

ОТЗЫВ
официального оппонента А.А. Соколова на диссертацию
Мефодьева Александра Владимировича на тему
“Разработка и создание магнитного нейтринного детектора Baby MIND”
по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной
физики, представленную на соискание учёной степени кандидата физико-
математических наук

Диссертационная работа А.В. Мефодьева посвящена разработке, созданию и тестированию магнитного железного нейтринного детектора (Magnetized Iron Neutrino Detector, Baby MIND), который используется в качестве мюонного спектрометра нейтринных событий в мишени Water-Grid-AndScintillator (WAGASCI) эксперимента Tokai to Kamioka (T2K).

Актуальность темы исследования

T2K – это нейтринный эксперимент с длинной базой, созданный для изучения нейтринных осцилляций. В эксперимент входит ускорительный комплекс Japanese Particle Accelerator Research Centre (J-PARC), находящийся в городе Токай, Япония, который служит источником нейтрино. В эксперименте используются комплекс ближних детекторов ND280, находящихся на расстоянии 280 метров от пионорождающей мишени, и дальний детектор Super-Kamiokande (SuperK) на расстоянии 295 километров. Эксперимент был разработан для поиска эффекта появления электронных нейтрино в пучке мюонных нейтрино, а также исследования исчезновения мюонных нейтрино. Целями данного эксперимента является точное измерение параметров осцилляций θ_{23} , измерения ненулевого угла смешивания θ_{13} , Δm^2_{23} , а также поиск CP нарушения в нейтринных осцилляциях. Дальний детектор служит для измерения осцилляций, в то время как ближний детектор служит для уменьшения систематических ошибок, определения параметров пучка до осцилляций, а также измерения сечений взаимодействия нейтрино с веществом. Благодаря ближнему детектору ND280 систематическая погрешность предсказанного количества сигнальных событий в детекторе Super-Kamiokande была уменьшена с 12,0% до 7.7% и с 11,9% до 6.8% в каналах $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ и $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$, соответственно. Однако, дальнейшее уменьшение систематической неопределенности ограничено из-за особенностей детекторов:

1. различия в активной части детекторов ND280 (80% C_8H_8 + 20% H_2O) и SK(H_2O). Что приводит к необходимости учета различия между нейтринными сечениями на C_8H_8 и H_2O ;
2. различия в угловом акцептансе ND280 (в основном вперед) и Super-K (4π);
3. различия в спектре нейтрино на ближнем и дальнем детекторе.

Для уменьшения систематических ошибок была разработана новая мишень-детектор Water-Grid-AndSCintillator (WAGASCI). Данная мишень, совместно с детекторами Baby MIND и Wall MRDs, предлагается для дальнейшего уменьшения систематических ошибок.

Новизна исследования

- Создан магнитный детектор нейтрино Baby MIND и установлен в зоне ближнего детектора ND280 эксперимента T2K. Модули данного детектора представляют собой слои намагниченного железа со сцинтилляционными модулями. Магнитное поле в модулях позволяет восстанавливать энергию проходящих частиц как по пробегу в детекторе, так и по отклонению от первоначальной траектории.
- Разработанный детектор имеет принципиально новый принцип намагничивания железных модулей. Намагничивание модулей происходит с помощью алюминиевых катушек. Принципиально новый дизайн магнитных модулей позволяет существенно уменьшить геометрические размеры, что, в свою очередь, позволяет увеличить количество активного материала.
- Оцифровка сигналов в детекторе Baby MIND происходит с помощью принципиально новой электроники на базе чипов CITIROC ASICs, разработанных в университете Женевы. Данная электроника оцифровывает сигнал, используя два предусилителя на каждом канале, что позволяет иметь большой динамический диапазон и точное значение амплитуды сигнала.
- Калибровка и обработка сигналов, полученных с кремниевых фотоумножителей, производится одновременно с двух предусилителей с каждого канала сильного и слабого усиления и с времени сигнала над порогом, что позволяет оцифровывать сигнал, считанный с кремниевых фотодиодов, с минимальным мертвым временем электроники.
- Проведены тесты детектора Baby MIND на пучке заряженных частиц в ЦЕРНе с энергиями от 1 ГэВ до 10 ГэВ и измерены параметры детектора.
- Проведен первый технический и физический сеанс детектора Baby MIND совместно с мишенью WAGASCI, проведена синхронизация между детекторами Baby MIND, Wall MRDs, протонным модулем и мишенью WAGASCI.
- Разработаны программные модули для восстановления треков заряженных частиц в детекторе Baby MIND от нейтринных взаимодействий.
- Измерен спектр мюонов, полученных при CCQE взаимодействиях нейтрино, под углом 1.5° относительно направления пучка протонов.

Степень достоверности

Разработанный детектор Baby MIND был протестирован в экспериментальной зоне T9 в ЦЕРНе. В ходе данных тестов была доказана

возможность регистрирования и реконструкции событий детектором. С помощью моделирования Монте-Карло была доказана эффективность реконструкции энергии и заряда проходящих мюонов. Реконструкция значения светового сигнала, считанного с кремниевого фотодиода, совпадает с значением амплитуды, вычисленной с помощью CAEN Digitizer.

Полученные спектры мюонов на нейтринном канале T2K под углом 1.5° для детектора Baby MIND совпали с ожидаемыми, полученными на основе моделирования методом Монте-Карло, нормированными с использованием данных на ND280 под углом 2.5° .

Практическая значимость

Результатом данной работы является создание магнитного нейтринного детектора Baby MIND и регистрация спектров мюонов на нейтринном канале T2K. Задача разработки детектора Baby MIND включала в себя разработку и тестирование намагниченных железных модулей, разработку, тестирование электроники на базе CITIROC ASICs. Разработанный детектор позволяет использовать его с мишенью WAGASCI в качестве спектрометра для восстановления нейтринных событий в мишени. Разработанная электроника FEBs позволяет использовать ее в других экспериментах. Программное обеспечение, разработанное в ходе разработки и тестирования детектора Baby MIND, может быть использовано и уже используется в других детекторах, например, в сегментированном сцинтилляционном детекторе (Super Fine Granulated Detector, SFGD).

Результаты, полученные с помощью разработанной в данной работе методики, нашли применение в экспериментальных исследованиях, которые проводятся в российских и зарубежных научных организациях, в частности в ИЯИ РАН, ОИЯИ, НИЯУ МИФИ, ЦЕРН (Швейцария, Франция), University of Tokyo (Япония), Universite de Geneve (Швейцария), Kyoto University (Япония), Imperial College London (Великобритания), University of Warsaw (Польша), ETH (Швейцария), Stony Brook University (США), The Pennsylvania State University (США), University of Pittsburgh (США), а также в других научных центрах России и за рубежом.

Оценка содержания диссертации

Диссертация является завершенной работой. Ее содержание и структура соответствуют заявленной специальности и цели исследования.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и библиографии.

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулирована цель и предмет исследования, методология и методы исследования, научная новизна,

теоретическая и практическая значимость, положения, выносимые на защиту, основные выводы и полученные результаты, личный вклад автора, степень достоверности, также описана структура диссертации.

Первая глава посвящена описанию изучения нейтринных осцилляций в нейтринных экспериментах и обсуждению полученных результатов. В данной главе представлено краткое теоретическое описание осцилляций нейтрино в вакууме, описан эффект вещества.

Во **второй главе** дано общее описание нейтринного ускорительного эксперимента с длиной базой T2K. В данной главе рассматривается комплекс ближних детекторов ND280 и дальний детектор Super-K. Также описываются основные этапы сбора и анализа данных в эксперименте T2K, представлены полученные результаты.

Третья глава посвящена основным этапам производства компонентов детектора Baby MIND. Описаны этапы сборки компонентов детектора, структура и дизайн изготовленных модулей. Также в этой главе представлены данные о проведенных тестах, методах исследования и полученные результаты. Описана схема намагничивания металлических модулей в детекторе Baby MIND. Представлены результаты разработки архитектуры электроники для оцифровки сигналов с кремниевых фотоумножителей и архитектура системы сбора данных.

Четвёртая глава посвящена описанию тестов, проведенных на пучке заряженных частиц в ЦЕРН'е. Описано, какие типы данных были собраны и обработаны; изменения, внесенные в конструкцию детектора; а также результаты, полученные в ходе проведенных тестов. Также здесь описана процедура обработки собранных данных для получения калибровок SiPM и электроники Baby MIND FEB. Представлено описание алгоритмов, используемых для реконструкции импульсов и зарядов, зарегистрированных в детекторе.

В **пятой главе** описаны результаты первого тестирования (технического сеанса) и первого физического сеанса детектора Baby MIND совместно с мишенью-детектором WAGASCI, детекторами WallMRDs и протонным модулем в экспериментальной зоне детектора ND280. Описаны изменения, внесенные в конструкцию детектора Baby MIND. В данной главе представлены результаты работ по синхронизации детектора Baby MIND с мишенью WAGASCI, WallMRDs, протонным модулем и пучком эксперимента T2K. Данные для исследования были взяты во время ввода в эксплуатацию Baby MIND в J-PARC в период с марта по май 2018 года, когда пучок работал в режиме мюонных антинейтрино.

В **заключении** представлены результаты и соответствующие выводы данной диссертации в рамках работ, посвященных разработке и созданию детектора Baby MIND.

1. Были разработаны и произведены сцинтилляционные счетчики заряженных частиц со спектрсмещающими волокнами для использования в

детекторе Baby MIND. Средний световой выход для горизонтальных счетчиков составил 66 ф.э./MIP и 37.5 ф.э./MIP для вертикальных счетчиков.

2. В тестах на пучке заряженных частиц в ЦЕРН'е измеренная эффективность регистрации мюонов для горизонтальных счетчиков составила 99.9% при пороговом значении регистрации сигнала в 4 ф.э., для вертикальных сцинтилляторов эффективность составила 99.8% при пороговом значении регистрации в 2 ф.э. в диапазоне энергий 1 – 10 ГэВ. Измеренное временное разрешение для горизонтальных счетчиков составило $\sigma = 0.7$ нс.

3. Разработаны и изготовлены сцинтилляционные модули детектора, состоящие из 4-х слоев сцинтилляционных счетчиков с зоной перекрытия между ними, что увеличило сегментацию детектора. Отсутствие контакта между счетчиками исключило оптический crosstalk между ними. Разработаны и созданы стальные модули, намагничивание которых происходит с помощью алюминиевых катушек. Особенность созданных магнитных модулей позволила существенно уменьшить геометрические размеры детектора и увеличить количество активного материала.

4. Разработанная и созданная электроника на базе чипов CITIROC ASICs позволила регистрировать динамический диапазон сигналов от 4 ф.э. до 500 ф.э., а использование метода регистрации сигнала от событий, с использованием информации о времени сигнала над порогом, позволило пренебречь мертвым временем оцифровки сигналов. Это позволило увеличить эффективность восстановления треков регистрируемых частиц.

5. В результате тестирование собранного детектора Baby MIND на пучке заряженных частиц в ЦЕРН'е была определена эффективность регистрации мюонов и эффективность определения их заряда в диапазоне энергий от 1 до 10 ГэВ. Эффективность регистрации мюона с последующей реконструкцией трека составила более 95%, эффективность определения заряда по отклонению в магнитном поле детектора Baby MIND составила более 90 %.

6. Детектор Baby MIND был установлен в шахте детектора ND280 эксперимента T2K совместно с мишенью WAGASCI, детекторами Wall MRDs и протонным модулем и начал набор статистики в 2019 году. В ходе технического сеанса была произведена калибровка всех кремниевых фотоумножителей, используемых в детекторе. Также была проведена синхронизация детекторов и мишеней между собой, что позволило восстанавливать энергию событий в мишени WAGASCI и протонном модуле.

7. Разработана система сбора данных DAQ. Данная система позволила осуществлять смену сеансов сбора данных и контролировать эффективность сбора данных. Для квалификации собранных данных в ходе сеанса были разработаны алгоритмы проверки качества данных. Итоговая эффективность набора данных в ходе первого физического сеанса составила 97.4%.

8. В ходе первого физического сеанса набора данных на нейтринном канале T2K получено разрешение восстановленного импульса мюонов в зависимости от

величины импульса и угла вылета мюонов из мишени WAGASCI и протонного модуля. Это разрешение составило $\sigma/P_{mean} = 0.09$ для событий, остановившихся в детекторе Baby MIND, и $\sigma/P_{mean} = 0.25$ для событий, покинувших эффективный объем детектора Baby MIND. Данные результаты позволили оптимизировать относительное местоположение мишени WAGASCI, протонного модуля, WallMRDs и детектора Baby MIND. Измерен спектр мюонов, полученных от CCQE взаимодействий нейтрино, под углом 1.5° относительно направления пучка протонов, вычислено количество нейтринных событий, нормированных на поток протонов. Полученный спектр совпадает со спектром, полученным методом Монте-Карло.

Соответствие автореферата диссертации её содержанию

Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации. В автореферате обоснована актуальность темы, приведены цели работы, ее научная новизна, практическая значимость, основные положения, выносимые на защиту, личный вклад автора, кратко изложено основное содержание работы, представлены результаты работы и список публикаций, содержащих основные результаты работы.

Личное участие автора в получении результатов, составляющих основу диссертации

1. Автор данной работы участвовал в разработке и создании сцинтилляционных счетчиков на всех этапах изготовления детектора Baby MIND.
2. Автор данной работы принимал участие в разработке конструкции детектора Baby MIND.
3. При непосредственном участии автора проводились измерения параметров сцинтилляционных счетчиков, таких как световой выход, временное разрешение и эффективность регистрации на пучке заряженных частиц в ЦЕРНе.
4. Автор принимал участие на всех этапах разработки электроники детектора для проведения тестов на пучке заряженных частиц в ЦЕРНе. А также участвовал на всех этапах сборки, настройки, установки и запуска детектора Baby MIND.
5. Автором был разработан программный комплекс для перевода бинарных данных с FEBs в root файлы и разработан программный комплекс для калибровки микропиксельных лавинных фотодиодов, установленных в детекторе.
6. Автор принимал активное участие в тестировании собранного детектора Baby MIND на пучке заряженных частиц в ЦЕРНе.
7. Автор создал программу для визуализации событий, зарегистрированных в детекторе и участвовал в разработке кода для реконструкции событий в

детекторе Baby MIND. Также автором был подготовлен программный код для квалификации собранных данных.

8. При непосредственном участии автора детектор был установлен и запущен в работу на нейтринном пучке T2K.
9. При непосредственном участии автора были проведен технический и физический сеанс, восстановлены нейтринные события в детекторе Baby MIND и получен спектр мюонов от CCQE взаимодействий нейтрино.

Замечания по диссертации:

1. Целью представленной работы является разработка детектора Baby MIND, тестирование данного детектора на мюонном пучке в ЦЕРНе, нейтринном канале T2K и использование в измерениях совместно с мишенью WAGASCI. Был выполнен обширный объем работ в различных областях. В результате при представлении соответствующих работ в диссертации не всегда удавалось достичь полноты, точности, согласованности их описания. Например,
 - нет упоминания и описания в тексте представленных рисунков 1.4, 1.5, 2.9;
 - встречаются неточности в формулировках, см. на стр.44 “Почти все адроны, кроме высокоэнергетичных (более 5 ГэВ) мюонов, останавливаются в поглотителе, ...”;
 - иногда нет четкого описания используемых элементов, см., например, описание коннектора на стр. 60.
2. При вычислении временного разрешения сцинтилляционных счетчиков, автор представляет результаты только для горизонтальных счётчиков, вычисленных с помощью электроники на базе чипов DRS4 (п. 3.3.7). Однако в работе не представлены результаты для вычисления временного разрешения для вертикальных счетчиков. Учет времени срабатывания вертикальных счетчиков позволит улучшить результаты временного разрешения детектора, но этого в работе не сделано.
3. В главе 5 автор представляет алгоритм валидации собранных данных, однако здесь не сказано о доле данных, не прошедших валидацию. Такая информация была бы полезной для более полного описания представленной процедуры.

Заключение

Отмеченные недостатки не влияют на качество исследования, а также на общую положительную оценку диссертационной работы. Диссертационная работа обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты. Результаты диссертации, имеющие большую практическую ценность, могут быть

использованы при создании детекторов следующего поколения в физике высоких энергий.

Рассмотренная диссертация является законченной научно-исследовательской работой и характеризуется высоким научным уровнем. Работы, вошедшие в диссертацию, опубликованы в рецензируемых научных изданиях и являются достоверными и оригинальными.

Диссертация А.В. Мефодьева на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук является научно-квалификационной работой, которая посвящена разработке, созданию и тестированию магнитного железного нейтринного детектора (Magnetized Iron Neutrino Detector, Baby MIND), который используется в качестве мюонного спектрометра нейтринных событий в мишени WATER-Grid-AndSCintillator (WAGASCI) эксперимента Tokai to Kamioka (T2K). Считаю, что диссертационная работа отвечает всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а её автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 - 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

Научного исследовательского центра «Курчатовский институт»,

ведущий научный сотрудник отделения экспериментальной физики.

« 03 » декабря 2021

_____ А.А. Соколов

Подпись Соколова Анатолия Александровича заверяю

Ученый секретарь

НИЦ “Курчатовский институт” - ИФВЭ

_____ Н.Н.Прокопенко

Соколов Анатолий Александрович, доктор физико-математических наук.

01.04.23 - физика высоких энергий.

Список основных публикаций официального оппонента по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет (не более 15):

1. Y.Guan, ...A. Sokolov et al. (Belle Collaboration), "Measurement of branching fractions and CP asymmetries for $D_s^+ \rightarrow K^+ (\eta, \pi^0)$ and $D_s^+ \rightarrow \pi^+ (\eta, \pi^0)$ decays at Belle", Phys. Rev. D **103**, 112005 (2021).
2. D. Sahoo, ...A. Sokolov et al. (Belle Collaboration), "Search for lepton-number- and baryon-number-violating tau decays at Belle", Phys. Rev. D **102**, 111101 (2020).
3. A. V. Akindinov, ...A. Sokolov et al., "Letter of interest for a neutrino beam from Protvino to KM3NeT/ORCA", Eur. Phys. J. C **79**, 758 (2019).
4. S.Jin, ...A. Sokolov et al. (Belle Collaboration), "Observation of $\tau^- \rightarrow \pi^- \nu_\tau e^+ e^-$ and search for $\tau^- \rightarrow \pi^- \nu_\tau \mu^+ \mu^-$ ", Phys. Rev. D **100**, 071101 (2019).
5. S.Watanuki, ...A. Sokolov et al. (Belle Collaboration), "Measurements of isospin asymmetry and difference of direct CP asymmetries in inclusive $B \rightarrow X_s \gamma$ decays", Phys. Rev. D **99**, 032012 (2019).
6. V.Babu, ...A. Sokolov et al. (Belle Collaboration), "Search for CP violation in the $D^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$ decay at Belle", Phys. Rev. D **97**, 011101 (2018).
7. A.Sibidanov, ...A. Sokolov et al. (Belle Collaboration), "Search for $B^- \rightarrow \mu^- \nu_\mu$ Decays at the Belle Experiment", Phys. Rev. Lett. **121**, 031801 (2018).
8. H.Nakano, ...A. Sokolov et al., (Belle Collaboration), "Measurement of Time-dependent CP Asymmetries in $B^0 \rightarrow K_s^0 \eta \gamma$ Decay", Phys. Rev. D **97**, 092003 (2018).
9. S.Sandilya, ...A. Sokolov et al. (Belle Collaboration), "Search for the Lepton-Flavor-Violating Decay $B^0 \rightarrow K^{*0} \mu^\pm e^\mp$ ", Phys. Rev. D **98**, 071101 (2018).
10. T. Horiguchi, ...A. Sokolov et al., (Belle Collaboration), "Evidence for Isospin Violation and Measurement of CP Asymmetries in $B \rightarrow K^*(892) \gamma$ ", Phys. Rev. Lett. **119**, 191802 (2017).
11. S. Hirose, ...A. Sokolov et al., (Belle Collaboration), "Measurement of the τ lepton polarization and $R(D^*)$ in the decay $B^- \rightarrow D^* \tau^- \bar{\nu}_\tau$ ", Phys. Rev. Lett. **118**, 211801 (2017).