

*На правах рукописи*

Федотов Сергей Андреевич

Разработка и создание  
детекторов заряженных частиц для каонных  
и нейтринных экспериментов

01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва — 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН).

**Научный руководитель:**

*Куденко Юрий Григорьевич*, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН), отдел физики высоких энергий, главный научный сотрудник с совмещением должности заведующего отделом физики высоких энергий и лабораторией физики электрослабых взаимодействий отдела физики высоких энергий ИЯИ РАН.

**Официальные оппоненты:**

*Кузьмин Александр Степанович*, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория 3-3, главный научный сотрудник.

*Чепурнов Александр Сергеевич*, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына (НИИЯФ МГУ), отдел электромагнитных процессов и взаимодействий в атомных ядрах, старший научный сотрудник.

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ)

Защита состоится \_\_\_\_\_ в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д002.119.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук по адресу: 117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7А.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯИ РАН и на сайте <http://www.inr.ru/rus/referat/dis-zasch.html>

Автореферат разослан \_\_\_\_\_

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д002.119.01,  
кандидат физ.-мат. наук,

С. В. Демидов

## Общая характеристика работы

Диссертация посвящена разработке и созданию детекторов заряженных частиц для каонных и нейтринных экспериментов. Задачи, стоящие перед новыми экспериментами, становятся с каждым годом все более амбициозными. Необходимая точность результатов накладывает жесткие требования к характеристикам современных детекторов. В диссертации приводятся результаты работ по разработке и созданию нового высокосегментированного детектора SuperFGD (Super Fine-Grained Detector) [1] для нейтринного ускорительного эксперимента с длинной базой T2K (Tokai to Kamioka) [2] и годоскопа заряженных частиц NewCHOD (New Charged Particle Hodoscope) [3] для эксперимента по измерению сверх редкого каонного распада  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$  NA62 (North Area 62) [4].

## Актуальность темы исследования

Пластиковые сцинтилляционные детекторы заряженных частиц имеют широкое применение в современной физике высоких энергий и физике элементарных частиц. В частности, такие детекторы используются в эксперименте по измерению сверх редкого каонного распада ( $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ ) NA62 и в ближнем детекторе ND280 (Near detector 280) ускорительного нейтринного эксперимента с длинной базой T2K. Основными преимуществами данных детекторов являются относительная дешевизна, достаточно высокая радиационная стойкость (в случае каонных экспериментов) и возможность варьирования формы и размеров детектирующих сегментов в большом диапазоне. Они могут иметь практически любую форму и размеры: от нескольких миллиметров до нескольких метров. Свет со сцинтилляционных сегментов часто снимается с помощью спектросмещающих волокон. Они помогают обеспечить не только равномерное снятие сигнала с сегментов различных форм, но и позволяют осуществлять транспортировку и регистрацию сигнала за пределами детектора. Например, благодаря спектросмещающим волокнам можно вынести считывающую электронику на периферию детектора и не помещать ее в магнитное поле, или не подвергать ее сильному радиационному воздействию. Детектирование сцинтилляционного света

в таких детекторах часто осуществляется с помощью микропиксельных фотосенсоров. Они могут иметь как непосредственной контакт со сцинтиллятором, так и регистрировать сцинтилляционный свет, приходящий со спектросмещающих волокон, или посредством световода. Несомненными преимуществами данных фотосенсоров являются компактный размер, нечувствительность к магнитному полю и возможность регистрации однофотонных событий.

Открытие бозона Хиггса в CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucleaire) в 2012 году полностью сформировало Стандартную модель. Одними из немногих явлений, не укладывающихся в рамки Стандартной модели, являются нейтринные осцилляции. Концепция нейтринных осцилляций была предложена Понтекорво в 1957 году [5, 6]. Они были открыты в экспериментах по изучению солнечных и атмосферных нейтрино. Реакторные и ускорительные нейтринные эксперименты смогли значительно продвинуть наше понимание физики нейтринных осцилляций. Одним из последних фундаментальных результатов является полученное в эксперименте T2K указание на отличие от нуля параметра  $\delta$  [7], отвечающего за наличие CP-нарушения в лептонном секторе. Однако, несмотря на выдающиеся успехи в изучении природы и физики нейтрино в последние несколько десятков лет, без ответа пока еще остаются многие вопросы. Какова природа нейтрино (майорановская или дираковская), какова абсолютная шкала масс нейтрино, прямую или обратную иерархию масс они имеют, каково количественное значение CP-нарушения в лептонном секторе и существует ли стерильное нейтрино. Эксперимент T2K призван дать ответы на многие из этих вопросов. Процессу разработки и созданию высокосегментированного сцинтилляционного детектора SuperFGD для этого эксперимента посвящена первая часть диссертационного исследования.

Еще одним путем для поиска Новой физики за пределами Стандартной модели является изучение сверхредких каонных распадов  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \tilde{\nu}$  и  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \tilde{\nu}$ . Наличие CP-нарушения в распадах каонов было качественно и по порядку величины предсказано Стандартной моделью. Особое внимание при поиске Новой физики заслуживают распады, обусловленные FCNC (Flavour Changing Neutral Currents) процессами ( $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \tilde{\nu}$  и  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \tilde{\nu}$ ), так как для них предсказания

в рамках Стандартной модели сделаны с высокой точностью. В настоящее время в эксперименте КОТО было зарегистрировано три кандидата в событие  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \tilde{\nu}$ , но все они были отнесены коллаборацией к фоновым [8]. А в эксперименте E949 BNL (Brookhaven National Laboratory) было зарегистрировано 7 распадов  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \tilde{\nu}$  [9, 10], однако, это не является достаточным для проверки предсказаний Стандартной модели. Изучение распада  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \tilde{\nu}$  с высокой точностью является главной целью эксперимента NA62 CERN, в котором к настоящему времени, было зарегистрировано 20 таких распадов [11]. Помимо основного распада в эксперименте NA62 осуществляется изучение распадов положительных каонов по другим модам и поиск различных экзотических событий (поиск тяжелых стерильных нейтрино и темных фотонов). Изучению параметров и характеристик как отдельных элементов, так и всего сцинтилляционного годоскопа заряженных частиц NewCHOD в этом эксперименте, посвящена вторая часть данной работы.

### Цели и задачи исследования

Основной целью ускорительного нейтринного эксперимента с длинной базой T2K является точное измерение параметров нейтринных осцилляций и поиск CP-нарушения в лептонном секторе. Основными элементами экспериментальной установки являются дальний детектор Super-Kamiokande (SK), расположенный в 295 км от мишени и ближний комплекс детекторов, расположенный на расстоянии 280 м от мишени, а также нейтринный канал. В эксперименте впервые в мире была использована технология смещенного нейтринного пучка, предложенная для эксперимента E889 BNL. Идея этой технологии заключается в том, что дальний детектор находится не на оси протонного пучка, попадающего в мишень, а под небольшим углом. В эксперименте T2K этот угол установлен на  $2.5^\circ$ . Использование данной технологии позволяет добиться достаточно моноэнергетического нейтринного пучка. В настоящее время в эксперименте T2K осуществляются работы по увеличению интенсивности первичного протонного пучка и апгрейду ближнего детектора ND280 [12]. Этот апгрейд нацелен на уменьшение систематической ошибки в анализе нейтринных осцилляций с уровня в 6–7% до 3–4% и прецизионного измерения нейтринных сечений с полным

восстановлением кинематики заряженных частиц от нейтринных взаимодействий. Для решения этой задачи необходим высокосегментированный детектор с низким энергетическим порогом детектирования заряженных частиц, с широким динамическим диапазоном, высокой эффективностью регистрации заряженных частиц и нейтронов в полном телесном угле. Такой детектор SuperFGD в настоящее время находится в активной стадии создания. Он будет состоять из около двух миллионов ( $192 \times 56 \times 184$ ) сцинтилляционных кубиков  $1 \times 1 \times 1 \text{ см}^3$ . Каждый кубик имеет три ортогональных отверстия для 3D снятия сигнала с помощью спектросмещающих волокон. Общая масса детектора  $\sim 2$  тонн, а общее количество каналов считывания  $\sim 60000$ . В процессе разработки и создания детектора SuperFGD необходимо было решить следующие **задачи**:

- Осуществить контроль качества сцинтилляционных и геометрических свойств сцинтилляционных кубиков, используемых при создании детектора SuperFGD.
- Разработать метод сборки двух миллионов сцинтилляционных кубиков в трехмерную структуру.
- В тестах на пучке заряженных частиц прототипов детектора SuperFGD определить основные параметры детектора.
- Произвести исследование затухания сигнала в спектросмещающем оптическом волокне, предназначенном для регистрации сигнала в детекторе SuperFGD.

Основной целью эксперимента NA62 CERN является точное измерение вероятности сверх редкого каонного распада  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ . Для достижения поставленной цели в эксперименте используется большое количество вето-детекторов и многоуровневая триггерная система. Одним из таких вето-детекторов является годоскоп заряженных частиц NewCHOD – система сцинтилляционных счетчиков сегментированной структурой, охватывающая область вокруг пучка после распадного объема. Детектор был установлен в экспериментальном холле и включен в триггерную систему весной 2016 года. В процессе создания детектора необходимо было осуществить тестирование его фотосенсоров. А после установки детектора NewCHOD в экспериментальном холле NA62 необходимо было решить следующие **задачи**:

- Определить основные параметры детектора NewCHOD: временное разрешение и загрузку при номинальной интенсивности пучка отдельных элементов детектора.
- Осуществить контроль за стабильностью параметров элементов детектора NewCHOD во время сеансов по набору статистики эксперимента NA62.

Несмотря на большое количество вето-детекторов и многоуровневую триггерную систему, в эксперименте NA62 в настоящее время не существует детектора, который бы осуществлял регистрацию гало пучка. Однако, для различных экзотических распадов, изучаемых в эксперименте NA62, а также для уменьшения фона в анализе данных по основному распаду, знания о гало могут быть крайне полезными. Поэтому необходимо было решить следующие **задачи**:

- Осуществить моделирование прохождения мюонного гало вдоль линии эксперимента NA62;
- Определить загрузку различных элементов экспериментальной установки NA62 мюонами гало;
- Подробно рассмотреть координатное распределение интенсивности мюонного гало перед началом распадного объема эксперимента NA62.

### **Научная новизна и практическая ценность**

В рамках эксперимента T2K впервые в мире создается высоко сегментированный трехмерный сцинтилляционный детектор нейтрино SuperFGD. Данный детектор должен значительно увеличить чувствительность эксперимента T2K (а также использоваться в проекте Hyper-Kamiokande [13]) для поиска CP-нарушения в лептонном секторе за счет уменьшения существующих систематических погрешностей с текущего уровня в 6–7% до 3–4%. Эти цели могут быть достигнуты за счет возможности регистрации в детекторе SuperFGD заряженных лептонов, протонов и нейтронов в полном телесном угле и с низким порогом регистрации. Помимо этого, новый предложенный метод восстановления энергии антинейтрино путем регистрации мюона и нейтрона в детекторе SuperFGD позволит улучшить энергетическое разрешение для мюонных антинейтрино до 7% относительно 15%, получаемых при

использовании традиционных методов восстановления нейтринной энергии [14].

Новая однослойная сегментированная сцинтилляционная структура детектора NewCHOD позволила достигнуть почти в три раза лучшего временного разрешения, чем временное разрешение детектора CHOD (Charged Particle Hodoscope) (до корреляций по времени), обладающего двухслойной стриповой структурой. Также структура детектора NewCHOD позволила избавиться от проблемы (которую испытывал детектор CHOD), вызванной высокой нагрузкой в центральной области детектора.

Практической ценностью обладает разработанный в ИЯИ РАН 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, например, для детектора 3DST (3D projection scintillator tracker) эксперимента DUNE (Deep Underground Neutrino Experiment) [15].

### **Положения выносимые на защиту**

- Разработка высокосегментированного ближнего нейтринного детектора SuperFGD для эксперимента T2K. Основной мотивацией для создания данного детектора является уменьшение систематической ошибки осцилляционных измерений с текущего уровня в 6–7% до 3–4%. Детектор будет состоять из ~2 миллионов оптически изолированных сцинтилляционных кубиков с размером грани в 1 см. Каждый из этих кубиков покрыт отражателем и имеет три ортогональных отверстия для регистрации сигнала с помощью спектросмещающего оптического волокна. Такой размер кубиков позволяет сохранить приемлемый баланс между пространственным разрешением детектора, идентификацией частиц и количеством каналов для считывания сигнала.
- Результаты тестирования двух прототипов детектора SuperFGD на пучке заряженных частиц ускорителя PS (Proton Synchrotron)

в CERN. В рамках тестов первого прототипа, состоящего из 125 кубиков, были определены его основные параметры: среднее значение световыхода, временное разрешение и оптический crosstalk. При тестировании второго прототипа, большего размера, состоящего из ~10000 кубиков, были определены не только его основные параметры, но и осуществлена проверка концепции создания детектора большого объема с 3D считыванием сигнала, проведено тестирование электроники, которая будет использоваться в детекторе SuperFGD, разработан алгоритм для восстановления треков от заряженных частиц и осуществления идентификация типов частиц, проходящих через прототип детектора.

- Метод сборки сотен тысяч сцинтилляционных кубиков в трехмерную структуру. Он основан на использовании калиброванной лески. Основным преимуществом данного метода является то, что он позволяет сохранить достаточную подвижность структуры из лесок и кубиков при четкой фиксации положения каждого из кубиков, а также осуществить выстраивание кубиков, минимизируя погрешности в размерах граней и положения отверстий.
- Тестирование и постоянный контроль качества сцинтиллятора и изготовленных сцинтилляционных кубиков 3D сегментированного детектора SuperFGD. Результаты исследования затухания сигнала в оптическом волокне Kuraray Y11. Было изучено влияние различных способов обработки торца волокна (полировка, покрытие светоотражающей или черной краской) на световыход. Результаты механических тестов различных прототипов и элементов детектора SuperFGD.
- Моделирование прохождения мюонного гало вдоль линии эксперимента NA62. Были рассмотрены основные источники мюонов гало. Определены загрузки мюонами гало отдельных элементов экспериментальной установки NA62 как при номинальной интенсивности пучка, так и переходе работы эксперимента в режим высокой интенсивности.
- Результаты тестирования всех применяемых в детекторе NewCHOD микропиксельных фотодиодов SensL и их измеренные характеристики. Основные параметры детектора

NewCHOD (временное разрешение и загрузка отдельных элементов детектора при номинальной интенсивности пучка), измеренные после полной сборки и установки детектора в экспериментальном холле. Осуществленный контроль за стабильностью параметров детектора NewCHOD в процессе набора статистики в эксперименте NA62.

### **Личный вклад автора**

Автор принимал непосредственное участие в решении следующих задач:

- Участвовал на всех этапах разработки и создания нового высокоэнергетизированного трехмерного сцинтилляционного нейтринного детектора SuperFGD для эксперимента T2K.
- Принимал активное участие в тесте на пучке заряженных частиц ускорителя PS в CERN первого прототипа детектора SuperFGD и в определении параметров сцинтилляционных кубиков.
- Осуществлял тестирование на космических мюонах сцинтилляционных кубиков, изготовленных для детектора SuperFGD. С помощью космических мюонов исследовал ослабление сигнала в спектросмещающих волокнах KurarayY11 (мягкого типа с двойной оболочкой). Волокна такого типа будут использоваться в детекторе SuperFGD.
- Осуществил тестирование всех, применяемых в детекторе NewCHOD, микропиксельных фотодетекторов SensL SiPM (Silicon Photomultiplier).
- Принимал участие в определении основных физических параметров детектора NewCHOD после его установки в экспериментальном холле NA62.
- Принимал участие в настройке экспериментальной установки NA62 и контроле за стабильностью работы детектора NewCHOD во время сеансов по набору статистики эксперимента NA62.
- Произвел моделирование прохождения мюонного гало пучка вдоль линии эксперимента NA62 и определил загрузки мюонами гало различных элементов экспериментальной установки NA62. Подробно рассмотрел координатное распределение интенсивности мюонного гало перед распадным объемом.

## **Достоверность результатов**

Достоверность полученных результатов подтверждается соответствием результатов в независимых тестах, сравнением экспериментальных результатов с теоретическими моделями, а также их апробацией на научных конференциях и семинарах, публикациями в печати и в сравнениях с результатами, полученными в других исследованиях.

## **Апробация работы**

Результаты данного исследования были представлены автором в виде докладов на следующих всероссийских и международных конференциях:

1. Международная сессия-конференция секции ЯФ ОФН РАН, Дубна, Россия, 12-15 апреля 2016 года;
2. 59 научная конференция МФТИ, Долгопрудный, Россия, 21-26 ноября 2016 года;
3. III Межинститутская молодежная конференция «Физика элементарных частиц и космология», Долгопрудный, Россия, 27–28 апреля 2017 года;
4. Международная сессия-конференция Секции ядерной физики ОФН РФН «Физика фундаментальных взаимодействий», посвященная 50-летию Баксанской нейтринной обсерватории, Нальчик, Россия, 6–8 июня 2017 года;
5. VII международная молодежная конференция «Физика элементарных частиц и космология 2018», Москва, Россия 9-10 апреля 2018 года;
6. VII международная молодежная научная школа-конференция «Современные проблемы физики и технологий», Москва, Россия, 17–20 апреля 2018 года;
7. Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2018», Москва, Россия, 9–13 апреля 2018 года;
8. Moscow International School of Physics, Вороново, Россия, 20-27 февраля 2019 года;
9. VIII Международная молодежная научная школа-конференция «Современные проблемы физики и технологий», Москва, Россия, 15–20 апреля 2019 года;

10. VIII межинститутская молодежная конференция «Физика элементарных частиц и космология 2019», Москва, Россия, 11–12 апреля 2019 года;
11. Молодежная конференция по теоретической и экспериментальной физике (МКТЭФ-2019), Москва, Россия, 25–28 ноября 2019 года;
12. Instrumentation for Colliding Beam Physics (INSTR-20), Новосибирск, Россия, 24–28 февраля 2020 года;
13. Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2020», Москва, Россия, 10–27 ноября 2020 года.

В диссертацию вошли результаты работ, поддержанных грантом под руководством С.А. Федотова:

- РФФИ 18-32-00245 мол\_а «Разработка и создание детекторов заряженных частиц для исследования распадов каонов на лету»

В диссертацию вошли результаты работ, поддержанных грантами, в которых С.А. Федотов выступал в роли исполнителя:

- РФФИ 20-52-50010 ЯФ\_а «Разработка нейтринных детекторов для экспериментов Т2К и ГиперКамиоканде»;
- РФФИ 20-32-70196 Стабильность «Изучение взаимодействий нейтрино на базе ускорительного эксперимента Т2К (Токай-ТоКамиока) для дальнейшего снижения систематических ошибок и повышение точности измерения нейтринных осцилляций»;
- РФФИ 19-72-10096 «Поиск новой физики в каонных экспериментах».

В диссертацию вошли результаты работ, поддержанных Минобрнауки РФ в рамках программы финансирования крупных научных проектов национального проекта «Наука», грант «Нейтрино и астрофизика частиц», номер 075-15-2020-778.

## Публикации

Основные результаты диссертации отражены в 8 работах, которые индексируются базами данных Web of Science и/или Scopus. Список публикаций приведен в конце автореферата.

## Структура и объем диссертации

Работа состоит из Введения, 6 глав, Заключения, Списка сокращений и условных обозначений и Списка литературы. Объем диссертации 133 стр., она содержит 68 рисунков и 3 таблицы. Список литературы включает в себя 93 наименования.

## 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.

**Глава 1** посвящена истории открытия нейтрино и нейтринных осцилляций. Приводится краткая историческая справка развития нейтринной физики: от предложенной в 1932 году Паули гипотезе о существовании слабо взаимодействующего фермиона до формирования современной Стандартной нейтринной модели. Описывается краткая история экспериментального изучения феномена нейтринных осцилляций от гипотезы Б. Понтекорво до результатов ускорительных экспериментов T2K, NOvA (Neutrinos at the Main Injector Off-axis  $\nu_e$  Appearance) [16], MINOS (Main injector neutrino oscillation search) [17], Daya Bay [18], RENO (Reactor experiment for Neutrino Oscillation) [19] и Double Chooz [20]. Рассматриваются актуальные вопросы физики нейтрино. Приводятся основные постулаты Стандартной нейтринной модели. Подробно рассмотрен простейший случай осцилляций нейтрино в вакууме. Рассматривается общая классификация экспериментов по изучению нейтринных осцилляций.

**Глава 2** посвящена ускорительному нейтринному эксперименту с длинной базой T2K. Основной целью данного эксперимента является точное измерение параметров нейтринных осцилляций и поиск CP-нарушения в лептонном секторе. Схема эксперимента представлена на Рис. 1.

Основными элементами экспериментальной установки являются дальний детектор SK, расположенный в 295 км от мишени и ближний комплекс детекторов, расположенный на расстоянии 280 м от ми-

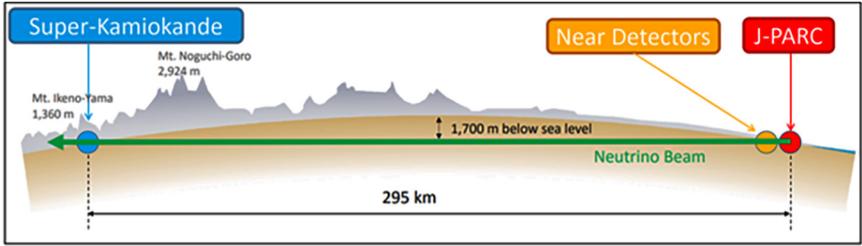


Рис. 1. Схема эксперимента T2K

шени. Этот комплекс состоит из двух детекторов: детектора INGRID (Interactive Neutrino GRID), который находится на оси пучка, и детектора ND280, расположенного под углом 2.5 градуса относительно оси пучка. Нейтринный пучок для эксперимента T2K образуется с использованием протонного пучка, полученного на базе ускорительного комплекса J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex). В эксперименте T2K впервые в мире была использована технология, предложенная для эксперимента E889 BNL, смещенного нейтринного пучка. Использование данной технологии позволяет добиться достаточно моноэнергетического пучка нейтрино.

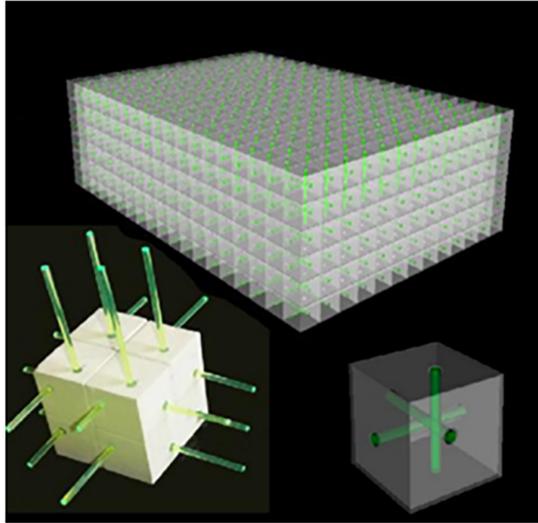
Эксперимент T2K начал свою работу в 2009 году с технического рана. С 2010 года эксперимент набирает данные для физического анализа. Всего за время работы к настоящему времени было осуществлено 9 физических ранов. За эти 9 ранов было аккумулировано  $3.29 \times 10^{21}$  протонов на мишени. Из них  $1.63 \times 10^{21}$  (49.76%) для нейтринного режима работы эксперимента и  $1.65 \times 10^{21}$  (50.24%) для режима работы с антинейтрино. В 2013 году в дальнем детекторе SK в изначальном пучке мюонных нейтрино было зарегистрировано 28 электронных нейтрино, при ожидаемом уровне фона 4.9 события. Это приводит к значимости наблюдаемого эффекта, осцилляции мюонного нейтрино в электронное, на уровне в  $7.3 \sigma$  [21]. На основе набранных за девять ранов данных были получены вероятности прямой и обратной иерархий масс нейтрино. Вероятность прямой иерархии ( $m_1 > m_2 > m_3$ ) составляет 88.9%, а вероятность обратной иерархии ( $m_2 > m_1 > m_3$ ) составляет 11.1% [22]. Также было установлено ограничение на значение параметра  $\delta$ , отвечающего за наличие CP-нарушения в лептонном секторе. На уровне в  $3 \sigma$  исключаются значения параметра  $\delta$  от  $-2^0$  до  $165^0$  [7].

В 2019–2020 году набор данных экспериментом T2K был приостановлен с целью проведения работ по модернизации пучка и экспериментальной установки. К 2021 году интенсивность первичного протонного пучка должна быть повышена до 750 кВт. В ходе работ по модернизации дальнего детектора в 2020 году должно быть осуществлено добавление гадолиния в воду детектора SK. Концентрация гадолиния должна быть доведена до уровня в 0.01% в водном объеме детектора. Добавка гадолиния призвана улучшить чувствительность детектора к нейтрино от сверхновых звезд. В рамках работ по модернизации ближнего нейтринного детектора ND280 детектор нейтральный пионов POD ( $\pi^0$  Detector) будет заменен на новый высокосегментированный сцинтилляционный детектор SuperFGD и две горизонтальные TPC. Эта модернизация призвана уменьшить систематическую ошибку осцилляционных измерений с уровня в 6–7% до 3–4%.

Также в данной **Главе** рассматривается вопрос строительства детектора Hyper-Kamiokande (HK), продолжающего эволюцию нейтринных экспериментов в Японии. HK будет примерно в 8 раз больше ныне существующего детектора SK. Создание детектора HK позволит с высокой точностью измерить CP-нарушение в лептонном секторе. Исследования атмосферных нейтрино в этом детекторе позволят точно определить иерархию масс нейтрино. Использование объединенных данных от ускорительных и атмосферных нейтрино позволят проверить современную теорию осцилляций с тремя поколениями нейтрино. В детекторе будет реализована программа по точному измерению осцилляций солнечных нейтрино и поиска нейтрино от сверхновых звезд. А также HK позволит значительно улучшить существующий предел вероятности протонного распада по нескольким модам.

**Глава 3** посвящена процессу разработки и создания нового высокосегментированного сцинтилляционного детектора SuperFGD. Создание данного детектора является главной частью проекта по модернизации ближнего нейтринного детектора ND280 эксперимента T2K. Концепт детектора SuperFGD представлен на Рис. 2.

Детектор будет состоять из сцинтилляционных кубиков с размером грани в 1 см. Каждый из этих кубиков покрыт отражателем



*Рис. 2.* Дизайн детектора SuperFGD. Группа из 8 кубиков иллюстрирует метод считывания сигнала

и имеет три ортогональных отверстия диаметром 1.5 мм. Такой размер кубиков позволяет сохранить приемлемый баланс между пространственным разрешением детектора и количеством каналов для считывания сигнала. Размер активной области детектора 192(ширина) $\times$ 56(высота) $\times$ 184(длина) кубика. Таким образом, детектор будет состоять из 1978368 кубиков, иметь 56384 канала для считывания сигнала и обладать активной массой  $\sim$ 2 тонн. Спектросмещающие волокна WLS (Wavelength Shifting) Kuraray Y11 (200) диаметром 1 мм пропускаются через отверстия с каждой из сторон кубиков, чтобы регистрировать сцинтилляционный свет с трех сторон с помощью фотосенсоров Hamamatsu MPPC (Multi-Pixel Photon Counter).

Для изготовления основных элементов детектора SuperFGD – сцинтилляционных кубиков с размером грани в 1 см, использовался метод литья под давлением. Достигнутая геометрическая точность изготовления этих кубиков (флуктуации размеров грани  $<$ 30 мкм, флуктуации позиционирования отверстий  $<$ 50 мкм) позволяет осуществить полную сборку детектора со спектросмещающими волокнами диаметром 1 мм. Разработанный метод сборки детектора

в трехмерную структуру основан на использовании калиброванной лески диаметром 1.3 мм. Релевантность этого способа сборки была проверена на нескольких полноразмерных прототипах. Данный метод сборки может применяться и при создании других детекторов со схожей геометрией и характеристиками.

На пучке заряженных частиц в CERN были осуществлены тесты двух прототипов детектора SuperFGD (Рис. 3).

Первый прототип состоял из 125 сцинтилляционных кубиков, изготовленных методом экструзии, и имел 75 каналов для считывания сигнала с помощью спектросмещающих волокон Kuraray Y11 длиной 1.3 м и микропиксельных фотодиодов MPPC. Для определения основных параметров данного прототипа применялся 16-канальный цифровой преобразователь CEAN DT5742 с частотой в 5 ГГц и разрешением 12 бит. Среднее значение световыхода  $l.y.$  (light yield) с одного кубика на одно волокно составило  $\sim 40$  ф.э./MIP (фотоэлектронов на минимально ионизирующую частицу), а с одного кубика на два волокна  $\sim 80$  ф.э./MIP. Временное разрешение для минимально ионизирующей частицы на одно волокно составило 0.95 нс, а на два волокна 0.65–0.71 нс. Оптический crosstalk через одну сторону кубика составил  $\sim 3\%$ .

Второй прототип детектора имел большие размеры:  $24 \times 8 \times 48$  кубиков, изготовленных, также как и в первом прототипе, методом экструзии. При такой конфигурации он состоял из 9216 кубиков и имел 1728 каналов для считывания сигнала с помощью спектросмещаю-



Рис. 3. Фотографии первого (слева) и второго (справа) прототипов детектора SuperFGD

ших волокон Kuraray Y11 с длиной, которая соответствовала длинам сторон прототипа, и микропиксельных фотодиодов Hamamatsu MPPC. В рамках исследования этого прототипа было произведено тестирование считывающей электроники, выбранной для использования в детекторе SuperFGD и основанной на ASIC (Application-Specific Integrated Circuit) «CITIROC» (Cherenkov Imaging Telescope Integrated Read Out Chip), а также была произведена проверка возможности восстановления треков и идентификации типа частиц, проходящих через прототип. Результаты, полученные при измерении основных параметров прототипа в данном тесте, согласуются с результатами, полученными при тестировании первого прототипа (с поправками на разную электронику, длину волокон и др.). Среднее значение световыхода с одного кубика на одно волокно составило  $\sim 58$  ф.э./MIP, временное разрешение на одно волокно составило  $\sim 1.14$  нс, оптический crosstalk через одну сторону кубика  $\sim 3\%$ .

В ходе всего процесса изготовления кубиков для детектора SuperFGD и его сборки на лесках непрерывно в тестах на космических мюонах осуществлялся контроль параметров кубиков и качества сцинтиллятора, используемого для их изготовления. Всего было протестировано более 2000 кубиков ( $>0.1\%$  от общего числа кубиков в детекторе). Средний световыход в этих тестах составил  $\sim 37$  ф.э./MIP. На протяжении тестов в течение двух лет не было обнаружено ни одного бракованного кубика с низким световыходом (минимальное значение световыхода в тестах составило 33.5 ф.э./MIP). 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 (полировка, покрытие светоотражающей или черной краской) противоположных от MPPC торцов волокна. Помимо этого, в данной **Главе** приводятся результаты других тестов отдельных элементов и систем детектора SuperFGD.

**Глава 4** посвящена теоретической и экспериментальной части изучения сверх редких каонных распадов  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$  и  $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ . Рассмотрены свойства унитарной матрицы Кабиббо-Кобаяши-Ма-

сквавы, 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.

**Глава 5** посвящена эксперименту NA62 CERN. Схема эксперимента представлена на Рис. 4.

Основной целью эксперимента NA62 является измерение с 10% точностью вероятности сверх редкого каонного распада  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ . Этот распад сильно подавлен и рассчитывается в Стандартной Модели с высокой точностью. Теоретические неопределенности крайне малы и не превышают 2% [23, 24]. Поэтому точное измерение вероятности этого распада позволит произвести проверку предсказаний Стандартной модели, отклонения от которых будут свидетельствовать о проявлении Новой физики.

Эксперимент набирал данные для физического анализа с 2016 по 2018 год. За три года эксперимент NA62 наблюдал 20 кандидатов в событие  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$  при ожидаемом уровне фона в 7 событий. Базируясь на полученных данных, была определена вероятность распада:

$$BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = (11.0_{-3.5}^{+4.0} \text{stst}) \times 10^{-11} (3.5\sigma) [11]$$

Для достижения главной цели эксперимента NA62 прямая регистрация гало пучка не требуется, поэтому, несмотря на большое количество вето-детекторов и многоуровневую триггерную систему, не существует детектора, который бы осуществлял его регистрацию. Однако, для различных экзотических распадов, изучаемых

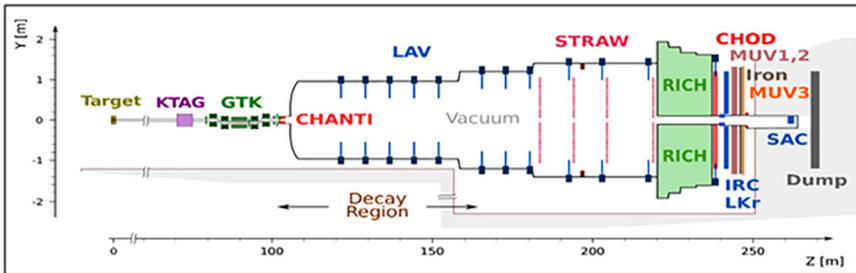


Рис. 4. Схема эксперимента NA62

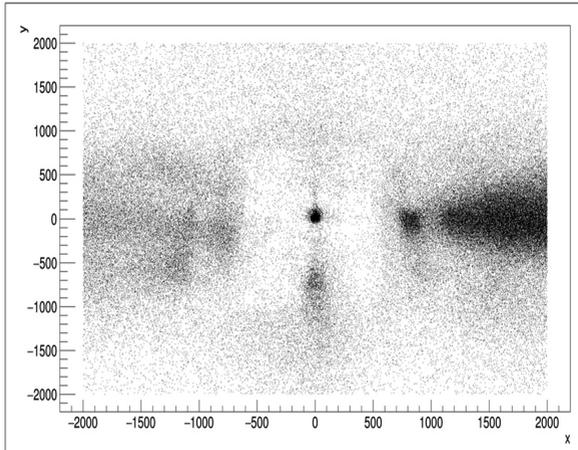


Рис. 5. Распределение гало мюонов в плоскости XY перед областью распада (X и Y указаны в мм)

в эксперименте NA62, а также для уменьшения фона в анализе данных по основному распаду, знания о гало могут быть крайне полезными [25]. Кроме того, из анализа данных 2016 года [26] следует, что основным источником фона являются взаимодействия в последней станции GTK (Gigatracker). Поэтому коллаборацией NA62 было принято решение о разработке и создании нового вето-детектора ANTI-0 (Charge anti-counter) [27], предназначенного для регистрации мюонного гало. Для этого было осуществлено моделирование прохождения гало каонного пучка вдоль экспериментальной линии NA62. В результате моделирования 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. Были получены загрузки мюонами гало отдельных элементов экспериментальной установки, а также подробно рассмотрено координатное распределение интенсивности мюонного гало перед распадным объемом Рис. 5 (в этой точке планируется установка нового вето детектора ANTI-0).

Были рассмотрены несколько вариантов размеров и два варианта структуры будущего детектора: однослойная сегментированная и двухслойная стриповая. Для обоих структур при радиусе  $\sim 1$  м общая загрузка детектора ANTI-0 мюонами гало составит  $\sim 24$  МГц.

Одним из вариантов работы эксперимента NA62 после большой остановки ускорительного комплекса в CERN в 2026 году является переход к режиму высокой интенсивности. При этом режиме интенсивность пучка должна возрасти в 4 раза. Такой переход потребует значительной модернизации всей экспериментальной установки. Многие детекторы потребуют полной замены. Возрастет не только полезная загрузка, но и фоновая загрузка детекторов от мюонов гало. Если рассмотреть систему LAV (Large Angle Veto), то при номинальной интенсивности пучка процент ложных срабатываний от мюонов гало  $\sim 10\%$ , а при переходе в режим высокой интенсивности, он уже достигнет  $\sim 50\%$ . Одним из возможных путей уменьшения фоновой загрузки детекторов мюонами гало является использование детектора ANTI-0 в качестве активного онлайн вето. Однако, переход работы эксперимента в режим высокой интенсивности будет все равно означать практически полную модернизацию/замену всех элементов экспериментальной установки NA62.

**Глава 6** посвящена годоскопу заряженных части NewCHOD для эксперимента NA62. В процессе использования детектора CHOD на пучке при его работе был обнаружен ряд проблем. Из-за двухслойной стриповой структуры осуществление корреляции событий в двух слоях при интенсивной загрузке, особенно в центральной области, представляло собой крайне тяжелую задачу. Кроме того, CHOD обладал низким временным онлайн (до корреляций по времени) разрешением. Поэтому после обсуждений коллаборацией NA62 было принято решение о создании нового детектора NewCHOD. Он представляет собой однослойный сегментированный сцинтилляционный годоскоп, симметричный относительно оси пучка. Центральный радиус детектора 140 мм, внешний радиус 1070 мм. Сегменты имеют размеры  $286 \times 108 \times 30 \text{ мм}^3$  на периферии детектора и  $134 \times 108 \times 30 \text{ мм}^3$  в центральной области. Сегменты разного размера используются для обеспечения равной загрузки на один канал считывания. Однослойная структура детектора и меньший размер сегментов в центральной области позволяют избежать проблем, вызванных высокой загрузкой.

В процессе создания детектора NewCHOD было осуществлено исследование характеристик, применяемых в нем фотосенсо-

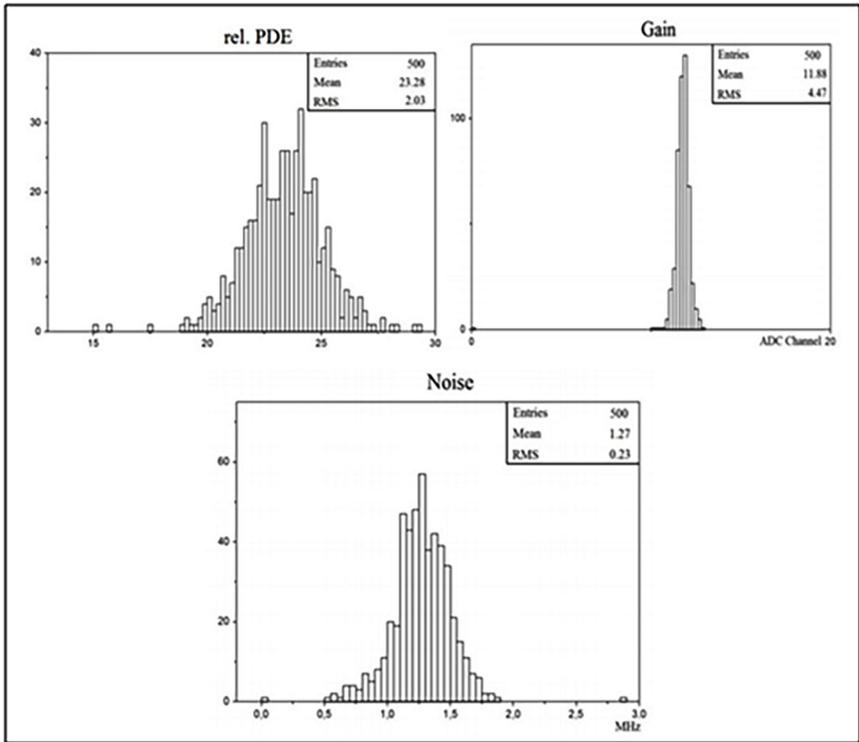


Рис. 6. Гистограммы относительного PDE (rel. PDE), усиления (Gain) и шума (Noise) для SiPM MicroFC-30035-SMT

ров: SensL SiPM MicroFC-30035-SMT с размером активной области  $3 \times 3 \text{ мм}^2$ , для которых были получены основные параметры: crosstalk, темновой ток и эффективность регистрации фотонов (PDE) Рис. 6. Тестирование всех фотосенсоров производилось на изолированном от внешних источников света стенде с контролируемой температурой. Зеленый светодиод генерировал световые импульсы, которые поступали на монохроматор, выделяющий свет с длиной волны 520 нм, которая соответствует спектральной чувствительности волокна. Свет, выходя из монохроматора, делился в соотношении  $\sim 1:1$  между двумя волокнами. Одно из этих волокон было подключено к тестируемому SiPM, а другое к эталонному ФЭУ (Hamamatsu PMT R580-17) с пиком спектральной чувствительности в зеленом диапазоне. Точность спектральной калибровки ФЭУ

~10%. В результате тестов не было найдено ни одного бракованного фотосенсора. За исключением двух образцов распределение параметров находится в разумных пределах. Также в рамках данных тестов было обнаружено, что абсолютное значение PDE для света с длиной волны в 520 нм при перенапряжении на фотосенсоре в 4.5 В составило 20%, что заметно ниже, чем указано в спецификациях производителем, но тем не менее соответствует требованиям к параметрам детектора.

Детектор NewCHOD был установлен и включен в экспериментальную установку NA62 в 2016 году. После этого по поступающим с детектора данным были определены его основные параметры: загрузка отдельных элементов не превышает 1 МГц, а среднее временное разрешение сегментов ~1.1 нс. Детектор NewCHOD использовался в нулевом уровне триггерной системы эксперимента NA62, обеспечивающем снижение частоты входящих данных до 1 МГц. Детектор также использовался для осуществления контроля качества пучка. Все это время детектор NewCHOD работал стабильно без значительных сбоев и остановок.

В **Заключении** представлены результаты и соответствующие выводы данной диссертации.

- Был разработан новый сцинтилляционный высокосегментированный ближний детектор нейтрино SuperFGD для эксперимента T2K. Данные работы входят в программу модернизации ближнего нейтринного детектора ND280. Детектор SuperFGD состоит из  $\sim 2 \times 10^6$  сцинтилляционных кубиков с размером грани в 1 см. Каждый из этих кубиков покрыт отражателем и имеет три ортогональных отверстия диаметром 1.5 мм для снятия сигнала с помощью спектросмещающего оптического волокна. Создание детектора SuperFGD позволит не только осуществлять регистрацию вторичных частиц от нейтринных взаимодействий во всех направлениях внутри детектора, но и поможет подавить фон от нейтронов и  $\gamma$ -квантов, что необходимо для уменьшения систематических ошибок осцилляционных измерений с текущего уровня в 6–7 % до 3–4 %. Это требуется для достижения планируемой чувствительности к CP-нарушению в экспериментах T2K и Hyper-Kamiokande.

- Был разработан метод сборки сотен тысяч сцинтилляционных кубиков в трехмерную структуру. Он основан на использовании калиброванной лески диаметром 1.3 мм. Преимущество применения данного метода заключается в том, что полученная структура детектора достаточно подвижна, что позволяет нивелировать небольшие различия в геометрии кубиков. Обоснованность данного метода сборки была протестирована на нескольких полноразмерных прототипах. Этот способ сборки также может быть использован при создании других детекторов со схожей геометрией и характеристиками, например для детектора 3DST эксперимента DUNE.
- На пучке заряженных частиц ускорителя PS в CERN были осуществлены тесты двух прототипов нового детектора SuperFGD, состоящих из 125 и 9216 сцинтилляционных кубиков. В результате тестов были получены основные параметры прототипов: среднее значение световыхода 1.у. с одного кубика на одно волокно составило  $\sim 40$  ф.э./MIP, а с одного кубика на два волокна  $\sim 80$  ф.э./MIP. Временное разрешение для одного волокна составило 0.95 нс, а для двух волокон 0.65–0.71 нс. Оптический crosstalk через одну сторону кубика составил  $\sim 3\%$ . Также в рамках данных измерений было произведено тестирование считывающей электроники, проверена возможность восстановления треков и идентификации типов частиц, проходящих через прототип детектора.
- Были проведены регулярные тесты и контроль сцинтилляционных параметров и геометрических размеров кубиков детектора SuperFGD. Средний световыход при измерениях с космическими мюонами составил  $\sim 37$  ф.э./MIP, не было обнаружено ни одного бракованного кубика с низким световыходом (менее 30 ф.э./MIP). Достигнутая точность геометрических размеров кубиков (точность размеров граней  $\sim 30$  мкм, точность позиционирования отверстий  $\sim 50$  мкм) удовлетворяет требованиям полной сборки детектора SuperFGD со спектросмещающими оптическими волокнами диаметром 1 мм.
- Было проведено исследование ослабления сигнала в спектросмещающем волокне Kuraray Y11 с использованием ультрафиолетового диода, а также с космическими мюонами. Один из торцов

тестируемых волокон просматривался фотосенсором, а другой был обработан одним из следующих способов: отполирован; отполирован и покрыт светоотражающей краской; отполирован и покрыт черной краской. Исследовались волокна длиной 2 м и 60 см, что соответствует длинам волокон в детекторе SuperFGD. В результате для каждого из образцов были получены две длины ослабления сигнала. Первая длина затухания сигнала для волокон, конец которых был просто отполирован, составила  $20.7 \pm 0.8$  см для волокон длиной 60 см;  $7.6 \pm 1.0$  см для волокон длиной 2 м. А вторая длина затухания составила  $172 \pm 5$  см для волокон длиной 60 см;  $304 \pm 7$  см для волокон длиной 2 м.

- Была осуществлена сборка 56 плоскостей детектора SuperFGD на лесках диаметром 1.3 мм. Каждая плоскость состоит их  $192 \times 184$  кубиков, прошедших геометрические тесты. В результате геометрических тестов было отобрано 95% хороших кубиков для сборки детектора SuperFGD от общего количества кубиков, которые были произведены.
- Было осуществлено моделирование прохождения гало каонного пучка вдоль линии эксперимента NA62. В результате моделирования было показано, что основным источником гало являются мюоны, образованные, в основном, из распадов каонов и пионов, а также из неупругих взаимодействий пучка первичных протонов с материалом мишени. Для каждого из этих источников были получены загрузки мюонами гало отдельных элементов экспериментальной установки, а также координатные распределения интенсивности на участке от мишени до конца экспериментальной установки. Более подробно рассмотрено координатное распределение интенсивности мюонного гало в зоне перед распадным объемом. В этой точке планируется установка нового вето детектора ANTI-0, предназначенного для регистрации мюонного гало. Было показано, что общая загрузка детектора мюонами гало составляет  $\sim 24$  МГц.
- В процессе создания детектора NewCHOD было осуществлено исследование характеристик, используемых в нем микропиксельных фотодетекторов SensL SiPM MicroFC-30035-SMT с размером активной области  $3 \times 3$  мм<sup>2</sup>, для которых были получены основные параметры: crosstalk, темновой ток и эффективность

регистрации фотонов. В результате тестов было исследовано 500 SensL SiPM. Не было найдено ни одного бракованного фотосенсора, но было обнаружено, что абсолютное значение PDE для света с длиной волны в 520 нм при перенапряжении на фотосенсоре в 4.5 В составило 20%, что заметно ниже, чем указано в спецификациях производителем, но тем не менее соответствует требованиям к параметрам детектора.

- После установки в экспериментальном зале и включения детектора NewCHOD в триггерную систему эксперимента NA62, было произведено изучение и осуществлен контроль за стабильностью его основных параметров. Были определены загрузки и временное разрешение всех отдельных элементов детектора. Загрузка отдельных элементов не превышала 1 МГц, а среднее временное разрешение сегментов составило  $\sim 1.1$  нс. Детектор NewCHOD использовался в нулевом уровне триггерной системы эксперимента NA62, обеспечивающем снижении частоты входящих данных до 1 МГц и для осуществления контроля качества пучка.

#### **Публикации автора по теме диссертационного исследования**

1. V. Duk, ..., **S. Fedotov**, ...et al. Performance studies of the hodoscope prototype for the NA62 experiment // JINST 11 (2016), no. 06, P06001
2. E. Cortino Gil, ..., **S. Fedotov**, ...et al. The Beam and detector of the NA62 experiment at CERN // JINST 12 (2017) no. 05, P05025
3. **S. Fedotov**, A. Kleymenova, A. Khotjantsev New CHOD Detector for the NA62 experiment at CERN // Physics of Particles and Nuclei, 2018, Vol. 49, No. 1, Pages 26-29
4. Blondel, ..., **S. Fedotov**, ...et al. A fully-active fine-grained detector with three readout views // JINST 02 2018, no 13, P02006
5. O. Mineev, ..., **S. Fedotov**, ...et al. Parameters of a fine-grained scintillator detector prototype with 3D WLS fiber readout for a T2K ND280 neutrino active target // Nucl.Instrum.Meth.A, Volume 936, 21 August 2019, Pages 136-138
6. O. Mineev, ..., **S. Fedotov**, ...et al. Beam test results of 3D fine-grained scintillator detector prototype for a T2K ND280 neutrino active target // Nucl.Instrum.Meth.A, Volume 923, 11 April 2019, Pages 134-138

7. **S. Fedotov** New 3D fine-grained scintillation detector for the T2K experiment // JINST 07 (2020) no. 15, C07042
8. A. Blondel, ..., **S. Fedotov**, ...et al. The SuperFGD Prototype charged particle beam test // JINST 12 (2020) JINST no. 15, P12003

### Список литературы

1. A. Blondel,..., S. Fedotov. et al. A fully active fine grained detector with three readout views // JINST 02 2018, no 13, P02006.
2. K. Abe et al. (T2K Collaboration). The T2K experiment // Nucl. Instrum. Meth, No. 659, 2011. pp. 106-135.
3. S. Fedotov, A. Kleymenova, A. Khotjantsev. New CHOD Detector for the NA62 experiment at CERN // Physics of Particles and Nuclei, Vol. 49, No. 1, 2018. pp. 26–29.
4. E.Cortino Gil,..., S. Fedotov,... et al. The Beam and detector of the NA62 experiment at CERN // JINST 12 (2017) no. 05, P05025.
5. B. Pontecorvo. Mesonium and Antimesonium // JETP, No. 6, 1957. pp. 549-551.
6. B. Pontecorvo. Inverse beta processes and nonconservation of lepton charge // JETP, No. 7, 1958. pp. 247-249.
7. K. Abe et al. (T2K Collaboration). Constraint on the matter-antimatter symmetry-violating phase in neutrino oscillations // Nature, No. 580, 2020. pp. 339-344.
8. KOTO Collaboration. Study of the  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  decay at the J-PARC KOTO experiment // Phys. Rev. Lett. 126, 121801 – Published 24 March 2021.
9. Artamonov A. V. et al. (E949 Collab.). // Phys. Rev. D., 2009. V. 79. P. 092004.
10. Artamonov A. V. et al. (E949 Collab.). // Phys. Rev. Lett., 2008. V. 101. P. 191802.
11. Radoslav Marchevski. Evidence for the decay  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$  from the NA62 experiment at CERN // ICHEP. Prague, Czech Republic. 28 July - 6 August.
12. K. Abe et al. (T2K Collaboration). T2K ND280 Upgrade - Technical Design Report // CERN-SPSC2019-001.
13. K. Abe, et al. Hyper-Kamiokande Design Report // e-Print 1805.04163 [physics.int-det].

14. L. Munteanu et al. New method for an improved anti-neutrino energy reconstruction with charged-current interactions in next-generation detectors // *Phys.Rev.D* 101 (2020) 9, 092003.
15. Guang Yang on behalf of the DUNE collaboration. The APS Division of Particles & Fields (DPF2019) // 3DST – S as a sub-system in DUNE ND. Boston, USA. 29 July – 2 August 2019.
16. M. A. Acero et al. [NOvA Collaboration]. New constraints on oscillation parameters from  $\nu_e$  appearance and  $\nu_\mu$  disappearance in the NOvA experiment // *Phys. Rev. D* 98, 032012 (2018).
17. MINOS Collaboration. The MINOS Experiment: Results and Prospects // *Adv.High Energy Phys.*, 2013 (2013) 182537.
18. Daya Bay Collaboration. Recent Results from the Daya Bay Experiment // *J.Phys.Conf.Ser.*, 888 (2017) 1, 012011.
19. RENO Collaboration. Status of RENO experiment // *AIP Conf.Proc.*, 1382 (2011) 1, 138-140.
20. The Double Chooz collaboration. Measurement of  $\theta_{13}$  in Double Chooz using neutron captures on hydrogen with novel background rejection techniques // *Journal of High Energy Physics*, No. 163, 2016.
21. Wilking M. in The European Physical Society Conf. on High Energy Physics Stockholm, Sweden, 18 - 24 July 2013.
22. A.K. Ichikawa for the T2K collaboration. NuPhys2019: Prospects of Neutrino Physics London, UK. 16-18 December 2019.
23. Ландсберг Л. Г. Редкие распады K-мезонов, Стандартная Модель и Новая Физика // Препринт ИФВЭ, 2000-27 2000.
24. Buras A.J. Lectures at 14 Lare Louise Winter Institute February 1999.
25. A. Calcaterra, et. al. Proposal to study the design and technology of a veto detector (ANTI-0) upstream of the decay vessel of the NA62 experiment // CERN, November 20 2016.
26. E.Cortino Gil., S. Fedotov. et. al. First search for  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \tilde{\nu}$  using the decay-in-flight technique // *Physics Letters B*, No. 791, April 2019. pp. 155-166.
27. S. Kholodenko, et. al. New veto hodoscope ANTI-0 for the NA62 experiment at CERN // *Journal of Instrumentation*, No. 15, July 2020. P. C07007.

Научное издание  
Федотов Сергей Андреевич  
Разработка и создание  
детекторов заряженных частиц для каонных  
и нейтринных экспериментов

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Ф-т 60x84/16 Уч.-изд.л. 1,2 Зак. № 22471 Тираж 80 экз. Бесплатно

Печать цифровая

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт ядерных исследований Российской академии наук

Издательский отдел  
117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а