

Диссертация состоит из введения, шести глав основной части, заключения, списка сокращений и условных обозначений и списка литературы. Представленная работа содержит 133 страницы, 68 рисунков и 3 таблицы, список литературы содержит 93 наименования. Автореферат адекватно отражает основное содержание диссертации.

Во **введении** излагаются цели и методы проведенного исследования; оценивается практическая ценность работы; раскрывается актуальность и научная новизна темы исследования; рассматривается личный вклад автора; приводятся фактические данные о работе и ее апробации.

Первая глава посвящена истории открытия нейтрино и нейтринных осцилляций. Приводится краткая историческая справка развития нейтринной физики. Описывается краткая история экспериментального изучения феномена нейтринных осцилляций. Рассматриваются актуальные вопросы физики нейтрино.

Приводятся основные постулаты Стандартной нейтринной модели. Подробно рассмотрен простейший случай осцилляций нейтрино в вакууме.

Вторая глава посвящена ускорительному нейтринному эксперименту с длинной базой T2K. Приводится подробное описание экспериментальной установки и основные полученные физические результаты. Также рассматриваются перспективы развития эксперимента: добавление гадолиния в дальний детектор; увеличение интенсивности первичного протонного пучка; проект по модернизации ближнего детектора; строительство нового детектора Hyper-Kamiokande.

В **третьей главе** описывается процесс разработки и создания нового высокосегментированного детектора SuperFGD, в рамках программы по модернизации ближнего детектора ND280 эксперимента T2K. Описывается общая структура и дизайн детектора. Приводятся результаты тестов двух прототипов детектора на пучке заряженных частиц ускорителя PS в CERN, а также результаты других физических и механических тестов различных элементов детектора. Описывается технология сборки детектора в единую структуру.

В **четвёртой главе** описывается теоретическая и экспериментальная части изучения сверх редких каонных распадов $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \tilde{\nu}$ и $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \tilde{\nu}$. Рассмотрены свойства унитарной матрицы Кабиббо-Кобаяши-Маскавы, редкие FCNC процессы и их роль в рамках поиска CP-нарушений в распадах каонов. Приводятся описания и основные результаты специализированных экспериментов по поиску сверх редких каонных распадов.

Пятая глава посвящена эксперименту по изучению сверх редкого распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \tilde{\nu}$ NA62 (CERN). Приводится детальное описание экспериментальной установки и основные полученные физические результаты. Рассматриваются как ближайшие планы (создание нового вето детектора ANTI-0, модернизация линии пучка и добавление новой станции GTK), так и отдаленное будущее эксперимента (режим высокой интенсивности). Рассмотрено распространение мюонного гало пучка вдоль линии эксперимента, приводятся загрузки мюонами гало различных элементов экспериментальной установки NA62. Подробно рассмотрено распределение интенсивности мюонов гало в точке перед началом распадного объема, в этой точке планируется установка нового вето-детектора, предназначенного для наложения вето на мюоны гало.

В **шестой главе** приводится описание и основные характеристики сцинтилляционного годоскопа заряженных частиц NewCHOD для эксперимента NA62. Также в рамках данной главы приводятся результаты тестирования всех применяемых в детекторе фотосенсоров. Рассматривается статус детектора в процессе сеансов по набору статистики эксперимента NA62 с 2016 по 2018 годы.

В **заключении** изложены основные результаты и выводы проведённых исследований.

Таким образом, на основе проведенных тестов и исследований соискателем

были осуществлены работы по разработке и созданию детектора SuperFGD и по проведению контроля за стабильностью работы и изучению основных параметров детектора NewCHOD. Впервые в мире осуществляется создание высокосегментированного 3D сцинтилляционного детектора, проведены тесты прототипов детектора, которые показали очень хорошие параметры. Разработан уникальный метод сборки двух миллионов элементов данного детектора в единую структуру. Помимо этого, новая однослойная сегментированная структура детектора NewCHOD позволила значительно улучшить временное разрешение детектора CHOD, который ранее использовался в эксперименте NA62.

Проделанная работа потребовала от диссертанта глубокого понимания методов разработки и создания сцинтилляционных детекторов для современных физических экспериментов, начиная с этапа проектирования и обсуждения концепта нового детектора, до включения детектора в систему экспериментальной установки и осуществления контроля за стабильностью его работы. Соискатель продемонстрировал не только навыки проведения тестирования прототипов и различных элементов детекторов, но также и умение осуществлять обработку экспериментальных данных.

Диссертация написана четким и ясным языком, хотя иногда заметны опечатки, а также на рис. 57 присутствуют «артефакты» в тексте на изображении. В качестве замеченных недостатков можно указать также следующее. При описании технологии изготовления сцинтилляционных кубиков детектора SuperFGD в третьей главе приводятся данные об их составе. Однако, отсутствует обоснование, почему были выбраны именно эти сцинтилляционные добавки, и как были определены их необходимые концентрации. Также, при обсуждении мотивации создания детектора SuperFGD, во второй главе приводится тезис о необходимости снижения систематической ошибки в эксперименте T2K. Но несмотря на то, что в третьей главе приводятся результаты моделирования, которые показывают ожидаемое уменьшение порогов и увеличение эффективности регистрации частиц под большими углами, снижение систематической ошибки остается оценочным, и, в рамках данной работы, непонятно насколько в действительности данный детектор позволит уменьшить систематическую ошибку эксперимента. Указанные недостатки не имеют принципиального значения для полученных результатов и никоим образом не снижают высокой оценки, которой заслуживает диссертационная работа С.А. Федотова.

Рассматриваемая диссертация представляет собой законченное научное исследование, содержащее **важные результаты, представляющие научную новизну и большую практическую ценность при создании других детекторов со схожими геометрией и характеристиками, а также при проведении современных физических экспериментов.** Эти результаты докладывались автором на научных семинарах и конференциях; они своевременно опубликованы в

реферируемых журналах.

Полученные в рамках исследования результаты находятся в согласии с теоретическими моделями и в соответствии с результатами независимых тестов, полученными в других исследованиях. **Таким образом, всё вышеуказанное подтверждает достоверность выводов диссертационной работы и положений, выносимых на защиту.**

Диссертация С.А. Федотова является законченным научным трудом, выполнена на высоком научном уровне и посвящена важной и актуальной проблеме. Диссертация удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям, а её автор С.А. Федотов безусловно заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 — приборы и методы экспериментальной физики.

Диссертация С.А. Федотова рассматривалась на семинаре Отделения физики высоких энергий (ОФВЭ) НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ 27 августа 2021 г., на котором были одобрены основные результаты диссертации и выводы данного отзыва.

Отзыв подготовили:

Научный руководитель ОФВЭ
НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ,
член-корреспондент РАН, д.ф.-м.н.,
профессор

А.А. Воробьев
vorobyov_aa@pnpi.nrcki.ru

Заместитель руководителя ОФВЭ по
научной работе НИЦ «Курчатовский
институт» - ПИЯФ, д.ф.-м.н.

В.Т. Ким
kim_vt@pnpi.nrcki.ru

Заведующий лабораторией барионной
физики ОФВЭ НИЦ «Курчатовский
институт» - ПИЯФ,
к.ф.-м.н.

А.А. Дзюба
dzyuba_aa@pnpi.nrcki.ru

Контакты ведущей организации:

ФГБУ «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт».
188300, Ленинградская область, г. Гатчина, мкр. Орлова роща, д. 1.
Тел.: +7 (81371) 460-25, E-mail: dir@pnpi.nrcki.ru.

Учёный секретарь НИЦ «Курчатовский
институт» - ПИЯФ, к.ф.-м.н.

С.И. Воробьев
vorobyev_si@pnpi.nrcki.ru

Список основных публикаций сотрудников ведущей организации по теме диссертации:

1. G. Ranucci,.. A. Derbin,.. et. al., Overview and accomplishments of the Borexino experiment, *J.Phys.Conf.Ser.* 675 (2016) 1, 012036
2. A.P. Serebrov,.. et. al., Neutrino-4 experiment on search for sterile neutrino with multi-section model of detector, *J.Phys.Conf.Ser.* 888 (2017) 1, 012089
3. G. Ranucci,.. A. Derbin,.. et. al., Seasonal Modulation of the 7Be Solar Neutrino Rate in Borexino, *Astropart.Phys.* 92 (2017) 21-29
4. C.E. Aalseth,.. A.V. Derbin,.. et. al., Cryogenic Characterization of FBK RGB-HD SiPMs, *JINST* 12 (2017) 09, P09030
5. K. Carvalho Akiba,.. N. Bondar,.. et. al., The HeRSChel detector: high-rapidity shower counters for LHCb, *JINST* 13 (2018) P04017
6. C. Ahdida,.. O. Fedin,.. et. al., The experimental facility for the Search for Hidden Particles at the CERN SPS, *JINST* 14 (2019) 03, P03025
7. A.P. Serebrov,.. et. al., First Observation of the Oscillation Effect in the Neutrino-4 Experiment on the Search for the Sterile Neutrino, *JETP Lett.* 109 (2019) 4, 213-221
8. A. Sirunyan,.. L. Chtchipounov,.. et. al., Measurements with silicon photomultipliers of dose-rate effects in the radiation damage of plastic scintillator tiles in the CMS hadron endcap calorimeter, *JINST* 15 (2020) 06, P06009
9. A.P. Serebrov, R.M. Samoilov, Analysis of the Results of the Neutrino-4 Experiment on the Search for the Sterile Neutrino and Comparison with Results of Other Experiments, *JETP Lett.* 112 (2020) 4, 199-212
10. M. Agostini,.. A. Derbin,.. et. al., Experimental evidence of neutrinos produced in the CNO fusion cycle in the Sun, *Nature* 587 (2020) 577-582
11. V. Khachatryan,.. G. Gavrilo,.. et. al., The very forward CASTOR calorimeter of the CMS experiment, *JINST* 16 (2021) 02, P02010
12. A.P. Serebrov,.. et. al., Search for sterile neutrinos with the Neutrino-4 experiment and measurement results, *Phys.Rev.D* 104 (2021) 3, 032003