

На правах рукописи

Мефодьев Александр Владимирович

Разработка и создание магнитного
нейтринного детектора Baby MIND

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:

Соколов Анатолий Александрович, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», отделение экспериментальной физики, ведущий научный сотрудник.

Титов Олег Александрович, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», отделение физики нейтрино, начальник лаборатории.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук (ИЯФ СО РАН)

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 и на сайте ИЯИ РАН по адресу:

<https://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, созданию и тестированию магнитного железного нейтринного детектора (Magnetized Iron Neutrino Detector, Baby MIND) [1–3], который используется в качестве мюонного спектрометра нейтринных событий в мишени Water-Grid-AndSCintillator (WAGASCI) [4–6]. Мишень WAGASCI, совместно с детекторами Baby MIND и Wall MRDs, предлагается для уменьшения систематической ошибки эксперимента Tokai to Kamioka (T2K) [7–12] с помощью подхода, аналогичного тому, который ранее использовался для измерения отношения сечения взаимодействия нейтрино с Fe и CH с помощью INGRID (сэндвич-железо-сцинтилляционные детекторы + модуль «протон» чистого углеводорода) [13]. В диссертации приводятся результаты работ по разработке и созданию детектора Baby MIND и первые полученные результаты на пучке заряженных частиц и на нейтринном канале эксперимента 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 [13], находящихся на расстоянии 280 метров от пиона рождающей мишени, и дальний детектор Super-Kamiokande (SuperK) [13] на расстоянии 295 километров. Эксперимент относится к классу экспериментов off-axis, это означает, что анализируемый пучок нейтрино расположен не на оси ускоритель-детектор, а под небольшим углом, в данном случае $2,5^\circ$. Эксперимент был разработан для поиска эффекта появления электронных нейтрино в пучке мюонных нейтрино, а также исследования исчезновения мюонных нейтрино. В данный момент эксперимент работает также в анти-нейтринной моде. Целями данного эксперимента является точное измерение параметров осцилляций θ_{23} , измерения ненулевого угла смешивания θ_{13} , Δm_{23}^2 , а так же 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.

Ближний комплекс детекторов эксперимента T2K ND280 расположен на расстоянии 280 метров от источника нейтрино под углом 2.5° к оси пучка в направлении детектора Super-Kamiokande. Основными задачами детектора являются:

1. измерение и контроль потока нейтрино;

Таблица 1 — Погрешности предсказанного количества сигнальных событий в детекторе Super-Kamiokande (1σ , %) для различных сцинтилляционных мод [14–16].

Систематические погрешности	ν_μ	ν_e
Поток	2.7	3.2
Зависимость от состава мишени	5.0	4.7
Систематическая ошибка Super-Kamiokande	4.0	2.7
Ядерные процессы	3.0	2.5
Общая	7.7	6.8

- определение состава нейтринного пучка (в том числе примеси электронных нейтрино);
- определение энергетического спектра нейтрино до процесса осцилляций;
- измерение сечений взаимодействия нейтрино с веществом.

Благодаря ближнему детектору ND280 систематическая ошибка была уменьшена с 12,0% до 7.7% и с 11,9% до 6.8% соответственно в каналах $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ и $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ [14–16], таблица 1.

Однако, дальнейшее уменьшение систематической неопределенности ограничено из-за особенностей детекторов:

- различия в активной части детектора между ND280 (80% C_8H_8 + 20% H_2O) и SK(H_2O). Что приводит к необходимости учета в различиях нейтринных сечений между C_8H_8 и H_2O .
- различия в угловом аксептансе ND280 (в основном вперед) и Super-K (4π).
- различия в спектре нейтрино в 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 уменьшения систематической ошибки с помощью подхода, аналогичного тому, который ранее использовался для измерения отношения сечения взаимодействия нейтрино с Fe и CH с помощью INGRID (сэндвич-железо-сцинтилляционные детекторы + модуль «протон» чистого углеводорода).

Основными целями созданного мишень-детектора WAGASCI являются:

- измерение отношения сечения взаимодействия нейтрино через заряженные токи между водой и сцинтиллятором с точностью 3%,
- измерение различных каналов взаимодействия нейтрино через заряженные токи с высокой точностью и большим угловым аксептансом.

Магнитный железный нейтринный детектор Baby MIND, используется в качестве магнитного спектрометра за основной мишенью WAGASCI

[5, 6, 16–19]. Детектор Baby MIND был установлен в зоне ближнего детектора эксперимента T2K на этаже В2 за мишенью WAGASCI весной 2018 года. Основная целью детектора Baby MIND – реконструкция заряда и импульса частиц из мишени WAGASCI, для восстановления нейтринных взаимодействий в мишени.

Цели и задачи исследования

Целью данной работы является разработка детектора Baby MIND, а также тестирование данного детектора на мюонном пучке в ЦЕРНе, нейтринном канале T2K и использование в измерениях совместно с мишенью WAGASCI.

Задачами работы являются:

- Разработка и тестирование сцинтилляционных счетчиков для детектора Baby MIND. Измерение характеристик сцинтилляционных счетчиков, таких как: световой выход, временное разрешение, эффективность регистрации на пучке заряженных частиц в ЦЕРНе.
- Тестирование детектора Baby MIND на пучке заряженных частиц.
- Установка и запуск детектора Baby MIND на нейтринном канале T2K.
- Использование детектора Baby MIND совместно с мишенью WAGASCI.
- Демонстрация возможности использования магнитных детекторов типа MIND (Magnetized Iron Neutrino Detector) в нейтринной физике.
- Измерение импульса, заряда и идентификации частиц с помощью детекторов типа MIND.
- Определение эффективности регистрации мюонов в детекторе Baby MIND.
- Регистрация нейтринных событий и восстановление треков заряженных частиц от нейтринных взаимодействий. Восстановление спектра мюонов, образованных при квазиупругих взаимодействиях заряженным током (CCQE) мюонных нейтрино.

Научная новизна

1. Создан магнитный детектор нейтрино Baby MIND и установлен в зоне ближнего детектора ND280 эксперимента T2K. Модули данного детектора представляют собой слои намагниченного железа с сцинтилляционными модулями. Магнитное поле в модулях позволяет восстанавливать энергию проходящих частиц как по пробегу в детекторе, так и по отклонению от изначальной траектории.
2. 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.

3. Оцифровка сигналов в детекторе Baby MIND происходит с помощью принципиально новой электроники на базе чипов CITIROC ASICs [20], 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.
4. Калибровка и обработка сигналов, полученных с кремневых фотумножителей, производится одновременно с двух предусилителей с каждого канала сильного и слабого усиления и с времени сигнала над порогом, что позволяет оцифровывать сигнал, считанный с кремневых фотодиодов, с минимальным мертвым временем электроники.
5. Проведены тесты детектора Baby MIND на пучке заряженных частиц в ЦЕРНе с энергиями от 1 ГэВ до 10 ГэВ и измерены параметры детектора.
6. 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.
7. Разработаны программные модули для восстановления треков заряженных частиц в детекторе Baby MIND от нейтринных взаимодействий.
8. Измерен спектр мюонов, полученных при CCQE взаимодействиях нейтрино, под углом 1.5° относительно направления пучка протонов.

Практическая значимость

Результатом данной работы является создание магнитного нейтринного детектора Baby MIND и получение первых зарегистрированных спектров от ускорителя J-PARC. 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 позволяют использовать их в других экспериментах (например, планируется модернизация детектора ND280 и использование в качестве центрального детектора нейтрино сегментированного сцинтилляционного детектора (Super Fine Granulated Detector, SFGD). Программное обеспечение, разработанное в ходе разработки и тестирования детектора Baby MIND, может быть использовано и уже используется в других детекторах (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 во многих других научных центрах России и за рубежом.

Методология и методы исследования

Основным методом исследования в разработке и создании магнитного нейтринного детектора Baby MIND является метод создания и исследования всех компонентов, входящих в детектор. Для каждого компонента детектора производился прототип, затем данный прототип тщательно исследовался. Все выявленные недостатки устранялись, и только следующим этапом производилось массовое производство. Далее производился этап объединения компонентов в независимые модули с последующим исследованием. В финальном этапе производилось объединение независимых модулей с последующим тестированием на пучке заряженных частиц в ЦЕРНе.

Все результаты, полученные на каждом этапе исследования и производства прототипов, были сохранены и учтены в моделировании методом Монте-Карло.

Алгоритмы реконструкции событий, зарегистрированных в детекторе Baby MIND, были протестированы на данных, полученных методом Монте-Карло. В алгоритмах реконструкции событий были учтены все данные, полученные в ходе разработки магнитного нейтринного детектора Baby MIND.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Разработан, создан и запущен в работу детектор Baby MIND, который предназначен для использования совместно с мишенью WAGASCI. Применение данного детектора позволяет реконструировать нейтринные события, произошедшие в мишени из пластика и воды. Данный детектор измеряет энергию и заряд регистрируемых мюонов, образованных от взаимодействия нейтрино с пластиком (CH) и водой (H_2O).
2. Проведено тестирование составных элементов и детектора Baby MIND в полном объеме на пучке заряженных частиц в ЦЕРНе. Получены параметры светового выхода сцинтилляционных счетчиков, временное разрешение, эффективность регистрации, а также произведено восстановление зарядов зарегистрированных частиц.
3. Разработаны алгоритмы калибровки кремневых фотоумножителей и электроники детектора Baby MIND. Созданы алгоритмы

восстановления амплитуды из времени сигнала над порогом регистрации. Ошибка восстановления амплитуды сигнала из времени над порогом составила 6.7% для канала сильного усиления и 3.6% для канала слабого усиления.

4. Разработана система сбора данных, включающая в себя DAQ сервер, клиент, Maximium Integration Data Acquisition System (MIDAS) сервер, плату временной синхронизации и 46 печатных плат Baby MIND FEB. Разработанная система сбора банных показала эффективность сбора статистики 97.4% в ходе первого физического сеанса. Проведена синхронизация детектора Baby MIND с нейтринным пучком T2K, мишенью WAGASCI, протонным модулем и WallMRDs. Разработаны алгоритмы квалификации собранных данных.
5. Разработан и протестирован алгоритм восстановления треков заряженных частиц и алгоритм восстановления импульсов мюонов, образованных от взаимодействия нейтрино с пластиком (CH) и водой (H_2O) в мишени WAGASCI.
6. Измерен спектр мюонов, образованных от CCQE взаимодействиях нейтрино, на основе данных, накопленных за технический и первый физический сеанс на нейтринном пучке T2K. Диапазон измеренных импульсов составил 350 – 1600 МэВ/с с пиком в 500 МэВ/с. Полученный спектр согласуется с результатами полученными методом Монте-Карло.

Степень достоверности

Разработанный детектор Baby MIND был протестирован в экспериментальной зоне T9 в ЦЕРНе. Возможность регистрирования и реконструкции событий была доказана в ходе данных тестов. С помощью моделирования Монте-Карло была доказана эффективность реконструкции энергии и заряда проходящих мюонов. Реконструкция значения светового сигнала, считанного с кремневого 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, ортонормированными на основе данных ND280 под углом 2.5° .

Апробация результатов Основные результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях:

- Мefодьев А.В., Разработка Прототипа T ASD (Totally Active Scintillator Detector), Международная сессия-конференция секции ядерной физики 2014, НИЯУ МИФИ, 17 – 21 ноября 2014 года, Москва.
- E. Noah, ..., A. Mefodiev, ... et al. Readout scheme for the Baby-MIND detector. PhotoDet 2015, July 6 – 9, 2015, Moscow, Russia.

- Fuminao Hosomi, . . . , A. Mefodiev, . . . et al. Performance test of new MPPC for a new neutrino detector WAGASCI. PhotoDet 2015, July 6 – 9, 2015, Moscow, Russia.
- A. Mefodiev, . . . et al. The design, construction and testing of TASD (Totally Active Scintillator Detector). PhotoDet 2015, July 6 – 9, 2015, Moscow, Russia.
- Мefодьев А.В., Нейтринные детекторы TАСD и Baby-MIND, 58-я международная научная конференция МФТИ, Московский физико-технический институт, 23 – 28 ноября 2015 года, г. Москва.
- Мefодьев А.В., Нейтринный детектор Baby-MIND, Международная Сессия-конференция Секции ядерной физики ОФН РАН, 12 – 15 апреля, 2016, ОИЯИ г. Дубна.
- Mefodiev A., Status of the magnetized neutrino detector Baby-MIND, The 2nd International Conference on Particle Physics and Astrophysics, 10 – 14 of October, 2016, Moscow, Russia.
- Mefodiev A., Performance of large scintillator detectors with WLS/SiPM readout, The 2nd International Conference on Particle Physics and Astrophysics, 10 – 14 of October 2016, Moscow, Russia, .
- Мefодьев А.В., Статус магнетизированного железного нейтринного детектора BabyMIND. 59 научная конференция МФТИ, 21 – 26 ноября 2016 года, Москва.
- Мefодьев А.В., Developing of the segmented neutrino detector Baby-MIND, The International Conference "Instrumentation for Colliding Beam Physics" (INSTR-17), 27 February – 3 March 2017 года, Novosibirsk, Russia.
- Mefodiev A., Baby MIND: last results from T9 beam line at CERN, The 3rd international conference on particle physics and astrophysics (ICPPA-2017). 2 – 5 October 2017, Moscow, Russia.
- Мefодьев А.В., Baby MIND: последние результаты тестов на пучке в ЦЕРНе, 61-я Научная конференция МФТИ, 19 – 25 ноября 2017 года, г. Москва.

Личный вклад автора

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 так же 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 разработал программный комплекс для калибровки микропиксельных лавинных фотодиодов, установленных в детектор.
6. Автор принимал активное участие в тестировании собранного детектора Baby MIND на пучке заряженных частиц в ЦЕРНе.
7. Автор создал программу для визуализации событий происходящих в детекторе и участвовал в разработке кода для реконструкция 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.

Публикации Материалы диссертационной работы опубликованы в **16** печатных работах [A1 – A16], **5** из них опубликованы в ведущих научных рецензируемых журналах рекомендованных ВАК, которые индексируются в международных базах Web of Science и/или Scopus, **11** из них опубликованы в трудах конференций, индексируемых базами данных Web of Science и/или Scopus. Список публикаций приведен в конце автореферата.

Содержание работы

Во **Введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы, рассматривается личный вклад автора и приводятся данные об апробации данной работы.

Глава 1 посвящена описанию нейтринных экспериментов и полученных результатов, также в данной главе предоставлены выражения для осцилляций нейтрино в вакууме. Представлен обзор экспериментов с солнечными, атмосферными, реакторными и ускорительными нейтрино, где особое внимание уделяется результатам нейтринных ускорительных экспериментов с длинной базой.

Вторая глава посвящена нейтринному ускорительному эксперименту с длинной 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 и представлены полученные результаты.

T2K – это эксперимент в Японии с длинной базой, созданный для изучения нейтринных осцилляций. В эксперименте используются ближний детектор ND280, находящийся на расстоянии 280 метров от мишени ускорителя, и дальний детектор Super-Kamiokande на расстоянии 295 километров (рис. 1). Эксперимент относится к классу экспериментов off-axes. Это означает, что анализируемый пучок нейтрино расположен не на оси ускоритель-детектор, а под небольшим углом, в данном случае $2,5^\circ$. Целями данного эксперимента являются: точное измерение параметров осцилляций θ_{23} , Δm_{23}^2 , измерения ненулевого угла смешивания θ_{13} , поиск CP нарушения. Дальний детектор служит для измерения осцилляций, в то время как ближний детектор служит для уменьшения систематических ошибок, определения и контроля параметров нейтринного пучка, а также измерения сечений взаимодействия нейтрино с веществом.

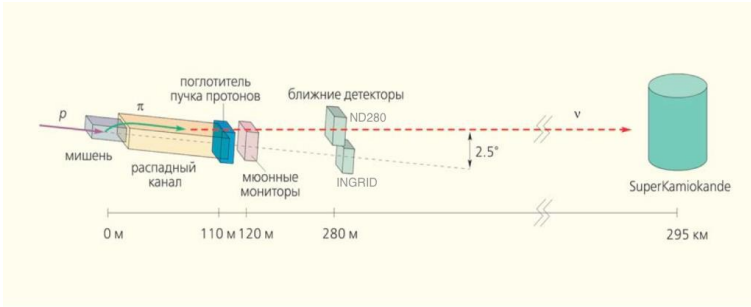


Рис. 1 — Схема эксперимента T2K.

Для набора статистики T2K использует один из самых интенсивных и почти чистых пучков ν_μ ($\bar{\nu}_\mu$) от J-PARC. Пучок протонов 30 ГэВ с интенсивностью $2,5 \times 10^{14}$ протонов в импульсе (с циклическостью в 2,48 секунд) бомбардирует в мишень с графитовым сердечником длиной 90 см. INGRID используется для мониторинга стабильности образования нейтрино и измерения профиля нейтрино вокруг центра пучка, ND280 предназначен для вычисления характеристик пучка нейтрино и понимания нейтринно-нуклонных (ядер) взаимодействий. В детекторе SuperK реализована способность отличать мюон и электрон и, следовательно, детектировать ν_μ и ν_e , что позволяет T2K проводить два вида измерений: исчезновение ν_μ и появление ν_e в пучке.

В 2010 году начался набор статистики в эксперименте T2K, а в 2011 году было получено первое указание на регистрацию ν_e в пучке ν_μ , было

зарегистрировано 6 событий ν_e в дальнем детекторе эксперимента T2K при ожидаемом фоне в 1.5 события [21]. В 2013 г. в эксперименте T2K впервые было получено указание на максимальное CP-нарушение в нейтринных осцилляциях [22]. Для этого использовалась комбинация измеренной вероятности перехода $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ и величины θ_{13} , полученные в реакторных экспериментах. А в 2020 году были представлены предварительные результаты измерения величины CP нечетной фазы [23].

Глава 3 посвящена основным этапам производства компонентов детектора Baby MIND. Показаны этапы сборки компонентов детектора, структура и дизайн, изготовленных модулей. Также в данной Главе представлены данные о проведенных тестах, методах исследования и полученных результатов. Описывается схема намагничивания металлических модулей в детекторе Baby MIND. И представлены результаты разработки архитектуры электроники для оцифровки сигналов с кремневых фотоумножителей и архитектура системы сбора данных.

Baby MIND состоит из модулей намагниченного железа [24], чередующихся с модулями сцинтилляционных счетчиков. Baby MIND включает в себя 33 модуля намагниченного железа, каждый модуль имеет индивидуальные индукционные катушки, и 18 сцинтилляционных модулей, где каждый сцинтилляционный модуль состоит из 95 горизонтальных счетчиков $3000 \times 31 \times 7.5 \text{ мм}^3$ и 16 вертикальных счетчиков $1950 \times 210 \times 7.5 \text{ мм}^3$ в двух плоскостях (внутри одного модуля), суммарный размер сцинтилляционного модуля $3000 \times 1950 \times 30 \text{ мм}^3$ (рис. 2). Средний световой выход для горизонтальных счетчиков составил 66 фотоэлектронов на минимально ионизирующую частицу (ф.э./MIP) и 37.5 ф.э./MIP для вертикальных счетчиков.



Рис. 2 — а — Фотография собранного магнитного модуля детектора Baby MIND. б — Фотография собранной половины сцинтилляционного модуля.

В тестах на пучке заряженных частиц в ЦЕРНе измеренная эффективность регистрации мюонов для горизонтальных счетчиков составила

99.9 % при пороговом значении регистрации сигнала в 4 ф.э., а для вертикальных сцинтилляторов 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.

В **четвертой главе** приведено описание проведенных тестов на пучке заряженных частиц в ЦЕРНе. Описаны какие данные были собраны и обработаны, какие изменения были внесены в конструкцию детектора, а также полученные результаты в ходе проведенных тестов. В Главе описано, каким образом происходит обработка данных для получения калибровок SiPM и электроники Baby MIND FEB. И предоставлено описание алгоритмов, используемых для реконструкции импульсов и зарядов, зарегистрированных в детекторе.

Первый этап тестирования компонентов детектора Baby MIND на ускорителе был проведен 2016 году. Тестирования проводились с использованием Полностью Активного Сцинтилляционного детектора (Totally Active Scintillator Detector, TASD). Основной целью первого этапа была проверка первой версии электроники, проводящей обработку и оцифровку сигналов с кремневых фотоумножителей. Второй этап тестов (май 2017 года) проводился с использованием первого блока детектора Baby MIND, состоящего из 7 сцинтилляционных модулей и 9 магнитных модулей детектора. Основной целью являлась проверка возможности детектирования проходящих частиц, поиск любых недочетов, допущенных при конструкции детектора и проверка отклонения оси пучка в магнитных модулях детектора. Финальный этапом тестов в ЦЕРНе проходил в июле - августе 2017 года, когда впервые проводилось полное тестирование собранного детектора, но еще не все компоненты электроники были произведены.

В ходе первого этапа тестов в экспериментальной зоне Т9 в ЦЕРНе позволили проверить и адаптировать программное обеспечение электроники Baby MIND FEB и программное обеспечение комплекса Unpacking до возможности реконструкции треков, пролетающих мюонов, и калибровки кремневых фотоумножителей. В результате второго этапа тестов был проведен анализ собранных данных для μ^+ , μ^- , π^+ , π^- с импульсами 0,5 – 5 Гэв/с. Сравнительный анализ доказал работу магнитных модулей, а влияние работы магнитных модулей на систему сбора данных обнаружено не было.

В ходе третьего этапа тестирования детектора Baby MIND (рис. 3) на пучке заряженных частиц было проведено повторное тестирование каждого компонента детектора, поиск оптимальных настроек компонентов детектора, калибровка кремневых фотоумножителей, вычисление временного разрешения сцинтилляционных счетчиков, исследование стабильности магнитных модулей, калибровка линии электроники со слабым и сильным усилением, калибровка зависимости времени сигнала над порогом на амплитуду сигнала и поиск оптимальных настроек электроники

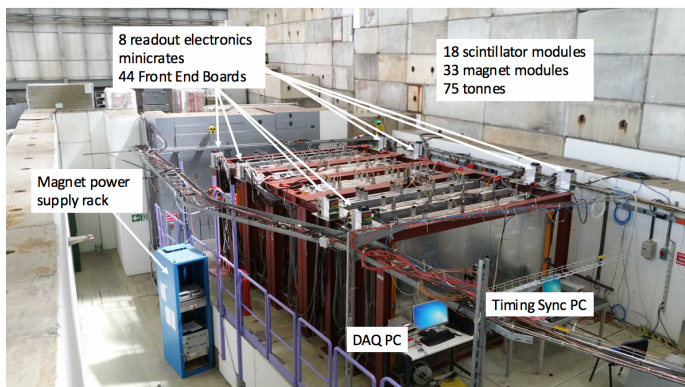


Рис. 3 — Фотография детектора Baby MIND в экспериментальной зоне T9 в ЦЕРНе.

FEBs, разработка алгоритмов восстановления треков (рис. 4), зарядов и импульсов регистрируемых частиц.

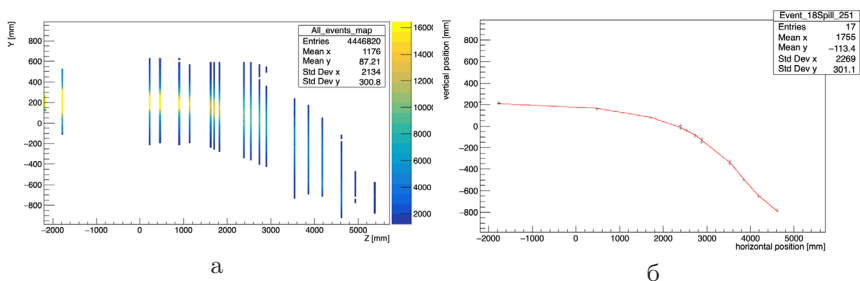
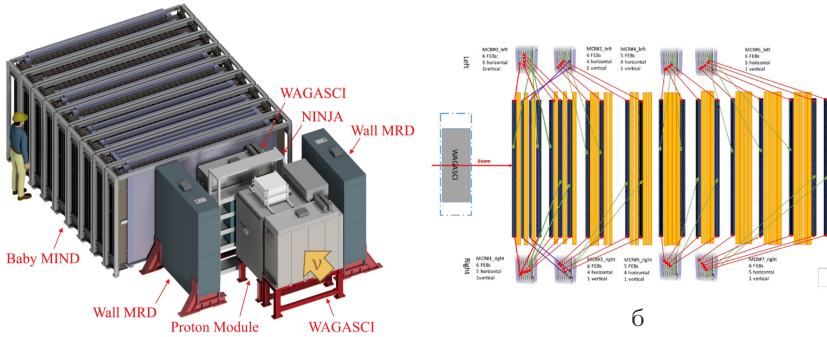


Рис. 4 — Карта всех событий (а) и пример трека (б) регистрируемых μ с импульсом 1,5 ГэВ/с для прямого подключения магнита.

В **пятой главе** представлены результаты первого тестирования (технического рана) и первого физического рана детектора Baby MIND совместно с мишенью-детектором WAGASCI, детекторами WallMRDs и протонным модулем в экспериментальной зоне детектора ND280 (рис. 5). Представлены изменения внесенные в конструкцию детектора Baby MIND. В данной Главе описаны результаты работ по синхронизации детектора Baby MIND с мишенью WAGASCI, WallMRDs, протонным модулем и пучком эксперимента T2K.

Также в данной главе описаны созданная система сбора данных DAQ (рис. 5), включающая в себя в общей сложности 46 Baby MIND FEBS



а

Рис. 5 — а – Схематическое изображения эксперимента WAGASCI и относительное положение детекторов Baby MIND и мишеней WAGASCI. б – Схематическое изображение схемы подключения детектора Baby MIND.

установленных в 8 MCRs и обеспечивают считывание с 4024 SiPMs, плату синхронизации Master Clock Board (MCB), систему контроля питания магнита. Описаны алгоритмы квалификации собранных данных, включающих в себя этапы проверки количества событий на каждом SiPM, времени каждого сигнала, структуры пучка и проверки согласованности зарегистрированных событий с соседними детекторами (рис. 6).

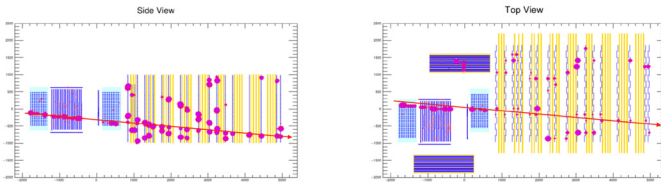
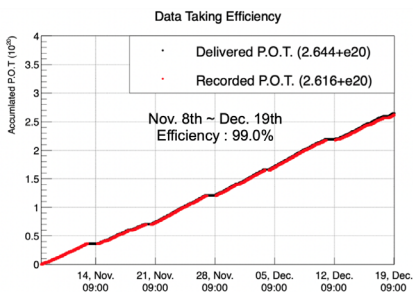


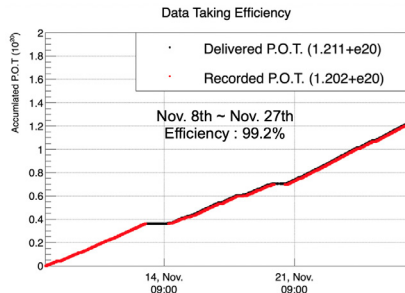
Рис. 6 — Примеры событий зарегистрированных сразу в нескольких детекторах.

Для определения эффективности сбора данных был разработан алгоритм, согласно которому сверялись данные с ускорителя (об интенсивности каждого спила пучка) с данными с детектора (о регистрации данного спила пучка по номеру и времени). Пример эффективности сбора данных изображен на рисунке 7.

Описаны результаты изучения эффективности восстановления треков, импульсов и зарядов зарегистрированных мюонов в зависимости от



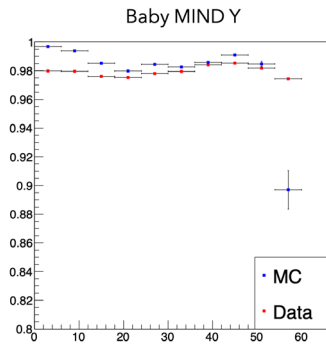
а



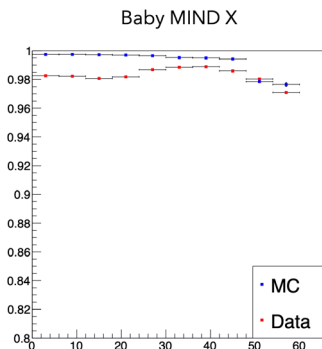
б

Рис. 7 — а — Определение эффективности сбора данных на количество событий на Р.О.Т. за первый физический сеанс для детектора Baby MIND. б — Определение эффективности сбора данных на количество событий на Р.О.Т. за промежуток с 7 ноября 2019 по 28 ноября 2019 для детектора Baby MIND.

угла трека (рис. 8) и импульса мюона, представлены алгоритмы получения данных результатов. Проведено сравнение разных методов восстановления импульса, а также сравнение полученных результатов с событиями разыгранными методом Монте-Карло.



а



б

Рис. 8 — Результаты вычисления эффективности регистрации событий сцинтиляционными счетчиками в зависимости от угла: а — для вертикальных сцинтиляционных счетчиков; б — для горизонтальных сцинтиляционных счетчиков.

Основываясь на статистике собранной в ходе первого физического сеанса с ноября 2019 года по февраль 2020 года с пучком в нейтринной

моде была проведена реконструкция событий в детекторе. В данной реконструкции были учтены все особенности детектора. Эффективность сбора данных на количество протонов на мишень составила 97.4%. Результат реконструкции импульсов представлен на рисунке 9 [17]. Полученный спектр совпадает с разыгранным спектром методом Монте-Карло.

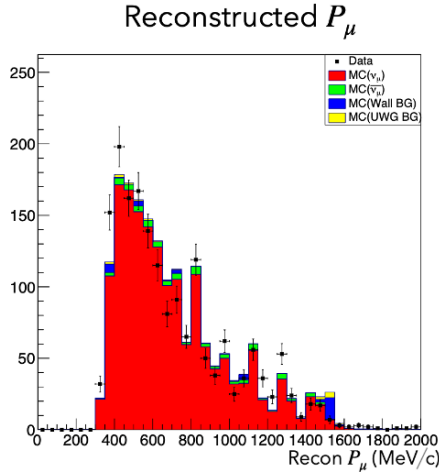


Рис. 9 — Спектр мюонов, зарегистрированных в детекторе Baby MIND в ходе первого физического сеанса с ноября 2019 года по февраль 2020 года с пучком в нейтринной моде.

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 спектросмещающими волокнами для использования в детекторе Baby MIND. Средний световой выход для горизонтальных счетчиков составил 66 ф.э./МIP и 37.5 ф.э./МIP для вертикальных счетчиков.
2. В тестах на пучке заряженных частиц в ЦЕРНе измеренная эффективность регистрации мюонов для горизонтальных счетчиков составила 99.9 % при пороговом значении регистрации сигнала в 4 ф.э., а для вертикальных сцинтилляторов 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 все сцинтилляционные модули детектора, состоящие из 4-х слоев сцинтилляционных счетчиков с зоной перекрытия между собой, что увеличило сегментацию детектора в зависимости от того, какое количество сцинтилляционных счетчиков участвует в регистрации события. 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 событий, с использованием информации о времени сигнала над порогом, позволило пренебречь мертвым временем оцифровки сигналов, что в свою очередь увеличило эффективность восстановления треков регистрируемых частиц.
5. В результате тестирования собранного детектора Baby MIND на пучке заряженных частиц в ЦЕРНе 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 кремневых 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, которое 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 взаимодействия нейтрино, под углом 1.5° относительно направления пучка протонов, вычислено количество нейтринных событий, нормированных на поток протонов. Полученный спектр совпадает с разыгранным спектром методом Монте-Карло.

Список публикаций по теме диссертации

- A1. *Abe, K. , ... Mefodiev A., ..., et al.* Measurements of $\bar{\nu}_\mu$ and $\bar{\nu}_\mu + \nu_\mu$ charged-current cross-sections without detected pions or protons on water and hydrocarbon at a mean anti-neutrino energy of 0.86 GeV // PTEP, vol. 2021 (2021), 043C01.
- A2. *Мефодьев А., Куденко Ю.* Разработка Прототипа TASD (Totally Active Scintillator Detector) // Ядерная физика и инжиниринг, том 5 (2014), номер 11-12, 924–930.
- A3 *Blondel A., ..., Mefodiev A., ..., et al.* Study of timing characteristics of a 3 m long plastic scintillator counter using waveform digitizers // Nucl. Instrum. Meth. A vol. 877 (2018), pages 9 – 15.
- A4. *Antonova M., ... Mefodiev A., ..., et al.* Baby MIND: A Magnetized Segmented Neutrino Detector for the WAGASCI Experiment // JINST 12 (2017) 07, C07028.
- A5. *Baldini W., ... Mefodiev A., ..., et al.* Measurement of parameters of scintillating bars with wavelength-shifting fibres and silicon photomultiplier readout for the SHiP Muon Detector // JINST 12 (2017) 03, P03005.

Также результаты работ были опубликованы в следующих трудах конференций:

- A6. *Мефодьев А.В., Куденко Ю.Г., Минеев О.В., Хотянецов А.Н.* Нейтринный детектор Baby-MIND // Письма в ЭЧАЯ, том 48 (2017), выпуск 6, 1002–1004.
- A7. *Овсянникова Т., ..., Мефодьев А., ..., и другие.* Эксперимент WAGASCI по измерению сечений взаимодействия нейтрино на воде и углеводороде на нейтринном пучке ускорителя J-PARC // Письма в ЭЧАЯ, том 48 (2017), выпуск 6, 1014–1017.

- A8. *Chikuma N., ... Mefodiev A., ..., et al.* Development of electronics and data acquisition system for the J-PARC T59 (WAGASCI) experiment // PoS, vol. EPS-HEP2017(2017), 780.
- A9. *Antonova M., ... Mefodiev A., ..., et al.* The Baby MIND spectrometer for the J-PARC T59(WAGASCI) experiment // PoS EPS-HEP2017 (2017) 508, EPS-HEP 2017, 508.
- A10. *Ovsiannikova T., ... Mefodiev A., ..., et al.* The new experiment WAGASCI for water to hydrocarbon neutrino cross section measurement using the J-PARC beam // J.Phys.Conf.Ser. 675 (2016) 1, 012030.
- A11. *Noah E., ... Mefodiev A., ..., et al.* Readout scheme for the Baby-MIND detector // PoS PhotoDet2015 (2016) 031.
- A12. *Mefodiev A., ..., et al.* The design, construction and testing of TASD (Totally Active Scintillator Detector) // PoS PhotoDet2015 (2016) 067.
- A13. *Fuminao H., ... Mefodiev A., ..., et al.* Performance test of new MPPC for a new neutrino detector WAGASCI // PoS PhotoDet2015 (2016) 046.
- A14. *Mefodiev A., Kudenko Yu.* The design of the totally active scintillator detector // J.Phys.Conf.Ser. 653 (2015) 1, 012016.
- A15. *Blondel A., ... Mefodiev A., ..., et al.* The WAGASCI experiment at JPARC to measure neutrino cross-sections on water // PoS EPS-HEP2015 (2015) 292.
- A16. *Blondel A., ... Mefodiev A., ..., et al.* Baby MIND Experiment Construction Status // Prospects in Neutrino Physics (2017), 4.

Список литературы

1. Baby MIND: A Magnetized Segmented Neutrino Detector for the WAGASCI Experiment / A. Mefodiev, M. Antonova, R. Asfandiyarov et al. // JINST. — 2017. - Vol. 12, no. 07. - R C07028.
2. Baby MIND: A magnetised spectrometer for the WAGASCI experiment / Sven-Patrik Hallsjo, M. Antonova, R. Asfandiyarov et al. // PoS. — 2018. — Vol. NuFact2017. - P. 078.
3. Baby MIND detector first physics run / A. Ajmi, M. Antonova, R. Asfandiyarov et al. // Prospects in Neutrino Physics. — 2020. — 4.

4. The WAGASCI experiment at JPARC to measure neutrino cross-sections on water / E Noah, A. Blondel, Y Farve, et al. // PoS. — 2015. — Vol. EPS-HEP2015. - P. 292.
5. Water/CH Neutrino Cross Section Measurement at J-PARC (WAGASCI Experiment) / T. Koga, M. Antonova, O. Basille et al. // JPS Conf. Proc. — 2015. Vol. 8. P. 023003.
6. The new experiment WAGASCI for water to hydrocarbon neutrino cross section measurement using the J-PARC beam / T. Ovsianikova, M. Antonova, O. Basille et al. // J. Phys. Conf. Ser. — 2016. — Vol. 675, no. 1. — P. 012030.
7. Nakaya Tsuyoshi, Nishikawa Koichiro. Long baseline neutrino oscillation experiments with accelerators in Japan: From K2K to T2K // Eur. Phys. J. C. — 2020. - Vol. 80, no. 4. - P. 344.
8. Measurements of neutrino oscillation in appearance and disappearance channels by the T2K experiment with 6.6×10^{20} protons on target / K. Abe, J. Adam, H. Aihara et al. // Phys. Rev. D. — 2015. — Vol. 91, no. 7. — P. 072010.
9. Neutrino oscillation physics potential of the T2K experiment / K. Abe, J. Adam, H. Aihara et al. // PTEP. - 2015. - Vol. 2015, no. 4. - P. 043C01.
10. Measurement of the Inclusive Electron Neutrino Charged Current Cross Section on Carbon with the T2K Near Detector / K. Abe, J. Adam, H. Aihara et al. // Phys. Rev. Lett. 2014. - Vol. 113, no. 24. - P. 241803.
11. First Muon-Neutrino Disappearance Study with an Off-Axis Beam / K. Abe, N. Abgrall, Y. Ajima et al. // Phys. Rev. D. — 2012. — Vol. 85. — P. 031103.
12. Kudenko Yury. The Near neutrino detector for the T2K experiment // Nucl. Instrum. Meth. A. — 2009. — Vol. 598. — Pp. 289-295.
13. New experiment WAGASCI to measure cross sections of neutrino interactions in water and hydrocarbon using J-PARC beam / T. Ovsianikova, M. Antonova, A. Izmaylov et al. // Phys. Part. Nucl. — 2017. — Vol. 48, no. 6. — Pp. 1014 1017.
14. Measurement of neutrino and antineutrino oscillations by the T2K experiment including a new additional sample of νe interactions at the far detector / K. Abe,

15. J. Amey, C. Andreopoulos et al. // Phys. Rev. D. — 2017. — Vol. 96, no. 9. — P. 092006. — [Erratum: Phys.Rev.D 98, 019902 (2018)].
16. Minamino Akihiro. WAGASCI and ND280 Upgrades // JPS Conf. Proc. — 2016. - Vol. 12. - P. 010038.
17. Measurements of $\bar{\nu}_\mu$ and $\bar{\nu}_\mu + \nu_\mu$ charged-current cross-sections without detected pions or protons on water and hydrocarbon at a mean anti-neutrino energy of 0.86 GeV / K Abe, N Akhlaq, R Akutsu et al. // Progress of Theoretical and Experimental Physics. — 2021. — Mar. — Vol. 2021, no. 4. — URL: <http://dx.doi.org/10.1093/ptep/ptab014>.
18. The WAGASCI experiment at JPARC to measure neutrino cross-sections on water / A. Blondel, M. Antonova, O. Basille et al. // PoS. — 2015. — Vol. EPS-HEP2015. P. 292.
19. Эксперимент WAGASCI по измерению сечений взаимодействия нейтрино на воде и углеводороде на нейтринном пучке ускорителя J-PARC / Т. Овсянникова, Ю.Г. Куденко, А.В. Мефодьев et al. // Письма в ЭЧАЯ. 2017. - Vol. 48, по. 6. - Pp. 1014-1017.
20. Readout scheme for the Baby-MIND detector / Etam Noah, A. Blondel, F. Cadoux, et al. // PoS. — 2016. — Vol. PhotoDet2015. — P. 031.
21. Indication of Electron Neutrino Appearance from an Accelerator-Produced Off-Axis Muon Neutrino Beam / K. Abe, N. Abgrall, Y. Ajima et al. // Physical Review Letters. — 2011. — Jul. — Vol. 107, no. 4. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.107.041801>.
22. Observation of Electron Neutrino Appearance in a Muon Neutrino Beam /K. Abe, J. Adam, H. Aihara et al. // Phys. Rev. Lett. — 2014. — Vol. 112. — P. 061802.
23. Constraint on the matter-antimatter symmetry-violating phase in neutrino oscillations / K. Abe, R. Akutsu, Ali A., et al. // Nature. — 2020. — Apr. — Vol. 580, no. 7803. — P. 339-344. — URL: <http://dx.doi.org/10.1038/s41586-020-2177-0>.

Научное издание

Мефодьев Александр Владимирович

Разработка и создание магнитного
нейтринного детектора Baby MIND

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Ф-т 60x84/16 Уч.-изд.л. 1,2 Зак. № 22477 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