Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН)

На правах рукописи

Мефодьев Александр Владимирович

Разработка и создание магнитного нейтринного детектора Baby MIND

01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
доктор физ.-мат. наук, профессор
Юрий Григорьевич Куденко

Москва 2021

Оглавление

Введение 6

Глава 1. Нейтринные осцилляции 21
1.1. Введение к главе 21
1.2. Нейтринные эксперименты и полученные результаты 21
1.3. Осцилляции нейтрино в вакууме 32
1.4. Выводы по Главе 1 36

Глава 2. Эксперимент T2K 37
2.1. Введение к главе 37
2.2. Общая информация об эксперименте 37
2.2.1. INGRID 38
2.2.2. ND280 38
2.2.3. Super Kamiokande 42
2.3. Сбор данных в эксперименте T2K 44
2.4. Анализ данных T2K 46
2.5. Результаты эксперимента T2K 48
2.6. Выводы по Главе 2 49

Глава 3. Конструкция детектора Baby MIND 50
3.1. Введение к главе 50
3.2. Магнитные модули Baby MIND 51
3.3. Активная часть детектора 54
3.3.1. Вклеивание спектросмещающего волокна 56
3.3.2. Спектросмещающее волокно Y11 57
3.3.3. Стенд тестирования сцинтилляционных счетчиков 58
Digitizer DT5742 59
3.3.4. Разработка коннекторов 59
3.3.5. Сцинтилляционные счетчики 60
3.3.6. Тестирование сцинтилляционных счетчиков в ЦЕРНе . . 62
3.3.7. Результаты тестирования горизонтальных сцинтилляционных счетчиков в ЦЕРНе 63

3.3.8. Результаты тестирования вертикальных сцинтилляционных счетчиков в ЦЕРНе . . . 66
3.3.9. Результаты тестирования сцинтилляционных счетчиков Baby MIND . . . 67
3.4. Сборка сцинтилляционных модулей . . . 68
3.5. Выбор кремневых фотоумножителей . . . 73
3.5.1. Тестирование кремневых фотоумножителей Hamamatsu S12571-025C . . . 77
3.6. Разработка дизайна кабелей . . . 79
3.6.1. Результаты тестирования кабелей . . . 81
3.7. Разработка системы сбора данных . . . 83
3.7.1. Архитектура FEBs . . . 85
3.7.2. Архитектура CITIROC . . . 86
Режимы работы формирователя сигнала и АЦП . . . 88
3.7.3. Архитектура ПЛИС . . . 90
3.7.4. Структура данных FEB CITIROC . . . 91
3.8. Выводы по Главе 3 . . . 95

Глава 4. Тестирование детектора Baby MIND в ЦЕРНе . . . 96
4.1. Введение к главе . . . 96
4.2. Тестирование электроники Baby MIND FEBv1 совместно с Полностью Активным Сцинтилляционным Детектором на пучке заряженных частиц . . . 98
4.2.1. Сбор данных . . . 99
4.2.2. Обработка данных . . . 101
Калибровка кремневых фотодиодов . . . 101
Восстановление событий в детекторе . . . 102
4.2.3. Результаты тестов . . . 102
4.3. Первый этап тестов Baby MIND в экспериментальной зоне T9 . . . 103
4.3.1. Сбор данных . . . 105
4.3.2. Обработка данных . . . 105
4.3.3. Результаты тестов . . . 105
4.4. Финальный этап тестирования Baby MIND в ЦЕРНе . . . 106
4.4.1. Система сбора данных . . . 108

4.4.2. Проверка и поиск оптимальных настроек компонентов детектора . . . 109
4.4.3. Набор данных . . . 112
4.4.4. Калибровка кремниевых фотоумножителей . . . 112
Вычисление пьедестала кремневых фотодиодов . . . 113
4.4.5. Калибровка электроники Baby MIND FEBs . . . 114
Калибровка зависимости HG и LG . . . 115
Совмещение времени над порогом и значений амплитуд сильного и слабого усиления . . . 116
Калибровка зависимости HG и LG от ToT . . . 119
4.4.6. Вычисление временного разрешения . . . 120
4.4.7. Исследование стабильности системы магнитных модулей 121
4.4.8. Реконструкция мюонных событий . . . 122
4.4.9. Реконструкция импульсов регистрируемых мюонов . . . 125
Реконструкция энергии регистрируемых мюонов методом Kalman fitter . . . 126
Реконструкция мюонов низких энергий . . . 130
4.4.10. Реконструкция заряда . . . 131
4.4.11. Результаты реконструкции зарядов и энергий мюонов . . 132
4.5. Выводы по Главе 4 . . . 133

Глава 5. Результаты полученные на нейтринном пучке J-PARC 135
5.1. Введение к главе . . . 135
5.2. Транспортировка детектора Baby MIND из ЦЕРНа в J-PARC . . 136
5.3. Установка детектора Baby MIND в шахте детектора ND280 . . . 137
5.4. Модификация детектора Baby MIND, установка дополнительных сцинтилляционных модулей . . . 140
5.5. Система синхронизации, питания и сбора данных DAQ . . . 142
5.5.1. Система опорного тактового сигнала синхронизации MCB 144
5.5.2. Система контроля питания магнитных модулей детектора Baby MIND . . . 144
5.5.3. Система сбора данных DAQ . . . 145
5.6. Квалификация собранных данных . . . 146
5.7. Стабильность системы сбора данных . . . 150
5.8. Температурные эффекты . . . 152

5.9. Калибровка детектора Baby MIND 153
5.9.1. Калибровка кремневых фотоумножителей 153
5.10. Изучение эффективности восстановление импульсов детектором Baby MIND 154
5.10.1. Эффективность восстановления треков в зависимости от угла 155
5.10.2. Эффективность восстановления заряда 156
5.10.3. Эффективность восстановления импульсов 157
5.11. Спектр зарегистрированных событий 161
5.12. Выводы по Главе 5 161

Заключение 163

Список литературы 172

Введение

Актуальность темы исследования

На сегодняшний день одной из наиболее актуальных тем исследований в современной физике является изучение свойств нейтрино. Основной причиной этого можно считать невозможность описать наличие массы и осцилляций нейтрино с помощью Стандартной Модели частиц.

Впервые эффект нейтринных осцилляций был зарегистрирован в эксперименте с солнечными нейтрино в виде дефицита наблюдаемого количества нейтрино по сравнению с предсказываемым Стандартной солнечной моделью (ССМ) в эксперименте Дэвиса [1–3]. Согласно Стандартной Модели, при существовании трех типов нейтрино, они имеют нулевую массу и не смешиваются. Основной целью эксперимента Дэвиса была регистрация солнечных нейтрино. Данный эксперимент основывался на идее Бруно Понтекорво и заключался в регистрации нейтрино посредством захвата нейтрино атомом ^{37}Cl с образованием ^{37}Ar – радиоактивного изотопа. Однако, согласно результатам данного эксперимента, был обнаружен дефицит зарегистрированных электронных нейтрино, так как было зарегистрировано лишь примерно $1/3$ часть потока, от предсказанного ССМ. В качестве решения данной проблемы рассматривалась идея Бруно Понтекорво, что нейтрино имеют массу и могут смешиваться, но данное решение было воспринято очень осторожно.

Для проверки результатов эксперимента Дэвиса было предложено два эксперимента Soviet–American Gallium Experiment (SAGE) [4–6] и Gallium Experiment (GALLEX) [7, 8]. В основе данных экспериментов лежало взаимодействие нейтрино с ядром изотопа ^{71}Ga с образованием радиоактивного изотопа ^{71}Ge, что позволяло уменьшить порог регистрации и детектировало солнечные $p-p$ нейтрино, но результаты данных экспериментов лишь подтвердили дефицит электронных нейтрино.

Основной вклад в решение этой проблемы и открытие осцилляций солнечных нейтрино внес эксперимент Sudbury Neutrino Observatory (нейтринная обсерватория в Садбери – SNO) [3, 9–11]. Данный эксперимент предполагал регистрацию трех типов нейтрино в детекторе на основе тяжелой воды. Поток электронных солнечных нейтрино совпадал с полученным ранее, однако поток всех типов нейтрино совпадал с теоретически предсказанным, что позволило

решить проблему солнечных нейтрино.

Немногим ранее (до экспериментов SAGE и GALLEX) дефицит солнечных нейтрино так же был зафиксирован экспериментом KamiokaNDE (Kamioka Nucleon Decay Experiment) в Японии. Основной изначальной целью эксперимента KamiokaNDE был поиск распада протонов, но, благодаря низкому фону, порог регистрации частиц трех килотонного черенковского детектора KamiokaNDE был снижен, что позволило регистрировать часть нейтринного потока от солнца. Результаты KamiokaNDE подтвердили результаты эксперимента Дэвиса. Стоит так же отметить, что это был первый эксперимент, позволивший регистрировать солнечные нейтрино в реальном времени с возможностью восстановления направления нейтрино [12, 13].

После детектора KamiokaNDE был создан пятидесяти килотонный детектор Super-Kamiokande (Super-K) [14–16], представляющий собой черенковский детектор, заполненный чистой водой, который в 1998 году зафиксировал явление, похожее на нейтринные осцилляции [17, 18]. Конструкция детектора и основные принципы работы детектора совпадают с использованным ранее детектором KamiokaNDE, а благодаря накопленному опыту порог регистрации частиц удалось уменьшить. Данные особенности детектора позволили регистрировать количества нейтрино, рожденные в разных слоях атмосферы и определить, что меньшее число мюонных нейтрино приходит с тех направлений, где нейтрино проходит большее расстояние. Эти результаты дали основания полагать, что количество нейтрино данного класса зависит от пройденного ими пути, что может быть следствием трансформации нейтрино из одного вида в другой.

Реакторный эксперимент Kamioka Liquid scintillator Anti-Neutrino Detector (KamLAND) [19, 20] так же внес свой вклад в изучение осцилляций нейтрино. KamLAND – большой нейтринный детектор, совместный американо-японский эксперимент, состоял 1000 тонн жидкого сцинтиллятора и 1879 ФЭУ. Источником нейтрино служили японские реакторы.

На установке KamLAND был зарегистрирован дефицит антинейтрино от реакторов, расположенных от него на среднем расстоянии в 180 км. Этот результат подтвердил осцилляции нейтрино с параметрами, характерными для осцилляций солнечных нейтрино.

Следующим этапом развития нейтринной физики можно назвать ускори-

тельные эксперименты. Эксперимент KEK to Kamioka (K2K) [21–23] в Японии использовал пучок мюонных нейтрино и состоял из двух детекторов: ближнего (300 метров от мишени) и дальнего(Super-K на расстоянии 250 км). Основной задачей ближнего детектора было определение параметров пучка, а дальнего регистрация изменений параметров пучка нейтрино. Результатом данного эксперимента можно назвать отличие числа зарегистрированных нейтрино (120 нейтрино в направлении пучка было зарегистрировано за 5 лет набора статистики) от теоретически предсказанного количества при отсутствии осцилляций ($158.1^{+9.2}_{-8.6}$) нейтрино, что подтвердило осцилляции нейтрино с параметрами, полученными в эксперименте Super-K с атмосферными нейтрино.

Ускорительный эксперимент Main Injector Neutrino Oscillation Search (MINOS)[24, 25] в США использовал пучок мюонных нейтрино и, также как и K2K, состоял из двух детекторов ближнего и дальнего (на расстоянии 735 км). В предположении отсутствия осцилляций данный эксперимент предполагал регистрацию 2451 события в дальнем детекторе, однако было зарегестрировано лишь 1986 нейтринных событий в направлении пучка, что так же подтвердило осцилляции нейтрино с "атмосферными"параметрами.

Следующей задачей нейтринной физики являлось более точное определение параметров осцилляций нейтрино и измерение угла смешивания θ_{13}. Для определения данных параметров были предложены ускорительные эксперименты Tokai to Kamioka (T2K) [26–31], NuMI Off-Axis ν_e Appearance (NOvA) [32] и реакторные эксперименты Daya Bay Reactor Neutrino Experiment (Daya Bay) [33–35] и Reactor Experiment for Neutrino Oscillation (RENO)[36–38] и Double Chooz [39, 40].

Основной целью ускорительных экспериментов T2K и NOvA является определение значения углов смешивания θ_{13} и θ_{23}, квадрата разности масс $\Delta m^2_{23} = m^2_3 - m^2_2$ и значения параметра CP-нарушения δ.

В 2013 г. в эксперименте T2K впервые было получено указание на максимальное CP-нарушение в нейтринных осцилляциях [41]. Для этого использовалась комбинация измеренной вероятности перехода $\nu_\mu \to \nu_e$ и величины θ_{13}, полученные в реакторных экспериментах. В начале 2017 г. T2K опубликовал результаты первого прямого поиска CP-нарушения из сравнения $P(\nu_\mu \to \nu_e)$ и $P(\overline{\nu}_\mu \to \overline{\nu}_e)$ [42].

Эксперимент MINOS производил набор статистики с 2006 по 2012 год, все-

го 10.71×10^{20} протонов на мишени в нейтринной моде и 3.36×10^{20} в анти-нейтринной моде. Полученные значения параметров: $|\Delta m^2_{32}| = [2.28 - 2.46] \times$ $\times 10^{-3}$ эВ (68%) и $sin^2\theta_{32} = 0.35 - 0.65(90\%)$ при нормальной иерархии масс, $|\Delta m^2_{32}| = [2.32 - 2.53] \times 10^{-3}$ эВ (68%) и $sin^2\theta_{32} = 0.34 - 0.67(90\%)$ при инверсной иерархии масс [24, 25].

Основной целью реакторных экспериментов Daya Bay, RENO и Double Chooz является определение значения угла смешивания θ_{13}. Описание данных экспериментов и полученные результаты представлены в разделе 1.2.

Основное содержание данной работы составляет разработка, создание и тестирование магнитного железного нейтринного детектора (Magnetized Iron Neutrino Detector, Baby MIND) [43–45], который используется для исследований свойств нейтрино в эксперименте T2K.

T2K (Tokai to Kamioka) – 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 [31], находящихся на расстоянии 280 метров от пионо рождающей мишени, и дальний детектор Super-Kamiokande [31] 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 $2,5°$. 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^2_{23}, 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 [31] расположен на расстоянии 280 метров от источника нейтрино под углом $2.5°$ к оси пучка в направлении детектора Super-Kamiokande. Основными задачами детектора

Таблица 1. Погрешности предсказанного количества сигнальных событий в детекторе Super-Kamiokande (1σ, %) для различных сцинтилляционных мод [46–48].

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

являются:

1. измерение и контроль потока нейтрино;
2. определение состава нейтринного пучка (в том числе примеси электронных нейтрино);
3. определение энергетического спектра нейтрино до процесса осцилляций;
4. 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 $\nu_\mu \to \nu_\mu$ и $\nu_\mu \to \nu_e$ [46–48], таблица 1.

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

1. 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.
2. различия в угловом аксептансе ND280 (в основном вперед) и Super-K (4π).
3. различия в спектре нейтрино в ближнем и дальнем детекторе.

Для уменьшения систематических ошибок был разработана новая мишень-детектор WAter-Grid-AndSCintillator (WAGASCI) [49–51]. 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)[52].

Основными целями созданного мишень-детектора WAGASCI являются:

1. измерение отношения сечения взаимодействия нейтрино через заряженные токи между водой и сцинтиллятором с точностью 3%,

2. 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 [48, 50, 51, 53–55]. Детектор Baby MIND был установлен в зоне ближнего детектора эксперимента T2K на этаже B2 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 диссертационной работы

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.

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.

Научная новизна

- 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.

- 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 [56], 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 кремневых 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 кремневых 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.

Теоретическая и 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.

Положения, выносимые на защиту

- 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).

- 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.

- 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.

- Разработана система сбора данных, включающая в себя DAQ сервер, клиент, Maximum Integration Data Acquisition System (MIDAS) север, плату временной синхронизации и 46 печатных плат Baby MIND FEB. Разработанная система сбора банных показала эффективность сбора статисти-

ки 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.

- 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.

- 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.

Основные выводы и полученные результаты В данной работе представлены результаты работ по разработке, созданию и тестированию детектора Baby MIND. Применение данного детектора позволит восстанавливать энергию и заряд регистрируемых мюонов, образованных от взаимодействия нейтрино с пластиком (CH) и водой(H_2O) в мишени WAGASCI.

- 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./MIP и 37.5 ф.э./MIP для вертикальных счетчиков.

- 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.

- 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.

- 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.

- В результате тестирование 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%.

- 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 треки событий в мишени WAGASCI, протонном модуле и детекторе Baby MIND.

- 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%.

- 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.

Степень достоверности

Разработанный детектор Baby MIND был протестирован в экспериментальной зоне T9 в 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:

- Мефодьев А.В., Разработка Прототипа TASD (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.

- Мефодьев А.В., Нейтринные детекторы TASD и Baby-MIND, 58-я международная научная конференция МФТИ, Московский физико-технический институт, 23 – 28 ноября 2015 года, г. Москва.

- Мефодьев 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, .

- Мефодьев А.В., Статус магнетизированного железного нейтринного детектора BabyMIND. 59 научная конференция МФТИ, 21 – 26 ноября 2016 года, Москва.

- Мефодьев 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.

- Мефодьев А.В., Baby MIND: последние результаты тестов на пучке в ЦЕРНе, 61-я Научная конференция МФТИ, 19 – 25 ноября 2017 года, г. Москва.

Публикации Материалы диссертационной работы опубликованы в **16** печатных работах [51, 53–55, 57–60, 62, 64–70], **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.

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.

Структура и объём диссертации Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка сокращений и библиографии. Общий объём диссертации составляет 186 страниц, включая 144 рисунка и 3 таблицы. Библиография включает 114 наименования на 15 страницах.

Глава 1

Нейтринные осцилляции

1.1. Введение к главе

В 2015 году Нобелевская премия по физике вручена за экспериментальное подтверждение нейтринных осцилляций. Это однозначно указывает на существование массы нейтрино отличной от нуля и является проявлением физики за пределами стандартной модели. Впервые возможность нейтринных осцилляций была рассмотрена Б.М. Понтекорво в 1957 году по аналогии с осцилляциями мезонов [71]. Понтекорво обсуждал возможность перехода между нейтрино и антинейтрино (тогда еще не было известно, что существуют нейтрино 3-х ароматов). А в 1962 г. японские физики Д. Маки, М. Накагава и С. Саката рассмотрели осцилляции нейтрино разных ароматов $\nu_e \to \nu_\mu$ [72].

Вещество, через которое проходит поток нейтрино может существенно изменить картину нейтринных осцилляций. В 1978 Л. Вольфенштейн (США) рассмотрел влияние на эволюцию осциллирующих нейтрино среды постоянной плотности [73, 74].

Глава 1 посвящена описанию нейтринных экспериментов и полученных результатов, так же в данной главе будут предоставлены формулы осцилляций нейтрино в вакууме.

1.2. Нейтринные эксперименты и полученные результаты

Впервые эффект нейтринных осцилляций был зарегистрирован в эксперименте с солнечными нейтрино в виде дефицита наблюдаемого количества нейтрино по сравнению с предсказываемым Стандартной солнечной моделью (ССМ) [1–3]. Основную лепту в решении этой проблемы и открытии осцилляций солнечных нейтрино внес эксперимент Sudbury Neutrino Observatory (нейтринная обсерватория в Садбери – SNO) [3, 9–11].

Канадский эксперимент SNO, расположенный на глубине 2 км, состоял из акриловой сферы, окруженной фотоэлектронными умножителями (ФЭУ) [75, 76] и заполненной 1000 тонн тяжелой воды (оксид дейтерия). Именно дейтерий был ключевым в поиске решений проблем недостатка солнечных нейтрино.

Дейтерий позволяет регистрировать все типы нейтрино, выражения (1.1 - 1.3).

$$\nu_e + d \to p + p + e^- \qquad (charged\ current, CC), \tag{1.1}$$

$$\nu_\alpha + d \to p + n + \nu_\alpha \qquad (neutral\ current, NC), \tag{1.2}$$

$$\nu_\alpha + e^- \to \nu_\alpha + e^- \qquad (elastic\ scattering, ES). \tag{1.3}$$

Эксперимент начался в 1999 году и его результат показал, что наблюдается дефицит именно электронных нейтрино, выражение (1.4).

$$\frac{N_e}{N_{expected}} = 0.34 \tag{1.4}$$

Процесс протекающий по реакции (1.1) регистрирует только электронные нейтрино. Процесс через нейтральные токи (1.2) чувствителен ко всем типам нейтрино (ν_μ, ν_e, ν_τ), но только если нейтрино имеет энергию больше 2.2 МэВ. Процесс протекающий по реакции (1.3) чувствителен ко всем типам нейтрино, но с разным сечением взаимодействия в зависимости от типа нейтрино (сечение взаимодействия ν_μ, ν_τ составляют примерно 15% от сечения взаимодействия ν_e).

При регистрации по черенковскому излучению электронов, регистрируются все события (реакции (1.1(и (1.2)). Однако регистрация регистрация событий происходит без их разделения по типу реакции и необходимо приложить дополнительные усилия, чтобы связать каждое событие с конкретной реакцией. Для наблюдения только событий, связных с рождением и захватом нейтронов (NC-реакцию), внутрь детектора были помещены пропорциональные счетчики, заполненные ^3He. Изотоп гелия ^3He имеет большое сечение захвата тепловых нейтронов, и в результате захвата образуются протон и тритон, которые ионизируют газ в счётчике. Поэтому в пропорциональной камере образуется электрический импульс.

Результатом эксперимента можно считать потоки нейтрино, измеренные в SNO на каждой реакции (1.1 – 1.3):

$$\begin{aligned}
\phi_{CC} &= 1.79 \pm 0.06(stat)^{+0.09}_{-0.11}(sys) \times 10^6 \text{см}^{-2}\text{сек}^{-1} \\
\phi_{ES} &= 2.39 \pm 0.24(stat)^{+0.12}_{-0.12}(sys) \times 10^6 \text{см}^{-2}\text{сек}^{-1} \\
\phi_{NC} &= 5.09 \pm 0.44(stat)^{+0.46}_{-0.43}(sys) \times 10^6 \text{см}^{-2}\text{сек}^{-1}
\end{aligned} \tag{1.5}$$

и отношение экспериментальных потоков солнечных нейтрино от ^8B к теорети-

чески предсказанным по Стандартной модели Солнца:

$$CC : 0.347 \pm 0.027$$
$$ES : 0.473 \pm 0.074 \quad (1.6)$$
$$NC : 1.008 \pm 0.122$$

Наблюдение всех сортов нейтрино в детекторе SNO позволило решить проблему солнечных нейтрино. Поток, измеренный с помощью реакции 1.2, оказался в согласии с предсказаниями ССМ. Это означало, что несмотря на уменьшение потока электронных нейтринно, суммарный поток нейтрино согласуется с теорией. Данный результат позволил решить проблему солнечных нейтрино и показал, что солнечные нейтрино претерпевают осцилляции на пути от Солнца к Земле.

Эксперимент Super-Kamiokande (Super-K) находится в горах Японии на расстоянии 1 км под землей [14–16]. Основная часть детектора – это огромный черенковский детектор Ø40 м, заполненный 50000 т чистой воды, с расположенными на нем ФЭУ (11 146 ФЭУ). Внешний детектор, толщиной 2 м обычной воды и ФЭУ, используется в качестве вето системы.

В 1998 году эксперимент SuperK заявил о регистрации явления, похожего на нейтринные осцилляции [17, 18]. В ходе эксперимента исследовалось число мюонных нейтрино, рожденных в верхних слоях земной атмосферы, в распадах пионов, каонов и мюонов, которые были рождены при столкновении протонов космических лучей с ядрами атомов воздуха, приходящих в детектор с разных расстояний. Оказалось, что меньшее число мюонных нейтрино приходило с тех направлений, где нейтрино преодолевали большее расстояние (снизу-вверх). Эти результаты дали основания полагать, что количество нейтрино данного класса зависит от пройденного ими пути, что может быть следствием трансформации нейтрино из одного вида в другой.

На настоящий момент, на основании данных Super-K I – IV, получены значения параметров осцилляций, представленные на рисунке 1.1.

Эффект нейтринных осцилляций был подтвержден ускорительными экспериментами, такими как KEK to Kamioka(K2K) [21–23], Tokai to Kamioka(T2K) [26–31] (подробное описание в главе 2) и MINOS[24, 78–82].

Эксперимент K2K, находившийся в Цукубе, Ибараки, Япония использовал мюонный пучек нейтрино с энергией около 1 ГэВ и проводил набор данных в период с 1999 по 2004 гг. всего 9.2×10^{19} протонов на мишень. Эксперимент

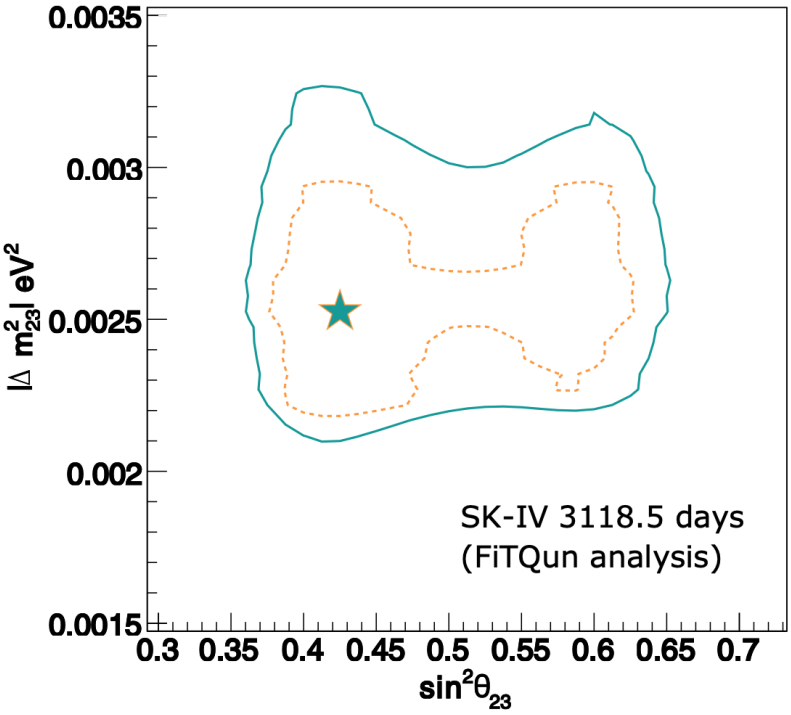


Рис. 1.1. Результаты эксперимента Super-K, полученные значения параметров осцилляций атмосферных нейтрино на основании данных Super-K IV [77]. Сплошная синяя (пунктирно-оранжевая) линия показывает 90% C. L. для нормальной (инверсной) иерархии. Звезда обозначает наиболее подходящее значение, которое находится в одной и той же точке для нормальной и инверсной иерархии.

K2K является первым нейтринным ускорительным экспериментом с длинной базой (расстояние между дальним и ближним детектором 250 км).

Ближний детектор эксперимента K2K состоял из черенковского детектора массой 1 кТ и высоко-гранулированного детектора (Fine Grained Detector, FGD) и находился на расстоянии 300 метров от мишени. Основной задачей ближнего детектора было измерение энергетического спектра нейтринного пучка. В качестве дальнего детектора использовался Super-K.

В ходе набора статистики в детекторе Super-K было зарегестрировано 120 нейтрино (с направлением пучка), а в предположении отсутствия осцилляций предполагалась регистрация $158.1^{+9.2}_{-8.6}$ нейтрино. Основным результатом эксперимента K2K (в сценарии двухфлейворных колебаний) является определение допустимой области $\Delta m^2 \in [1.9 \times 10^{-3}; 3.5 \times 10^{-3}]$ эВ (90%) с наиболее подходящим значением $\Delta m^2 = 2.8 \times 10^{-3}$эВ (рис.1.2 [83]).

С 2001 года в Японском институте атомных исследований (J-PARC) в Токае, в 100 км от Токио, началось строительство нового ускорительного комплекса, включающего протонный синхротрон с интенсивностью 40 ГэВ. А в

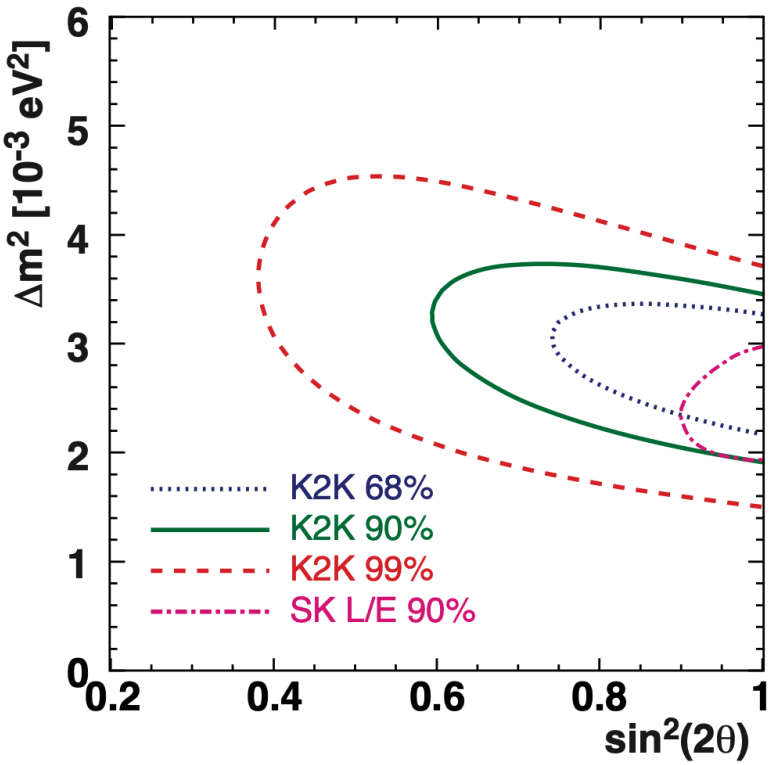


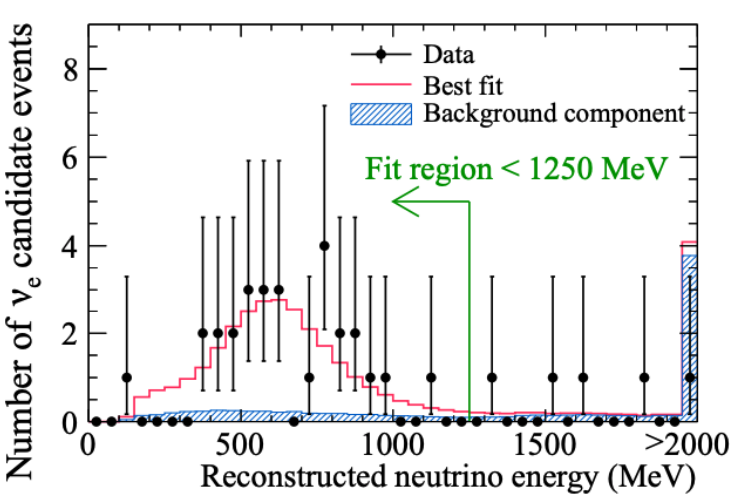
Рис. 1.2. Результаты эксперимента K2K и сравнение с результатами атмосферных нейтрино Super-K.

2010 году начался первый физический сеанс, а 2011 году было получено первое указание на обнаружение $\nu_\mu \to \nu_e$, в детекторе Super-K было зарегестрировано 6 событий ν_e при ожидаемом фоне в 1,5 события [84]. В 2013 г. в эксперименте T2K впервые было получено указание на максимальное CP-нарушение в нейтринных осцилляциях [41], рисунок 1.3. Для этого использовалась комбинация измеренной вероятности перехода $\nu_\mu \to \nu_e$ и величины θ_{13}, полученные в реакторных экспериментах.

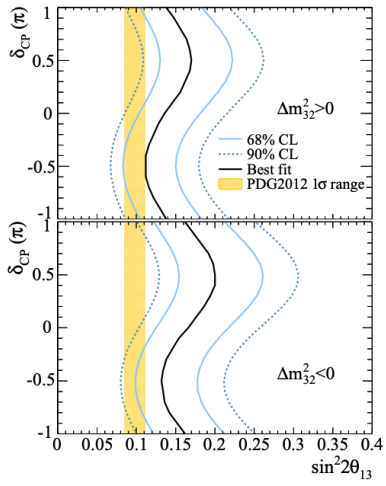
В начале 2017 г. T2K опубликовал результаты первого прямого поиска CP-нарушения из сравнения $P(\nu_\mu \to \nu_e)$ и $P(\overline{\nu}_\mu \to \overline{\nu}_e)$ [42].

Эксперимент Main Injector Neutrino Oscillation Search (MINOS) [24, 25], который находился в национальной ускорительной лаборатории им.Э.Ферми — Фермилаб, Батавия, штат Иллинойс, США), использовал пучок мюонных нейтрино в широком диапазоне энергий от 1 до 10 ГэВ. Нейтрино, рожденные в Фермилаб, проходили через Землю расстояние 735 км и регистрировались дальним детектором весом 5.4 кт, расположенным на глубине 714 м в шахте Соудан (штат Северная Миннесота, США).

Детекторы MINOS представляли собой хорошо гранулированные трековые калориметры со стальным слоем поглотителя и активным слоем пластикового



а



б

Рис. 1.3. а – Спектр E_ν реконструированных событий ν_e с $sin^2 2\theta_{13} = 0,144$ для нормальной иерархии масс. б – Предварительный результат T2K, показывающий область допустимых значений δCP и $sin^2 2\theta_{13}$. Для нормальной (верхний рисунок) и инверсной иерархий масс (нижний рисунок). Затемнённой полосой отмечен интервал значений $sin^2 2\theta_{13}$ из реакторных экспериментов, обозначенный PDG2012 (на момент публикации статьи [41]).

сцинтиллятора. Сцинтиллятор состоял из полистирола, заполненного флюоритом PPO (1%) и POPOP (0.030%). Толщина слоя 2.54 см и 1 см для стали и сцинтиллятора соответственно. Каждая плоскость детектора была слоистой конструкцией стали, воздуха и сцинтиллятора с расстоянием между плоскостями примерно 6 см. Сцинтилляционные слои состояли из полос толщиной 4.1 см каждая, в случае дальнего детектора может быть длиной до 8 м.

Дальний детектор – это самый большой из детекторов MINOS весом 5.4 кт. Он состоял из 486 восьмиугольных стальных пластин и сцинтиллятора длиною 8 м каждая. Детектор разделялся на 2 супермодуля, каждый из которых состоит из 243 пластин. Оба супермодуля независимо снабжались 15 кА катушками, которые двигались вдоль оси супермодуля через центр каждой стальной пластины, и это было сделано с целью возбуждения магнитного поля в них.

Ближний детектор был расположен в Фермилабе приблизительно в 1 км от мишени NuMI. Его вес 980 тонн, и он состоял из 282 плоскостей, каждая имела форму удлиненного восьмиугольника 3.8 м высотой и 4.8 м шириной. Детектор был помещен в магнитное толе 1.5 Т.

Эксперимент MINOS производил набор статистики с 2006 по 2012 год, всего 10.71×10^{20} протонов на мишени в нейтринной моде и 3.36×10^{20} в антинейтринной моде. Основным результатом эксперимента является измерения

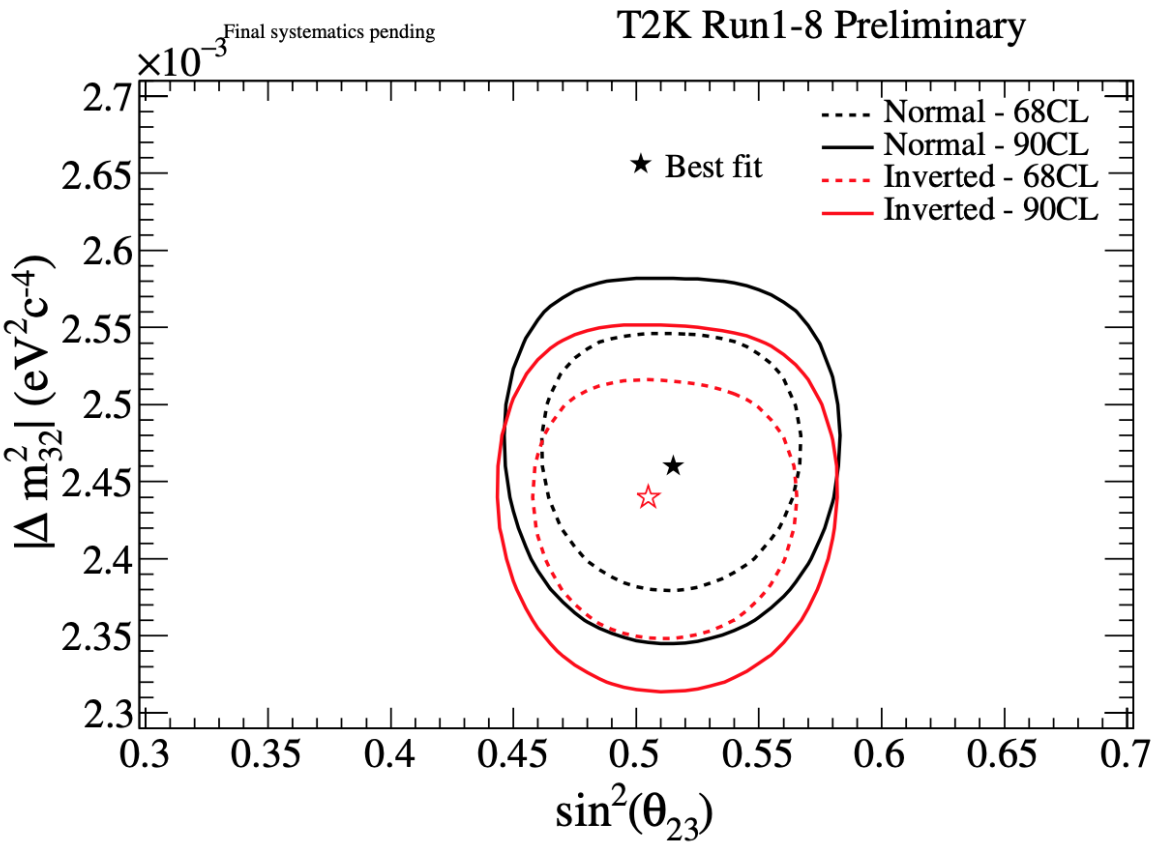


Рис. 1.4. Предварительный результат T2K, показывающий область допустимых значений Δm^2_{32} и $sin^2 2\theta_{23}$ для нормальной и инверсной иерархий масс. Звездочками показаны результаты наилучшей аппроксимации данных для нормальной (чёрные кривые) и инверсной (красные кривые) иерархий масс нейтрино.

атмосферных параметров нейтринных колебаний, а именно θ_{23} и Δm_{32}. Полученные значения параметров: $|\Delta m^2_{32}| = [2.28 - 2.46] \times 10^{-3}$ эВ (68%) и $sin^2\theta_{32} = 0.35 - 0.65(90\%)$ при нормальной иерархии масс, $|\Delta m^2_{32}| = [2.32 - 2.53] \times 10^{-3}$ эВ (68%) и $sin^2\theta_{32} = 0.34 - 0.67(90\%)$ при инверсной иерархии масс [24, 25] (рис. 1.6).

Реакторные эксперименты CHOOZ [85, 86] и Kamioka Liquid scintillator Anti-Neutrino Detector (KamLAND) [19, 20] так же внесли свой вклад в изучение осцилляций нейтрино.

Детектор CHOOZ располагался в подземной лаборатории на расстоянии 1 км от реактора Chooz (Франция). Детектор состоял из цилиндрического стального сосуда с диаметорм 5.5 м и высотой 5 м. Реакторные антинейтрино регистрировались с помощью реакции обратного β-распада:

$$\overline{\nu_e} + p \rightarrow n + e^+ \tag{1.7}$$

Регистрация происходила по сигналу аннигиляции позитрона с излучением двух

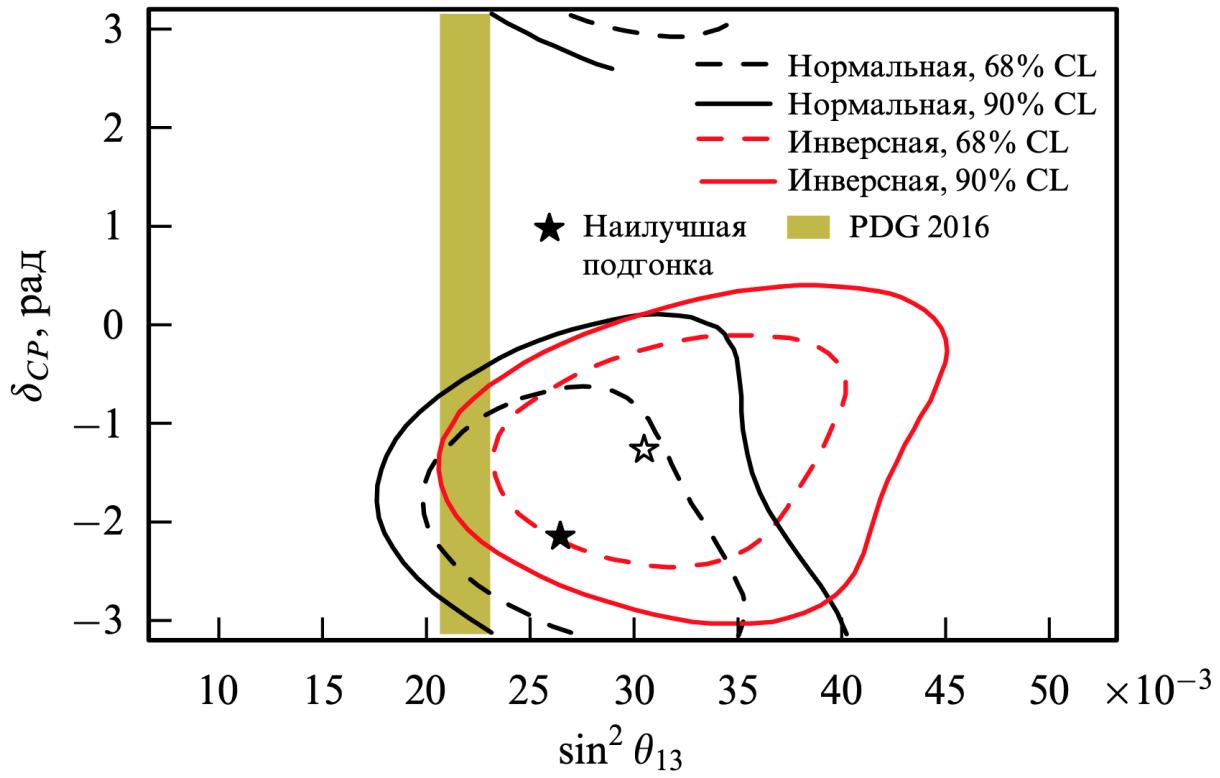


Рис. 1.5. Предварительный результат T2K, показывающий область допустимых значений δCP и $sin^2 2\theta_{13}$ для нормальной и инверсной иерархий масс. Затемнённой полосой отмечен интервал значений $sin^2 2\theta_{13}$ из реакторных экспериментов, обозначенный PDG2016. Звездочками показаны результаты наилучшей аппроксимации данных для нормальной (чёрные кривые) и инверсной (красные кривые) иерархий масс нейтрино.

фотонов с энергией 511 кэВ с задержанным захватом нейтрона протоном. Средняя энергия потока реакторных антинейтрино составляла 3 МэВ. Однако эксперимент не обнаружил осцилляций $\overline{\nu}_e$, так как измеренный поток (0.2 – 0.4 события/день/тонна) совпадал с ожидаемым.

KamLAND – большой нейтринный детектор, совместный американо-японский эксперимент, состоял из 1000 тонн жидкого сцинтиллятора и 1879 ФЭУ. Источником нейтрино служили японские реакторы.

На установке KamLAND был зарегистрирован дефицит антинейтрино от реакторов, расположенных от него на среднем расстоянии в 180 км. Этот результат подтвердил осцилляции нейтрино с параметрами, характерными для осцилляций солнечных нейтрино. Для регистрации реакторных антинейтрино использовалась реакция (1.7).

С помощью метода задержанных совпадений детектировались позитроны, за счет аннигиляции в 2 γ-кванта с энергией 511 кэВ и γ-кванты с энергией 2.2 МэВ от захвата нейтронов протонами.

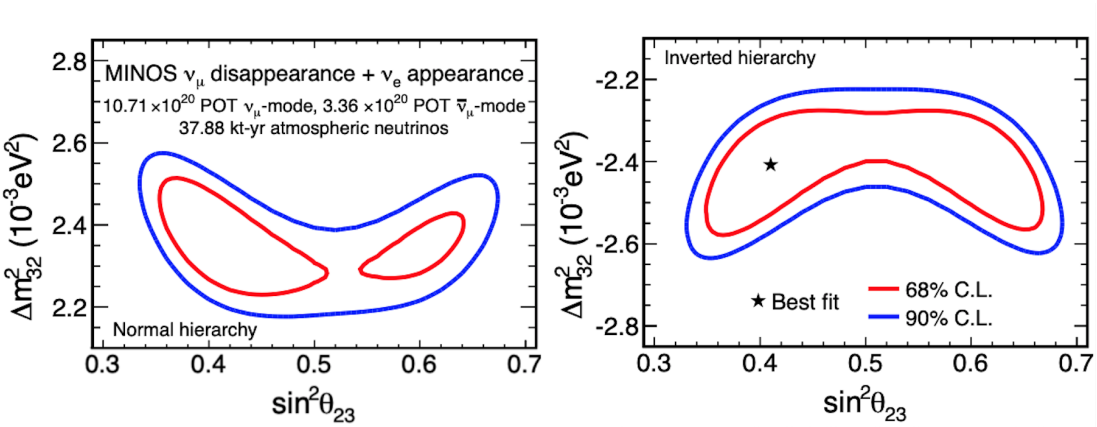


Рис. 1.6. Результаты эксперимента MINOS доверительный интервал θ_{23} и Δm_{32} для нормальной и инверсной иерархии масс.

Собранная статистика в эксперименте KamLAND позволила вычислить доверительные интервалы параметров осцилляций для двух-нейтринных осцилляций θ и Δm. Полученные значения параметров:$\Delta m^2 = 7.9^{+0.6}_{-0.5} \times 10^{-5}$эВ и $tan^2\theta = 0.40^{+0.10}_{0.07}$ (рис. 1.7).

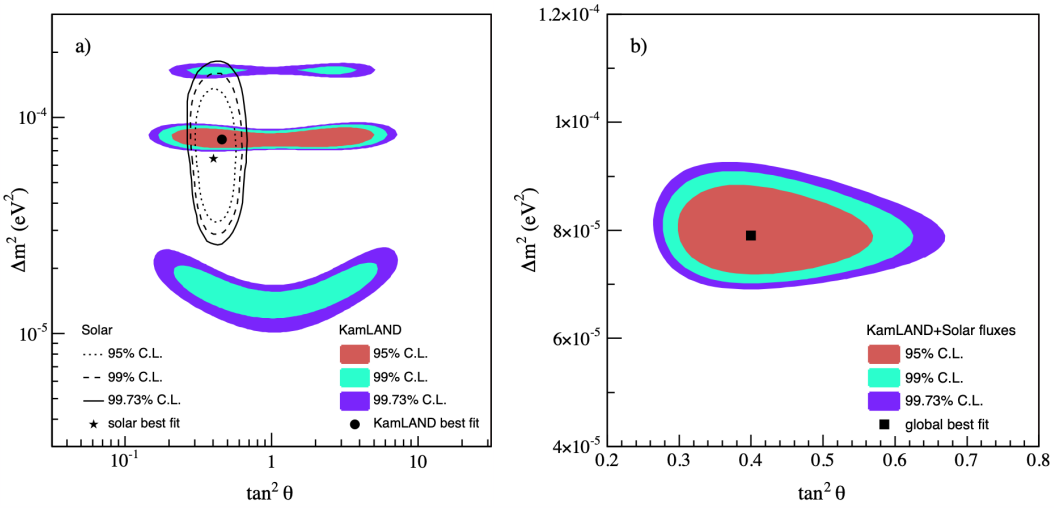


Рис. 1.7. Результаты эксперимента KamLAND, доверительный интервал для $tan^2\theta$ и Δm^2.

Эксперимент Reactor Experiment for Neutrino Oscillation (RENO) [36–38] – нейтринный реакторный эксперимент у атомной электростанции Yonggwang в 250 км от Сеула в Южной части Кореи. В эксперименте используются два идентичных сцинтилляционных детектора на расстоянии 290 и 1400 м от реакторов. Каждый из детекторов состоит из вето-системы и центральной части. Основной детектор содержится в цилиндрическом сосуде из нержавеющей стали, в котором находятся два вложенных цилиндрических акриловых сосуда. Самый

внутренний акриловый сосуд содержит 18,6 м3 (16,5 т) $\sim 0,1\%$ гадолиния Gd, с жидким сцинтиллятором LS в качестве нейтринной мишени.

Основной целью эксперимента RENO является определение параметра $sin^2\theta_{23}$. Основываясь на статистике 1500 дней сбора данных предварительными результатами является значение параметра $sin^2\theta_{23} = 0.097 \pm 0.013(stat.) \pm 0.015(syst.)$.

Эксперимент Daya Bay Reactor Neutrino Experiment (Daya Bay) [33–35] – нейтринный реакторный эксперимент в Гонконге, Китай. В качестве источника антинейтрино выступают реакторы атомных электростанций близ города Гонконг Daya Bay, Ling Ao Ling Ao II. В эксперименте используются два схожих детекторных комплекса с расстоянием в 1,5 км между собой, что позволяет подавить связанную с реактором неопределенность в измеряемом потоке нейтрино. Каждый детектор состоит из 20 т жидкого сцинтиллятора Gd и 20 т обычного жидкого сцинтиллятора, разделенных между собой акриловыми сосудами. Детекторы погружены в черенковские детекторы и покрыты четырехслойными Resistive Plate Chamber в качестве вето-системы.

Основной целью эксперимента Daya Bay является определение параметров $sin^2\theta_{23}$ и $|\Delta m^2_{32}|$. За 1958 дней работы эксперимент Daya Bay получил следующие значения параметров: $sin^2 2\theta_{23} = 0.0856 \pm 0.0029$, $|\Delta m^2_{ee}| = (2.52^{+0.068}_{-0.070}) \times$ $\times 10^{-3}$эВ, $\Delta m^2_{32}(NH) = +(2.471^{+0.068}_{-0.070}) \times 10^{-3}$эВ и $\Delta m^2_{32}(IH) = -(2.575^{+0.068}_{-0.070}) \times$ $\times 10^{-3}$эВ, (рис. 1.8).

Эксперимент Double Chooz был предложен в 2004 году в качестве нейтринного реакторного эксперимента на месте эксперимента Chooz, не нашедшего осцилляций нейтрино. Основной задачей было увеличение чувствительности детектора, для этого была произведена установка двух детекторов на атомной электростанции Chooz во Франции. Ближний детектор (ND) и дальний детектор (FD), расположенных на расстоянии $\approx$ 400 м и $\approx$ 1050 м от реакторов электростанции соответственно. Использование двух детекторов в эксперименте Double Chooz позволило улучшить ограничения на параметр нейтринных осцилляций θ_{13}. Результат был получен путем восстановления наблюдаемого спектра нейтрино при различных мощностях реактора: $sin^2 2\theta_{13} = 0.90^{+0.034}_{0.035}$ [39, 40].

Эксперимент OPERA (Oscillation Project with Emulsion-tRacking Apparatus) – эксперимент по изучению нейтринных осцилляций, проводивший набор стати-

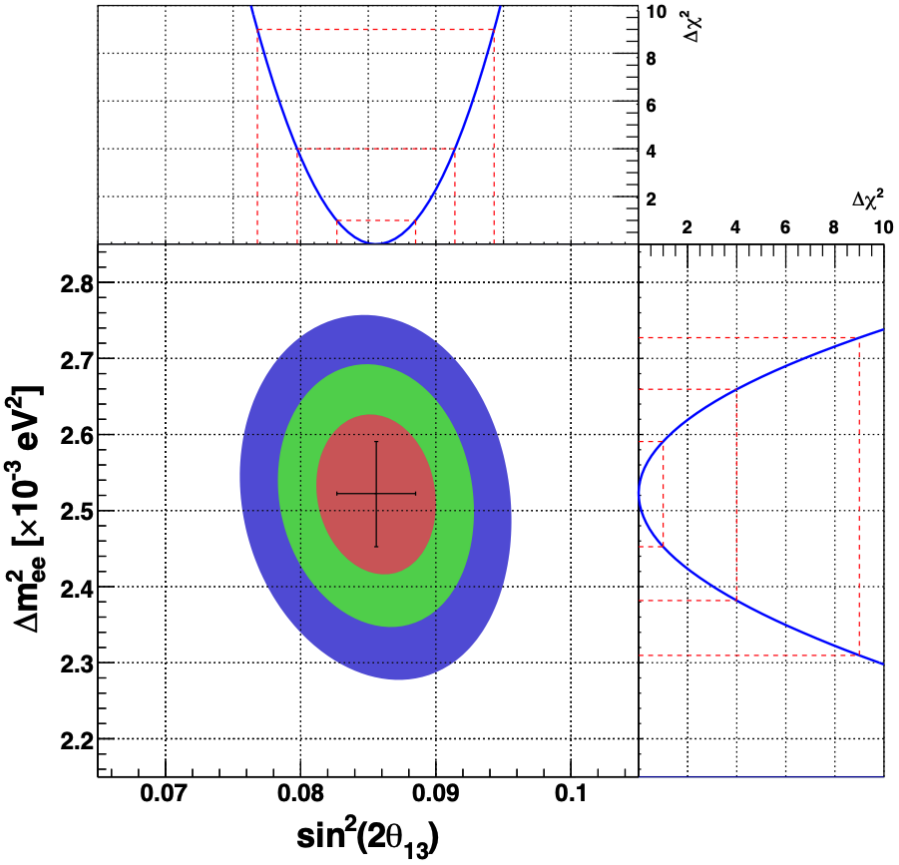


Рис. 1.8. Результаты эксперимента Daya Bay, доверительный интервал для $sin^2\theta_{23}$.

стики с 2008 по 2012 год. Основной целью эксперимента являлся поиск прямого перехода мюонного нейтрино в $\tau-$нейтрино. Эксперимент использовал нейтринный пучок из ЦЕРНа с энергией нейтрино от 5 ГэВ до 25 ГэВ. Детектор OPERA [87] был расположен в подземной лаборатории Гран-Сассо (LNGS), примерно в 730 км от источника нейтрино в ЦЕРНе. Детектор состоит из двух идентичных супермодулей (Super Modules, SM). Размеры детектора $10 \times 10 \times 20$м^3. Каждый модуль делится на три основные части – это мишень и два боковых мюонных спектрометра.

Основным результатам эксперимента OPERA является обнаружение осцилляций мюонного нейтрино в $\tau-$нейтрино. Всего было зарегистрированно 10 кандидатов в $\tau-$нейтрино с ожидаемым фоном в 2.0 ± 0.4 события (рис. 1.9), что соответствует 6.1σ [88]. Также были полученны ограничения на θ_{23} и θ_{13}. Данные ограничения впервые были получены совместно с использованием тау и электронных каналов появления нейтрино. Полученные значения параметров: $\theta_{23} = 0.78^{+0.32}_{-0.31}$ радиан и $\theta_{13} \in [0, 0.20]$ с точностью 1σ [87].

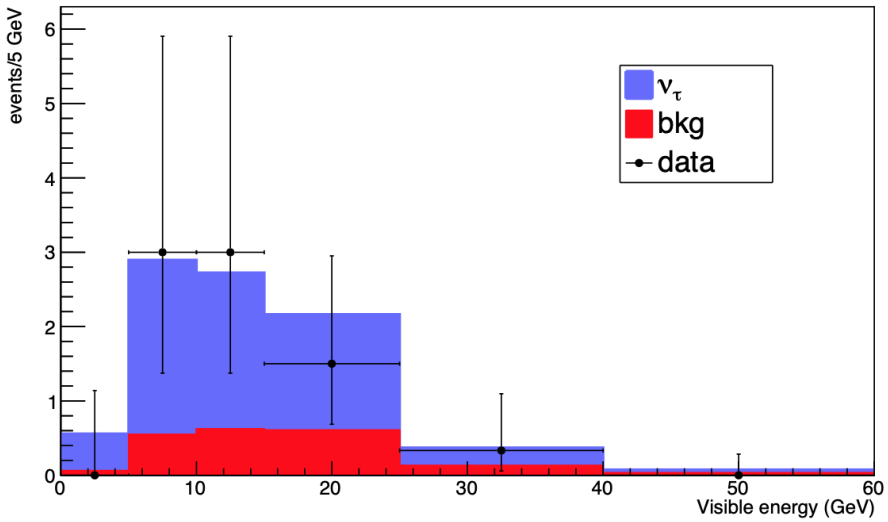


Рис. 1.9. Результаты эксперимента OPERA. Распределение энергии выборки из 10 кандидатов ν_τ по сравнению с предсказанием Монте-Карло (гистограмма).

Эксперимент NOvA (NuMI Off-Axis ν_e Appearance) – нейтринный эксперимент с длинной базой, в котором используется пучок нейтрино от ускорителя NuMI, находящегося в Национальной ускорительной лаборатории им. Ферми [89]. Для регистрации состава пучка в начале и в конце пути в эксперименте используются два детектора. Ближний находится на расстоянии 1 км от мишени (для измерения пучка до осцилляций), дальний — на расстоянии 810 км.

Основной целью эксперимента NOvA является измерение величин δ, θ_{23} и $\Delta m^2_{23} = m^2_3 - m^2_2$. Для этого в пучке мюонных нейтрино наблюдаются процессы исчезновения мюонных нейтрино ($\nu_\mu \to \nu_\mu$) и появления электронных нейтрино ($\nu_\mu \to \nu_e$).

К настоящему моменту предварительным результатом эксперимента NOvA является получение ограничений на параметры осцилляций. Для нормальной иерархии масс: $sin^2\theta_{23} = 0.57^{+0.03}_{-0.04}$, $\Delta m^2_{23} = (2.41 \pm 0.07) \times 10^{-3}$эВ^2, $\delta_{CP} = 0.82\pi$ [32] (рис. 1.10). Набор данных на эксперименте NOvA предполагается до 2025 года.

1.3. Осцилляции нейтрино в вакууме

Нейтринные осцилляции представляют собой периодический процесс полного или частичного изменения аромата движущегося в вакууме или среде нейтринного пучка. Наблюдение нейтринных осцилляций возможно, если нейтрино

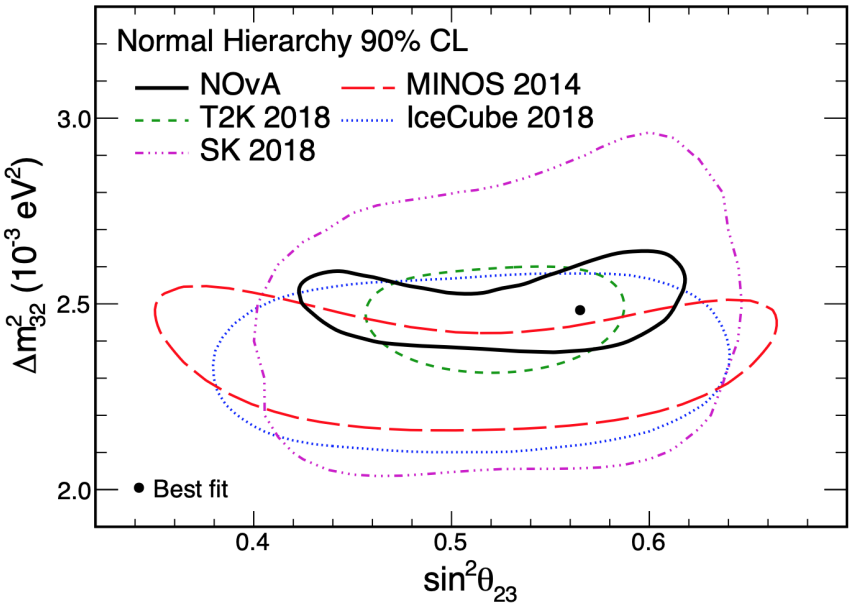


Рис. 1.10. Результаты эксперимента NOvA, доверительные интервалы для $sin^2\theta_{23}$ и Δm^2_{23}.

имеет массу и реализуется гипотеза смешивания. В этом случае нейтрино, участвующие в слабых взаимодействиях $(\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau)$, являются линейной комбинацией собственных массовых состояний:

$$\nu_\alpha = \sum_{k=1}^{3} U_{\alpha i}\nu_i, (\alpha = e, \mu, \tau), \tag{1.8}$$

где $U_{\alpha k}$ есть унитарная матрица смешивания, а ν_i – массовые собственные состояния. Если рассмотреть, для простоты два типа нейтрино ν_e, ν_μ, то ν_e, которое появляется при взаимодействии W-бозона с электроном, является линейной суперпозицией двух массовых состояний ν_1 и ν_2. Тогда смешивание двух ароматов может быть записано следующим образом:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} cos\theta & sin\theta \\ -sin\theta & cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix} \tag{1.9}$$

При наблюдении эффекта смешивания нейтрино, для ν_e, рожденного в момент времени $t = 0$ с импульсом $\overrightarrow{p}$, волновая функция может быть записана в виде двух плоских волн, соответствующих двум массовым состояниям ν_1 и ν_2:

$$|\nu_e(t = 0)\rangle = cos\theta|\nu_1\rangle + sin\theta|\nu_2\rangle \tag{1.10}$$

При прохождении нейтрино через вакуум в момент времени $t > 0$:

$$|\nu(\overrightarrow{x}, t)\rangle = exp(i(\overrightarrow{p}\,\overrightarrow{x} - E_1 t))cos\theta|\nu_1\rangle + exp(i(\overrightarrow{p}\,\overrightarrow{x} - E_2 t))sin\theta|\nu_2\rangle, \tag{1.11}$$

где:

$$E_i = \sqrt{p^2 + m_i^2} = p\sqrt{1 + m_i^2/p^2} \simeq p + m_i^2/2p \tag{1.12}$$

при условии, что $m_i \ll p$. Таким образом, в момент времени $t > 0$ нейтринная волновая функция выглядит как:

$$\begin{gathered} |\nu(t)\rangle = cos\theta|\nu_1\rangle + e^{i\phi}sin\theta|\nu_2\rangle, \\ \phi = \frac{m_1^2 - m_2^2}{2p}t. \end{gathered} \tag{1.13}$$

Получается, что нейтрино, которое при $t = 0$ было электронным, в момент $t > 0$ уже не является таковым, а благодаря фазе ϕ приобретает примесь мюонного нейтрино. Вероятность перехода электронного нейтрино в мюонное определяется следующим выражением:

$$P\left(\nu_e \to \nu_\mu\right) = |\langle\nu_\mu|\nu(t)|^2 = sin^2 2\theta sin^2\frac{\pi x}{L}, \tag{1.14}$$

где длина осцилляций

$$\begin{gathered} L = \frac{4\pi p}{\Delta m^2} = \frac{4\pi E_\nu}{\Delta m^2}, \\ \Delta m^2 = m_1^2 - m_2^2 \end{gathered} \tag{1.15}$$

А вероятность электронного нейтрино остаться электронным:

$$P\left(\nu_e \to \nu_e\right) = 1 - sin^2 2\theta sin^2\frac{\pi x}{L} \tag{1.16}$$

Для трех типов нейтрино используется унитарная матрица 3×3, связывающая три слабых состояния нейтрино с тремя массовыми состояниями. Нейтринная матрица 3×3 имеет следующий вид:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu 1} & U_{\mu 2} & U_{\mu 3} \\ U_{\tau 1} & U_{\tau 2} & U_{\tau 3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix} \tag{1.17}$$

Либо,

$$\begin{gathered} \begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta_{CP}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta_{CP}} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \times \\ \times \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix} \end{gathered} \tag{1.18}$$

где $c_{ij} = cos(\theta_{ij}), sij = sin(\theta_{ij})$, а матрица смешивания представлена в качестве трех матриц, первая – эффект атмосферных нейтрино, вторая – связь между

атмосферными и солнечными нейтрино, а третья – эффект солнечных нейтрино.

Несмотря на простоту, двух-нейтринная формула для осцилляций является хорошим приближением к трех-нейтринной из-за того, что $|\Delta m_{31}|^2 \sim$ $\sim |\Delta m_{32}|^2 \gg \Delta m_{21}^2$ и $|U_{e3}|^2 \ll 1$. Вероятности осцилляций, определенные в выражениях 1.14 и 1.16) изменяются по мере длины L. Амплитуда осцилляций определяется углом смешивания θ и максимальна при $\theta = 45°$.

При расчете вероятности осцилляций нейтрино в веществе необходимо учитывать эффект вещества при осцилляциях. Вещество содержит из всех лептонов только электроны, ν_e взаимодействуют с электронами за счет обмена W и Z бозонами, а мюонные нейтрино только Z бозонами, в амплитуде рассеяния электронных нейтрино возникает дополнительный член пропорциональности плотности электронов. А при исследовании солнечных нейтрино эффект плотности играет существенную роль[74].

Однако, для энергии пучка T2K и расстояния до дальнего детектора вероятность того, что $\nu_\mu(\overline{\nu_\mu})$ осциллируют до $\nu_e(\overline{\nu_e})$, задается в ведущем порядке в δ_{CP}, включая CP-нарушающий член, но пренебрегается эффект вещества:

$$P(\nu_\mu \to \nu_e) \approx sin^2(2\theta_{13})sin^2(\theta_{23})sin^2\left(\frac{1.27\Delta m_{32}^2 L}{E}\right) \mp \frac{1.27\Delta m_{21}^2 L}{E} 8 J_{CP} sin^2\left(\frac{1.27\Delta m_{32}^2 L}{E}\right) \tag{1.19}$$

$$J_{CP} = \frac{1}{8} cos\left(\theta_{13}\right) sin\left(2\theta_{12}\right) sin\left(2\theta_{23}\right) sin\left(2\theta_{13}\right) \sin\left(\delta_{CP}\right)$$

Здесь E – энергия нейтрино в ГэВ, квадратичные разность масс дана в eV^2, а L – распространение в км. Второй член в уравнении 1.19 имеет отрицательный знак для нейтрино и положительный знак для антинейтрино. Расстояние и энергия пучка оптимизированы таким образом, что для T2K вероятность осциллировать до электронных нейтрино достигает максимума при спектре пучка T2K. В то время как вероятность осцилляции к электронным нейтрино мала, мюонные нейтрино также осциллируют в тау-нейтрино, которые не могут быть идентифицированы в SuperK с энергиями пучка T2K. А вероятность того, что мюонные нейтрино и антинейтрино сохранят свой первоначальный аромат, рав-

на:

$$P(\nu_\mu \to \nu_\mu) \approx 1 - 4cos^2(\theta_{13})\, sin^2(\theta_{23}) \times \left[1 - cos^2(\theta_{13})\, sin^2(\theta_{23})\right] sin\left(\frac{1.27\Delta m^2_{32} L}{E}\right) \tag{1.20}$$

1.4. Выводы по Главе 1

Обнаружение осцилляций нейтрино является прорывом в новую физику за пределами Стандартной Модели. Определение точных параметров осцилляций нейтрино является важной задачей экспериментаторов всего мира. За последние 50 лет были вычислены параметры смешивания и разности квадратов масс активных нейтрино, но без ответа все еще остаются многие вопросы: нейтрино — это майорановская или дираковская частица; определение иерархии масс нейтрино и численное значение нарушение CP-симметрии.

Глава 2

Эксперимент T2K

2.1. Введение к главе

Глава 2 посвящена нейтринному ускорительному эксперименту 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 и предоставлены полученные результаты.

2.2. Общая информация об эксперименте

T2K – это эксперимент в Японии с длинной базой, созданный для изучения нейтринных осцилляций. В эксперимент входит ускорительный комплекс J-PARC, который находится в городе Токай, Япония и служит источником нейтрино. Также в эксперименте используются ближний детектор ND280, находящийся на расстоянии 280 метров от мишени ускорителя, и дальний детектор Super-Kamiokande на расстоянии 295 километров (рис. 2.1). 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 $2,5^\circ$. Эксперимент был разработан для поиска эффекта появления электронных нейтрино в пучке мюонных нейтрино, а также исследования исчезновения мюонных нейтрино из пучка. В данный момент эксперимент работает также в анти-нейтринной моде. Целями данного эксперимента являются: точное измерение параметров осцилляций θ_{23}, Δm^2_{23}, 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.

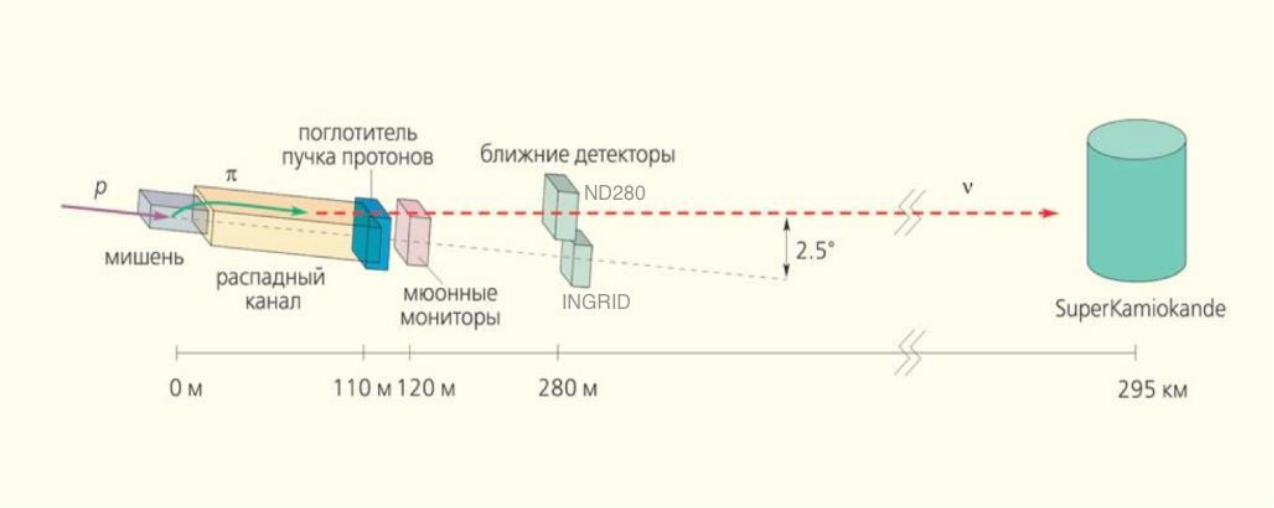


Рис. 2.1. Схема эксперимента T2K.

2.2.1. INGRID

Ближний детектор Interective Neutrino GRID – INGRID [31] находится на расстоянии 280 метров от ускорителя на оси пучка и служит для мониторинга нейтринного пучка. Он состоит из 14 идентичных модулей (7+7), расположенных в виде креста (рис. 2.2), и двух дополнительных модулей. Каждый из модулей (рис. 2.3) имеет сэндвич-структуру железо-сцинтиллятор, поперечные размеры 1.3×1.3 м^2 и вес порядка 10 тонн. В состав модуля входят десять слоев железа толщиной по 6.5 см и 11 слоев сцинтиллятора. Также модуль окружен четырьмя вето-детекторами (рис. 2.3). Каждый слой сцинтиллятора состоит из 24 пластин размером $5 \times 1 \times 120$ см^3, расположенных вертикально и горизонтально. В пластинах есть отверстия, через которые проходит спектросмещающее оптоволокно для сбора и передачи света. Общий вес детектора порядка 170 тонн.

2.2.2. ND280

Ближний детектор эксперимента T2K ND280 (рис. 2.4)[31] 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. определение потока нейтрино в близи мишени в направлении SuperK.

2. определение состава нейтринного пучка (в том числе примеси электрон-

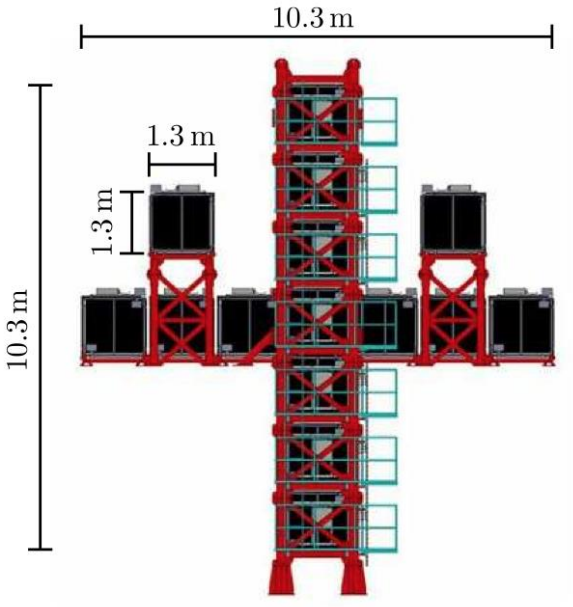


Рис. 2.2. Фронтальный вид детектора INGRID, на котором видно 7 вертикальных и 7 горизонтальных модулей, а так же 2 дополнительных.

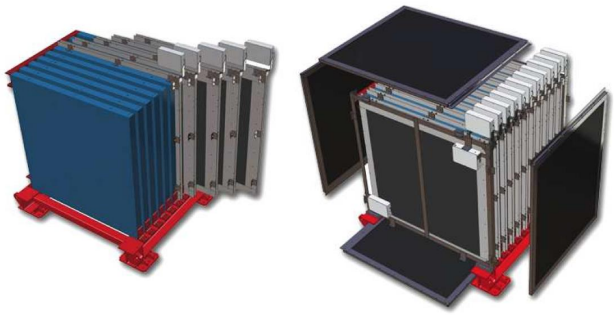


Рис. 2.3. Модуль детектора INGRID без вето-детекторов (слева) и с четырьмя вето-детекторами (справа).

ных нейтрино);

3. определение энергетического спектра нейтрино до процесса осцилляций;

4. измерение сечений взаимодействия нейтрино с веществом в области энергий около 1 ГэВ.

P0D

Детектор P0D (рис. 2.5)[90] имеет следующую структуру: в передней и задней части детектора расположены электромагнитные калориметры, выступающие в качестве активной вето-системы, а между ними находятся два

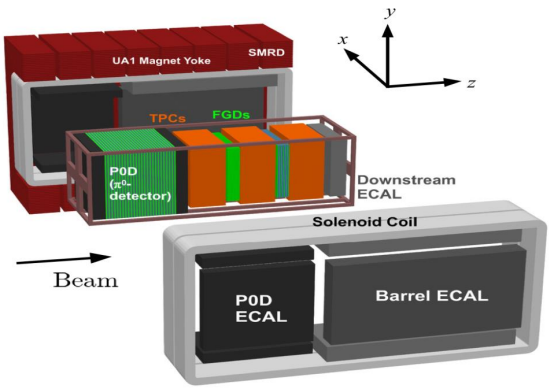


Рис. 2.4. Схема ближнего детектора ND280 эксперимента T2K.

модуля, в которых используется вода в качестве мишени. Водная мишень состоит из 26 сцинтилляционных трековых секций, чередующихся с заполненными водой полиэтиленовыми емкостями. Для увеличения эффективной радиационной длины между водой и пластиком вставлены медные пластины толщиной 2 мм. Каждый из электромагнитных калориметров в передней и задней частях детектора включает в свой состав 7 трековых модулей, разделенных 4 мм пластинами из свинца. Трековые модули имеют размер $220 \times 230 \times 3.9$ см^3 и состоят из сцинтилляционных пластин треугольного сечения, расположенных в X и Y направлениях перпендикулярно оси пучка. Общая масса детектора составляет 17 т, из них около 3 тонн воды.

FGD and TPC

Трековый комплекс ND280 состоит из двух высоко сегментированных детекторов FGD и трех время-проекционных камер TPC[31].

Два FGD (Fine Grained Detector, высоко-гранулированный детектор) (Рис. 2.6) модуля имеют размер $230 \times 240 \times 36$ см^3 [91]. Первый модуль (по направлению пучка) состоит из 30 чередующихся X и Y трековых слоев, расположенных перпендикулярно нейтринному пучку. Во втором модуле трековые слои чередуются с 3 см слоями, заполняемыми водой. Каждый из трековых слоев в FGD модулях представляет собой структуру из 192 сцинтилляционных пластин, имеющих размеры $9.6 \times 9.6 \times 1864.3$ мм^3. Пластины, покрытые отражателем из TiO2, имеют центральное отверстие, в которое вставлено спектросмещающее оптоволокно, с одного конца которого свет регистрируется лавинными фотодиодами. Сегментация детектора дает возможность восстанавливать треки прото-

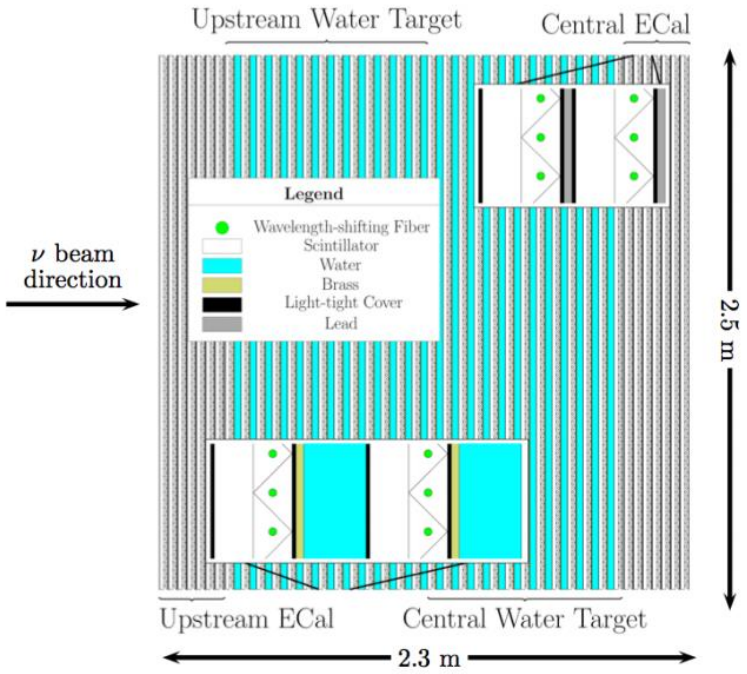


Рис. 2.5. Схема детектора нейтральных пионов.

нов низкой энергии, что позволит отделять CCQE реакции от других, неупругих процессов. Суммарный вес FGD составляет около 2 т.

Три камеры TPC (Time Projection Chamber, время проекционная камера) (рис. 2.7) имеют активный объем $180 \times 200 \times 70$ см^3 каждая [92]. В камерах используется газовая смесь Ar–CF4–IC4H10 (95–3–2%), скорость дрейфа составляет 7.5 см/мкс при напряженности поля 200 В/см. Усиление и съем сигнала осуществляется с помощью MicroMegas модулей с размером ячейки 9.8×7.0 мм^3. Всего в TPC используются 72 MicroMegas модуля, ∼124000 каналов. Пространственное разрешение ~ 0.7 мм. При измерении $\frac{dE}{dx}$ разрешение достигает 10% при длине трека более 70 см, что дает возможность разделить электроны и мюоны на уровне более 5σ. Для энергий мюонов ~ 1 ГэВ импульсное разрешение $\frac{\sigma(p)}{p}$ составляет около 8%.

ECal и SMRD

Электромагнитный калориметр (ECAL) состоит из нескольких модулей, окружающих P0D, FGD и TPC, и служит для регистрации частиц, дающих электромагнитные ливни[93]. Внутренние детекторы способны хорошо работать с заряженными частицами, однако электромагнитные ливни могут выйти за

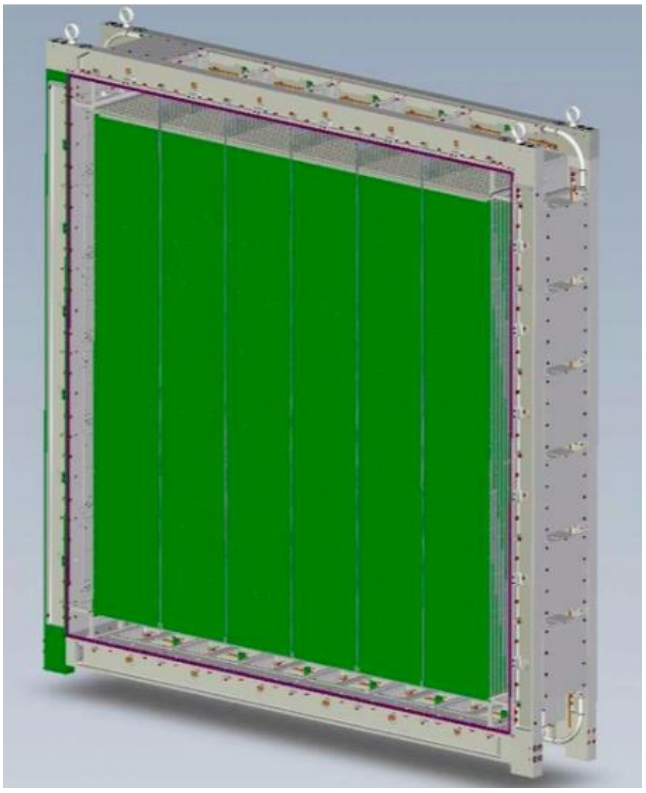


Рис. 2.6. Фотография детектора FGD.

пределы детектора, тем самым ухудшив энергетическое разрешение. Электромагнитный калориметр состоит из чередующихся слоев свинца и сцинтиллятора и имеет общую массу около 40 т.

Воздушные прослойки ярма магнита UA1 оснащены 440 пластинами сцинтиллятора для создания детектора мюонного пробега SMRD[94]. В качестве сцинтилляционного вещества выбраны экструдированные пластины полистирола с добавками 1.5 % паратерфенила (PTP) и 0.01% POPOP. Внутри каждой сцинтилляционной пластины находится спектросмещающее волокно, транспортирующее выделенный свет к светочувствительным приборам, находящимся на концах пластины (рис. 2.8).

2.2.3. Super Kamiokande

Super-Kamiokande или Super-Kamioka Neutrino Detection Experiment [14–16] – нейтринная обсерватория, расположенная на глубине 1000 м под землей под горой Икено в шахте Мозуми в районе Камиока в Хиде (префектура Гифу, Япония) . Данная обсерватория является модернизацией эксперимента Kamiokande-II. Основными целями эксперимента являются: исследование ос-

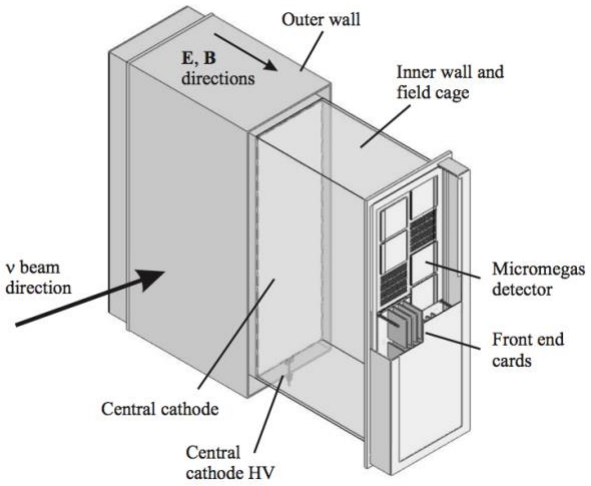


Рис. 2.7. Схематическое изображение TPC.

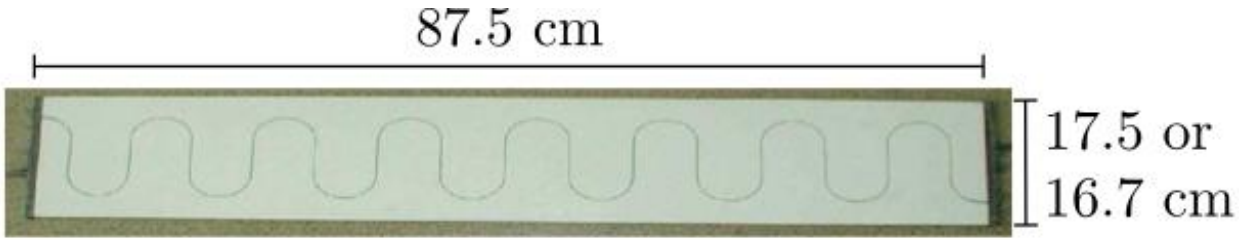


Рис. 2.8. Сцинтилляционный счетчик детектора SMRD.

цилляций атмосферных нейтрино, поиска распада протона, изучение солнечных и атмосферных нейтрино и наблюдение за сверхновыми в галактике Млечный путь.

Детектором является огромный резервуар (41,3 × 39,3 м), заполненный 50 кТ чистой воды, с 11146 фотоумножителями (ФЭУ), расположенными на поверхности внутренней части детектора, и 1885 ФЭУ, расположенными на внешней части детектора. Излучение Черенкова, производимое заряженными частицами, проходящими через воду детектора, собирается ФЭУ и используется для реконструкции физических событий. Взаимодействие нейтрино с нуклонами создает заряженные лептоны, которые пересекают детектор, создавая регистрируемый конус света Черенкова. Расплывчатость колец Черенкова позволяет отделить $\mu^{+/-}$ от $e^{+/-}$, что дает представление о нейтрино, вызвавшего взаимодействие (но без предоставления информации об электрическом заряде частиц), примеры событий представлены на рисунке 2.10.

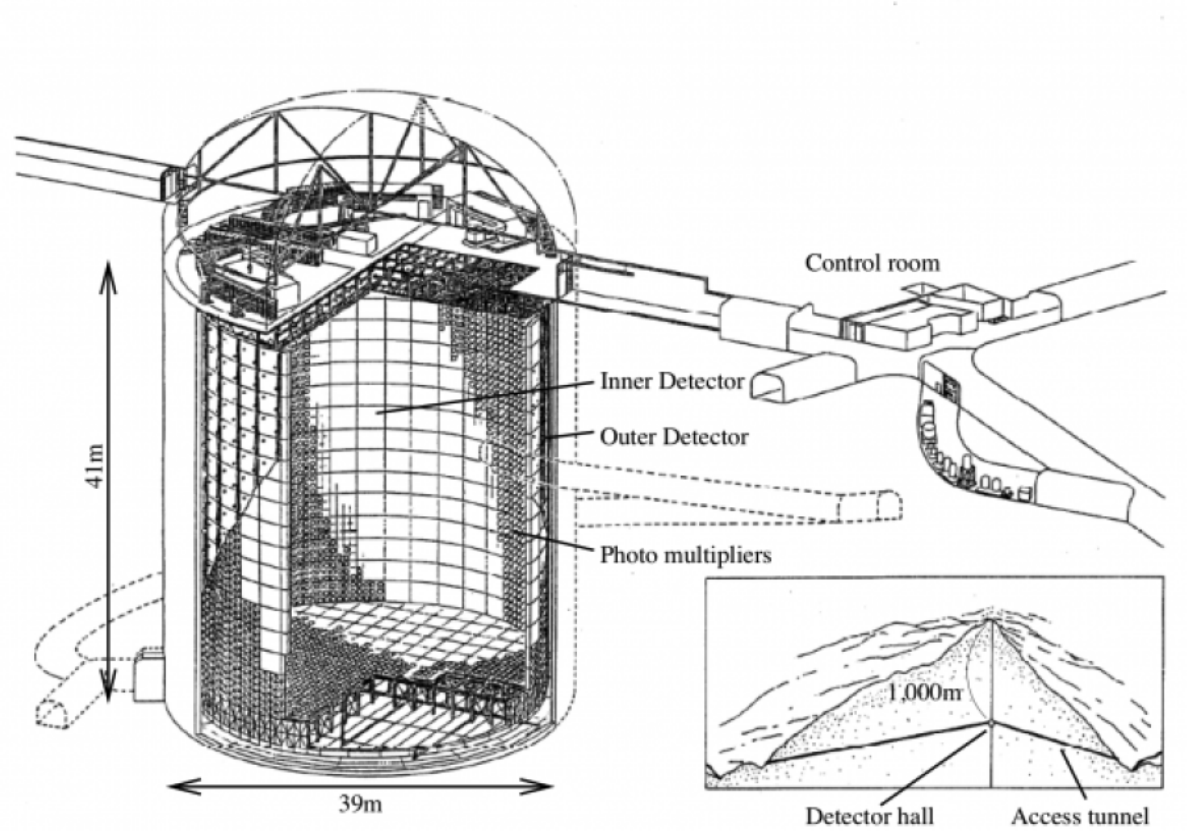


Рис. 2.9. Схематическое изображение Super Kamiokande.

2.3. Сбор данных в эксперименте T2K

Для набора статистики T2K использует один из самых интенсивных и почти чистых пучков ν_μ ($\overline{\nu_\mu}$) от J-PARC. Пучок протонов 30 ГэВ с интенсивностью $2,5 \times 10^{14}$ протонов в импульсе (с цикличностью в 2,48 секунд) бомбардирует в мишень с графитовым сердечником длиной 90 см. Рожденные пионы и мюоны фокусируются системой импульсных магнитов и затем распадаются в объеме длиной около 96 метров. Почти все адроны, кроме высокоэнергетичных (более 5 ГэВ) мюонов останавливаются в поглотителе, состоящем из графита и железа, толщиной 3,2 м. В 280 м от нейтринной мишени расположен ближний детекторный комплекс, состоящий из так называемых INGRID и ND280, которые размещены на оси и на 2,5 ° вне оси нейтринного пучка соответственно. 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. Центральная часть ND280 - трекер, который состоит из

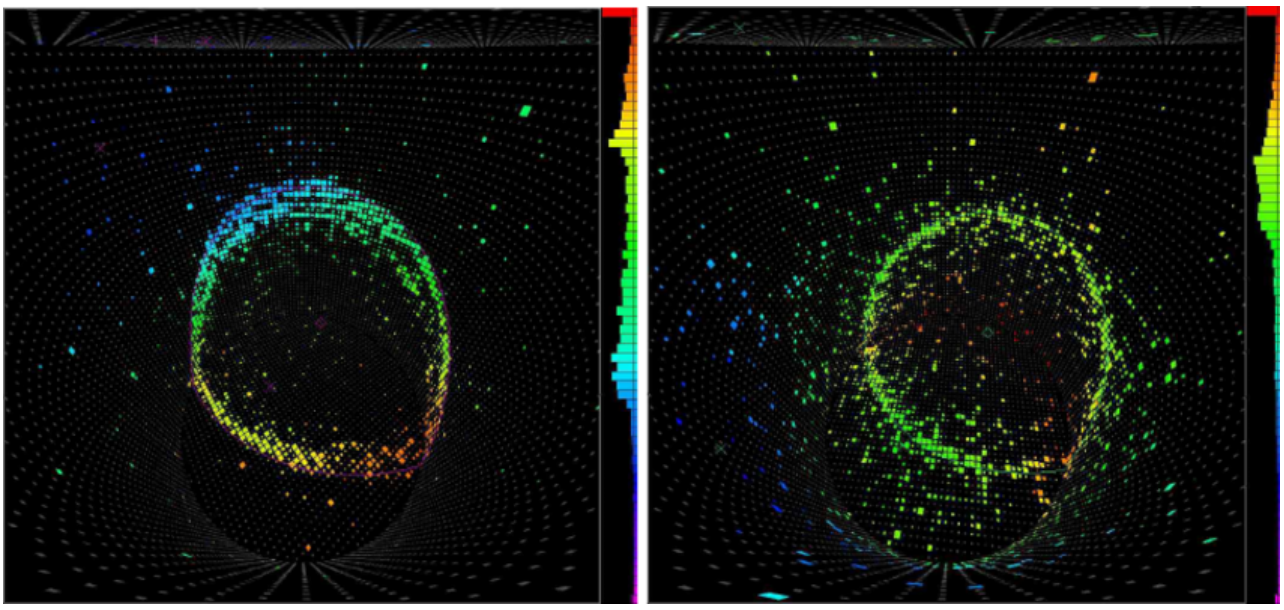


Рис. 2.10. Два события в детекторе Супер-Камиоканде . Слева: мюонное событие, у которого более чистое наружное кольцо конуса Черенкова. Правое: электронное событие, у которого кольцо гораздо более неровное из-за множества частиц электромагнитного ливня и многократного рассеяния частиц.

двух детекторов (FGD1 и FGD2) и трех временных проекционных камер (TPC). Оба FGD используются в качестве мишеней нейтринных взаимодействий с общей массой мишени 1,1 тонны каждая. В то время как FGD1 состоит исключительно из сцинтилляционных стержней, FGD2 перемежается сцинтиллятором и водой. В самом начале трекера размещается детектор π_0 (P0D), который состоит из водяных мешков, помещенных между плоскостями сцинтиллятора и латунными или свинцовыми листами. P0D оптимизирован для детектирования π_0, в основном рождающихся из процессов с нейтральными токами, которые могут имитировать сигнал ν_e, наблюдаемый в дальнем детекторе SuperK. И трекер, и P0D окружены электромагнитными калориметрами (ECals), которые предназначены для регистрации фотонов и идентификации нейтральных частиц и ливней электронов / позитронов. Все субдетекторы помещены в магнитное поле 0,2 Тл, создаваемое бывшим дипольным магнитом, который использовался в экспериментах UA1 / NOMAD.

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. На рис. 2.11 показаны вероятности осцилляций нейтрино и интенсивность пучка T2K. По данному рисунку видно, что узкий пик интенсивности пучка находится на провале $\nu_\mu \to \nu_\mu$ и на пике $\nu_e \to \nu_e$. Что является результатом оптимальной конструкции

эксперимента T2K, в которой детектор Super-K находится под углом $2,5°$ от направления пучка.

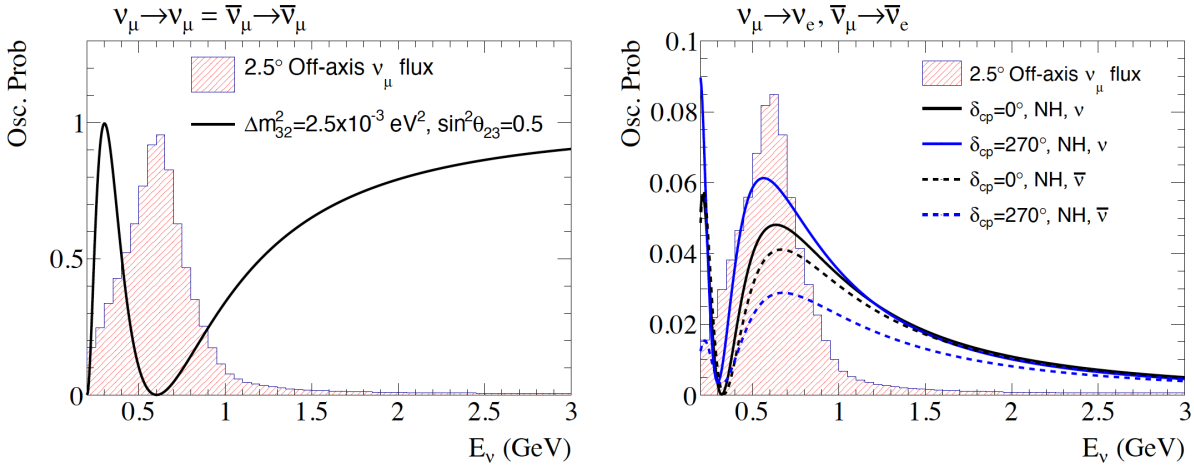


Рис. 2.11. Вероятность осцилляций $\nu_\mu \to \nu_\mu$ (слева) и $\nu_e \to \nu_e$ (справа).

Исчезновение ν_μ необходимо для измерения Δm^2_{32}, θ_{23} параметров, появление ν_e чувствительно к параметрам θ_{13} и δ_{CP}. Нарушение CP проявляется в разнице между $\nu_\mu \to \nu_e$ с его CP-сопряжением $\overline{\nu_\mu} \to \overline{\nu_e}$. При анализе данных эксперимента T2K используются формулы осцилляций, включающие эффект материи с плотностью земли $= 2.6$ г/см^3. На практике с помощью пучка $\nu_\mu(\overline{\nu_\mu})$ можно измерить фазу CP-нарушения с помощью сравнения вероятностей осцилляций $\nu_\mu \to \nu_e$ и $\overline{\nu_\mu} \to \overline{\nu_e}$. В приближении при $\dfrac{\Delta m^2_{31}}{4E} L = \dfrac{\pi}{2}$ асимметрия CP выражается как:

$$A_{CP} = \left(\frac{\Delta m^2_{31}}{4E} L = \frac{\pi}{2} \right) = \frac{P_{\nu_\mu \to \nu_e} - P_{\overline{\nu_\mu} \to \overline{\nu_e}}}{P_{\nu_\mu \to \nu_e} + P_{\overline{\nu_\mu} \to \overline{\nu_e}}} \approx -0.27 sin\delta_{CP} \pm \frac{L\,[km]}{2800} \qquad (2.1)$$

где знак $+$ или $-$ зависит от того, является ли иерархия масс нормальной или инвертированной соответственно. Для эксперимента T2K с относительно короткой базой 295 км эффект иерархии масс относительно невелик, около 10%; в то время как эффект CP может достигать 27%, когда $\delta_{CP} \approx \pi/2$.

2.4. Анализ данных T2K

T2K начал набирать данные с января 2010 года. Всего на 2020 год был набран интегральный поток 3.64×10^{21} протонов на мишени (POT). Параметры

Таблица 2.1. Погрешности предсказанного количества сигнальных событий в детекторе Super-Kamiokande (1σ, %) для различных сцинтилляционных мод [46–48].

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

осцилляций нейтрино оцениваются путем сравнения предсказаний числа событий и спектра нейтрино с наблюдениями на ближнем и дальнем детекторах T2K.

Данные с ближнего детектора T2K являются основным фактором для уменьшения систематической погрешности и повышения чувствительности к параметрам осцилляций. Благодаря ближнему детектору ND280 систематическая ошибка была уменьшена с 12,0% до 7,7% и от 11,9% до 6.8% соответственно в каналах $\nu_\mu \to \nu_\mu$ и $\nu_\mu \to \nu_e$ [46–48], таблица 2.1.

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

1. различия в активной части детектора между ND280 (80% C_8H_8 + 20% H_2O) и SuperK(H_2O). Что приводит к необходимости учета в различиях нейтринных сечений между C_8H_8 и H_2O.

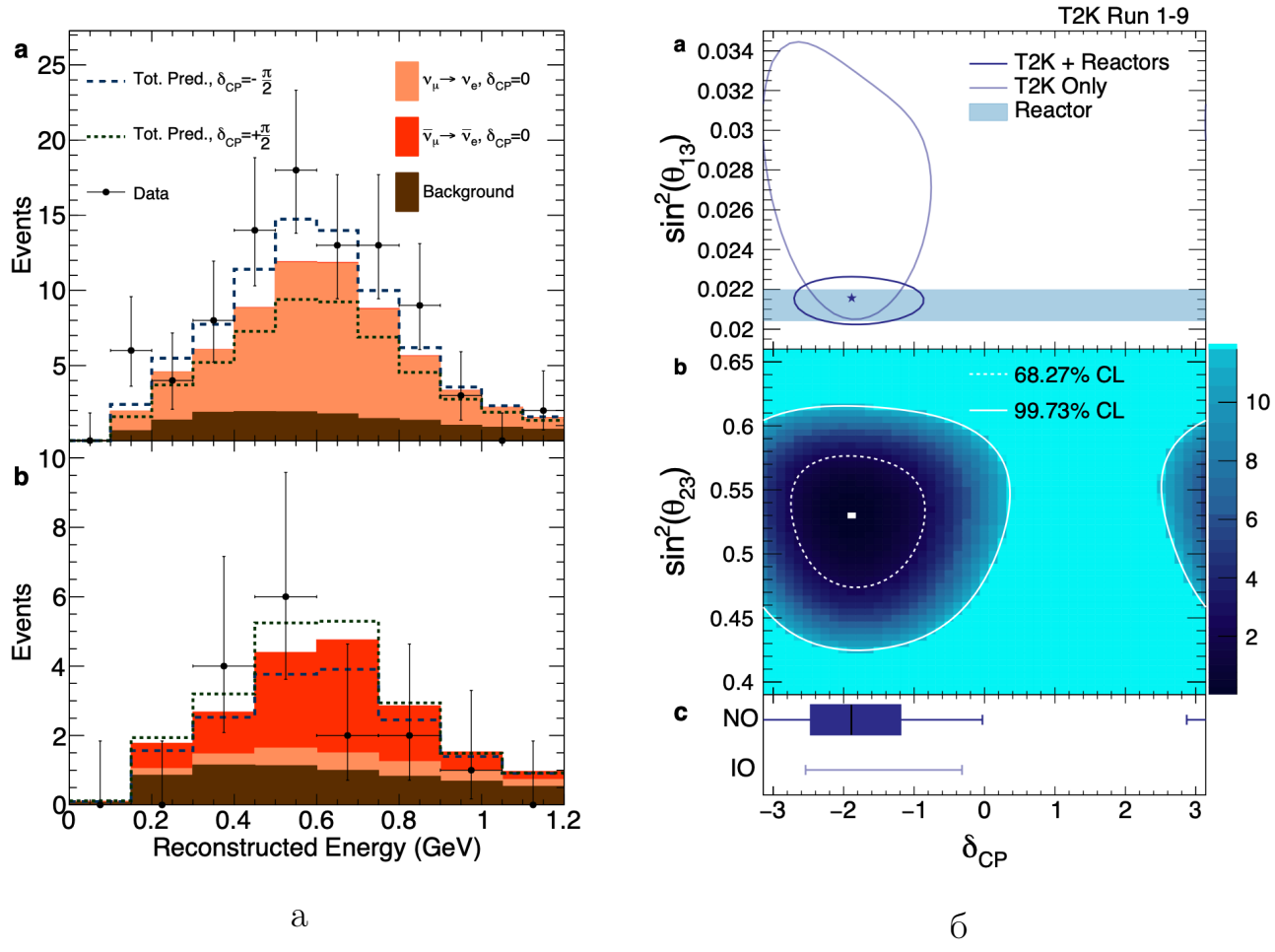
2. различия в угловом аксептансе ND280 (в основном вперед) и SK (4π).

3. различия в спектре нейтрино в ближнем и дальнем детекторе.

Для уменьшения систематических ошибок была разработана новая мишень-детектор WAGASCI [49–51]. 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)[52].

2.5. Результаты эксперимента T2K

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 [84]. В 2013 г. в эксперименте T2K впервые было получено указание на максимальное CP-нарушение в нейтринных осцилляциях [41]. Для этого использовалась комбинация измеренной вероятности перехода $\nu_\mu \to \nu_e$ и величины θ_{13}, полученные в реакторных экспериментах. А в 2020 году были представлены предварительные результаты измерения значения CP нарушения (рис. 2.12) [95].



а б

Рис. 2.12. а – Спектр E_ν реконструированных событий ν_e для пукки в нейтринной и антинейтринной моде. б – Предварительный результат T2K, показывающий область допустимых значений δCP, $sin^2 2\theta_{13}$ и $sin^2 2\theta_{23}$. Затемнённой полосой отмечен интервал значений $sin^2 2\theta_{13}$ из реакторных экспериментов, обозначенный PDG2016 (на момент публикации статьи [95]).

Эксперимент T2K нечувствителен к параметрам так называемых осцилляций солнечных нейтрино m^2_{21} и θ_{12}. Значения для этих параметров взяты из PDG, в частности $sin^2 2\theta_{12} = 0.846 \pm 0.021$ и $m^2_{21} = (7.53 \pm 0.18) \times 10^{-5} (eV^2/c^4)$.

Таблица 2.2. Измеренный осцилляционные парраметры значения и интервалы $\pm 1\sigma$, в эксперименте T2K(без реакторных ограничений) для нормальной и обратной иерархий.

параметры	нормальная иерархия	обратная иерархия
δ_{CP}, рад	$-2.14^{+0.90}_{-0.69}$	$-1.26^{+0.61}_{-0.69}$
$sin^2\theta_{13}/10^{-3}$	$26.8^{+5.5}_{-4.3}$	$30.0^{+5.9}_{-5.0}$
$sin^2\theta_{23}$	$0.512^{+0.045}_{-0.042}$	$0.500^{+0.050}_{-0.036}$
$\lvert\Delta m^2_{23}\rvert/10^{-3}$эВ^2	$2.46^{+0.07}_{-0.07}$	
$\lvert\Delta m^2_{13}\rvert/10^{-3}$эВ^2		$2.47^{+0.07}_{-0.08}$

Если принять во внимание реакторные измерения нейтрино, то $sin^2\theta_{13} = 0.0857 \pm 0.0046$ [96]. Результаты, представленные в таблице 2.2 и на рисунке 2.12, основаны на статистике 3.64×10^{21} протонов на мишени.

2.6. Выводы по Главе 2

Ускорительный нейтринный эксперимент с длинной базой T2K, состоящий из комплекса ближних детекторов ND280 и дальнего детектора Super-K, первым получил указание на максимальное CP-нарушение в нейтринных осцилляциях в 2013 году [41]. За годы работы эксперимент T2K получил ряд физических результатов, представленных в таблице 2.2.

Разность в активном материале ближнего и дальнего детекторов вносит вклад в систематическую ошибку эксперимента. Для уменьшения данных систематических ошибок была разработана новая мишень-детектор WAGASCI [49–51]. 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)[52].

Глава 3

Конструкция детектора Baby MIND

3.1. Введение к главе

Для конструкции Baby MIND был выбран новый подход - использование тонких намагниченных стальных пластины с высокой проницаемостью ARMCO для идентификации заряда при минимальном количестве стальных пластин и сцинтилляционными модулями между ними. Оптимальная конструкция была разработана с учетом ограничений таких как, время конструирования, размер шахты ND280 и затраты на проектирование. Дополнительным преимуществом намагничивания каждой стальной пластины в отдельности является возможность полностью модульной конструкции, позволяющая установить Baby MIND в любой конфигурации. Использование намагниченных стальных модулей вместо использования обычного магнита упрощает магнитную конструкцию, снижает стоимость и позволяет использовать равномерное поле. Непосредственными недостатками этого решения являются ограничение в разрешении по импульсу, ограничение многократного кулоновского рассеяния и сложность реконструкции трека. Нейтринная платформа CERN поддержала Baby MIND в качестве эксперимента NP05 в декабре 2015 года, а конструирование началось в августе 2016 года и завершилось в июне 2017 года. Во время разработки детектора было предложено использовать Baby MIND в качестве мюонного спектрометра совместно с мишень-детектором WAGASCI (T59) в J-PARC, в котором используются нейтрино от пучка T2K. Baby MIND был установлен в шахте ближнего детектора ND280 в J-PARC в начале 2018 года.

Глава 3 посвящена основным этапам производства компонентов детектора Baby MIND. Показаны этапы сборки компонентов детектора, структура и дизайн, изготовленных модулей. Также в данной Главе предоставлены 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.

3.2. Магнитные модули Baby MIND

Baby MIND состоит из модулей намагниченного железа [97], чередующихся с модулями сцинтилляционных счетчиков. Baby MIND включает в себя 33 модуля намагниченного железа, каждый модуль имеет индивидуальные катушки. Данная конфигурация позволяет изменять физические и геометрические свойства детектора в зависимости от требований и условий.

Опытный образец магнитного модуля был изготовлен из стандартной конструкционной стали и завершен в марте 2016 года. Первый производственный модуль был изготовлен в сентябре 2016 года из магнитной стали ARMCO. Производство 33 модулей осуществлялось из расчета по одному модулю каждые 3-4 дня с завершением за 2 недели до запланированного конца февраля 2017 года. Зона сборки находилась в 180 холле в Северной зоне ЦЕНРа (рис. 3.1).

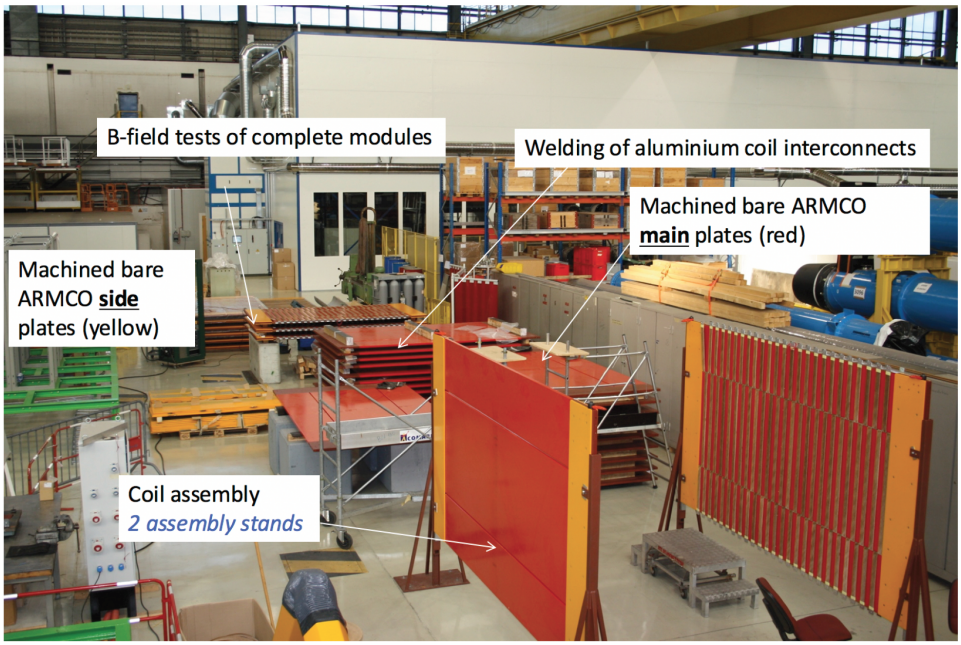
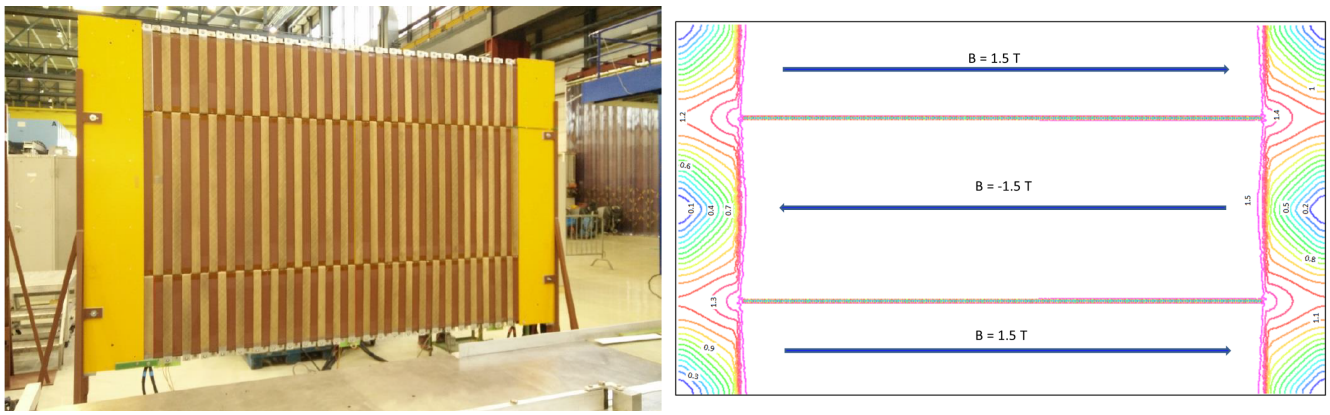


Рис. 3.1. Холл для сборки магнитных модулей.

Ключевым результатом проекта по созданию магнитных модулей является высокооптимизированное магнитное поле, создаваемое катушками. Конфигурация с двумя щелями для намотки катушек позволила увеличить область с однородным магнитном полем в центральной части в центральной области и охватывает область 2800×2000 мм^2 (рис. 3.2). В этой области доминирует компонент B_x с незначительными значениями B_y и B_z. Результаты испытаний 33 модулей показывают, что для достижения требуемого поля в 1,5 Тл необходим ток в 140 А при общей потребляемой мощности 11,5 кВт.



а б

Рис. 3.2. а – Фотография собранного магнитного модуля детектора Baby MIND. б – Симуляции магнитного поля, создаваемого алюминиевыми катушками, внутри железного модуля ARMCO.

Процесс сборки магнитных модулей проходил в несколько этапов. Первый этап заключался в подготовке и покраске модулей ARMCO. Следующий этап заключался в подготовке алюминиевых проводников намагничивающей катушки и изоляции их. Проводник представляет собой алюминиевую полосу 4×50 мм^2.

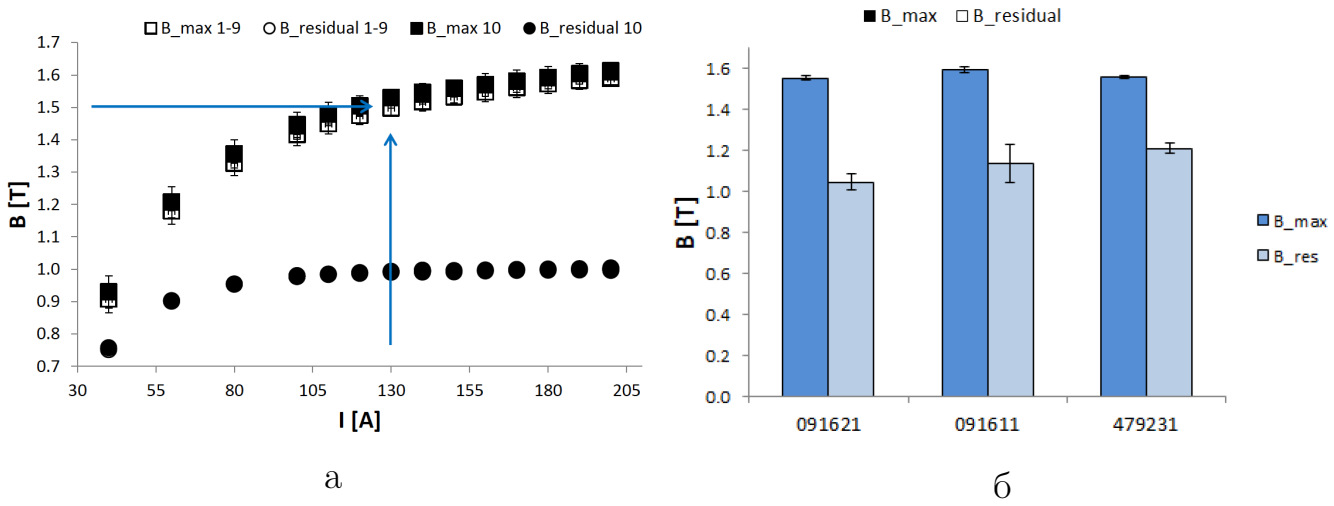
Процедуру подготовки и установки намагничивающих катушек магнитных модулей детектора Baby MIND можно описать в несколько этапов (рис. 3.3):

1. нарезка алюминиевых катушек на куски длиной, равной половине оборота;
2. установка изоляции вокруг проводника;
3. установка изоляторов в верхней / нижней части железной плиты и в прорезях;
4. установка предварительно согнутого проводника намагничивающей катушки в щели;
5. установите поворотных и соединительных элементы для создания контура катушки;
6. сварка всех элементов проводника катушки.

Следующим этапом происходит тестирование магнитного поля, создаваемого внутри железных модулей ARMCO. Магнитное поле внутри модулей

Рис. 3.3. Этапы подготовки алюминиевых проводников намагничивающей катушки магнитных модулей Baby MIND.

Armco измеряется с помощью измерительных катушек. Результаты тестирования были разделены на три категории в зависимости от номера партии модулей Armco. Результаты тестирования представлены на рисунке 3.4



а б

Рис. 3.4. а – Зависимость значений измеренного тока в катушках, установленных на металлических модулях ARMCO, в зависимости от подаваемого напряжения. б – Результаты измерений магнитного поля внутри модулей Armco в зависимости от номера партии, при установленном значении тока в 130 А.

3.3. Активная часть детектора

Сцинтилляторы – вещества, обладающие способностью излучать фотоны под действием ионизирующего излучения [98, 99]. Причем сцинтиллятором является только такое вещество, в котором вероятность излучения фотонов из атомов и молекул, находящихся в возбужденном состоянии, достаточно велика, а вероятность поглощения собственного излучения мала. То есть, в сцинтилляторе спектр излучения сдвинут относительно спектра испускания. Также вспышки света в сцинтилляторе появляются не только под действием заряженных частиц, а также при взаимодействии с γ–квантами и нейтронами. Это происходит благодаря тому, что γ–кванты, взаимодействуя с атомами, при рассеянии создают фотоэлектроны, нейтроны же взаимодействуют с ядрами, создавая ядра отдачи или заряженные частицы в результате реакций с протонами или α–частицами. Таким образом, сцинтилляторы позволяют регистрировать не только заряженные частицы, но и кванты и нейтроны.

Экструзия – технологический процесс, результатом которого являются готовые изделия, получаемые за счет продавливания расплавленного материала через формообразующую часть инструмента (экструзионную головку). В качестве сырья можно использовать вязкие вещества, а полученное изделие имеет заданную форму.

Экструзивный процесс получения материалов нужной формы происходит путем прикладывания механических усилий, высокой температуры и влаги. То есть гранулированное сырье в определенных пропорциях состава засыпается в

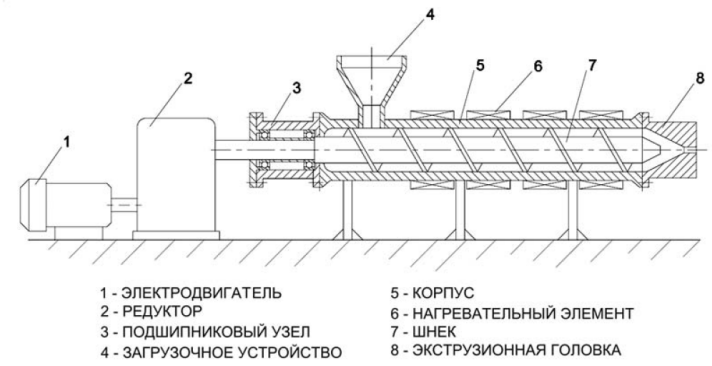


Рис. 3.5. Схематическое изображение экструдера.

бункер загрузки (рис. 3.5). При открытии заслонки бункера сырье через загрузочную воронку попадает в цилиндр пресса. Там с помощью внутреннего трения, деформации, под воздействием внешнего нагревателя и давления гранулы сырья полностью расплавляются и перемешиваются, образуя однородную гомогенную массу. Вращающийся шнек пресса проталкивает расплавленную массу в экструзионную головку. Расплав сырья равномерно распределяется по каналам головки и выходит из нее в виде заготовки. Далее заготовка попадает в калибратор, установленный на монтажном столе, где она, охлаждаясь, затвердевает и приобретает необходимые геометрические размеры. Сформированный профиль непрерывно протягивается траками машины тянущей с определенной заданной скоростью. Отвердевший профиль из машины проходит через отрезное устройство, при достижении заготовки определенной длины запускается цикл отрезки профиля и сброс изделия в накопитель приемного устройства.

Основными преимуществами использования экструдера для производства сцинтилляционных пластин являются: высокий уровень производительности, экономичность, простота эксплуатации, монтажа и запуска оборудования, долговечность. Достоинствами данного оборудования являются прочные узлы и механизмы, а также невысокие эксплуатационные расходы, что снижает стоимость производства сцинтилляционных пластин.

Основной проблемой при обработке сырья является возникновение пузырьков, что устраняется поредством использования дегазирующей камеры. Работа дегазационной камеры заключается в том, чтобы путем выпаривания отделить остаточные мономеры и растворитель от перерабатываемого материала. Конструкция в данном случае такова, что поток материала, который должен быть

дегазирован, подается со стороны привода шнека, а дегазированное сырье перемещают к концу шнека. После подачи материала уровень давления снижается и происходит дегазация под воздействием атмосферного давления или вакуума, что обеспечивается за счет более глубокого профиля резьбы шнека. Чтобы повысить эффективность дегазации, экструзионная машина комплектуется цилиндром и шнеком с увеличенными диаметрами после зон дегазации.

Экструзивный метод изготовления пластин позволяет производить сцинтилляторы любой геометрии (длинные однонаправленные стержни, полосы, профильные листы и листы большой и малой толщины). При изготовлении сцинтилляционных полос использовалась двухшнековая экструзивная линия, обеспечивающая интенсивное смешивание компонентов и термическую гомогенизацию расплава исходной сухой смеси полистирольных гранул и люминесцентных добавок 1.5% паратерфенила (PTP) и 0.01% POPOP.

3.3.1. Вклеивание спектросмещающего волокна

В полученные пластины сцинтилляционного вещества определенной геометрии вырезаются канавки в 2 миллиметра глубиной, которые вырезаются в ИЯИ (РАН). Данная канавка рассчитана на вклеивание в ней спектросмещающего волокна WLS Y11 KURARAY [99].

Вырезание канавок было осуществлено на фрезерном станке Woodpecker CAMARO 2030Y. Фрезерно-гравировальные станки Woodpecker серии «Camaro» – станки оборудованные контролером СЧПУ, базирующемся на DSC процессоре с LSD дисплеем. Станок оборудован системой автономной работы, что теоретически должно позволять работать системе без непосредственного вмешательства человека, но на практике возникают некие сложности. Основной проблемой автономной работы можно назвать наличие отходов производства в виде сцинтилляционной стружки, появляющейся вследствие вырезания канавок. Образовавшаяся стружка нагревает фрезу, что приводит к повышенному износу фрезы. В качестве решения этого вопроса используется ручная система удаления сцинтилляционной стружки, что приводит к необходимости постоянного контроля работы станка человеком.

3.3.2. Спектросмещающее волокно Y11

Основным требованием при выборе спектросмещающего волокна является хорошая степень согласования спектра поглощения волокна и спекра высвечивания сцинтиллятора. Как видно из рисунка 3.6, люминесцентная добавка POPOP с хорошей точностью согласуется со спектросмещающим волокном WLS Y11 KURARAY диаметром 1 мм.

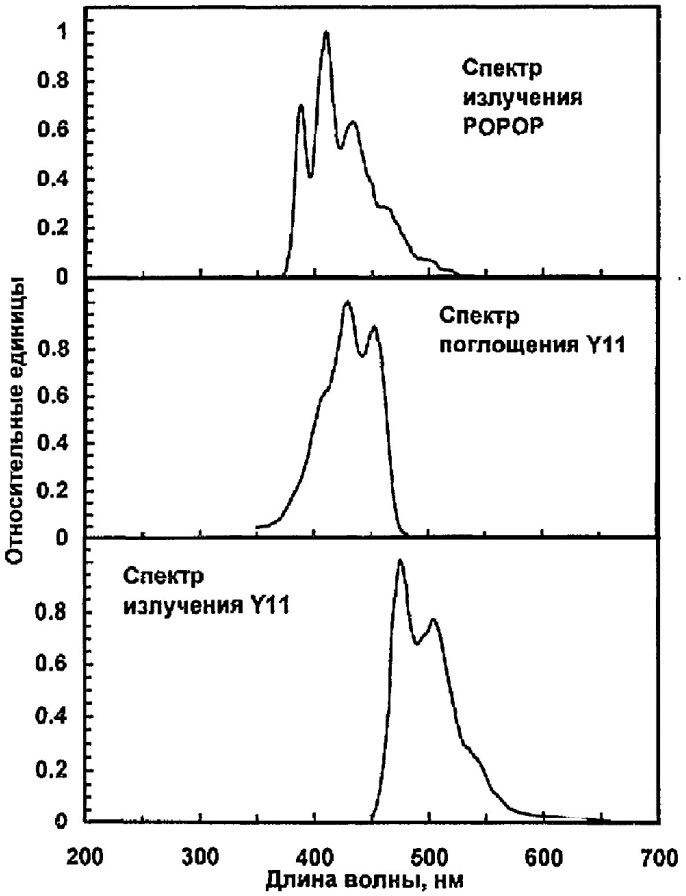


Рис. 3.6. Степень согласованности люминесцентной добавки POPOP со спектросмещающим волокном WLS Y11 KURARAY.

Еще одним требованием, предъявляемым к волокну, является устойчивость структуры к механическим воздействиям. Это связано с ручной технологией вклеивания WLS в сцинтилляционную пластину и необходимостью перевозки волокна в место использования. Вследствие неосторожности либо иных причин, волокно может быть подвергнуто механическому воздействию, что приведет его в негодность. А факт брака волокна может быть установлен только после непосредственного вклеивания его в сцинтиллятор, что приведет к браковке сцинтилляционного счетчика.

3.3.3. Стенд тестирования сцинтилляционных счетчиков

Тестирование сцинтилляционных пластин производилось в ИЯИ (РАН). В ходе тестирования использовались кремневые фотоумножители Hamamatsu MPPC (S10362-13-050C) [99–103], специально разработанные для эксперимента T2K, 16 канальный Digitizer DT5742, система питания MPPC и компьютер (рис. 3.7). Для сбора данных использовалось программное обеспечение DAQ, построенное на основе пакетов MIDAS и ROOT. MPPC были подключены к обоим концам сцинтилляторов. Измерения проводились в центре сцинтилляционных пластинок для горизонтальных счетчиков и области U-образного изгиба фибры для вертикальных счетчиков. В качестве триггера были использованы две сцинтилляционные пластины 10×10 см^2. На каждый MPPC подавалось напряжение, рекомендованное производителем кремневых фотоумножителей (69.7 В).

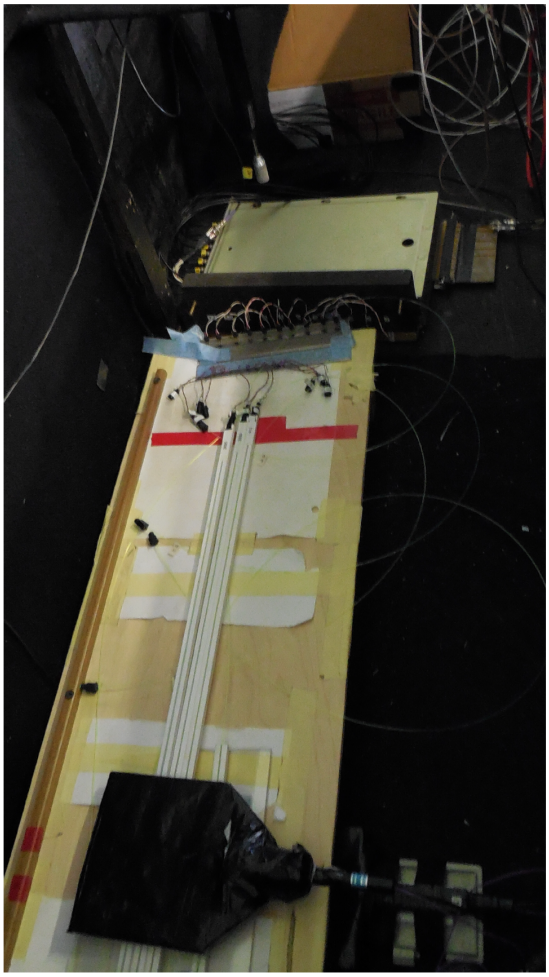


Рис. 3.7. Стенд измерения световых выходов сцинтилляционных счетчиков.

Digitizer DT5742

Модель Digitizer CAEN DT5742 [104] (рис. 3.8) включает в себя 16-ти канальную систему преобразования аналогового сигнала в цифровой. Каждый канал оборудован 12bit АЦП со скоростью передачи данных 5GS/s. Digitizer построен на основе чипа DRS4, позволяющего считывать сигналы в динамическом диапазоне ± 1 V (от канала к каналу либо от группы каналов к группе каналов) и использовать каналы, как триггерные.

Рис. 3.8. Digitizer CAEN DT5742.

Аналоговый сигнал, поступающий на канал Digitizer, посылается на циклический аналоговый буфер памяти. После срабатывания триггера все аналоговые сигналы из памяти посылаются на 12 битное АЦП, что не влияет на возможность продолжения записи. Таким образом, имеется возможность записывать события в буфер Digitizer как до срабатывания триггера, так и после, без потери информации. Посылаемая же на компьютер информация имеет только события, соответствующие срабатыванию триггера, что экономит необходимое дисковое пространство и время при обработке полученных данных.

3.3.4. Разработка коннекторов

Обеспечение хорошего взаимодействия между волокном сцинтиллятора и фотодиодом также является важной задачей. Опыт, накопленный в эксперименте MICE EMR в дизайне оптических разъемов в Женевском университете, доказал ценность в проектировании разъемом фотодатчиков. Прототипы разъемов были изготовлены в 3D литографии. Но окончательный дизайн разъемов и массовое производство с использованием литья пластмасс под давлением выполнил ИЯИ. Особое внимание при производстве уделено полировке волокна и этапам сборки, где контроль качества должен быть гарантированным.

Концепция системы коннектора для обеспечения оптимального соединение между оптическим волокном и фотодетектором показана на рисунке 3.9. Он состоит из следующих основных компонентов:

1. пластмассовый сцинтиллятор плиты;
2. оптическое волокно;
3. разъем, обеспечивающий центральное положение волокна относительно чувствительного фотоэлемента кремневого фотоумножителя;
4. кремневый фотоумножитель (Silicon photomultiplier, SiPM; Multi-Pixel Photon Counters, MPPC);
5. компонент с пружинным эффектом (губка);
6. разъем для фиксирования фоточувствительного датчика.

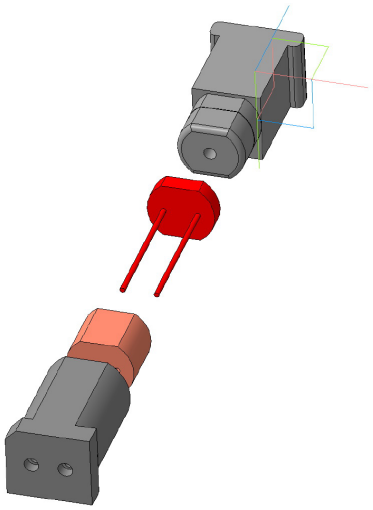


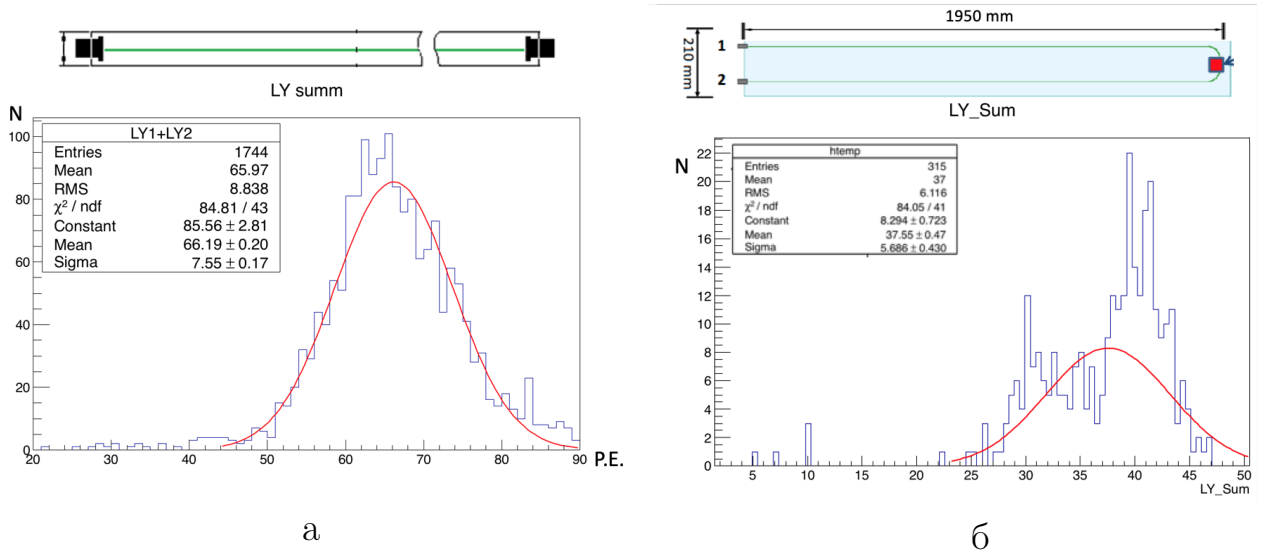
Рис. 3.9. Коннектор, предложенный Институтом Ядерных Исследований (РАН).

3.3.5. Сцинтилляционные счетчики

Детектирование частиц в детекторе Baby MIND осуществляется с помощью сцинтилляционных счетчиков, которые предоставляют информацию как о горизонтальном, так и вертикальном положении трека. Всего в детекторе 18 сцинтилляционных модулей, где каждый сцинтилляционный модуль состоит из

95 горизонтальных счетчиков $3000 \times 31 \times 7.5$ мм^3 и 16 вертикальных счетчиков $1950 \times 210 \times 7.5$ мм^3 в двух плоскостях (внутри одного модуля), суммарный размер сцинтилляционного модуля $3000 \times 1950 \times 30$ мм^3. Внутри сцинтилляционного модуля расположены 4 плоскости: горизонтальная, вертикальная, вертикальная, горизонтальная, с перекрытием между плоскостями, что позволяет достичь почти 100% эффективности регистрации минимально ионизирующих мюонов [59, 64, 67].

Все сцинтилляционные счетчики были протестированы на наличие брака. Для каждого счетчика был вычислен световой выход. Сумма светового выхода с обоих концов для горизонтальных и вертикальных сцинтилляционных счетчиков представлена на рисунке 3.10.

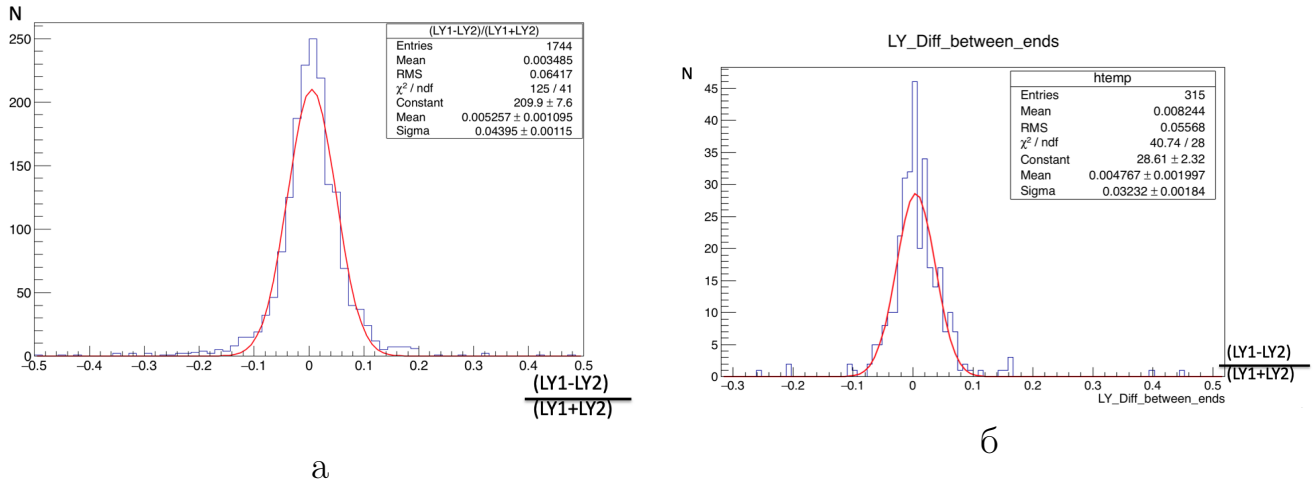


а б

Рис. 3.10. Световой выход сцинтилляционных счетчиков: а – горизонтальных (световой выход 66.2 фотоэлектронов); б – вертикальных (световой выход 37.6 фотоэлектронов).

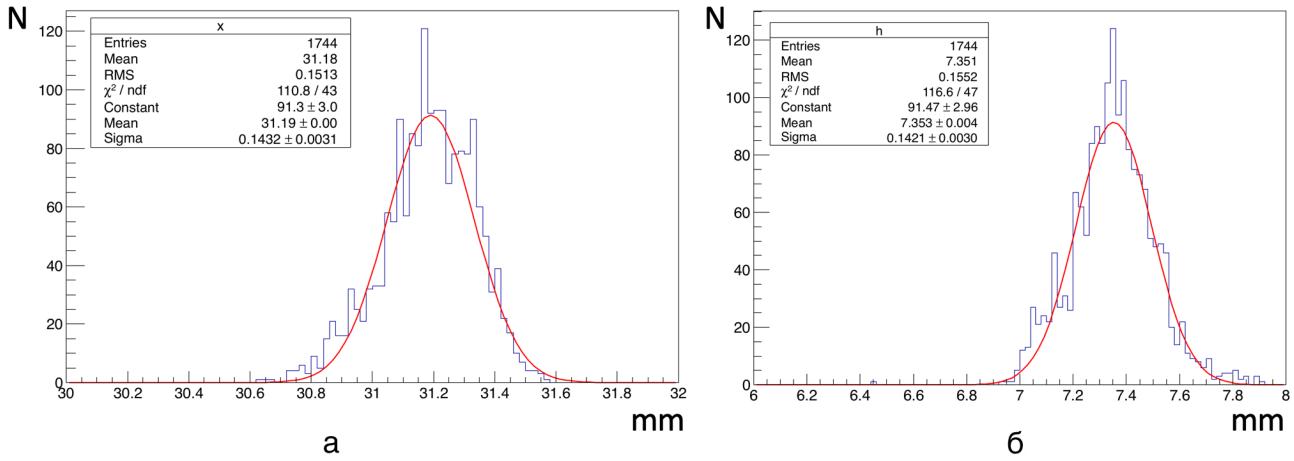
Важным аспектом при тестировании сцинтилляционных счетчиков на космических мюонах было отсутствие асимметрии в световом выходе с разных концов счетчика. Критерием отсутствия брака была асимметрия менее 10%. Асимметрия светового выхода представлена на рисунке 3.11.

На рисунке 3.12 показан разброс размеров горизонтальных сцинтилляционных счетчиков. Измерялись 6 размеров в трех точках. По толщине разброс составил около 142 микрон при средней толщине в 7.353 мм. По ширине разброс составил около 143 микрон для средней ширины пластинок 31.19 мм. Эти параметры удовлетворяют требованиям для геометрии детектора Baby MIND.



а б

Рис. 3.11. Асимметрия светового выхода с разных концов сцинтилляционных счетчиков: а – горизонтальных; б – вертикальных.



а б

Рис. 3.12. а – Среднее значение ширины сцинтиллятора (сумма 3-х размеров деленная на 3). б – Среднее значение толщины сцинтиллятора (сумма 3-х размеров деленная на 3).

3.3.6. Тестирование сцинтилляционных счетчиков в ЦЕРНе

Как было отмечено ранее, тестирование сцинтилляционных счетчиков на наличие брака проводилось в ИЯИ РАН на космических мюонах. Но полное тестирование светового выхода счетчика в зависимости от точки взаимодействия и исследование временного разрешения требовали исследований на ускорителе. Для достижения данных целей в 2015/2016 годы были проведены тесты вертикальных и горизонтальных счетчиков на ускорителе в экспериментальной зоне T9 в северной зоне ЦЕРНа [105, 106].

3.3.7. Результаты тестирования горизонтальных сцинтилляционных счетчиков в ЦЕРНе

Основной целью тестирования было определение точных характеристик сцинтилляционных счетчиков для возможности создания моделирования методом Монте-Карло, включающее в себя изменение светового выхода в зависимости от геометрического положения точки взаимодействия. Для этого был создан стенд с возможностью перемещения триггера относительно плоскости сцинтиллятора (рис. 3.13). В качестве пучка использовался поток мюонов с энергией 10 ГэВ. Для сбора данных с MPPCs использовался Digitizer DT5742 (описанный в разделе 3.3.3), а так же система предусилителей, триггеров и кремневые фотодиоды фирмы Hamamatsu MPPC S12571-025C [103]. Система триггеров была организована с помощью сцинтилляционных счетчиков размером 1×5 см крест-накрест и размещена перед тестируемыми счетчиками и после них по оси пучка.

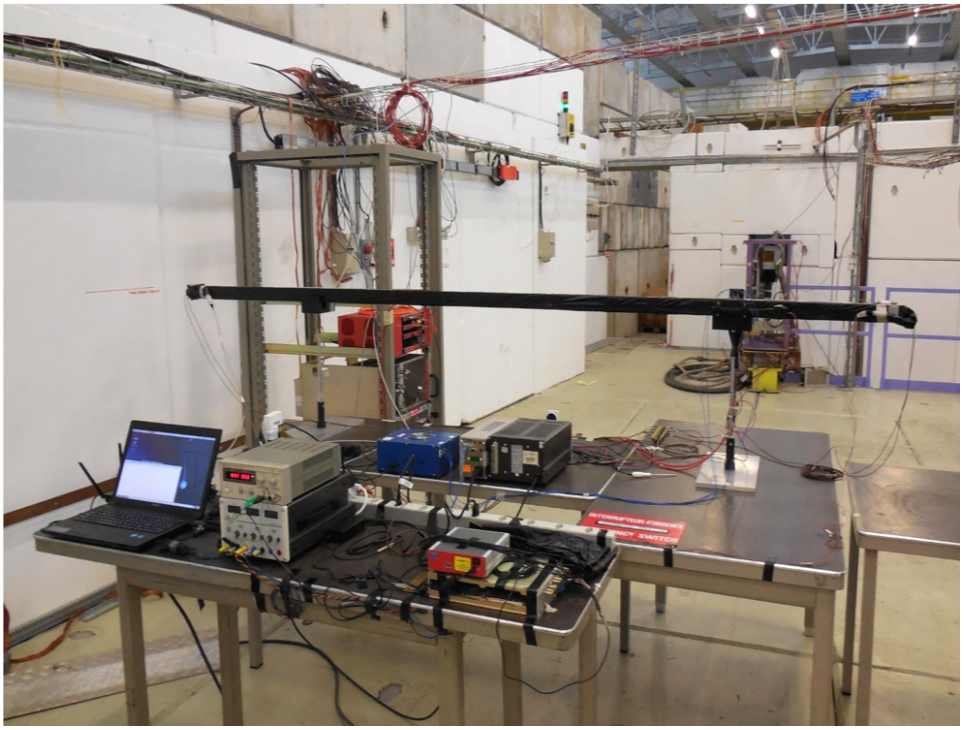


Рис. 3.13. Стенд тестирования горизонтальных сцинтилляционных счетчиков в экспериментальной зоне T9 в ЦЕРНе.

Для набора статистики одновременно тестировалось 3 сцинтилляционных счетчика [60, 62]. Для горизонтальных сцинтилляционных счетчиков сканирование происходило каждые 10 см вдоль оси сцинтиллятора (рис. 3.14). На каждой точке набиралась статистика из 10000 триггерных событий. Для предотвраще-

ния сигналов светового шума каждый из сцинтилляторов был обернут в черную алюминиевую фольгу. Представленные результаты – это среднее значение для 3 счетчиков. Нормировка на температуру не производилась.

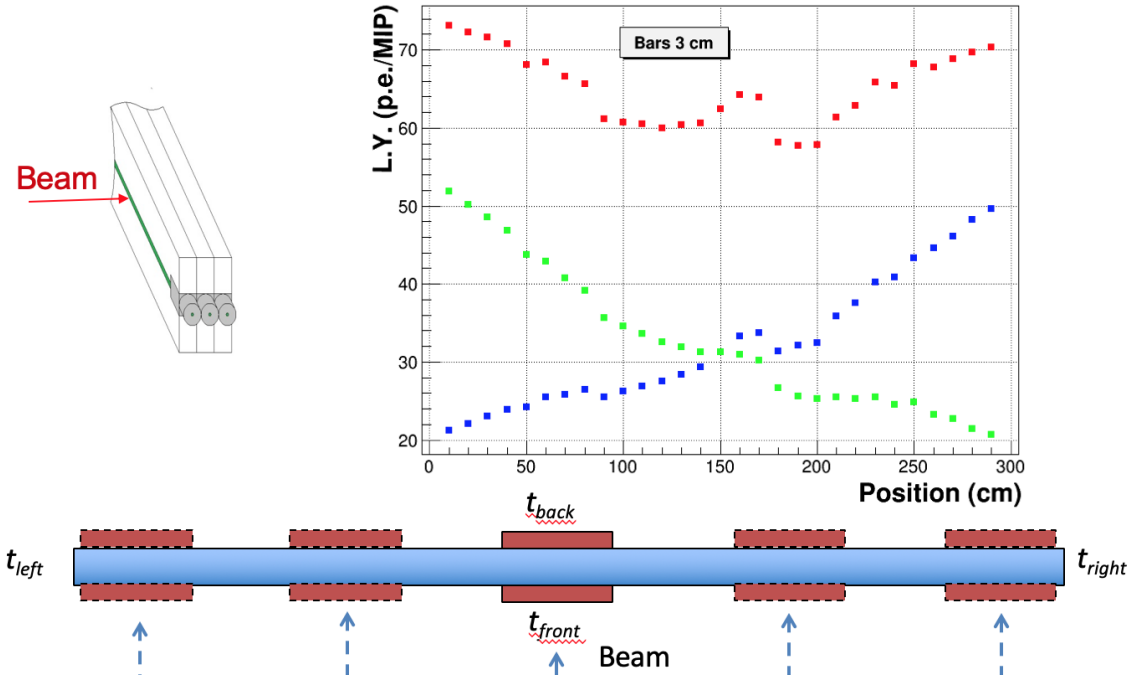


Рис. 3.14. Схемотехническое изображение стенда тестирования горизонтальных сцинтилляционных счетчиков и результаты тестирования зависимости светового выхода от геометрического положения точки взаимодействия с MIP вдоль оси счетчика. Зеленым и синим цветом обозначены результаты светового выхода с разных сторон сцинтилляционного счетчика; красным цветом – сумма светового выхода.

Следующим важным вопросом являлось определение временного разрешения горизонтальных сцинтилляторов. Для обработки результатов использовался метод Constant fraction (постоянной доли) [107]. Основная суть метода Constant fraction заключается в исключении зависимости времени срабатывания триггера от амплитуды сигнала. Чем больше амплитуда сигнала, тем быстрее фронт нарастания, что при использовании метода пересечения порога приводит к дополнительным погрешностям. Временной точкой события в методе Constant fraction считается пересечение линий фронта и базовой линии, рисунок 3.15.

Основные этапы вычисления времени события, согласно методу Constant fraction (рис. 3.15)[58]:

1. высота импульса принимается за 100%.

2. первая отметка по времени находится на уровне 5% от базовой линии.

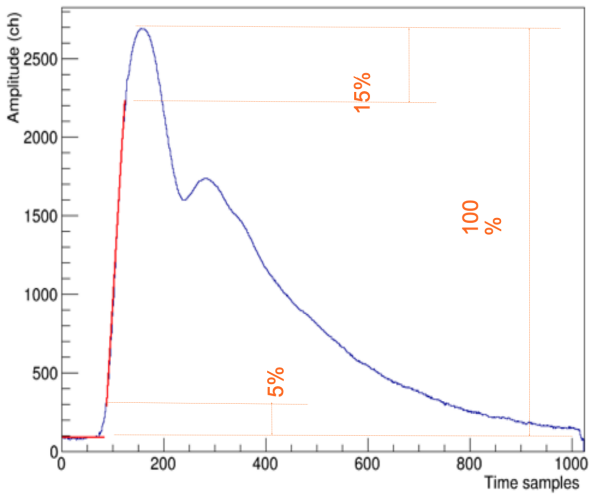


Рис. 3.15. Метод Constant fraction. Определение временной координаты события, для вычисления временного разрешения сцинтилляционных счетчиков.

3. последняя отметка времени находится на уровне 85% от базовой линии.

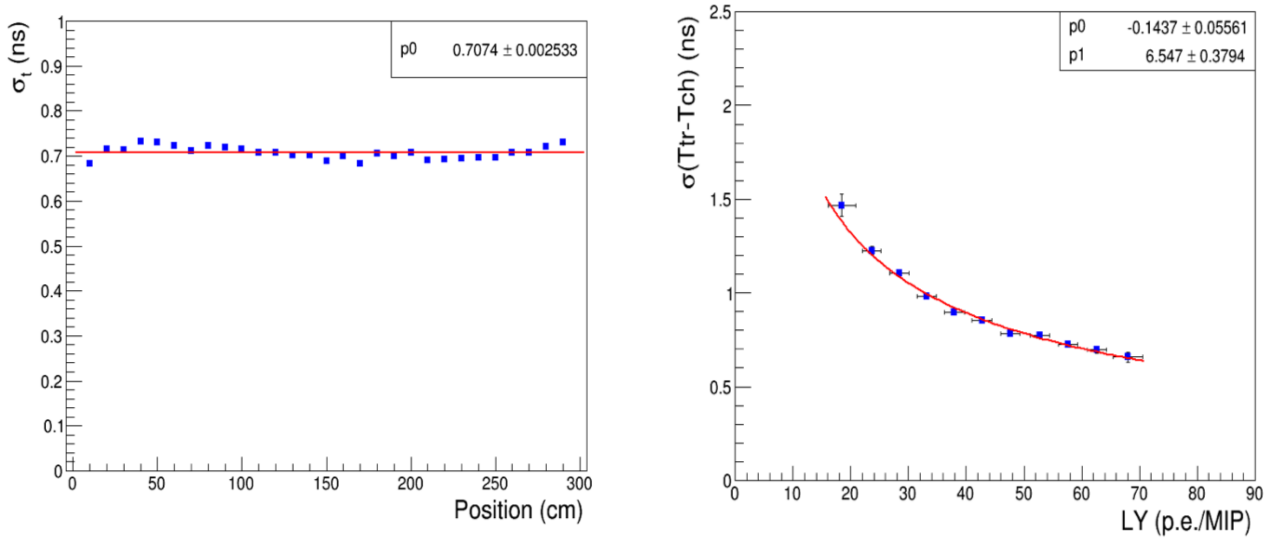
4. промежуток между двумя точками фитируется прямой линией.

5. базовая линия также фитируется прямой.

6. временем события считается точка пересечения данных линий.

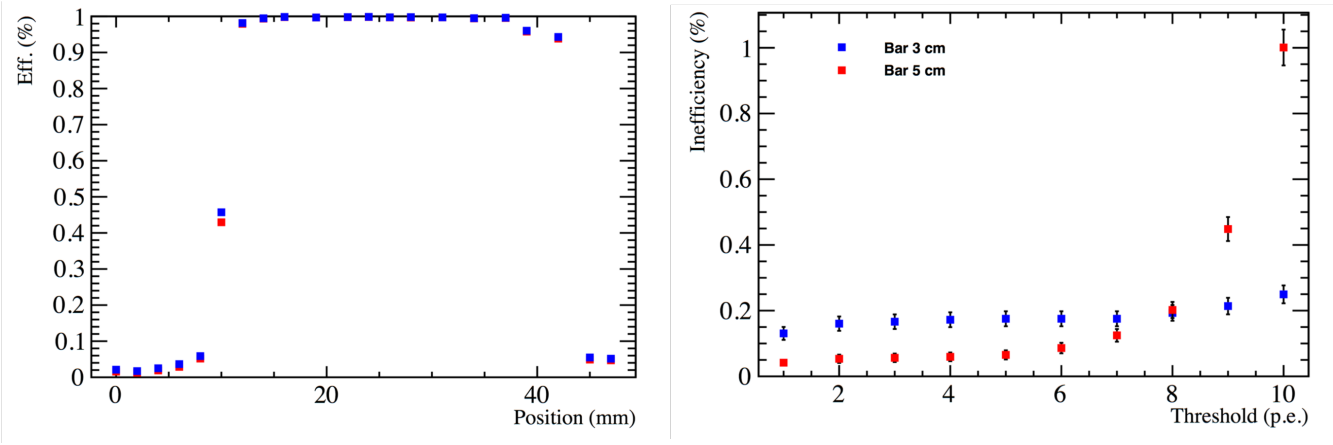
Временное разрешение вычислялось относительно времени срабатывания триггера. Временное разрешение $\sigma_t = \frac{T_{left}+T_{right}}{2}$, где T - время сигнала минус время триггера. Средний результат для всех протестированных позиций составил 707 пс (рис 3.16). Следующим этапом было фитирование зависимости временного разрешения от светового выхода, фитирование производилось по следующей формуле: $\frac{p0+p1}{sqrt(L.Y.)}$.

Для определения эффективности регистрации минимально ионизирующий частицы (Minimum ionizing particles, MIP) было проведено дополнительное сканирование перпендикулярно оси сцинтилляционного счетчика с триггерами размером 2×2 мм^2. Итоговая эффективность рассчитывалась как отношение количества событий в триггерных счетчиках (при условии наличия сигнала в каждом из триггеров) к количеству событий в исследуемом сцинтилляционном счетчике. Результаты тестирования представлены на рисунке 3.17.



а б

Рис. 3.16. Результаты исследования временного разрешения горизонтальных сцинтилляционных счетчиков. а – Сканирование временного разрешения в зависимости от положения точки взаимодействия, среднее значение 707 пс. б – Зависимость временного разрешения от светового выхода в фотоэлектронах.



а б

Рис. 3.17. Результаты тестирования эффективности регистрации MIP горизонтальными сцинтилляционными счетчиками. а – Эффективность регистрации MIP в зависимости от положения точки взаимодействия (перпендикулярно оси счетчика). б – Неэффективность регистрации MIP в зависимости от порога регистрации. Точки с нулевой эффективностью соответствуют точкам за границей сцинтилляционного счетчика. Точки с эффективностью $\approx 45\%$ соответствуют точкам на границе сцинтилляционного материала и диффузионного отражателя.

3.3.8. Результаты тестирования вертикальных сцинтилляционных счетчиков в ЦЕРНе

В 2016 году, во время тестов полностью активного сцинтилляционного детектора (Totally Active Scintillator Detector, TASD) [68, 70, 108] и первого поколения электроники Baby MIND Front end Board, появилась возможность сканирования вертикальных счетчиков детектора Baby MIND. Для этого был собран

стенд, аналогичный стенду для тестирования горизонтальных счетчиков (рис. 3.18). Главными задачами данного тестирования было вычисление светового выхода и эффективности регистрации в зависимости от положения точки взаимодействия. На плоскости было выбрано более 100 точек для сканирования. На каждой точке набиралось более 5000 триггерных событий.

Рис. 3.18. Стенд тестирования вертикальных сцинтилляционных счетчиков для детектора Baby MIND.

Для набора статистики случайным образом были выбраны 3 вертикальных сцинтилляционных счетчика. Для предотвращения сигналов светового шума каждый из сцинтилляторов был обернут в черную алюминиевую фольгу. Представленные результаты – это среднее значение для 3 счетчиков. Нормировка на температуру произведена не была. По оси сцинтиллятора было выбрано для сканирования 7 перпендикулярных оси линий (на расстоянии 9, 50, 98, 145, 165, 187 и 193 см от границы счетчика). На каждой линии статистика набиралась для 13 или 26 точек, в зависимости от особенностей данного положения (рис. 3.19 – 3.21).

3.3.9. Результаты тестирования сцинтилляционных счетчиков Baby MIND

Полученные результаты были учтены при разработке и создании сцинтилляционных модулей. Для достижения лучшей эффективности регистрации MIP использовалось геометрическое перекрытие сцинтилляционных счетчиков между собой.

Основные результаты:

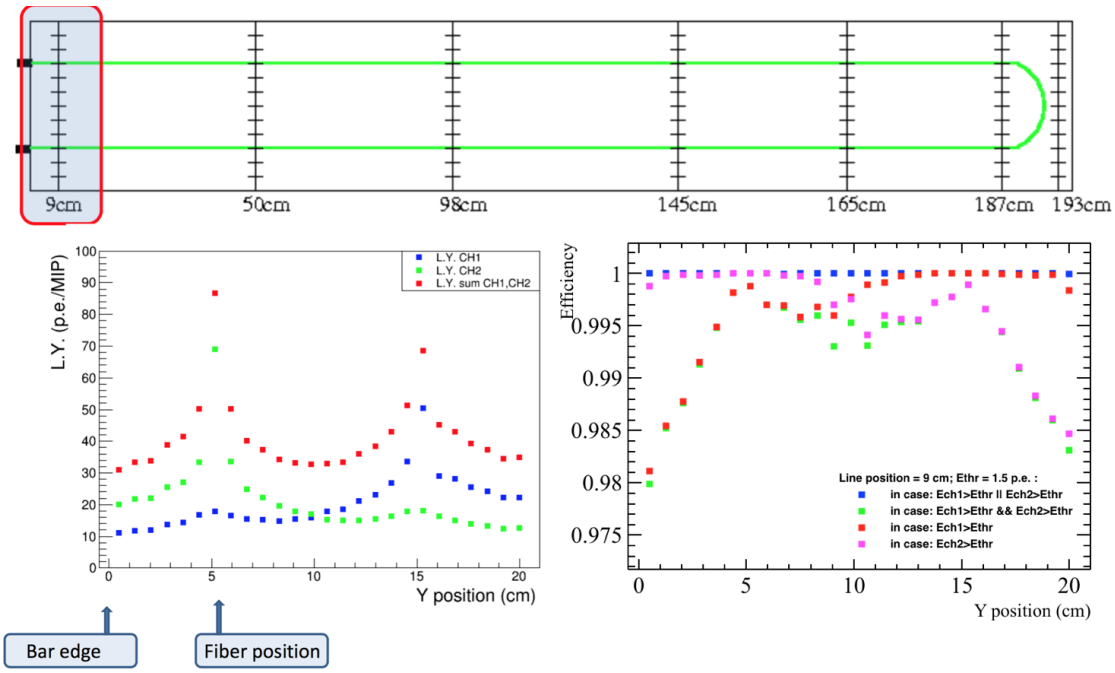


Рис. 3.19. Схематическое изображение тестирования вертикальных сцинтилляционных счетчиков и результаты тестирования 26 точек на расстоянии 9 см от границы сцинтиллятора. Слева – результаты тестирования светового выхода в зависимости от положения точки взаимодействия (синим цветом – световой выход с одного канала; зеленым цветом – световой выход со второго канала; сумма светового выхода с обоих каналов). Справа – эффективность регистрации MIP (синим цветом – наличие светового выхода более 1.5 ф.э. хотя бы на одном канале;зеленым цветом – наличие светового выхода более 1.5 ф.э. в обоих каналах; красным цветом – световой выход более 1.5 ф.э. с первого канала; розовым цветом – световой выход более 1.5 ф.э. со второго канала).

1. световой выход для горизонтальных сцинтилляционных счетчиков составляет 67 ф.э. / MIP;

2. световой выход для вертикальных сцинтилляционных счетчиков составляет 37 ф.э. / MIP;

3. разрешение по времени для горизонтальных полос составляет 707 пс;

4. эффективность регистрации для сцинтилляционных счетчиков составляет около 99,9%.

3.4. Сборка сцинтилляционных модулей

Важным этапом создания магнитного нейтринного детектора Baby MIND была разработка механической опоры для сцинтилляционных модулей. В качестве основного материала механической рамы был выбран алюминий. Основные достоинства алюминия – легкость, податливость штамповке, коррозионная стой-

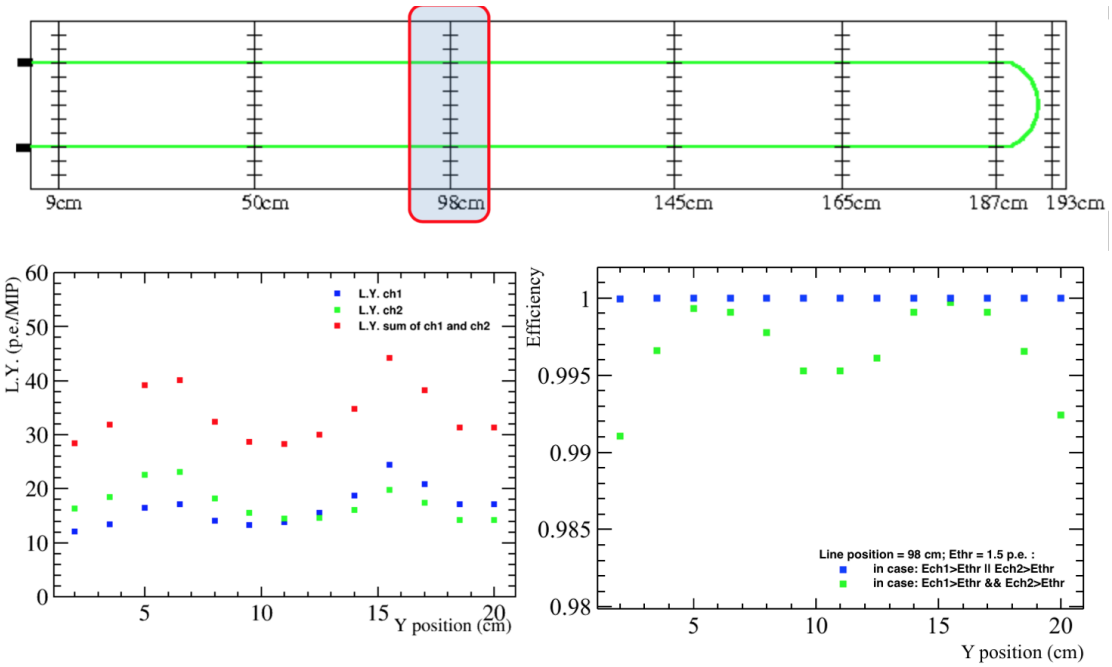


Рис. 3.20. Схематическое изображение тестирования вертикальных сцинтилляционных счетчиков и результаты тестирования 26 точек на расстоянии 98 см от границы сцинтиллятора. Слева – результаты тестирования светового выхода в зависимости от положения точки взаимодействия (синим цветом – световой выход с одного канала; зеленым цветом – световой выход со второго канала; красным цветом – сумма светового выхода с обоих каналов). Справа – эффективность регистрации MIP (синим цветом – наличие светового выхода более 1.5 ф.э. хотя бы на одном канале;зеленым цветом – наличие светового выхода более 1.5 ф.э. в обоих каналов).

кость (на воздухе алюминий мгновенно покрывается прочной пленкой Al_2O_3, которая препятствует его дальнейшему окислению), высокая теплопроводность и парамагнетизм.

За создание дизайна опоры сцинтилляционных модулей отвечал Университет Женевы. Главными задачами при разработке дизайна сцинтилляционных модулей являлось:

1. предотвращение попадания света на сцинтилляционные счетчики;
2. отсутствие соприкосновения между сцинтилляторами для предотвращения cross-talk;
3. возможность замены сцинтилляционных счетчиков и кремневых фотоумножителей;
4. увеличения разрешения восстановления треков регистрируемых частиц путем геометрического перекрытия сцинтилляционных счетчиков между собой;

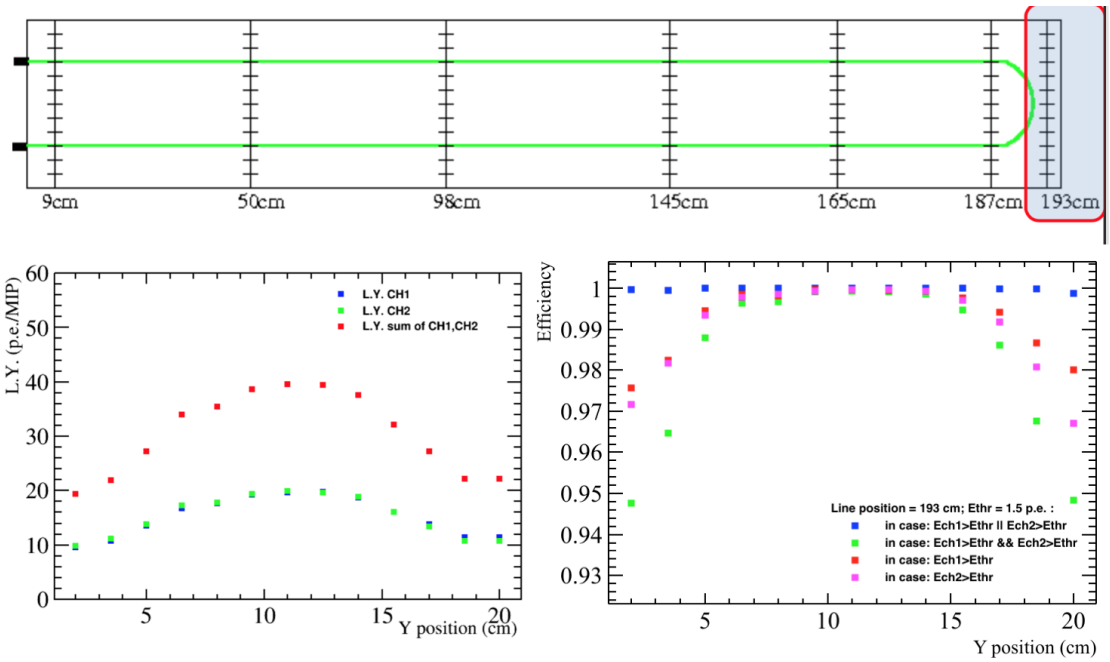


Рис. 3.21. Схематическое изображение тестирования вертикальных сцинтилляционных счетчиков и результаты тестирования 13 точек на расстоянии 193 см от границы сцинтиллятора. Слева – результаты тестирования светового выхода в зависимости от положения точки взаимодействия (синим цветом – световой выход с одного канала; зеленым цветом – световой выход со второго канала; сумма светового выхода с обоих каналов). Справа – эффективность регистрации MIP (синим цветом – наличие светового выхода более 1.5 ф.э. хотя бы на одном канале;зеленым цветом – наличие светового выхода более 1.5 ф.э. в обоих каналах; красным цветом – световой выход более 1.5 ф.э. с первого канала; розовым цветом – световой выход более 1.5 ф.э. со второго канала).

5. увеличение эффективности регистрируемых частиц путем геометрического перекрытия сцинтилляционных счетчиков между собой.

Первая проверка прототипа сцинтилляционного модуля состоялась в октябре 2016 года. Был собран первый модуль и проработана механика сборки. Сцинтилляционные счетчики в модуле удерживаются на месте с помощью пластмассовых пазов, которые выравнивают и удерживают стержни на месте (рис. 3.22). Каждый модуль представляет из себя два полумодуля, и каждый полумодуль состоит из одного слоя горизонтальных сцинтилляционных счетчиков (48 или 47 счетчиков) и одного слоя из 8 вертикальных сцинтилляционных счетчиков (рис. 3.23). Каждый полумодуль собирается независимо, а затем соединяется с соответствующим полумодулем, образуя целостный модуль (рис. 3.24). Алюминиевые листы спереди и сзади обеспечивают легкую герметичность и некоторую степень механической устойчивости. Тест совмещения сцинтилляционного модуля с магнитным модулем ARMCO также был проведен в октябре 2016 года для того, чтобы убедиться, что пазы между магнитом и сцинтилляционным модулем были четко определены (рис. 3.25).

Все монтажные работы проводились в северной части ЦЕРНа, Швейцания, Женева, в сборочных холлах 180 и 190.

Рис. 3.22. Стойки для монтирования сцинтилляционных счетчиков в модули. Слева – верхняя часть переднего полумодуля с вертикальными сцинтилляционными счетчиками и проставками с пазами, которые удерживают горизонтальные сцинтилляционными счетчики на месте, Справа – задний полумодуль с горизонтальными сцинтилляционными счетчиками в пазах.

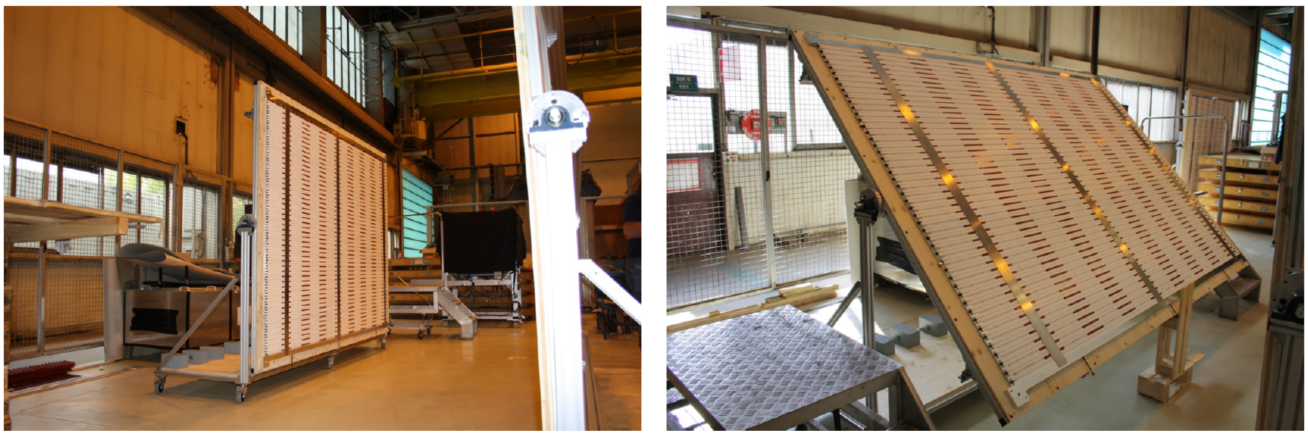


Рис. 3.23. Стойки для монтирования сцинтилляционных счетчиков в модули. Слева – передний полумодуль справа) задний полумодуль.

Полная сборка 18 сцинтилляционных модулей заняла 4 месяца. После сборки каждый канал всех сцинтилляционных счетчиков был оснащен кремневыми фотоумножителями и был протестирован на наличие сигналов и отсутствие светового шума.

Рис. 3.24. Стойки для монтирования сцинтилляционных счетчиков в модули. а – сборка передних и задних полумодулей. б – собранный прототип сцинтилляционного модуля. в – транспортировка в зону установки на магнит.

Рис. 3.25. Интеграция первого прототипа сцинтилляционного модуля с магнитным модулем для проверки пазов между ними.

3.5. Выбор кремневых фотоумножителей

В данном разделе обсуждается выбор кремневых фотодиодов. Как было отмечено ранее, детектор Baby MIND включает в себя 18 сцинтилляционных модулей. В каждый модуль входит 95 горизонтальных сцинтилляционных счетчиков и 16 вертикальных, каждый счетчик имеет два выхода для считывания светового сигнала. В сумме получается 3996 каналов для считывания.

Много Пиксельный Счетчик Фотонов (Multi-Pixel Photon Counter или MPPC) или кремневый фотоумножитель (Silicon photomultipliers, SiPM) – это один из новейших типов счетчиков фотонов, работающих в гейгеровском режиме, в основе которого лежит p-n переход. MPPC – представляет собой детектор фотонов, состоящий из упорядоченного множества пикселей, размещенных на общей подложке. Каждый пиксель – это лавинный фотодиод, работающий в гейгеровском режиме. Коэффициент умножения MPPC порядка 10^6. А выходным сигналом является сумма сигналов с каждого пикселя [109, 110].

Основным преимуществом использования множества пикселей является возможность детектирования нескольких фотонов единовременно, когда каждый из фотонов создает лавину в отдельном пикселе матрицы. Но важным ограничением на интенсивность регистрируемого излучения является количество пикселей (порядка 10^3), так как после регистрации фотона в каждом пикселе создается электронная лавина, которая имеет некоторое время релаксации или побочный импульс, после основного сигнала (after pulse).

SiPM является уникальным прибором, способным регистрировать одиночные фотоны благодаря следующим свойствам:

1. высокое усиление сигнала позволяет существенно уменьшить требования к электронике;

2. стабильность коэффициента усиления (разброс в пределах 10%) дает низкий уровень шумов;

3. малая чувствительность к изменениям температуры и подаваемого напряжения;

4. большая эффективность регистрации отдельных фотонов;

5. возможность восстановления формы регистрируемого сигнала;

6. возможность работы в режиме как счетчика, так и спектрометра одновременно;

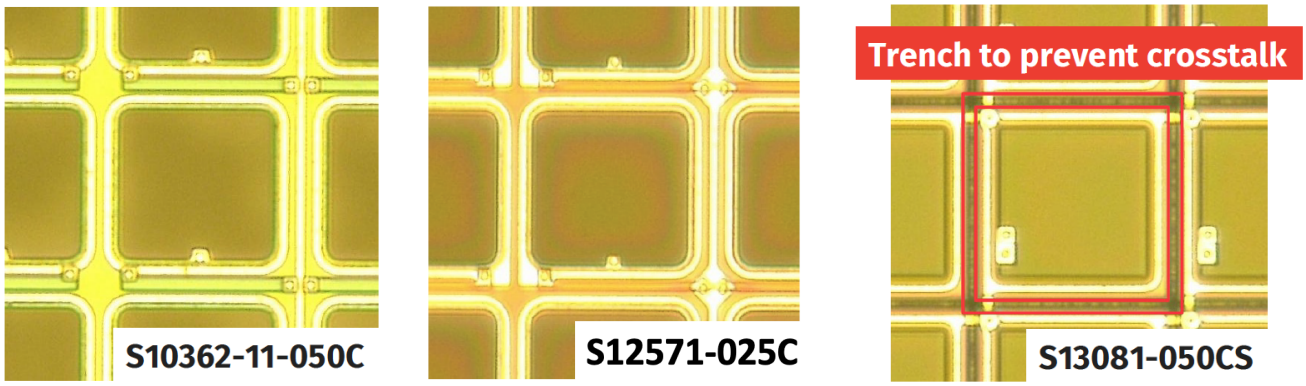
7. хорошее временное разрешение;

8. невысокое напряжение питания;

9. отсутствие влияния магнитного поля.

Выбор кремневых фотодиодов датирован 2013-2014 годом. В это время в активной стадии находился процесс разработки полностью активного сцинтилляционного детектора (Totally active scintillator detector – TASD). Огромный опыт использования кремневых фотоумножителей компании Hamamatsu в рамках эксперимента T2K повлиял на выбор в пользу данного производителя. С начала 2009 года в детекторе INGRID и ND280 было уже использовано более 56000 кремневых фотоумножителей Hamamatsu S10362-11-50C.

На момент выбора кремневых фотодиодов существовало две наиболее подходящие альтернативы – это S12571-025C и S13081-050CS [69, 103]. Кремневые фотодиоды S12571-025C были анонсированы летом 2013 года, основным преимуществом по сравнению с S10362-11-50C является подавление after pulse и темнового тока. Преимуществом кремневых фотодиодов S13081-050CS [69] по сравнению с S12571-025C, представленных зимой 2014 года, является подавление перекрестных помех из пикселя в пиксель (cross-talk) (рис. 3.26).



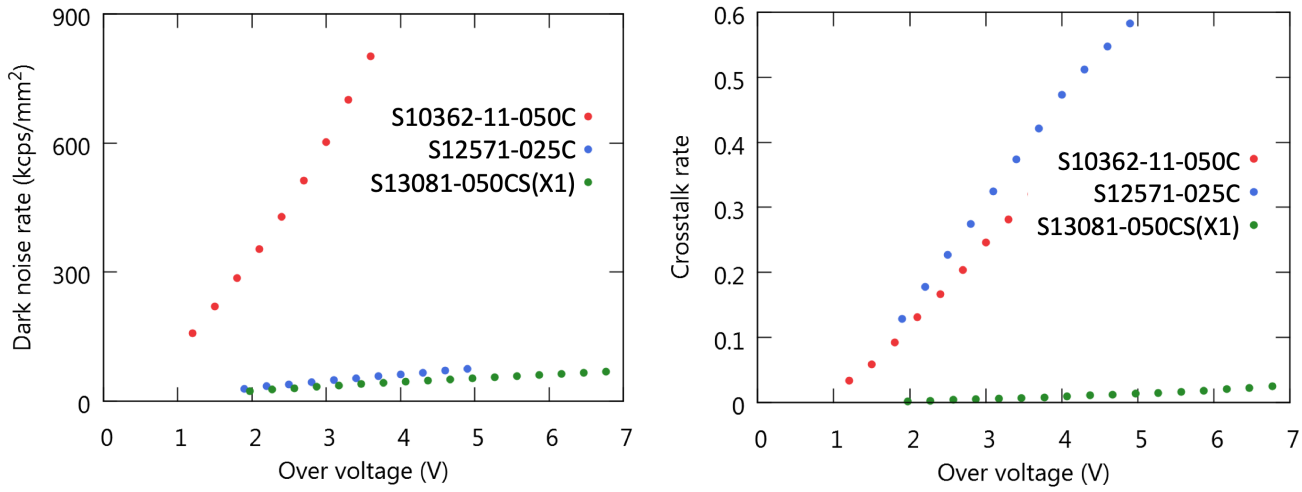
а б в

Рис. 3.26. Изображение отдельных пикселей кремневых фотодиодов фирмы Hamamatsu. а – S10362-11-50C. б – S12571-025C. в – S13081-050CS

Кремневые фотодиоды S12571-025C с чувствительной областью 1×1 мм^2 имеют размер пикселя в 25 мкм, количество пикселей 1600, напряжение пробоя 65 ± 10 В. Кремневые фотодиоды S13081-050CS с чувствительной областью

1,3×1,3 мм^2 имеют размер пикселя 50 мкм, количество пикселей 667 с напряжением пробоя 60 ± 10 В. Главными критериями при выборе фотодиодов являлись цена, возможность быстрой калибровки и совместимость с геометрией сцинтилляторов (влияние размера чувствительной области на световой выход). Тестирование проводилось с помощью Digitizer CAEN DT5742 и первого поколения электроники для считывания данных с SiPM детектора Baby MIND Front End Board (FEBv1).

Главными задачами сравнительного тестирования 3 типов кремневых фотоумножителей было вычисление шумов, кросс-тока, усиления и эффективности регистрации фотонов. Тестирования проводились в ЦЕРНе в 595 здании в светоизоляционной комнате. На рисунке 3.27, 3.28 представлены сравнительные результаты тестирования для трех типов MPPCs S10362-11-50C, S12571-025C и S13081-050CS.

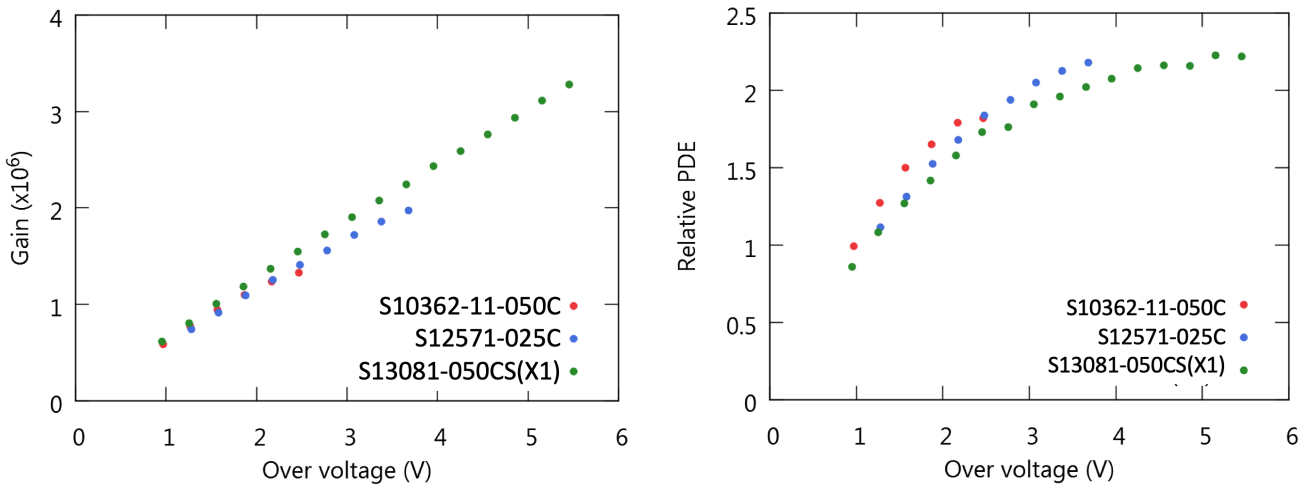


а б

Рис. 3.27. а – Исследование темнового тока в кремневых фотоумножителях фирмы Hamamatsu. б – Исследование кросс-тока в кремневых фотоумножителях фирмы Hamamatsu.

Тестирование темнового тока проводилось в режиме self-триггера с порогом на считывание более 0,5 фотоэлектрона. Напряжение над порогом (over voltage) вычислялось, как подаваемое напряжение минус напряжение пробоя. Уменьшение темнового тока в ∼ 10 раз в S12571-025C и S13081-050CS по сравнению с S10362-11-50C позволяет использовать более высокое напряжение над порогом.

Расчет кросс-тока вычислялся по формуле 3.1. Кросс-ток на кремневых фотодиодах S12571-025C сравним с S10362-11-50C. Кросс-ток на кремневых фотодиодах S13081-050CS по сравнению с S10362-11-50C в ∼ 10 раз ниже, что



а б

Рис. 3.28. а – Исследование усиления в кремневых фотоумножителях фирмы Hamamatsu. б – Исследование эффективности регистрации фотонов в кремневых фотоумножителях фирмы Hamamatsu.

позволяет уменьшать уровень триггера.

$$Crosstalk\ rate = \frac{1.5\ p.e.\ threshold\ dark\ noise}{0.5\ p.e.\ threshold\ dark\ noise} \tag{3.1}$$

Расчет усиления кремневого фотоумножителя вычислялся по формуле 3.2. Тестирование показало одинаковые результаты для всех типов кремневых фотоумножителей.

$$Gain = \frac{[(1\ p.e.\ ADC\ ch) - (pedestal\ ADC\ ch)] \times (ADC\ charge\ per\ ch)}{elementary\ charge} \tag{3.2}$$

Расчет относительной эффективности регистрации фотонов проводился в сравнении с кремневым фотодиодом S10362-11-50C с напряжением в 1В над уровнем пробоя. Все вычисления проводились по формуле 3.3. Все тесты проводились с помощью светодиодов и платы для управления светодиодом (Light-emitting diode driver, LED driver) в 595 здании в ЦЕРНе.

$$Relative\ PDE = \frac{Number\ of\ photons\ detected\ by\ each\ MPPC}{Number\ of\ photons\ detected\ by\ S10362\ MPPC} \tag{3.3}$$

По результатам тестирования был выявлен ряд преимуществ в использования кремневых фотодиодов S13081-050CS. Однако, при тестировании возможности калибровки с электроникой FEBv1, было выявлено, что подавление кросс-тока приводит к невозможности калибровки с электроникой, подавляющей пьедестал. Для калибровки кремневых фотодиодов S13081-050CS возможно использовать светодиоды. Но конструкция детектора, разработанная университетом Женевы, не предусматривала возможности установки светодиодов для

калибровки SiPM, что привело к выбору кремневых фотоумножителей типа S12571-025C.

3.5.1. Тестирование кремневых фотоумножителей Hamamatsu S12571-025C

В данной главе будут описаны результаты тестирования выбранных кремневых фотоумножителей Hamamatsu MPPCs S12571-025C. Главной задачей тестирования выбранных фотоумножителей являлась проверка зависимостей фотоумножителей от подаваемого напряжения и температуры. Все результаты, полученные в данной главе, были использованы для моделирования методом Монте-Карло. Все тестирования проводились в Институте Ядерных Исследований РАН с использованием термостата, Digitizer CAEN DT5742 и осциллографа.

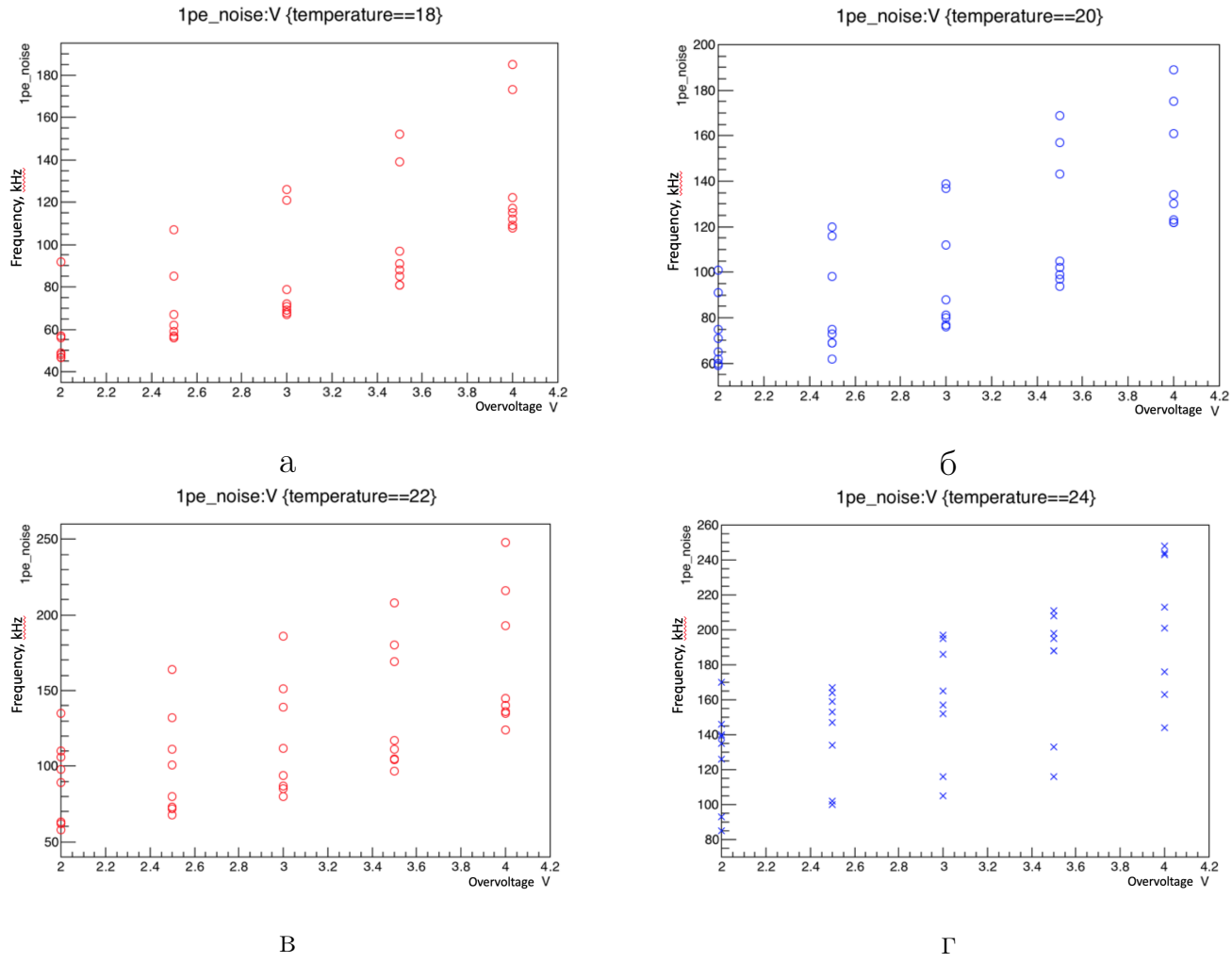


Рис. 3.29. Результаты тестирования темнового тока на уровне 0,5 электрона: а – при температуре 20°C; б – при температуре 18°C; в – при температуре 22°C; г – при температуре 24°C.

Напряжение над пробоем (overvoltage, V) вычислялось, как подаваемое на-

пряжение минус напряжение пробоя. Первой точкой подаваемого напряжения для вычисления было напряжение, рекомендуемое компанией Hamamatsu. Первые тесты были направлены на вычисление частоты темнового тока. Self-триггер был установлен на уровень в 0,5 электрона. Результаты тестирования 10 разных кремневых фотодиодов Hamamatsu MPPCs S12571-025C представлены на рисунке 3.29.

Следующие тесты были направлены на вычисление частоты темнового тока на уровне 1, 2, 3 и 4 электронов на рекомендуемом рабочем напряжении (согласно спецификации, предоставленной фирмой Hamamatsu) при разных температурах. Результаты тестирования 10 разных кремневых фотодиодов Hamamatsu MPPCs S12571-025C представлены на рисунке 3.30.

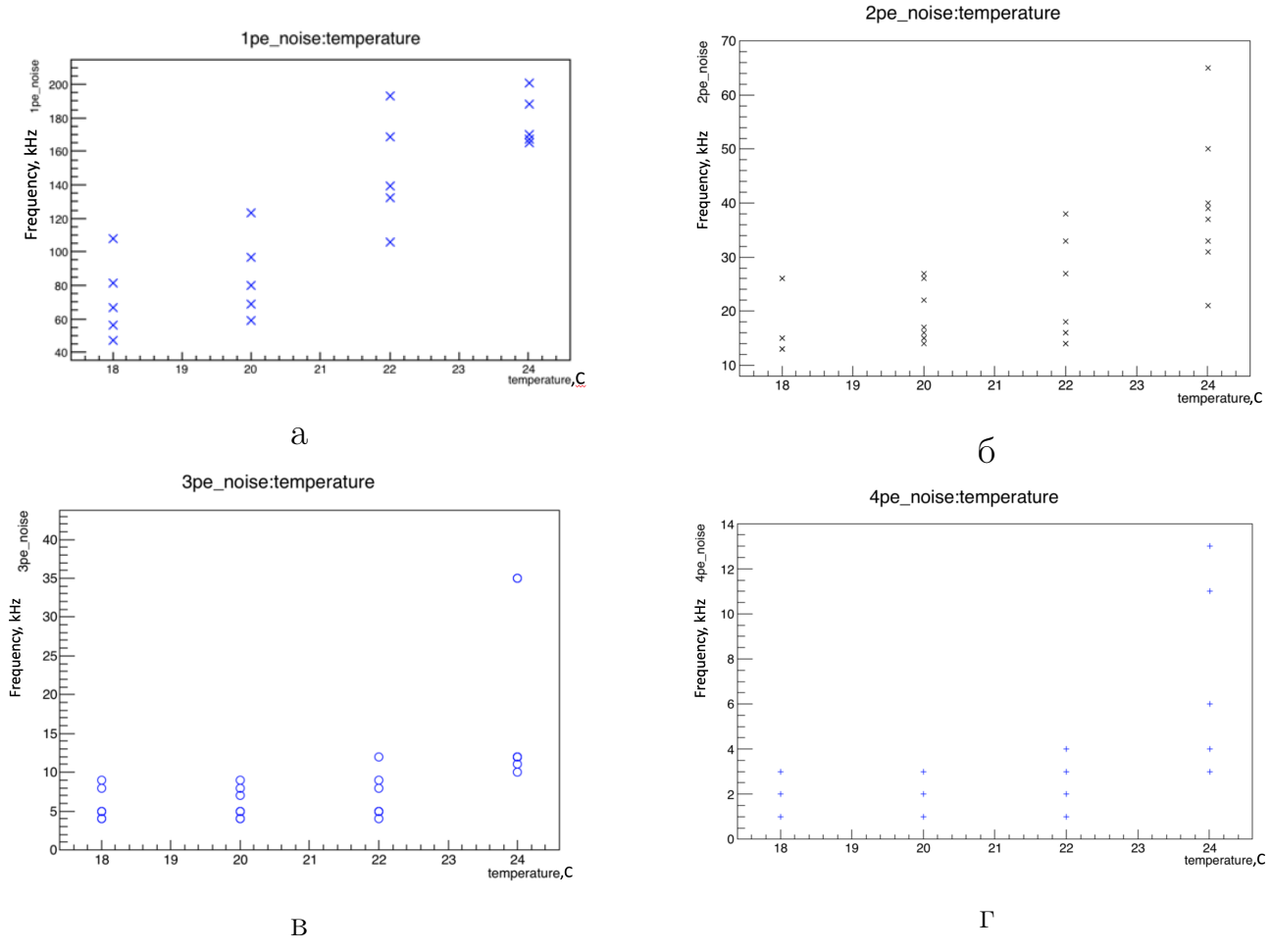


Рис. 3.30. Результаты тестирования темнового тока на уровне: а – 0,5 электрона; б – 1,5 электрона; в – 2,5 электрона; г – 3,5 электрона.

Вычисление коррелированного тока (кросс-ток и after pulse) было финальным этапом тестирования кремневых фотодиодов. Все вычисления проводились по формуле 3.1 при разных температурах и для каждого отдельного фотоумножителя. Результаты представлены на рисунке 3.31.

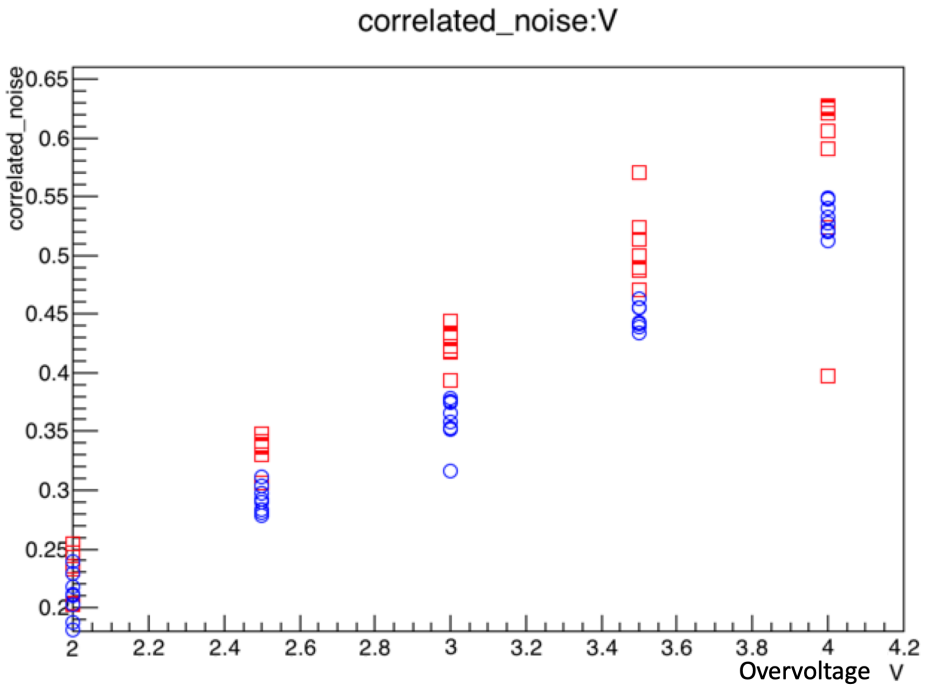


Рис. 3.31. Результаты вычисления коррелированного тока при $18°C$(синим цветом) и $24°C$ (красном цветом).

3.6. Разработка дизайна кабелей

В этом разделе будут описаны этапы проектирования кабелей и интеграции модулей электроники и сцинтилляторов. Среди задач, которые решались при разработке дизайна кабелей, можно выделить следующие:

1. предусмотреть риски электромагнитных помех;
2. предусмотреть ослабление сигнала в зависимости от длины кабеля;
3. обеспечить возможность по канальной настройки подаваемого напряжения на каждый SiPM;
4. обеспечить возможность отключения подачи напряжения на SiPM индивидуально;
5. обеспечить возможность независимой замены кабелей;
6. обеспечить защиту от короткого замыкания.

Точкой отправления при разработке системы кабелей был утвержденный дизайн сцинтилляционных модулей и первое поколение разработанной электроники FEBv1, включающее в себя три чипа ASIC CITIROC [111] с 96 каналами

в общей сложности. Система кабелей для каждой из FEB была разделена на 3 группы, каждая группа отвечала за свой ASIC CITIROC. Каждая группа кабелей включала в себя печатные платы для подключения к FEB и сцинтилляционному модулю, 36 коаксиальных кабелей, включающие в себя 32 сигнальных кабеля, 1 кабель опорного напряжения, 1 кабель заземления, 2 кабеля для настройки подаваемого напряжения и проверки короткого замыкания (рис. 3.32, 3.33).

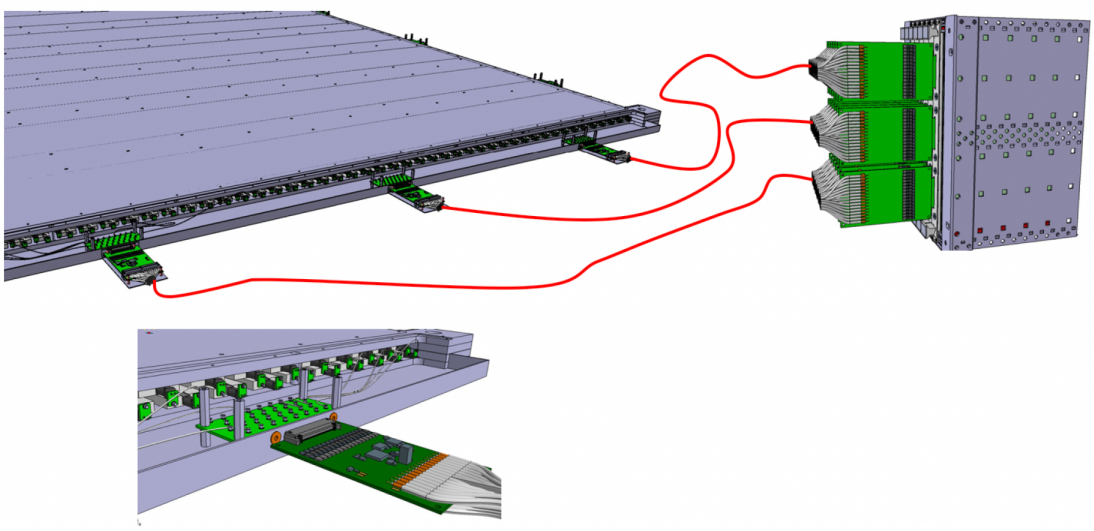
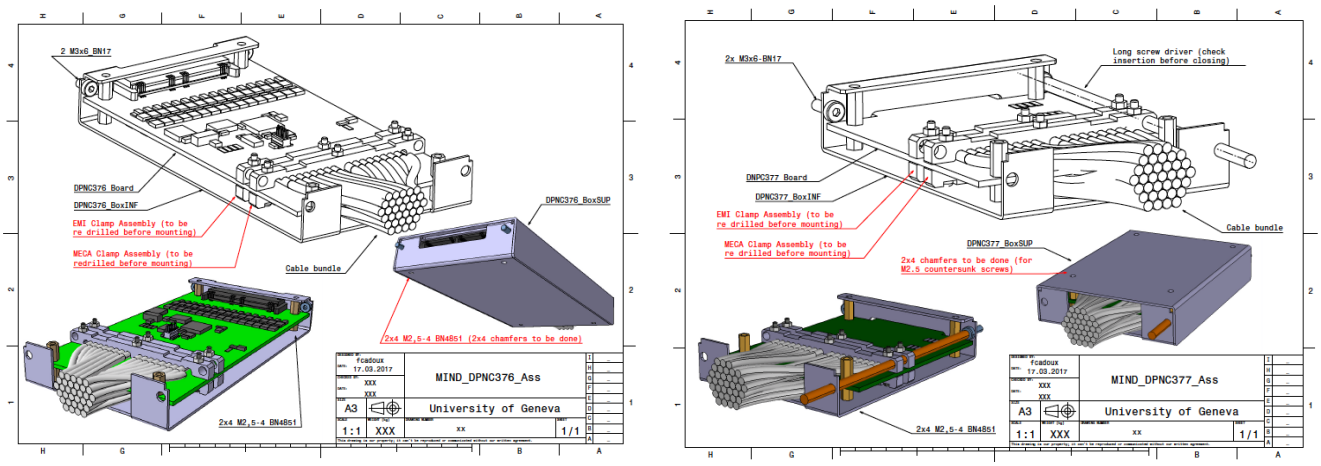


Рис. 3.32. Схема кабелей, связывающая кремневые фотодиоды, установленные на сцинтилляционных модулях, со считывающей электроникой FEBs, расположенными на расстоянии до 5 м.



а б

Рис. 3.33. Схема устройства удлинения кабеля. а – печатная плата, которая подключается к плате модуля IF на сцинтилляционном модуле. б – Печатная плата, которая подключается к электронике FEB.

Важным аспектом при разработке системы кабелей было изолирование сигналов от посторонних шумов. Основным источником шума считаются электромагнитные помехи. Для учета возможных шумов существует понятие риска

электромагнитных помех: чем больше длина кабеля, тем выше риск электромагнитных помех. Но существовала проблема определения риска помех. Уровень электромагнитных помех в лабораторных условиях отличен от уровня помех в экспериментальной зоне T9 и окончательной локации зоны детектора ND280. Для решения данной задачи были выбраны коаксиальные и микрокоаксиальные кабели. Исследование зависимости ослабления сигнала и риска электромагнитных помех от длины кабелей описано в разделе 3.6.1.

Возможность поканальной настройки, проверки короткого замыкания и отключения напряжения на каждом канале индивидуально обеспечена микроконтроллерами на печатной плате, подключаемой к сцинтилляционному модулю, кабелем опорного напряжения и 2 кабелями настройки подаваемого напряжения. Данный функционал обеспечивает возможность отключать неисправные или шумные каналы, которые в противном случае могли бы повлиять на соседние каналы или, возможно, на все 32 канала ASIC CITIROC.

3.6.1. Результаты тестирования кабелей

Как было отмечено ранее, при разработке системы кабелей необходимо было учитывать риск электромагнитных помех. Для этого проводилось тестирование зависимости сигналов с кремневых фотоумножителей (MPPCs S12571-025C от Hamamatsu) от длины кабеля. Проводимые тесты были сосредоточены на возможности калибровки одиночных фотоэлектронных пиков темнового тока, полученных с помощью FEBv1. Данные, полученные при тестировании, использовались как мера качества для получаемых сигналов в зависимости от коаксиальных кабелей разной длины и разных производителей. Во внимание принимались шум и затухание сигнала на нескольких метрах. Тестирование проводилось с использованием FEBv1 в светоизляционной комнате в ЦЕРНе, фотография стенда тестирования изображена на рисунке 3.34.

Результаты тестирования представлены на рисунках 3.35 и 3.36. В ходе тестирования было учтено, что итоговый сигнал есть результат индивидуальных характеристик кремневых фотодиодов, соединительных элементов и активных элементов, входящих в данный канал в FEB v1. По данной причине каждый кабель был протестирован множество раз и с каждым кремневым фотодиодом, входящим в контрольную группу.

Вычисление коэффициента усиления кремневого фотодиода рассчитыва-

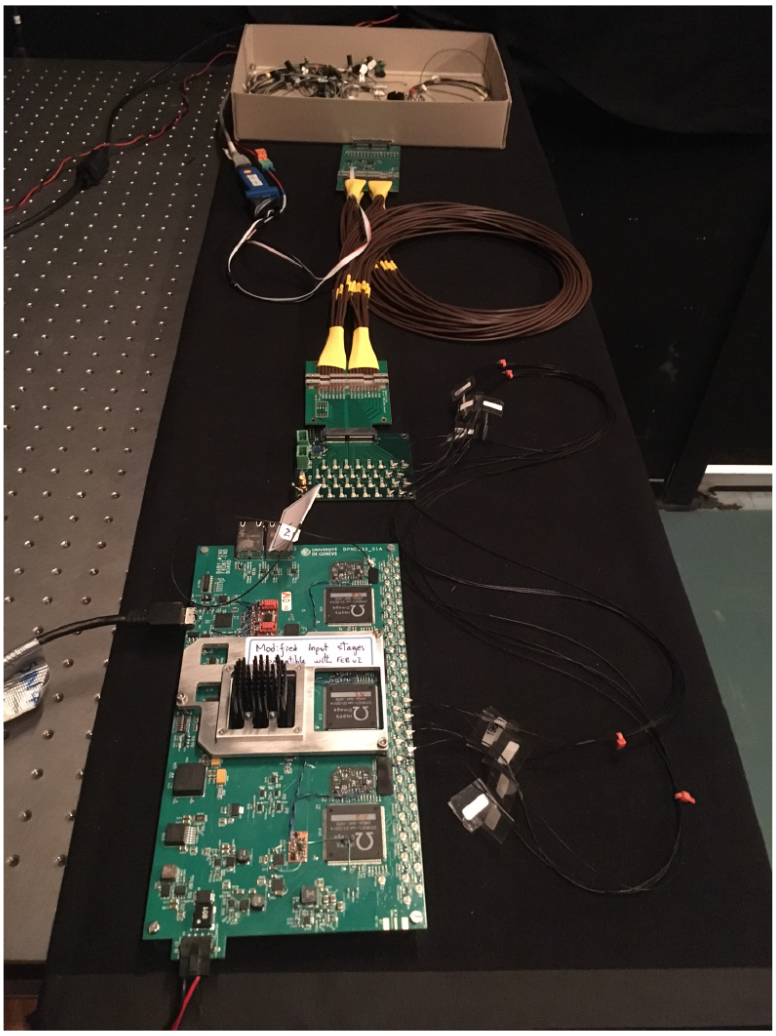
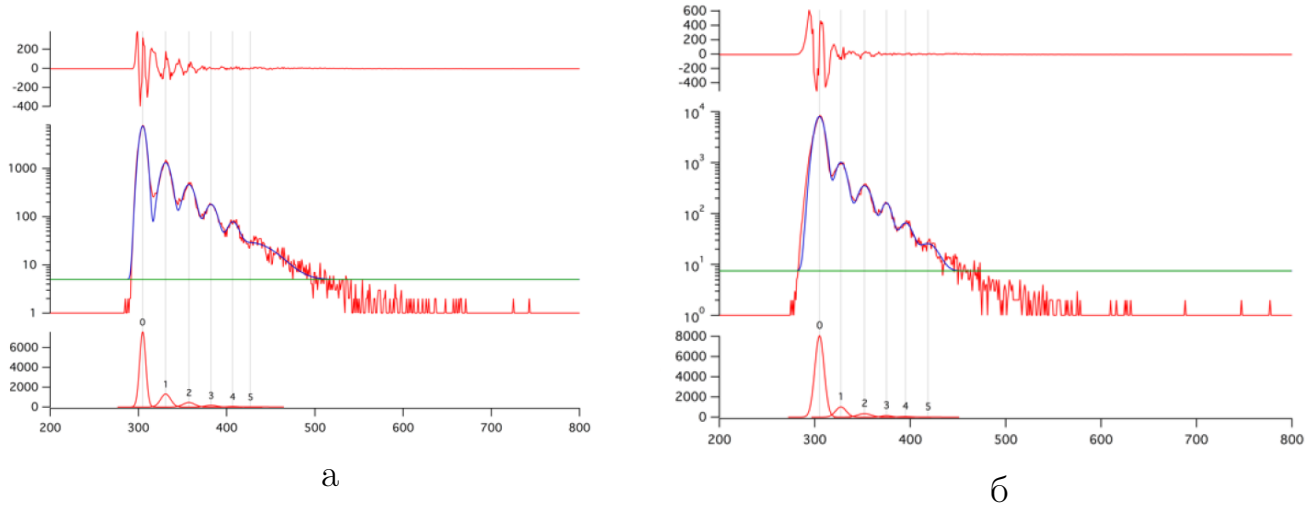


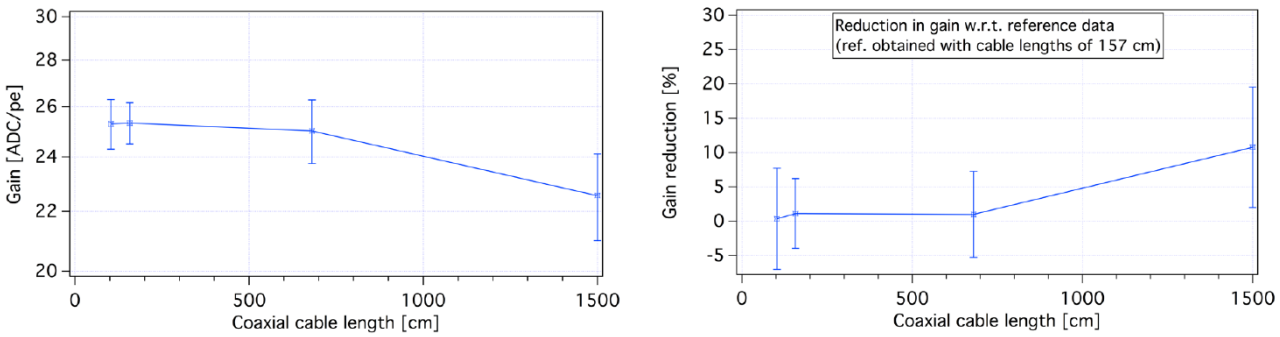
Рис. 3.34. Стенд тестирования коаксиальных кабелей разной длины от разных производителей.



а б

Рис. 3.35. Одиночные фотоэлектронные пики темнового тока для кабелей разной длины: а – 100 см; б – 1500.

лось из анализа расстояния между фотоэлектронными пиками. Графики 3.35



а б

Рис. 3.36. Вычисленный коэффициент усиления кремневого фотодиода, как функция от длины коаксиального кабеля между SiPM и считывающей электроникой FEBv1. а – Зависимость результатов вычисления коэффициента усиления SiPM в зависимости от длины кабеля. б – Ошибка определения коэффициента усиления SiPM в зависимости от длины кабеля.

и 3.36 представляют собой контрольные примеры. Коэффициент усиления рассчитывался по 4 пикам, не включая 1-й пик (Пик №0) (рис. 3.35). Вычисление коэффициента затухания от длины коаксиального кабеля показано на рисунке 3.36.

3.7. Разработка системы сбора данных

Архитектура всей системы сбора данных (data acquisition – DAQ) основана на цепочках, состоящих из N интерфейсных плат, встроенных в детектор (рис. 3.37). Каждая цепочка подключается через USB-кабель к ПК, используемому в качестве системы DAQ. Каждый ПК может обрабатывать M цепочек FEB через отдельные разъемы USB [61].

Цепочка FEB (mini crate, MCR) – это количество N FEB в цепочке, зависящее от пропускной способности считываемых данных. Цепочка способна передавать команды протокола (CMD) с ПК на FEB и считывать данные и ответы протокола (ANS) с FEB на ПК.

Все платы синхронизируются параллельно через выделенный разъем RJ45, связывающий следующие сигналы: CLOCK, GTRIG, SPILL, FS и RESET. Синхронизация на всех платах происходит одновременно с помощью специального сигнала.

1. Сигнал CLOCK работает на частоте 50 МГц или 100 МГц и используется для синхронизации временного блока разрешением 2,5 нс.

2. Сигнал GTRIG используется в качестве метки времени, как локальные

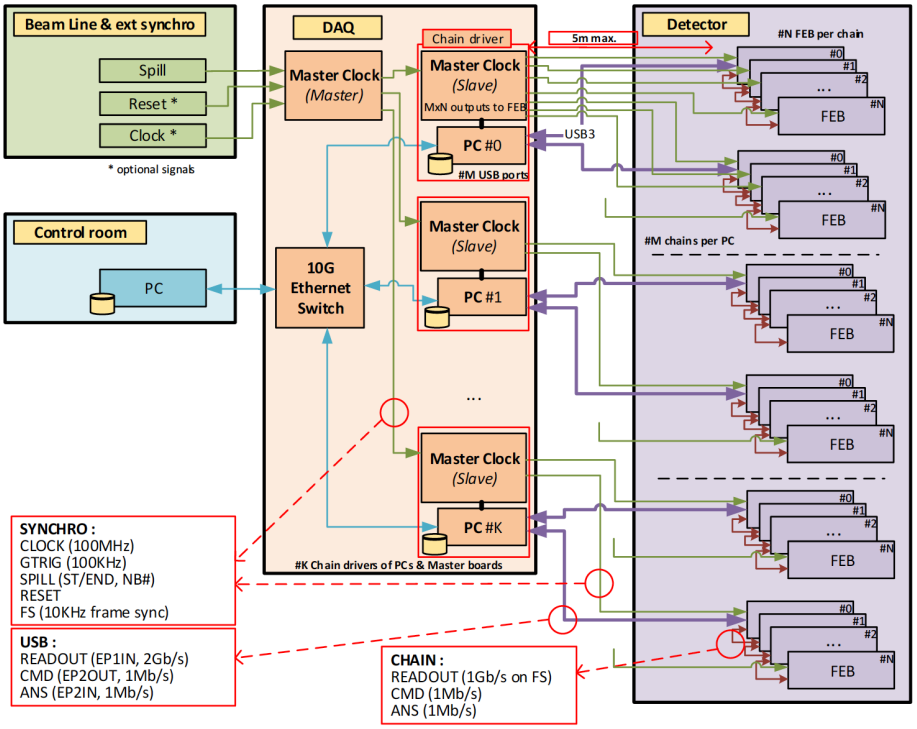


Рис. 3.37. Архитектура системы DAQ для эксперимента Baby-Mind.

опорные часы, чтобы избежать переполнения счетчика блока синхронизации.

3. Сигнал SPILL содержит 16-разрядный номер пучка и может быть использован для сопоставления данных между детекторами. В этом случае необходимо использование триггера PRE-BEAM.

4. Триггер BEAM используется для синхронизации временного окна.

5. Сигнал блочной синхронизации (Frame Synchronisation, FS) используется в качестве синхронизации считывания данных с FEBs в цепочке. Схема мультиплексирования с разделением по времени (Time Divided Multiplexed, TDM) позволяет считывать данные каждой FEB по выделенному временному интервалу, то есть полоса пропускания распределяется поровну между всеми платами цепи.

6. RESET - это сигнал, позволяющий сбросить все счетчики на FEB в цепочке. Он, в основном, используется перед началом сеанса считывания.

Плата генератора тактового сигнала (Master Clock Board, MCB) используется для управления всеми FEB, подключенными к DAQ-ПК. MCB подключа-

ется к триггеру с ускорителя для получения и синхронизации номера и временного окна пучка, а так же генерации и синхронизационных сигналов GTRIG и FS на всех FEBs. Каждая MCB может управляться через USB-соединение с соответствующим DAQ-ПК или через Ethernet-соединение для настройки конфигурации системы и синхронизации.

3.7.1. Архитектура FEBs

Электроника Baby MIND FEBs разработана специально для оцифровки сигналов с кремниевых фотоумножителей (SiPM). На рисунке 3.38 представлена электронная архитектура на основе FEB:

1. 96 каналов, включая 3 ASIC CITIROC;
2. 12-разрядный 8-канальный АЦП для оцифровки аналоговых сигналов с высоким и низким усилением (High Gain, HG; Low Gain, LG) с 3 ASIC;
3. 1 ПЛИС для цифровой обработки данных;
4. датчики температуры и влажности;
5. низковольтные и высоковольтные DC - DC преобразователи;

Соединение FEBs между собой происходит с помощью объединительной платы (backplane) и/или USB. Основной задачей backplane является синхронизация и трансляция данных между платами FEBs, объединенными в один MCR.

Система синхронизации представляет собой MCB, который производит общие часы детектора (CLK) и объединяет пользовательские сигналы (сброс, отсчет начала), сигналы синхронизации (GTRIG, синхронизация кадров для межплатформенной связи) и входные сигналы от линии пучка ускорителя, включая номер разлива и триггер предварительного пучка (затвор разлива), выданные за 30 С до луча, в единый цифровой сигнал синхронизации (SYNC).

MCB может быть в синхронизирован с внешними часами эксперимента, работающими на частоте 100 МГц. И сигналы синхронизации и CLK переданы от MCB через 2 пары кабеля RJ45 и распределены к FEBs в пределах одного minicrate через backplane. Внутренние часы 400 MHz на каждом FEB синхронизированы к общим часам детектора (CLK). Тесты показали, что разница в

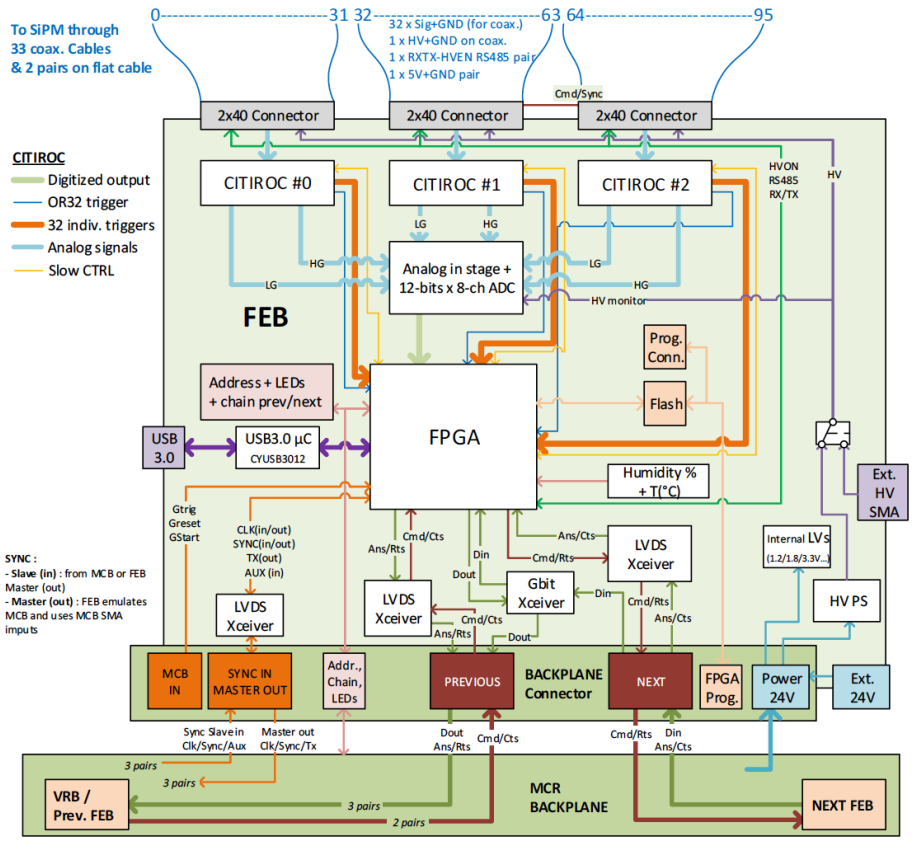


Рис. 3.38. Блок схема Baby-Mind FEB.

задержке от FEB к FEB CLK (SYNC) составляет 50 ПС (70 ПС). Схема "Hold mask"реализована для обеспечения одновременного запуска циклов чтения всех CITIROCs.

3.7.2. Архитектура CITIROC

Чип CITIROC является следующим поколением чипов EASIROC (Extended Analogue SiPM ReadOut Chip). Чип EASIROC использовался в экспериментах PEBS, MuRAY и T2K. EASIROC – это 32-канальный полностью аналоговый интерфейс ASIC, предназначенный для считывания сигналов с фотодиодов SiPM. Он является следующим поколением чипов SPIROC, разработанным для адронного калориметра международного линейного коллайдера [61].

Чип CITIROC (рис. 3.39) включает в себя 8-разрядный DAC 4.5 V (2.5 V) для индивидуальной регулировки напряжения на каждом SiPM. Аналоговое ядро чувствительно к положительным сигналам SiPM. Для каждого канала путь заряда состоит из 2 цепей: цепи с высоким коэффициентом усиления и цепи с низким коэффициентом усиления. Каждый из них состоит из предусилителя

с переменным коэффициентом усиления, за которым следует настраиваемый интегральный формирователь сигнала (shaper).

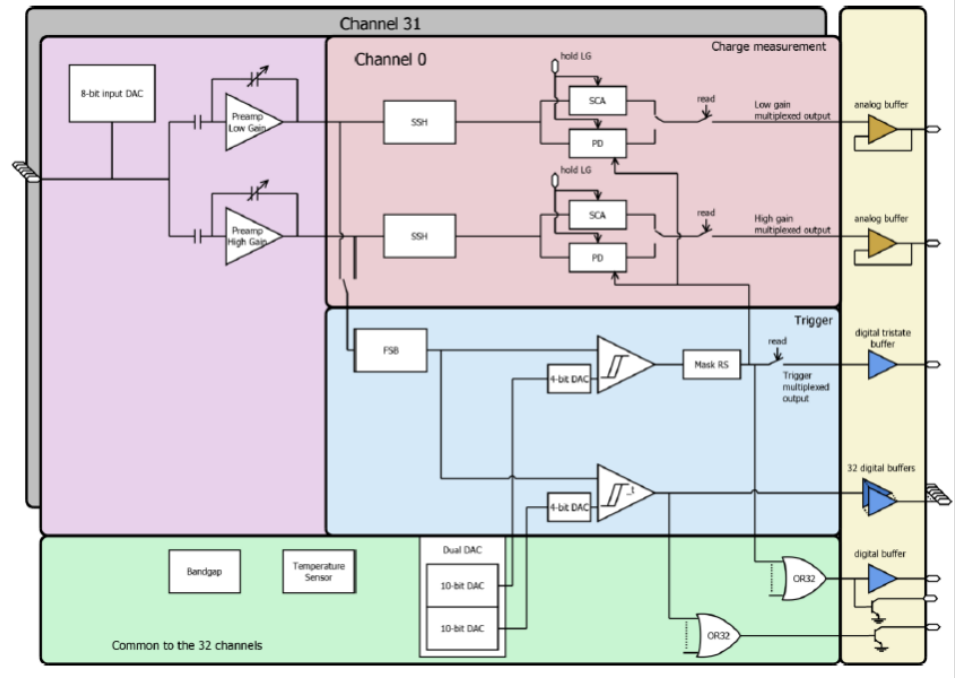


Рис. 3.39. Блок схема CITIROC.

Для измерения времени сигнала также доступна линия от предусилителя с высоким коэффициентом усиления. Он состоит из быстрого формирователя сигнала (fast shaper), за которым следует дискриминатор. Его порог устанавливается внутренним 10-битным цифро-аналоговым преобразователем и является общим для 32 каналов. Данная схема отделения временной и аналоговой линии позволяет избавиться от мертвого времени электроники. Каждый сигнал выше уровня порога на временном дискриминаторе будет передан на ПЛИС, но не каждый сигнал будет оцифрован. Данный фактор поставил задачу совмещения времени событий и амплитуд событий, решение которых подробно описано в главе 4.4.5. Тактовая частота в 400 МГц позволяет накладывает ограничение на точность определение времени сигнала в 2.5 нс.

Аналоговые выходы LG и HG всех 3 чипов ASIC расположены параллельно, чтобы уменьшить количество АЦП и длительность дискретизации; это означает, что необходимо 6 независимых каналов АЦП. Но данная схема не позволяет считывание АЦП только с активного канала (либо канала с сигналом), сигналы с каждого канала мультиплицируются и посылаются на АЦП с каждого аналогового выхода одновременно.

Режимы работы формирователя сигнала и АЦП

Чип CITIROC имеет 2 режима регистрации и оцифровки пиков сигналов, полученных с кремневых фотоумножителей:

1. HG и LG Hold MODE: (ASIC в режиме регистрации амплитуды по времени относительно пересечения триггерного уровня). Задержка HOLD HG и HOLD LG должна быть точно установлена пользователем, чтобы соответствовать максимуму выходного сигнала формирователя. В этом режиме все триггерные сигналы должны возникать одновременно, иначе только 1-й триггерный вход действует на сигналы удержания, а триггерный вход, поступающий после 1-го, не удерживается.

2. Режим пикового поиска HG/LG: (ASIC в режиме поиска максимального значения во временном диапазоне). Задержки HOLD HG и HOLD LG не обязательно должны быть установлены точно, так как пиковое зондирование активно. Сигнал удержания должен быть заявлен после окончания подъема и до конца чтения. В этом режиме все триггерные сигналы независимы и могут возникать в разное время. Пользователь должен установить параметр ADC Delay достаточно большим, чтобы задержать запуск АЦП, чтобы убедиться, что все каналы зафиксировали свои максимальные значения (подробно описано в главе 4.4.5).

Далее будут рассмотрены имеющиеся данные регистрации и оцифровки пиков сигналов, на примере одного канала.

Режим HG/LG Hold MODE подразумевает точное определение значений времени между моментом пересечения триггерного уровня сигналом и пиковым значением, но для сигналов разной амплитуды данное значение может меняться. Это приводит к проблемам определения пикового значения амплитуды. На рисунке 3.40 изображена схема работы в режиме HG и LG Hold MODE. Событие 1 изображает идеальный вариант, когда выбранное значение HG и LG Hold совпадает с разностью по времени между пересечением триггерного уровня (зеленая пунктирная линия) и максимумом амплитуды (T), красным показана оцифрованная амплитуда. Однако в случае события 2 оцифрованная амплитуда будет меньше максимального значения амплитуды сигнала и значение амплитуды 3 не будет зафиксировано, так как это событие происходит в течении мертвого времени оцифровки.

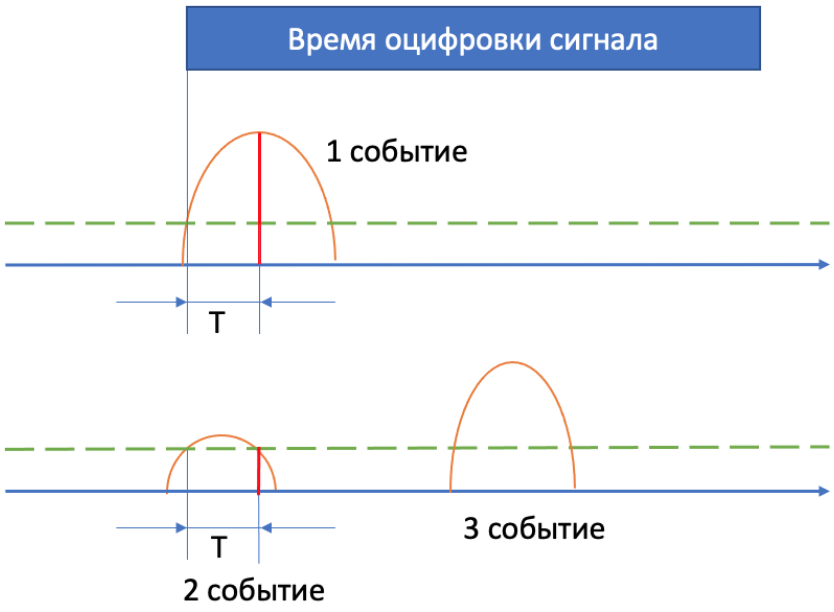


Рис. 3.40. Схематическое изображение работы ASIC CITIROC в режиме HG/LG Hold MODE.

Режим пикового поиска HG/LG подразумевает автоматический поиск пикового значения амплитуды и оцифровку максимального значения в заданные промежуток времени, что достаточно удобно при единичном сигнале на каждом канале за выбранный промежуток времени. Но если за выбранный промежуток времени было более одного сигнала на канал, тогда для сопоставления временного и амплитудного значения необходимо проводить совмещение временных и амплитудных данных. На рисунке 3.41 изображена схема работы в режиме пикового поиска HG/LG. L1Hold – это временной диапазон поиска максимального значения амплитуды. Черным пунктиром обозначается хранимое значение амплитуды. Для события 1 максимальное значение амплитуды и будет зафиксировано. Амплитуда события 2 не будет оцифрована, так как во временной диапазон поиска пика было зафиксировано событие 3 с большей амплитудой. Амплитуда события 4 будет зафиксирована, но амплитуда события 5 нет, так как оно было меньше Амплитуды сигнала 4.

Учитывая все плюсы и минусы данных методов, был выбран режим работы пикового поиска HG/LG. Но для решения проблемы оцифровки не зафиксированных амплитуд используется метод калибровки времени над порогом (Time over Threshold). Решение данной задачи описано в разделе 4.4.5.

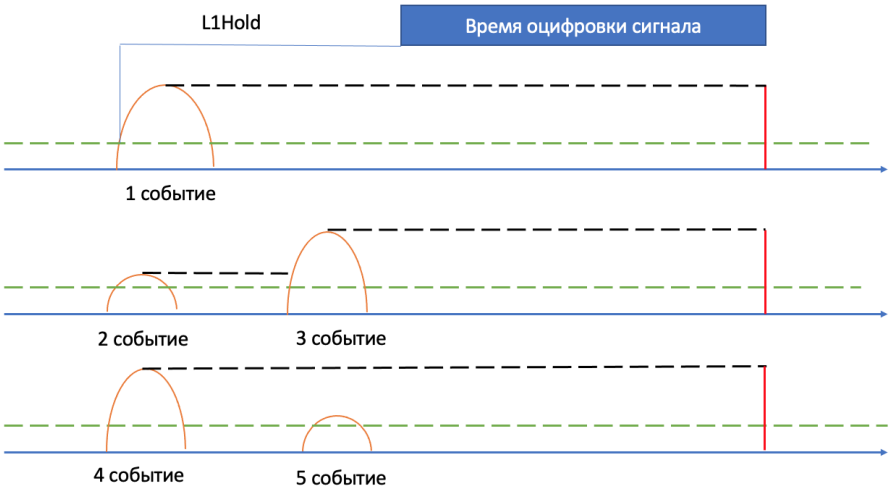


Рис. 3.41. Режим пикового поиска HG/LG.

3.7.3. Архитектура ПЛИС

ПЛИС – это программируемые логические интегральные схемы. ПЛИС, как и обычные микросхемы состоят из таких же транзисторов, из которых собираются триггеры, регистры, мультиплексоры и другие логические элементы для обычных схем. Но принципиальным отличием ПЛИС от обычной микросхемы является возможность реконфигурирования схемы, то есть возможность изменения способов коммутирования сигналов между блоками. Это позволяет изменять логику работы микросхем в зависимости от потребностей. Логика работы ПЛИС конфигурируется с помощью микропрограммы. На рисунке 3.42 представлена логическая схема конфигурации ПЛИС.

На схеме, изображенной на рисунке 3.42, можно заметить, что сигналы событий с ASICs CITIROC (амплитудные и временные) обрабатываются независимо друг от друга. На амплитудные сигналы (HG, LG), поступающие с CITIROC накладываются ограничения нижнего порога для последующей записи в очередь FIFO. Обработка данных с сенсора температуры и влажности происходит на том же канале, что и для амплитудных данных. Обработка данных времени сигнала независима и передается в свою очередь FIFO, что позволяет производить запись временных данных начала сигнала и завершения сигнала без "мертвого времени оцифровки". Данная конфигурация ПЛИС позволяет восстанавливать амплитуды всех событий, сигнал которых был больше порога, заданного в конфигурации CITIROC, но ставит задачу сопоставления данных по амплитуде и временных данных,решение данной задачи представлено в разделе

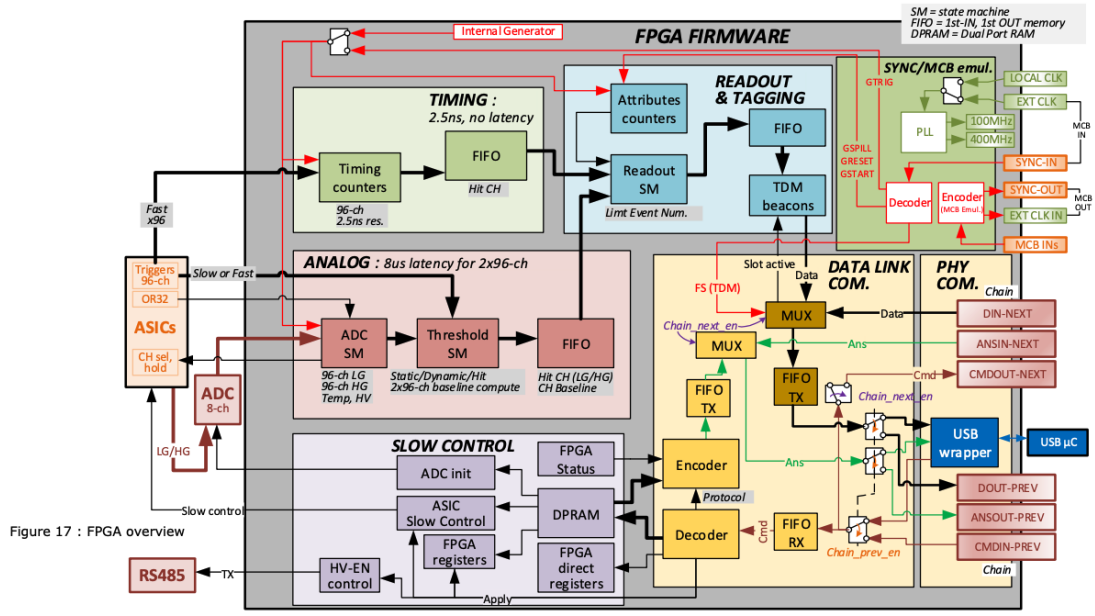


Figure 17 : FPGA overview

Рис. 3.42. Логическая схема конфигурационной микропрограммы ПЛИС.

4.4.5.

3.7.4. Структура данных FEB CITIROC

Принцип связи основан на 16-битном слове по модулю за счет приемопередатчика Gigabit Ethernet TLK1501, работающего со скоростью 800 Мбит/с. Поэтому коммуникационный протокол FEB-VRB или FEB-FEB основан на 32-битных словах в режиме little endian (младшие биты в конце), где 4 бита MSB [31..28] зарезервированы для идентификатора слова. Идентификатор слова определяет содержимое оставшихся 28 битов LSB [27..0] 32-битного слова.

На рисунке 3.43 представлен формат данных с FEB.

В структуре данных на рисунке 3.43 введены следующее обозначения:

Time Slot Start - специальное слово для разграничения данных с каждой FEB в режиме TDM.

Биты [27, 26] определяют начало либо конец TDM слота:

1. ’00’ – начало временного интервала. В таком случае :

   а. биты [25 . . . 21] определяют идентификатор слота, либо порядковый номер платы в данном MCR;

   б. биты [7 . . . 0] определяют номер TDM, который увеличивается на 1 при каждом новом запуске TDM.

Рис. 3.43. Структура данных FEB CITIROC.

2. ’01’ – конец временного интервала. В этом случае :

   а. биты [25 . . . 21] определяют идентификатор слота, инкапсулирующий данные платы, связанные с этим временным интервалом;

   б. биты [20 . . . 0]-это усеченная контрольная сумма от 32 до 21 бита, вычисляемая для всех данных, вычитанная для определения корректности переданных данных.

Spill – данные спила пучка:

1. Spill header – стартовое слово слота спила пучка.

2. Spill trailer – завершающее слово слота спила пучка.

3. Spill time ID – временные данные с разрешением 10 мс.

   а. Board ID – порядковый номер FEB платы.

   б. Для Spill header ID бит [20] 1 - разделитель между Spill header 1 и 0.

   в. DAQ type – тип DAQ моды:

г. Spill Time from GTRIG (10ns res.) – временная разница между тактовым временем GTRIG и сигналом старта спила.

д. Spill time on spill start – время старта спила относительно старта рана с разрешением 10 мс.

е. Temperature – значения температуры, передаваемое на ПЛИС.

ж. Humidity – значения влажности, передаваемое на ПЛИС.

з. Spill time on spill end – время завершения спила относительно старта рана с разрешением 10 мс.

HOLD time – время срабатывания триггера на сигнал.

1. Board ID – порядковый номер FEB платы.
2. Hold start time from GTRIG – время срабатывания триггера на сигнал.
3. Hold stop time from GTRIG – время срабатывания триггера на сигнал плюс временное окно поиска максимального значения амплитуды сигнала/сигналов.

GTRIG – тактовые временные слоты с периодичностью 10 мкс.

1. GTRIG header – заголовочное слово временного слота GTRIG.
   а. Global Trigger tag – порядковый номер GTRIG с момента старта рана.
2. GTRIG trailer – закрывающее слово временного слота GTRIG.
   а. Global Trigger tag – порядковый номер GTRIG с момента старта рана. Используется для проверки соответствия слота открытия слоту закрытия.
   б. Hit counts within gtrig – количество событий, зарегистрированных в данном слоте GTRIG.
   в. Global Trigger time – временное измерение с момента начала данного спила.

Event Data – временные, либо амплитудные значения зарегистрированных сигналов.

1. Hit time ID – временные значения зарегистрированных сигналов.
2. Hit Amplitude ID – амплитудные значения зарегистрированных сигналов.
    а. Channel ID – номер канала.
    б. Hit ID – эти биты используются для проверки от подери данных во время передачи или обработки. 3 битный счетчик увеличивается на каждом канале параллельно, что позволяет проверить данные после обработки на полноту.
    в. Tag ID – эти биты используются для синхронизации событий и слотов GTRIG, для размещения измерений времени и амплитуды в соответствующем слоте GTRIG, то есть между его реальным заголовком/окончанием. В 2 младших бита идентификатора тега должны соответствовать 2ум младших битам GTRIG. Из-за различных тактовых частот и задержек FIFOs, используемой для считывания, сообщение hit или amplitude ID может быть отправлено на следующий слот заголовка/трейлера GTRIG, если событие происходит непосредственно перед сигналом GTRIG. Кроме того, вероятность наличия амплитудного события на следующем GTRIG выше, так как для обработки аналогового считывания (ASIC LG/HG мультиплексированные выходы) требуется примерно 9 мкс по сравнению с событием попадания, которое выталкивается в поток считывания в течение 10-20 нс из-за более коротких задержек FIFO-FIFO (тактовая частота 2,5 НС).
    г. EDGE – используется для определения времени попадания события: 0 - восходящий край события, 1 - падающий край события. Длительность события (ToT) может быть рассчитана с учетом разницы временных меток падающего и восходящего фронтов.
    д. Hit time – время события с разрешением 2.5 нс.
    е. Amplitude ID – разделение амплитуды по HG, LG либо значениями температуры, влажности и значениями напряжения.
    ж. Amplitude measurement – значения амплитуды в каналах АЦП.

3.8. Выводы по Главе 3

Конструкция магнитного нейтринного детектора Baby MIND включает в себя магнитные и сцинтилляционные модули. В конструкции магнитного нейтринного детектора Baby MIND используются принципиально новые магнитные модули, разработанные командой Дударева Алексея. Ключевым результатом проекта по созданию магнитных модулей является высокооптимизированное магнитное поле, создаваемое катушками. Конфигурация с двумя щелями для намотки катушек позволила увеличить область с однородным магнитном полем в центральной части в центральной области и охватывает область $2800 \times$ $\times 2000$ мм^2 (рис. 3.2). В этой области доминирует компонент B_x с незначительными значениями B_y и B_z.

Разработанные сцинтилляционные модули представляет из себя два полумодуля, и каждый полумодуль состоит из одного слоя горизонтальных сцинтилляционных счетчиков (48 или 47 счетчиков) и одного слоя из 8 вертикальных сцинтилляционных счетчиков. Каждый полумодуль собирается независимо, а затем соединяется с соответствующим полумодулем, образуя целостный модуль. Алюминиевые листы спереди и сзади обеспечивают легкую герметичность, некоторую степень механической устойчивости и защиту от светового шума. Отсутствие соприкосновения между сцинтилляционными счетчиками предотвращает cross-talk. Геометрического перекрытие сцинтилляционных счетчиков между собой позволяет увеличить эффективность регистрации частиц.

Для функционирования детектора была разработана DAQ система сбора данных, включающая в себя электронику Baby MIND FEB, конструкция системы DAQ была оптимизирована под задачи детектора. Система кабелей предотвращает короткое замыкания и позволяет индивидуально контролировать подаваемое напряжение на каждый канал. Архитектура FEB позволяется использовать информацию ToT для восстановления амплитуды каждого сигнала, что увеличивает эффективность реконструкции треков.

Глава 4

Тестирование детектора Baby MIND в ЦЕРНе

4.1. Введение к главе

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.

Рис. 4.1. Схемотехническое изображение экспериментальной зоны T9 в ЦЕРНе.

Все тесты с использованием пучка частиц проводились в северной зоне

ЦЕРНа в экспериментальной зоне T9 (рис. 4.1). Входящий протонный пучок с энергией 24 ГэВ/с от ускорителя PS ударяется о Северную мишень и таким образом производит частицы для линии пучка T9 [112]. Столкновения протонов с мишенью могут приводить к появлению различных частиц, таких как электроны, позитроны, мюоны, пионы, каоны, в зависимости от мишени. Таким образом, линия пучка T9, используемая для эксперимента, представляет собой смешанный адронный и электронный пучки и может переносить положительно или отрицательно заряженные частицы с импульсами от 0,5 ГэВ до 10 ГэВ. Пучек, длительности 0.4 секунды с неравномерной во времени интенсивностью, проходит приблизительно 55 м, прежде чем он попадает в экспериментальную зону. Эксперимент проходит в области размером около 5 м на 12 м, содержащей ряд детекторов, которые могут быть изменены или добавлены.

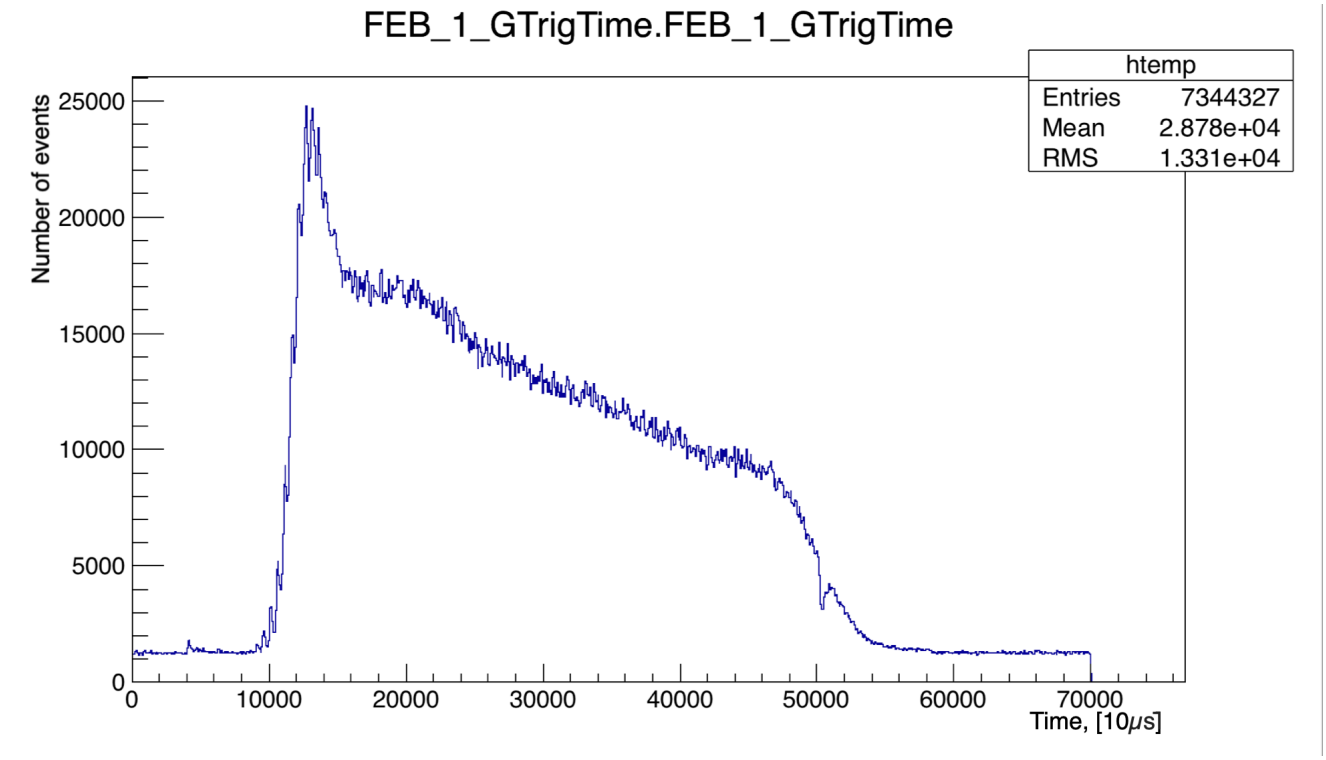


Рис. 4.2. Распределение интенсивности пучка в экспериментальной зоне T9.

Глава 4 посвящена описанию 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. Также 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.

4.2. Тестирование электроники Baby MIND FEBv1 совместно с Полностью Активным Сцинтилляционным Детектором на пучке заряженных частиц

Первым этапом тестирования компонентов детектора Baby MIND на ускорителе было тестирование электроники Baby MIND FEBv1. Данные тесты были проведены в июне 2016 года. Все тесты проводились в экспериментальной зоне T9 в ЦЕРНе с использованием детектора TASD [57, 68, 70]. Полностью Активный Сцинтилляционный Детектор, построенный в рамках проекта AIDA-2020 (Advanced European Infrastructures for Detectors at Accelerators – Передовая Европейская инфраструктура для детекторов на ускорителях), был использован для проверки работы электроники, DAQ и программного обеспечения.

Детектор TASD (рис. 4.3) состоит из 50 модулей сцинтилляторов [68, 70, 108]. Каждый модуль включает в себя плоскости X и Y сцинтилляторов, в каждой плоскости по 86 сцинтилляторов. Ширина, толщина и длина каждого сцинтиллятора примерно 1.0 см, 0.7 см и 90 см соответственно. В каждый сцинтиллятор вклеено спектросмещающее волокно Y11 диаметром 1 мм. Регистрация сцинтилляционного сигнала осуществляется с обоих концов волокна с помощью MPPCs Hamamatsu, рабочая область которых составляет 1 мм^2. Расстояние между модулями может изменяться от 0 до 2.5 см, поэтому длина полного детектора TASD может варьироваться от 75 см до 200 см.

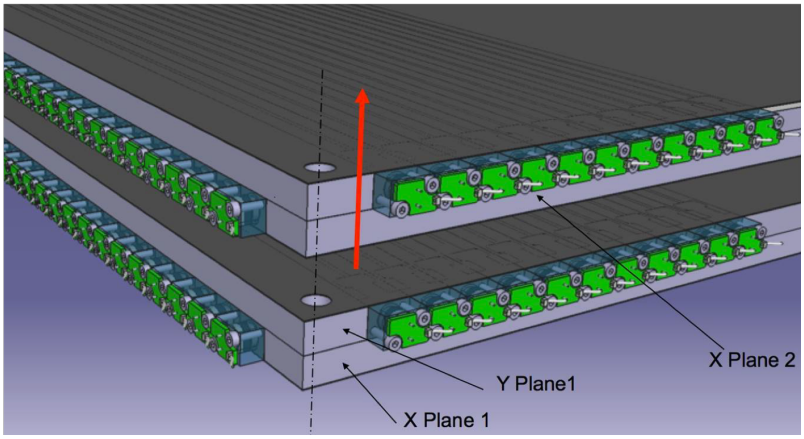
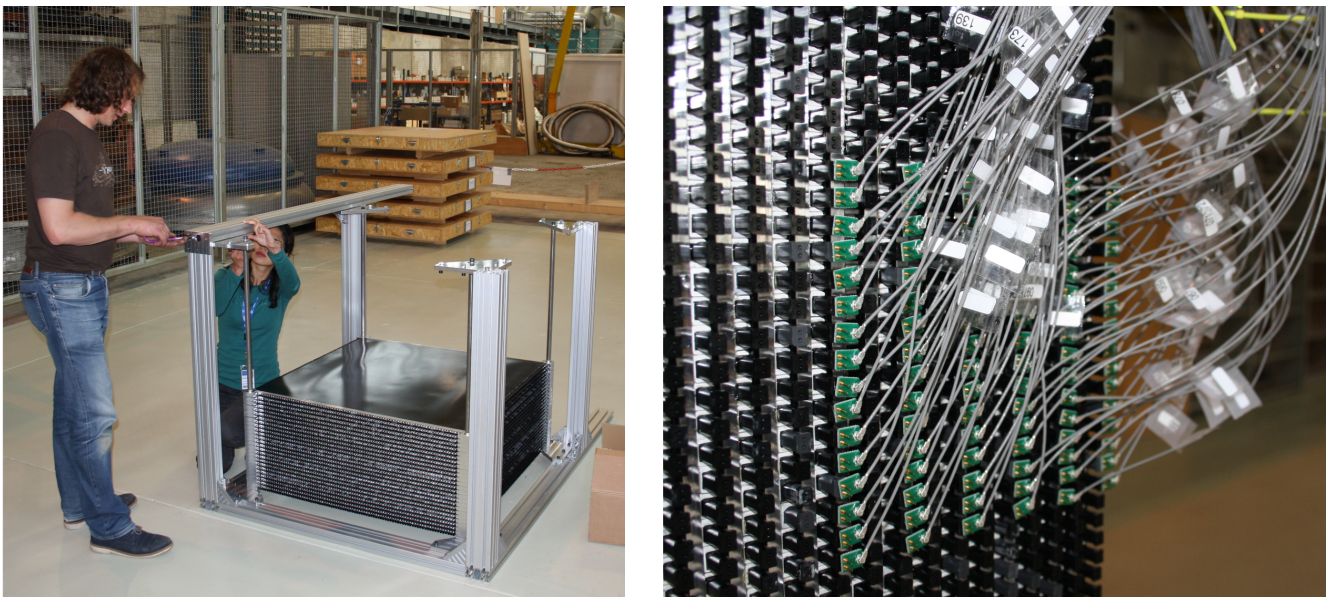


Рис. 4.3. Схемотехническое изображение модулей детектора TASD.

Сборка детектора TASD была закончена в мае 2016 года. Сборка проис-

ходила в 180 холле в ЦЕРНе (рис. 4.4). Перед коллаборацией стояли задачи проверки использования разработанной электроники, среди которых можно выделить:

1. проверка стабильности сбора данных в условиях электромагнитного шума экспериментальной зоны T9;
2. проверка возможности калибровки множество SiPM единовременно;
3. проверка возможности синхронизации FEBv1 с помощью эмулятора генератора тактового сигнала;
4. проверка возможности восстановления карты событий в детекторе.



а б

Рис. 4.4. а – Процесс сборки детектора TASD. б – Подключенные каналы считывания к сцинтилляционным счетчикам детектора TASD.

Во время тестов существовало ограничение по количеству доступных каналов оцифровки сигналов с SiPM. Летом 2016 года существовало только 4 платы FEBv1, либо 384 канала. Во время тестов было использовано только 12 модулей из 16×16 сцинтилляторов, а общий измеренный объем составил 0,003 м^3, фотография подключения SiPM изображена на рисунке 4.4.

4.2.1. Сбор данных

Все установленные кремневые фотодиоды (Hamamatsu MPPCs S12571-025C) были подключены к платам FEBv1. Каждая FEBv1 была подключена к персо-

нальному компьютеру (ПК) через USB3. Синхронизация происходила одновременным запуском отчета на каждом FEBv1 (на тот момент единого генератора отчета не существовало), выделенный FEBv1 выступал эмулятором тактового сигнала. С помощью ПК осуществлялась настройка и контроль FEBv1 (рис. 4.5). Запись данных на диск без предварительного анализа и обработки осуществлялась на диск от каждого FEBv1 в отдельный файл. Далее полученные бинарные данные были проанализированы автономно.

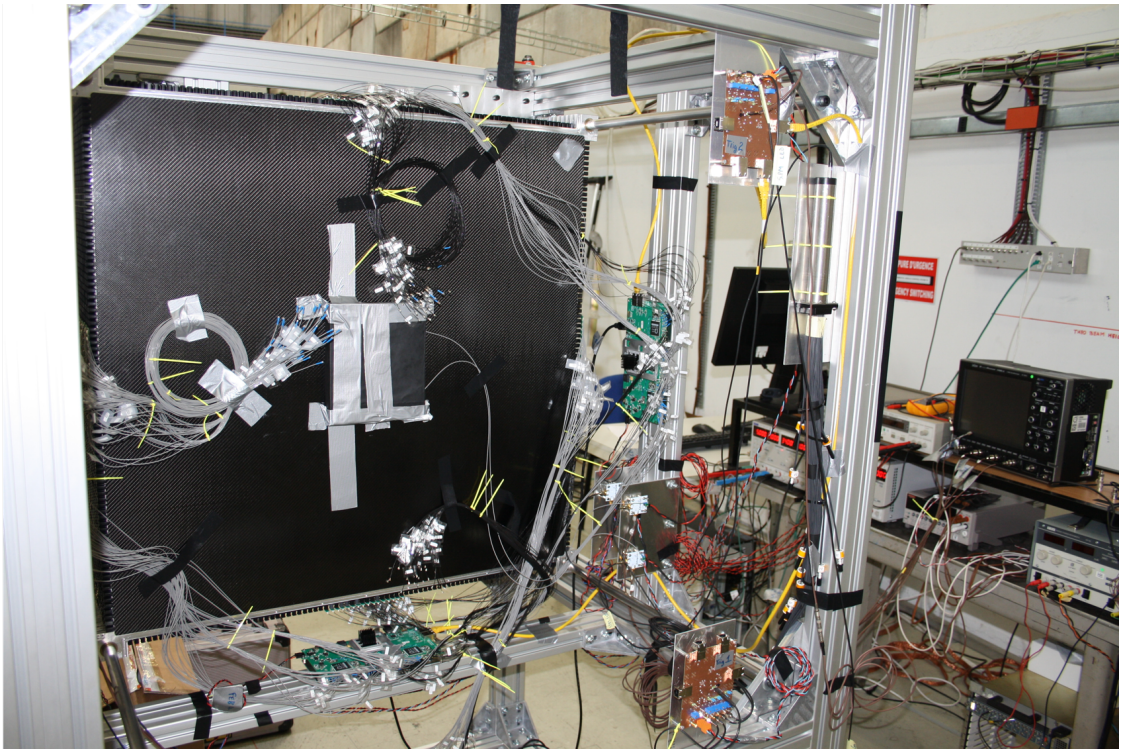


Рис. 4.5. Экспериментальная установка TASD во время тестов.

Каждый канал работал в режиме self-триггера, что означает запуск на считывания с 32 каналов. Для обеспечения возможности отсеивания событий космических мюонов от событий пучка было использовано 2 триггера, установленных перед и после детектора по оси ускорителя. Отсеивание событий происходило на моменте анализа данных.

Обработка бинарных данных осуществлялась с помощью программного комплекса Unpacking. Unpacking объединял сеты данных с четырех FEBv1, переводя их в один root-файл. Затем данный root-файл использовался для анализа: калибровки кремневых фотоумножителей, построения карты событий или вычисления параметров детектора (временное разрешение, световыход).

4.2.2. Обработка данных

Калибровка кремневых фотодиодов

Перед командой Baby MIND стояла задача проверки возможности калибровки каждого SiPM. Для этого было необходимо установить ASIC триггер и ПЛИС триггер на уровень, близкий к 0,5 электрона. Учитывая особенности оцифровки сигналов в FEBv1 (и FEBv2), временное окно электроники(L1HoldHG Delay) устанавливают близким к максимальному. При калибровке нет необходимости во временной информации, поэтому ее вывод с ПЛИС отключают. Пример калибровки изображен на рисунке 4.6.

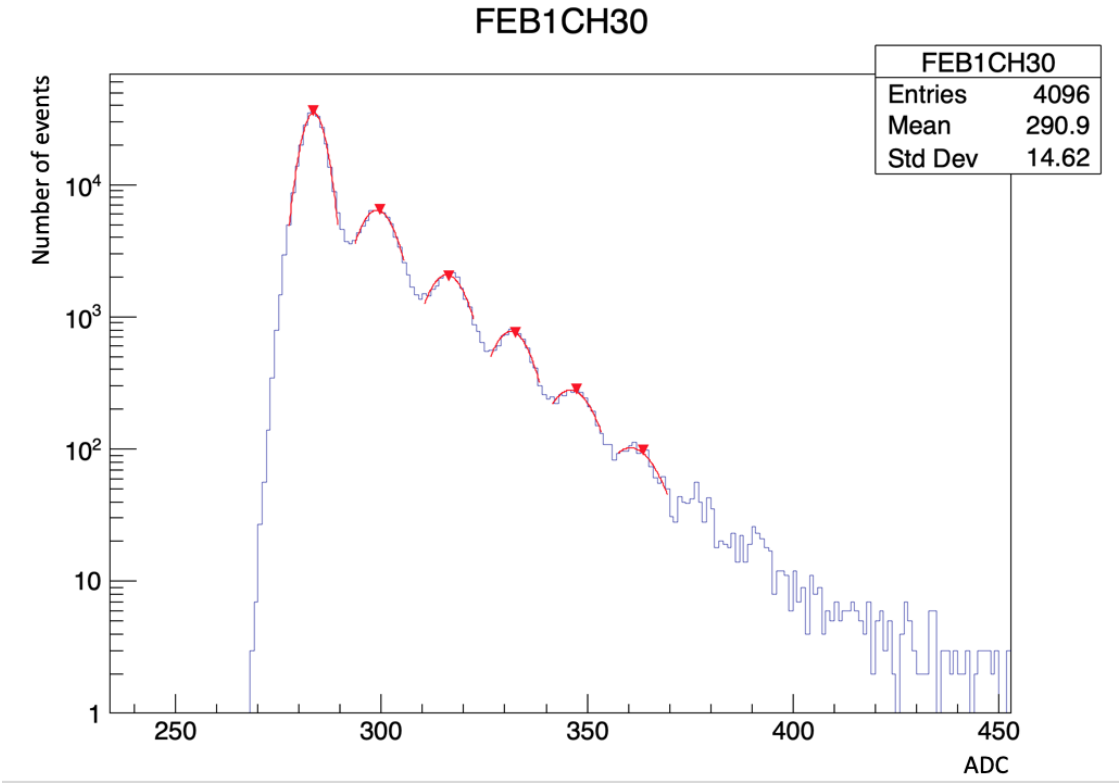


Рис. 4.6. Пример калибровки кремневого фотоумножителя.

Для калибровки использовался программный комплекс ROOT. Первым этапом калибровки является отсечение шума от пиков. Второй этап заключается в поиске пиков с помощью библиотеки TSpectrum, входящей в программный комплекс ROOT. Следующий этап – это фитирование каждого пика с помощью гауссиана. Финальный этап – это вычисление усиления кремневого фотоумножителя, как средняя разница между положениями пиков.

Восстановление событий в детекторе

Время события для восстановления трека бралось из времени одновременного срабатывания триггеров, установленных на детекторе. Далее шел поиск событий во временном окне в 100 нс на всех каналах. Горизонтальная позиция трека восстанавливалась из сигналов с вертикальных сцинтилляционных счетчиков, вертикальная позиция из горизонтальных счетчиков. Все события, не входящие во временное окно от времени срабатывания триггеров, отбрасывались, как события космических мюонов. На рисунке 4.7 показано схематическое изображение подключенных счетчиков в детекторе TASD во время тестов.

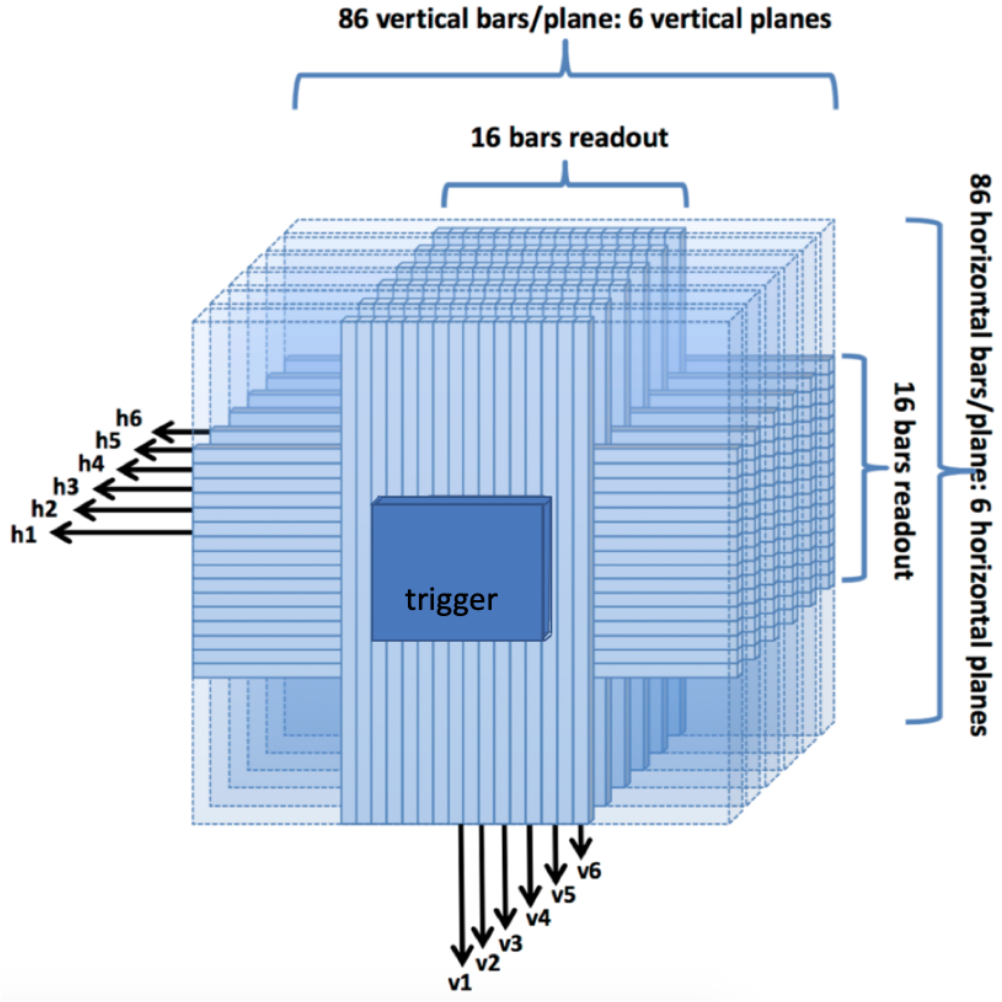
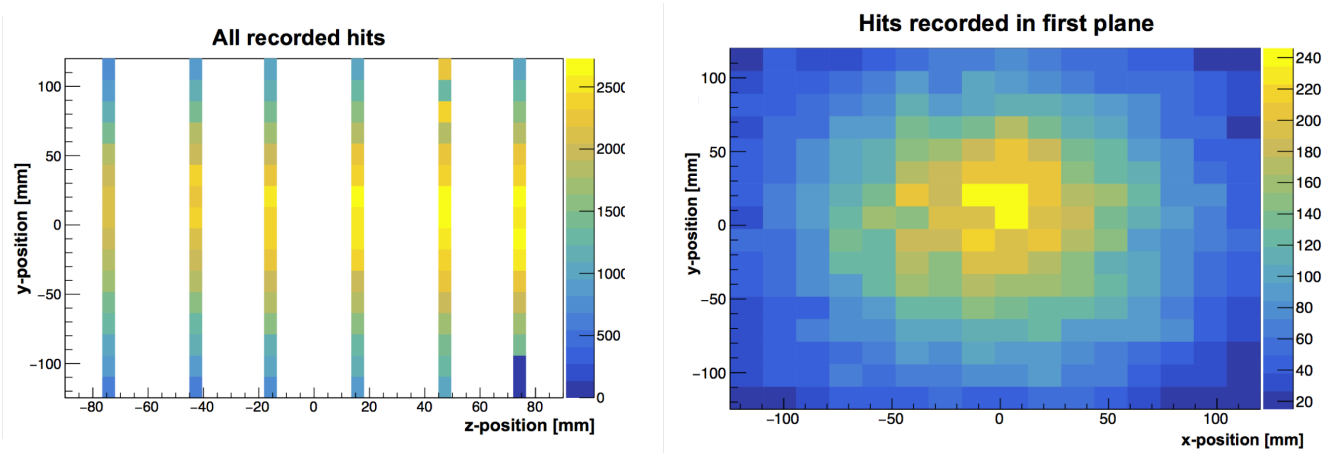


Рис. 4.7. Схематическое изображения подключенных счетчиков в детекторе TASD во время тестов.

4.2.3. Результаты тестов

Как говорилось ранее, главной задачей первого теста на ускорителе с использованием детектора TASD являлась проверка функционирования электро-



а б

Рис. 4.8. Карта событий в детекторе TASD, цветом показано количество событий в данной точке. а – Все реконструированные события во оси пучка TASD. б – Профиль пучка мюонов в зарегистрированный в первом модуле детектора TASD.

ники: возможность калибровки и восстановления интегральной карты событий. В ходе тестов конфигурация микропрограммы ПЛИС электроники дорабатывалась множество раз. Три недели активных тестов в экспериментальной зоне T9 в ЦЕРНе позволили адаптировать программное обеспечение электроники FEBv1 и программное обеспечение комплекса Unpacking до возможности реконструкции треков, пролетающих мюонов, и калибровки кремневых фотоумножителей. На рисунках 4.6 и 4.8 представлены основные результаты тестов: проверка возможности калибровки и карта всех событий в детекторе. Проверка возможности синхронизации FEBv1 с помощью эмулятора генератора тактового сигнала была произведена с поиска событий, соответствующих триггерным.

Данные рисунки доказывают, что электроника и программное обеспечение позволяет использовать их в эксперименте Baby MIND, после адаптации.

4.3. Первый этап тестов Baby MIND в экспериментальной зоне T9

Второй этап тестирования компонентов детектора Baby MIND состоялся в мае 2017 года. На тот момент изготовление и валидация системы кабелей и сборка сцинтилляционных модулей детектора находились в активной стадии. Второе поколение электроники еще не было готово к использованию (объединенная панель для миникрейтов не была произведена и протестирована). По данным причинам на первом этапе тестов использовался только первый блок

Baby MIND, состоящий из 7 сцинтилляционных модулей и 9 магнитных модулей детектора (рис. 4.9). Главными задачами тестирования являлись: проверка возможности функционирования электроники при непосредственной близости к магнитным модулям и функционирование магнитных модулей. Для решения данных задач было решено исследовать отклонение пучка заряженных мюонов.

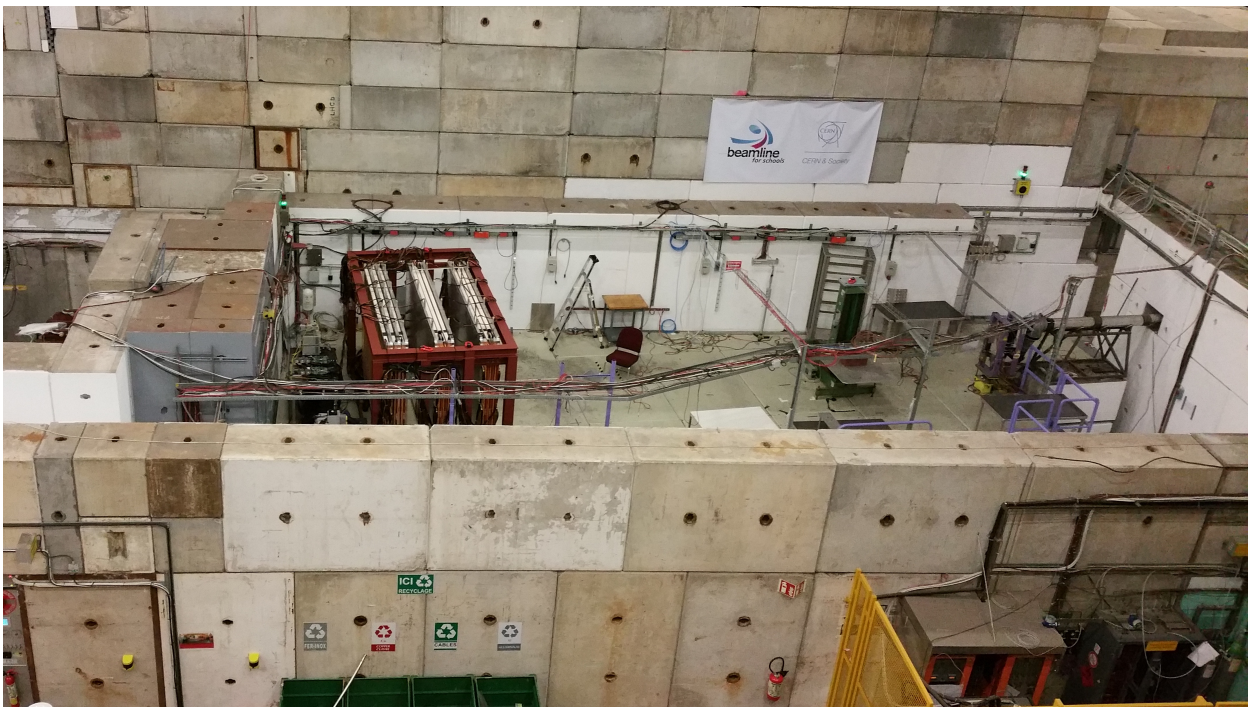


Рис. 4.9. Фотография детектора Baby MIND. Во время второго теста на ускорителе использовался лишь первый блок.

Рис. 4.10. Транспортировка первого модуля детектора Baby MIND в экспериментальную зону T9 в северной зоне ЦЕРН.

4.3.1. Сбор данных

Для сбора данных использовалось первое поколение электроники FEBv1. В тот момент было доступно только 4 платы FEBv1, что давало возможность одновременно исследовать только один сцинтилляционный модуль Baby MIND. Все установленные кремневые фотодиоды (Hamamatsu MPPCs S12571-025C) были подключены к платам FEBv1 с помощью специально разработанной системы кабелей. Каждая FEBv1 была подключена к персональному компьютеру (ПК) через USB3. Синхронизация происходила одновременным запуском отчета на каждом FEBv1. Перед детектором был размещен триггер для возможности отделения событий с ускорителя от посторонних шумов.

Для проверки работоспособности магнитных модулей по поиску отклонения заряженных мюонов в магнитном поле был предложен последовательный набор данных с каждого сцинтилляционного модуля, с построением графиков количества событий на каждом сцинтилляционном модуле. Проверка работоспособности заключалась в поиске отклонений центра пучка от модуля к модулю. Набор данных производился при разных энергиях для положительно и отрицательно заряженных мюонов. Фокус пучка был установлен на бесконечность.

4.3.2. Обработка данных

Для восстановления карты событий на сцинтилляционном модуле первым делом идет поиск триггерных сигналов. Затем поиск совпадения событий на горизонтальных сцинтилляторах с разных концов во временном окне в 50 нс от времени срабатывания триггера. Третий этап – это поиск сигнала/сигналов на вертикальных сцинтилляторах (совпадения с разных концов вертикального сцинтиллятора не требуется). Финальный этап – это отметка точки пересечения сигнальных горизонтальных и вертикальных сцинтилляторов на графике карты событий. Результаты для μ^+, μ^- с импульсами 1 ГэВ/с для сцинтилляционного модуля 1 и 7 представлены на рисунках 4.11, 4.12.

4.3.3. Результаты тестов

В ходе тестов был проведен анализ собранных данных для μ^+, μ^-, π^+, π^- с импульсами 0,5 – 5 Гэв/с. Сравнительный анализ доказал работу магнитных модулей. На рисунках 4.11, 4.12 представлено отклонение центра пучка μ^+ с

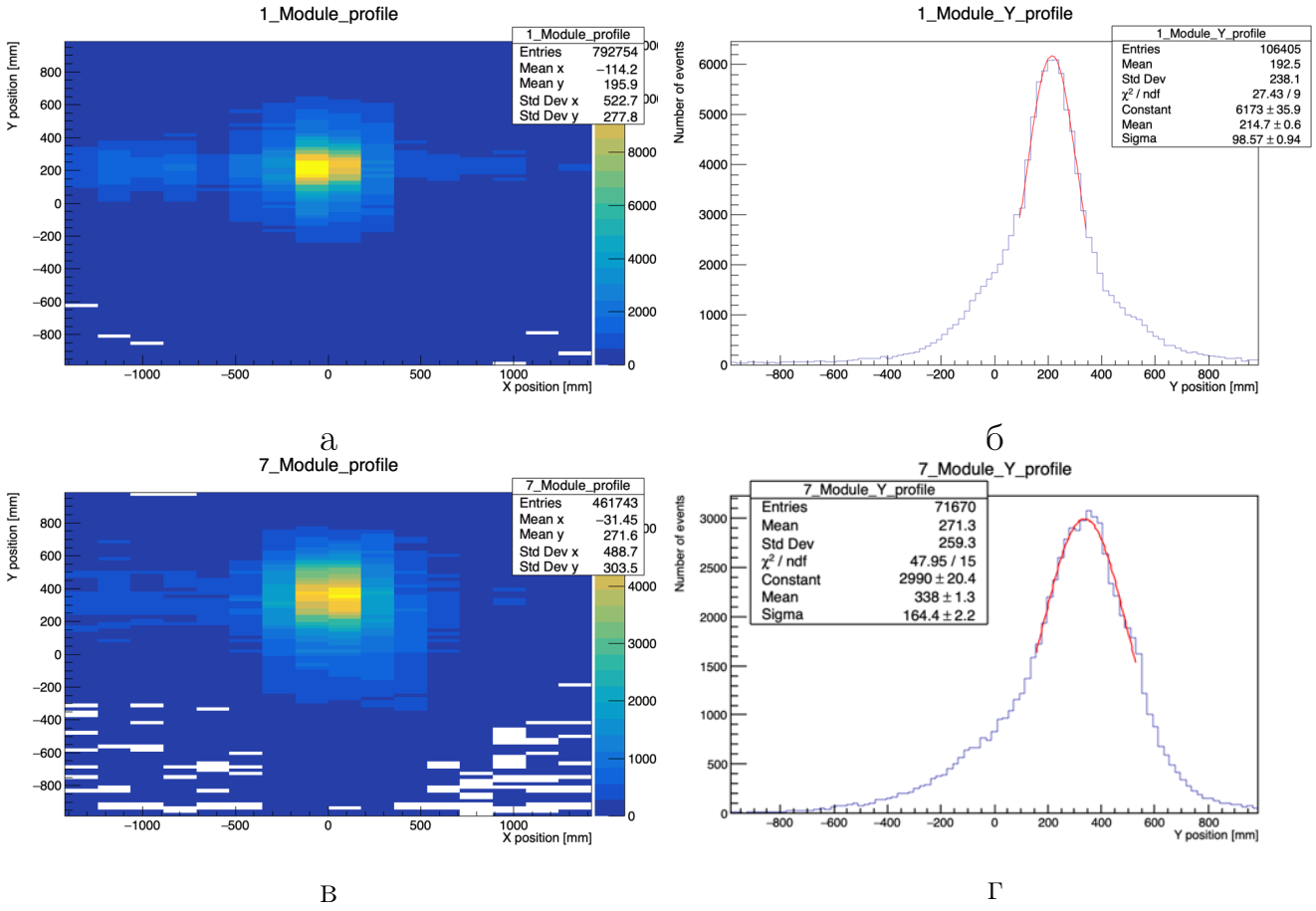


Рис. 4.11. График профиля пучка μ^+ с импульсом 1 ГэВ/с. а – Профиль пучка на 1 модуле детектора Baby MIND, цветом показано количество событий. б – Количество триггерных событий на горизонтальных сцинтилляционных счетчиках для 1 модуля Baby MIND. в – Профиль пучка на 7 модуле детектора Baby MIND, цветом показано количество событий. б – Количество триггерных событий на горизонтальных сцинтилляционных счетчиках для 7 модуля Baby MIND.

импульсом 1 ГэВ/с на 123,3 мм, μ^- с импульсом 1 ГэВ/с на -113,62 мм. Влияние работы магнитных модулей на систему сбора данных обнаружено не было. Но для полной проверки функциональности детектора необходимо было получение трека единичного мюона и полное тестирование всех компонентов, входящих в детектор. Для этого был организован 4-х недельный тест в экспериментальной зоне T9 в июне-июле 2017 года.

4.4. Финальный этап тестирования Baby MIND в ЦЕРНе

Заключительный этап тестирования детектора Baby MIND в ЦЕРНе проходил в июне-июле 2017 года в экспериментальной зоне T9. Основной целью было полное тестирование детектора:

1. повторное тестирование каждого компонента детектора;

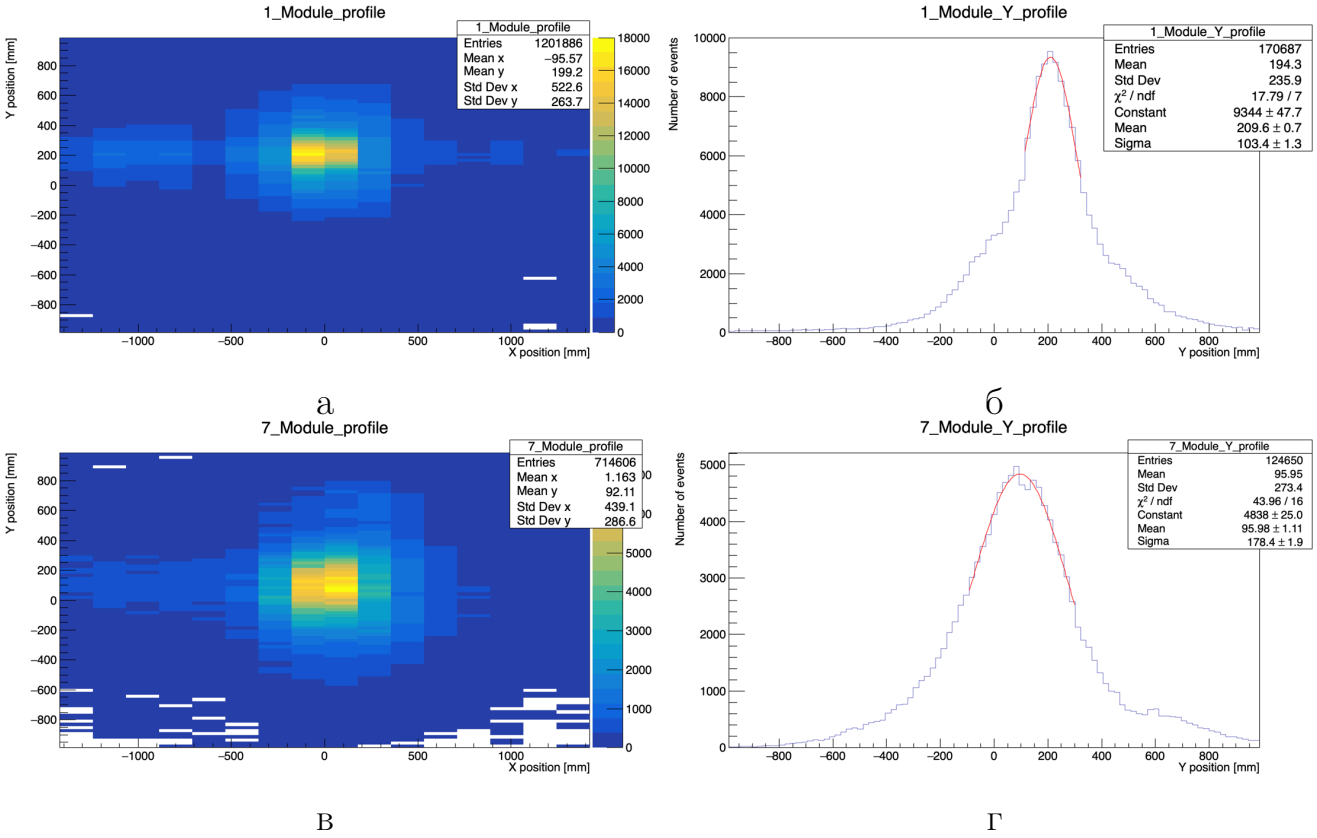


Рис. 4.12. График профиля пучка μ^- с импульсом 1 ГэВ/с. а – Профиль пучка на 1 модуле детектора Baby MIND, цветом показано количество событий. б – Количество триггерных событий на горизонтальных сцинтилляционных счетчиках для 1 модуля Baby MIND. в – Профиль пучка на 7 модуле детектора Baby MIND, цветом показано количество событий. б – Количество триггерных событий на горизонтальных сцинтилляционных счетчиках для 7 модуля Baby MIND.

2. поиск и устранение дефектов, не замеченных ранее;
3. поиск оптимальных настроек компонентов детектора;
4. калибровка кремневых фотоумножителей;
5. вычисление временного разрешения сцинтилляционных счетчиков;
6. исследование стабильности магнитных модулей;
7. калибровка HG, LG и ToT и поиск оптимальных настроек электроники FEBs;
8. разработка алгоритмов восстановления треков, зарядов и импульсов регистрируемых частиц.

Схемотехническое изображение тестирования детектора изображено на рисунке 4.13 и на рисунке 4.14 представлена фотография установленного детектора Baby MIND. Детектор Baby MIND был разделен на 4 блока, каждый блок

был установлен с помощью опорный рамы (данные рамы были изготовлены для тестирования и перевозки детектора). TASD был установлен перед детектором Baby MIND в качестве триггера и для обеспечения исходной информации о угле вылета частиц из ускорителя, для этого два модуля детектора TASD были оборудованы кремневыми фотоумножителями (в сумме 192 канала). Полная конструкция детектора состояла из четырех блоков с установленными 18 сцинтилляционными модулями, подключенными с помощью 108 горизонтальных систем кабелей (для подключения горизонтальных сцинтилляционных счетчиков) и 18 вертикальных систем кабелей (для подключения вертикальных сцинтилляционных счетчиков). Также 33 магнитных модуля были установленны в опорные раммы и подключены к источнику питания.

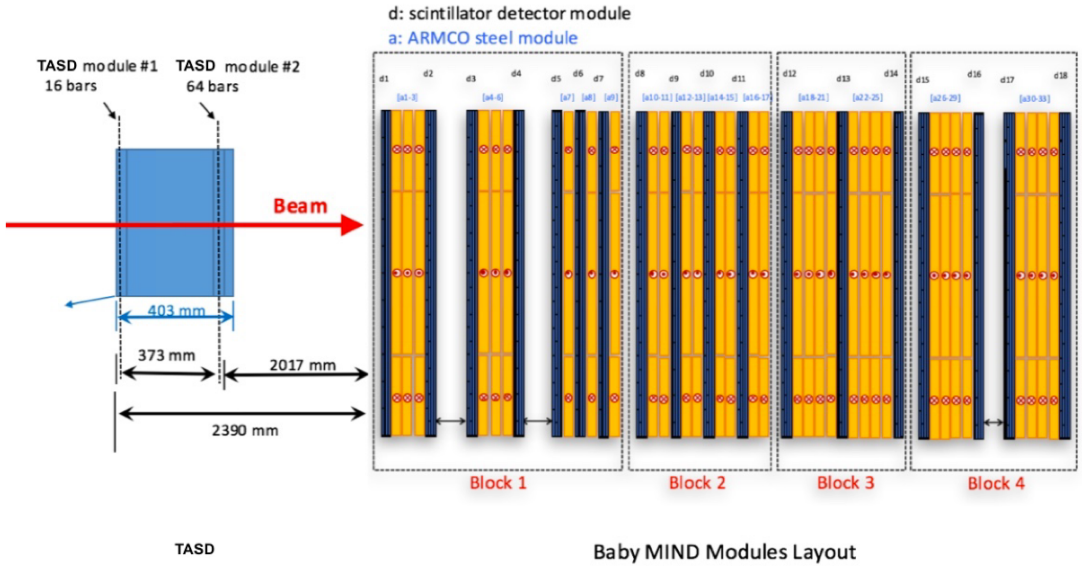


Рис. 4.13. Схематическое изображение тестов детектора Baby MIND в июне-июле 2017 года.

4.4.1. Система сбора данных

44 FEBs, установленные в 8 коробках специального дизайна (mini crates – MCR) (рис. 4.16), обеспечивали считывание сигналов с 3996 каналов детектора Baby MIND и 192 каналов TASD (схема подключения детекторов к электронике изображена на рисунке 4.15). Все каналы были оснащены кремневыми фотодиодами Hamamatsu MPPCs S12571-025C. Синхронизация электроники происходила с помощью сигнала с линии ускорителя, подставленного за секунду до пучка. Данный сигнал подавался на дополнительную плату FEB в режиме генерации

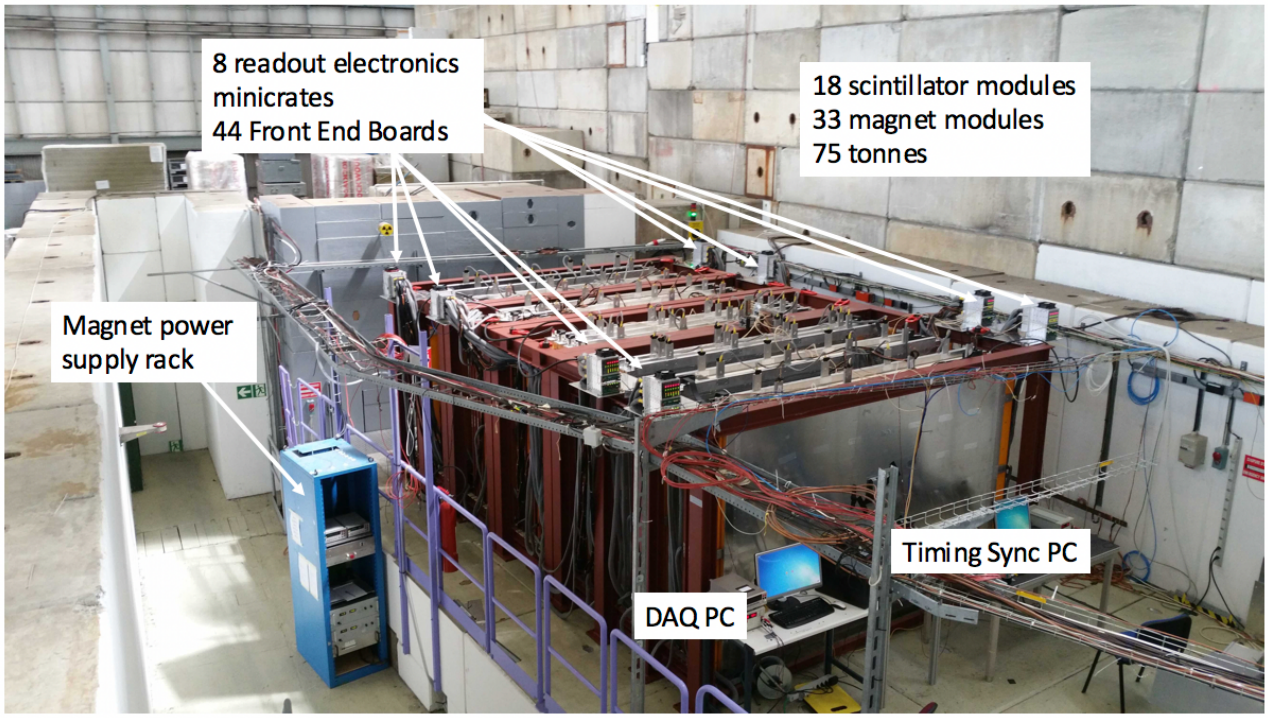


Рис. 4.14. Фотография детектора Baby MIND в экспериментальной зоне T9 в ЦЕРНе.

тактового сигнала, либо режиме эмулятора единого генератора отчета (плата единого генератора отчета (Master Clock Board – MCB) еще не была произведена), который генерировал опорный тактовый сигнал для всех других FEBs, оцифровывающих данные с фотоумножителей. Эмулятор MCB подавал опорный сигнал через 3 платы распределения (fanout boards) с помощью кабелей RJ45 (рис. 4.16).

Для записи данных с мини-крейтов использовалось 2 ПК, подключение MCR к ПК осуществлялось с помощью USB 3. Эмулятор MCB контролировался с помощью отдельного ПК. Схема подключения сцинтилляционных модулей к электронике FEBs изображена на рисунке 4.15. Все данные, оцифрованные FEBs, анализировались оффлайн.

4.4.2. Проверка и поиск оптимальных настроек компонентов детектора

При решении задачи повторного тестирования каждого компонента детектора было обнаружено несколько каналов, не имеющих сигналов. Как было сказано ранее, в разделах 3.4, 3.6 и 3.7, при разработке дизайна компонентов детектора, важной задачей было предусмотреть возможность замены компонентов в

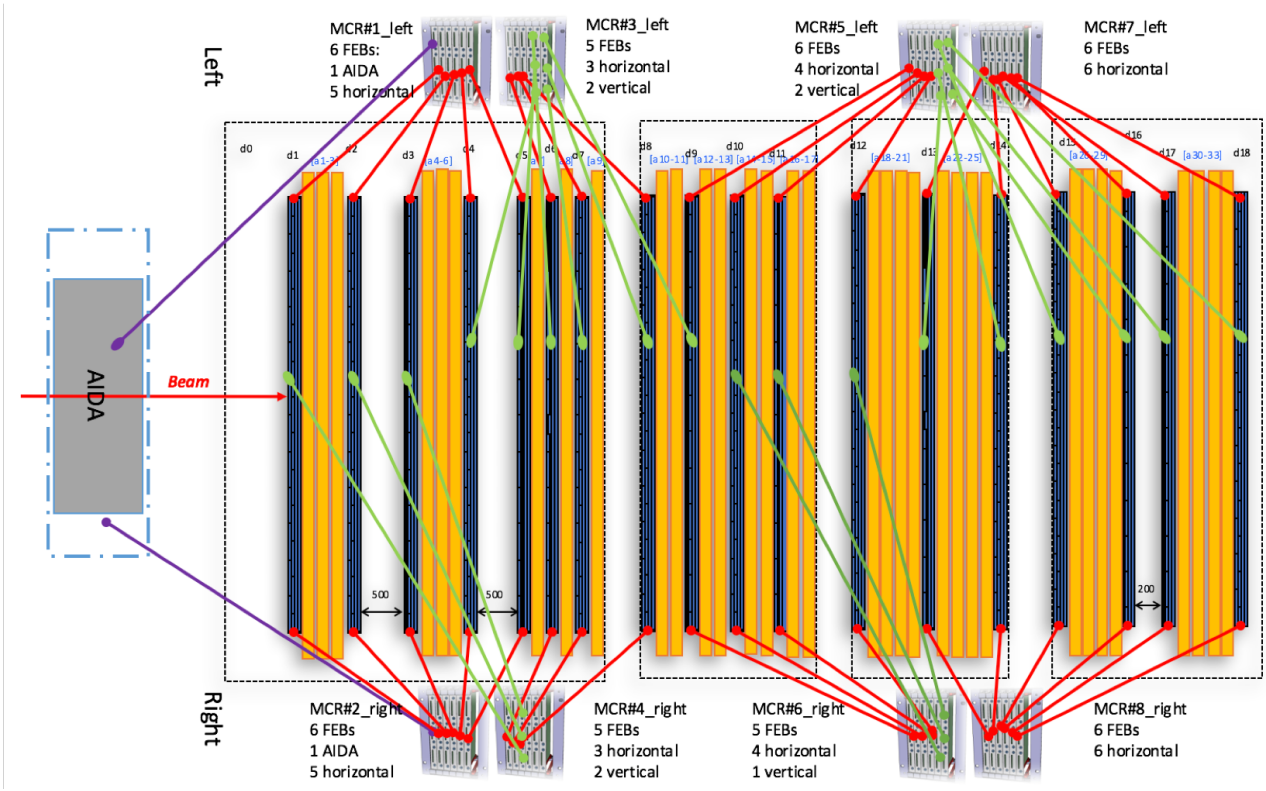
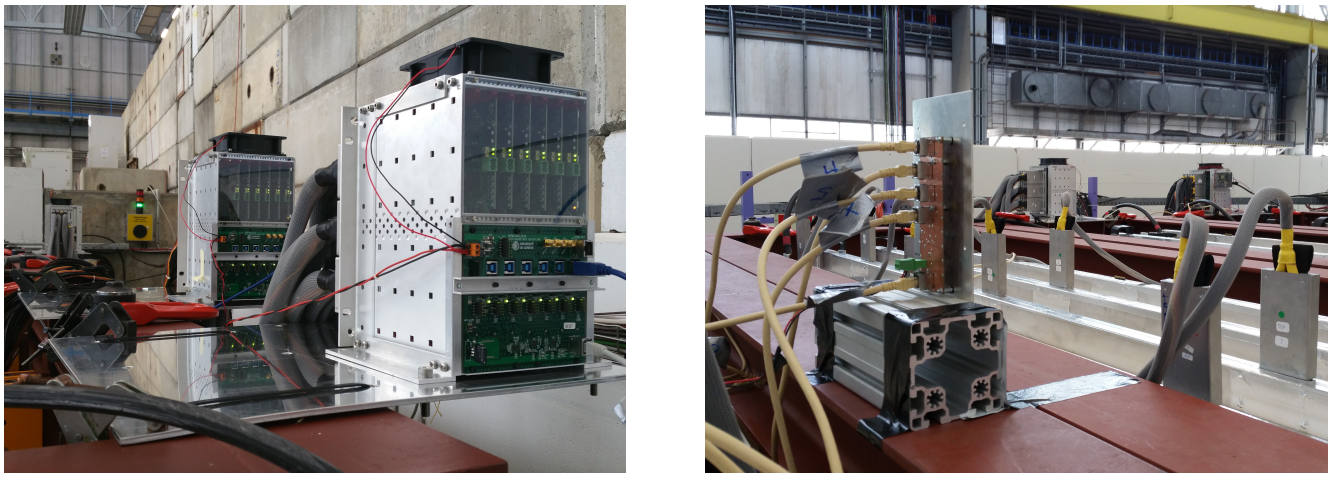


Рис. 4.15. Схема подключения детектора Baby MIND к электронике FEBs.



а б

Рис. 4.16. Подключение электроники FEBs к сцинтилляционных модулям. а – Фотография подключенного MCR с 6 платами FEBs. б – Фотография подключенной платы распределения опорного сигнала.

случае необходимости. Главной причиной обнаруженных дефектов являлся плохой электрический контакт между компонентами детектора. Все обнаруженные проблемы устранялись в ходе тестов, что позволило исследовать детектор Baby MIND без поврежденных каналов.

В ходе тестирования детектора Baby MIND было обнаружено, что система тактового опорного сигнала была чувствительна к уровню помех на экспери-

ментальной зоне T9. Данный эффект выражался в нарушении синхронизации электроники Baby MIND FEBs между собой. Для решения данной проблемы было предложено использование кабелей RJ45 6a S/FTP с индивидуальной изоляцией каждой жилы. Индивидуальная изоляция каждой жилы позволила избавиться от зависимости системы синхронизации FEBs от внешних электромагнитных помех экспериментальной зоны T9.

Важным этапом финальных тестов детектора Baby MIND был поиск оптимальных настроек электроники FEBs. На данном этапе все печатные платы FEBs были произведены, что дало возможность исследовать систему DAQ. Первым вопросом, возникшим в ходе тестов, был выбор уровня порога регистрации сигналов на ASICs CITIROC и ПЛИС.

Подключение цепочек FEBs (MCR) осуществляется посредством интерфейса USB 3.0. Данная технология позволяет передавать данные со скоростью 5 Гбит/с, однако все FEBs объединены в MCR (до 8ми FEB). Как было отмечено ранее, в разделе 3.7, режим цепочки подразумевает передачу данных с каждой FEB в TDM, что означает ограничение скорости передачи с каждого канала в определенный промежуток времени (5(Гбит/с)/8 = 625 Мбит/с с каждой FEB). Среднее значение темнового тока на каждом MPPCs S12571-025C $\sim$ 100 кГц. Каждое событие на SiPM (выше уровня порога ASICs CITIROC и ПЛИС) записывает на ПК значения HG, LG, Leading Time и Falling Time (размер каждого слова 32 бита). Суммарный поток данных с каждого FEB от темнового тока, объединенного в MCR в режиме TDM (без учета данных TDM Slot, Spill, GTrig):

$$\begin{gathered} 32\text{бит(размер слова)} \times 96\text{(колличество каналов)}\times \\ \times 4\text{(колличество слов)} \times 10^5\text{кГц(частота шумов)} = 1.3\ \text{Гбит/с} \end{gathered} \tag{4.1}$$

Первое ограничение было получено из пропускной способности интерфейса USB 3.0. Второе ограничение было получено из размеров DAQ файлов данных:

$$44\text{(колличество } FEBs\text{)} \times 625\ \text{Мбит/с} = 3,44\text{ГБ/с} \tag{4.2}$$

В данном случае, в ходе набора статистики для 400 пучков с ускорителя, при длительности пучка 0,5 с (длительность пучка экспериментальной зоны T9), суммарный размер данных будет $\sim$ 0.7 ТБ (без учета данных TDM Slot, Spill, GTrig). Учитывая данные тестов, описанные в разделе 3.3, световой выход

33 ф.э. с каждого конца горизонтального сцинтилляционного счетчика и 14 ф.э. с каждого конца вертикального сцинтилляционного счетчика, было принято решение установить уровень порога (в режиме набора статистики с ускорителя) ASICs CITIROC и ПЛИС на 5,5 ф.э. для горизонтальных сцинтилляционных счетчиков и 3,5 ф.э. для вертикальных сцинтилляционных счетчиков . В данной конфигурации поток данных составил 5 МБ/с с одного FEB либо 40 ГБ данных с 44 FEBs за 400 пучков ускорителя (согласно разделу 3.5.1 уровень темнового тока с порогом более 3.5 ф.э. менее 4 кГц).

4.4.3. Набор данных

Во время тестов была проведена калибровка кремневых фотоумножителей и электроники, проведен набор данных для пучка μ^+, μ^-, π^+, π^- с импульсами 0,5; 0,6; 0,8; 1; 1,5; 2; 3; 5; 10 ГэВ/с. Во время тестов также проводилась смена полярности магнитных модулей. Каждый проведенный тест набирал статистику в 300 – 400 пучков (spills), что занимало примерно 2–3 часа набора статистики.

Оцифрованные данные с FEBs обрабатываются с помощью базы данных, связывающей номер канала непосредственно с относительным положением сцинтилляционного счетчика. Триггерные события в детекторе TASD (программный триггер) открывали временное окно в 100 нс, во время которого искались сигналы в сцинтилляционных модулях. Для создания события в сцинтилляционном модуле требовалось наличие сигналов с разных концов горизонтального сцинтилляционного счетчика и наличие сигнала на вертикальном счетчике детектора Baby MIND.

Все собранные данные проходили процедуру перевода из бинарных данных с электроники в root файлы с помощью программного комплекса Unpacking, для дальнейшей обработки с помощью Unpaking или других программных комплексов.

4.4.4. Калибровка кремниевых фотоумножителей

Для калибровки использовался программный комплекс ROOT. Первым этапом калибровки является отсечение шума от пиков. Второй этап заключается в поиске пиков с помощью библиотеки TSpectrum, входящей в программный комплекс ROOT. Следующий этап это фитирование каждого пика с помощью

гауссиана. Финальный этап - это вычисление усиления кремневого фотоумножителя, как средней величины расстояния между положениями пиков.

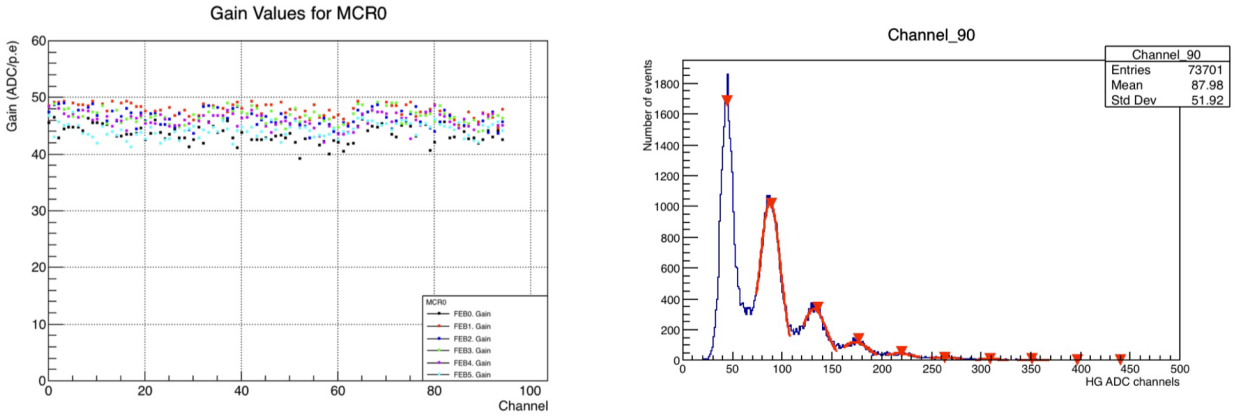


Рис. 4.17. Коэффициент усиление для 576 каналов (слева) и графиков спектра темнового тока с 5 профитироваными пиками для одного канала (справа).

Графики коэффициента усиления для 576 кремневых фотодиодов (MCR_0), установленных на Baby MIND, показаны на рисунке 4.17. Среднее значение коэффициента усиления равно ~ 45 АЦП/ф.э. (рис. 4.17), слева. Значение коэффициента усиления может быть дополнительно уменьшено путем оптимизации коэффициента усиления предусилителя на FEBs для каждого из кремневого фотоумножителя индивидуально.

Вычисление пьедестала кремневых фотодиодов

FEBs это подавляющая пьедестал электроника. Это означает, что положение пика в 0 ф.э. данной электроникой не фиксируется. Но для вычисления светового выхода каждого события необходимо знание положения пьедестала для каждого канала. Для поиска пьедестала используется метод изменения усиления каждого канала изменением значения High_Gain и повторяется калибровка каждого канала. Учитывая особенности Baby MIND FEBs при изменении коэффициента усиления положение пьедестала не изменяется, что означает, что при разных значениях High_Gain нулевой пик имеет одно и то же положение для индивидуального канала. Вычисление положения пьедестала происходит в несколько этапов:

1. калибровка SiPM при значении High_Gain равным 45;
2. калибровка SiPM при значении High_Gain равным 50;

3. калибровка SiPM при значении High_Gain равным 52;

4. калибровка SiPM при значении High_Gain равным 55;

5. варьирование значений профитированных пиков и определение гипотезы положение пьедестала методом Пирсона (χ^2).

Пример определения положения пиков изображен на рисунке 4.18. Результаты вычисления позиций пьедесталов для SiPM Baby MIND показаны на рисунке 4.19.

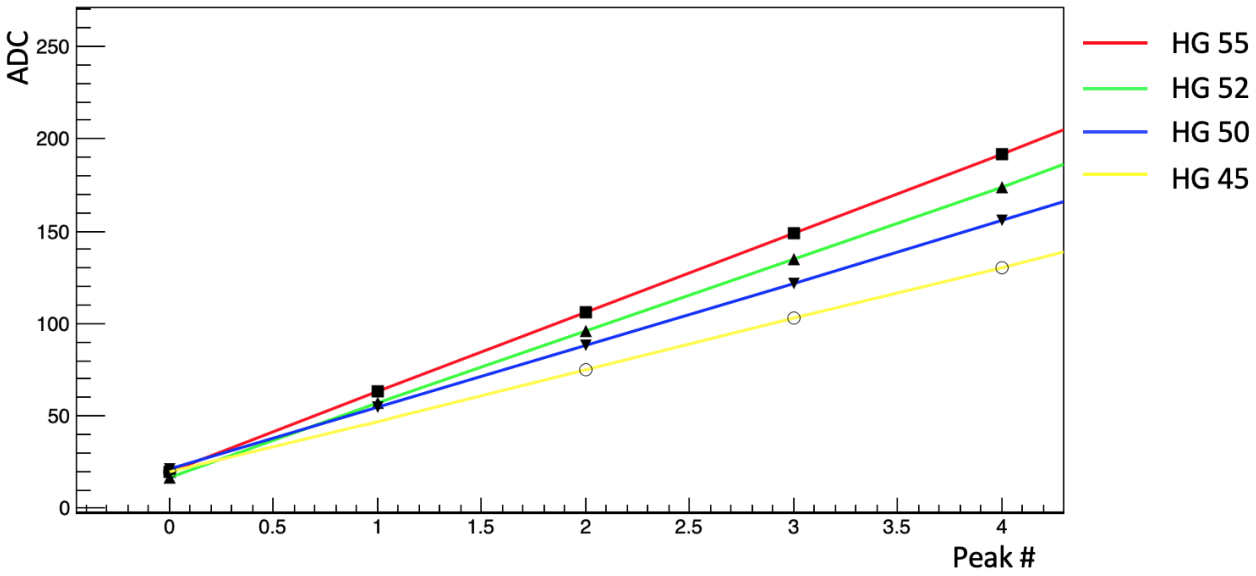


Рис. 4.18. Пример алгоритм вычисления позиции пьедестала для электроники Baby MIND FEBs для одного канала.

4.4.5. Калибровка электроники Baby MIND FEBs

Наличие линий HG и LG передачи сигнала на ПЛИС позволяет иметь данные амплитуды сигнала с большой точностью и малым динамическим диапазоном, а так же с маленькой точностью и большим динамическим диапазоном. Но калибровка зависимости каналов АЦП LG и ф.э. прямым образом невозможна. Для получения возможности восстановления уровня сигналов с LG в ф.э. необходима калибровка HG к LG.

Наличие же данных пересечения порога ASICs CITIROC сигналом с SiPM позволяет восстанавливать амплитуду событий, попавших в мертвое время оцифровки. Для решения данной задачи необходимо знание зависимости длительно-

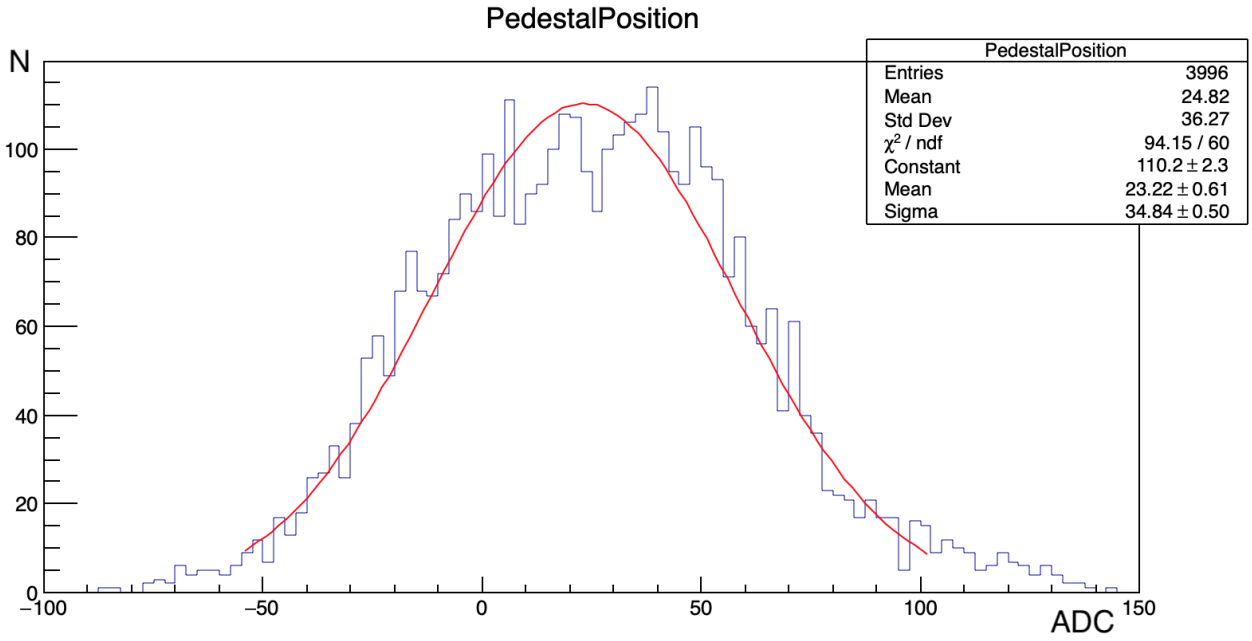


Рис. 4.19. Распределение позиций вычисленных пьедесталов SiPM, установленных в детектор Baby MIND.

сти сигнала на порогом от значения амплитуды сигнала. Для этого необходимо знание зависимости HG от ToT и LG от ToT.

Калибровка зависимости HG и LG

Коэффициенты усиления сигналов HG и LG были подобраны так, чтобы калибровка кремневых фотоумножителей HG АЦП к ф.э. была легко осуществима, а LG включала в себя возможность регистрации в 10 MIP. Для калибровки электроники HG к LG использовались данные с событиями с ускорителя, для этих данных строился график, где по горизонтальной оси располагались данные HG, а по вертикальной данные LG. Фитирование на данном графике происходит с помощью прямой и является индивидуальным к каждому каналу и параметрам, установленным на усилителе HG и LG. На рисунке 4.20 представлен пример данной калибровки. Сатурация на уровне $\sim$ 3700 ADC происходит при высоких значениях амплитуды, не входящих в динамический диапазон HG.

Среднее значение коэффициента зависимости HG от LG представлено на рисунке 4.21.

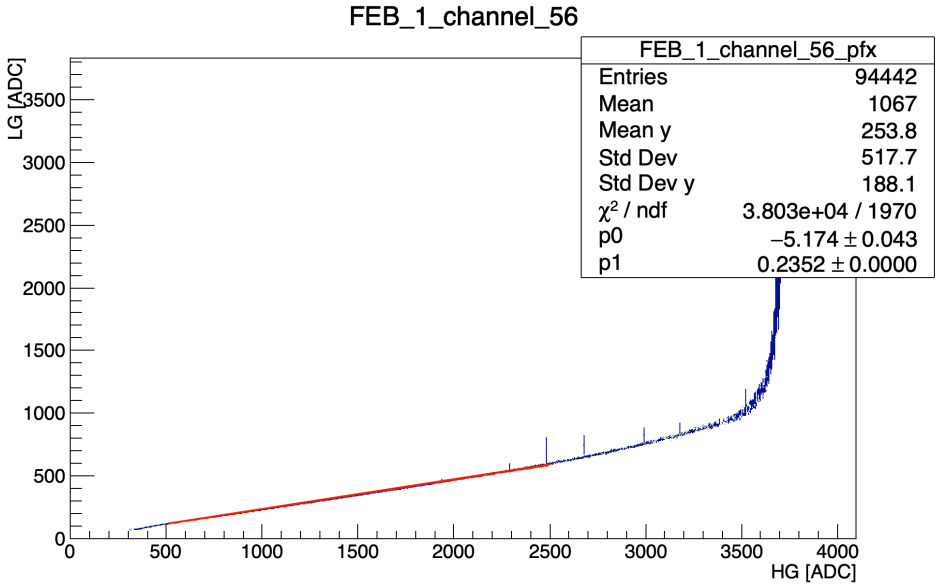


Рис. 4.20. Пример калибровки HG к LG, фитирование происходит прямой.

Совмещение времени над порогом и значений амплитуд сильного и слабого усиления

Как было отмечено ранее в главах 3.7.2 и 3.7.4, в случае существования для сопоставления данных амплитуды и времени каждого сигнала необходимо провести совмещение данных амплитуд сигналов с временными значениями сигналов (пересечении триггерного порога снизу и сверху – rising и falling time). Для этого используются данные амплитуд сигналов, временные данные и слова L1Hold Start и L1Hold Stop.

Рассмотрим ситуацию, показанную на рисунке 4.22. Для примера на данной схеме изображены сигнала с 2-ух каналов Ch0 и Ch1. Событие 1 на канале Ch0 Открывает временные ворота L1Hold (в эксперименте был выбран временной промежуток поиска максимального значения амплитуды в периоде 10 мс, L1Hold). Далее в течении времени L1Hold происходт событие 2 с большей амплитудой (данная амплитуда сохраняется для оцифровки, так как амплитуда события 2 больше амплитуды события 1). После завершения времени L1Hold происходит событие 3, чья амплитуда не учитывается (амплитуда события 2 уже передана на оцифровку). На канале Ch1 L1Hold был открыт благодаря событию 1 с канала Ch0. Далее в течении времени L1Hold происходят события 5 и 6. На данном канале на оцифровку будет передана амплитуда события 5, так как амплитуда события 5 больше амплитуды события 6. В поток данных с данных двух каналов будет передано значение времени пересечения снизу (rising

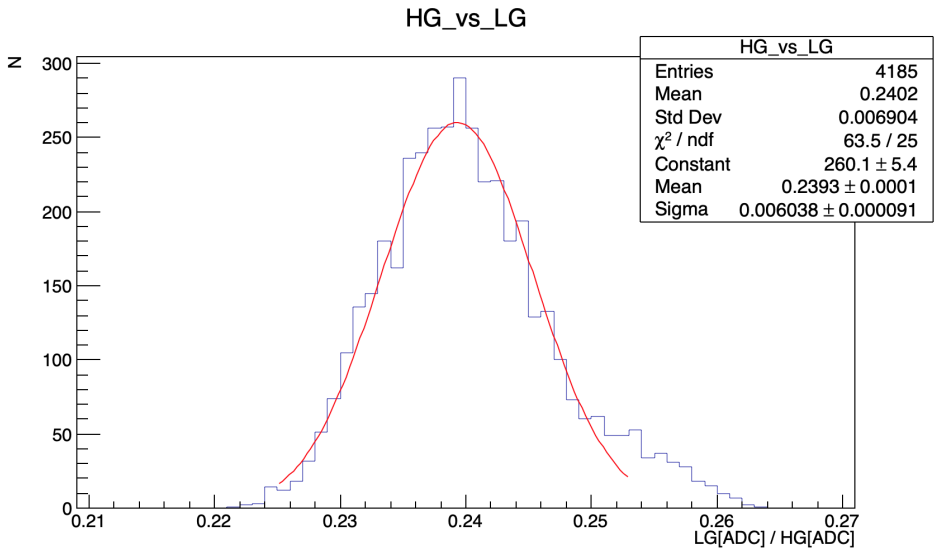


Рис. 4.21. Результаты калибровок отношения коэффициентов усиления LG к HG для всех каналов.

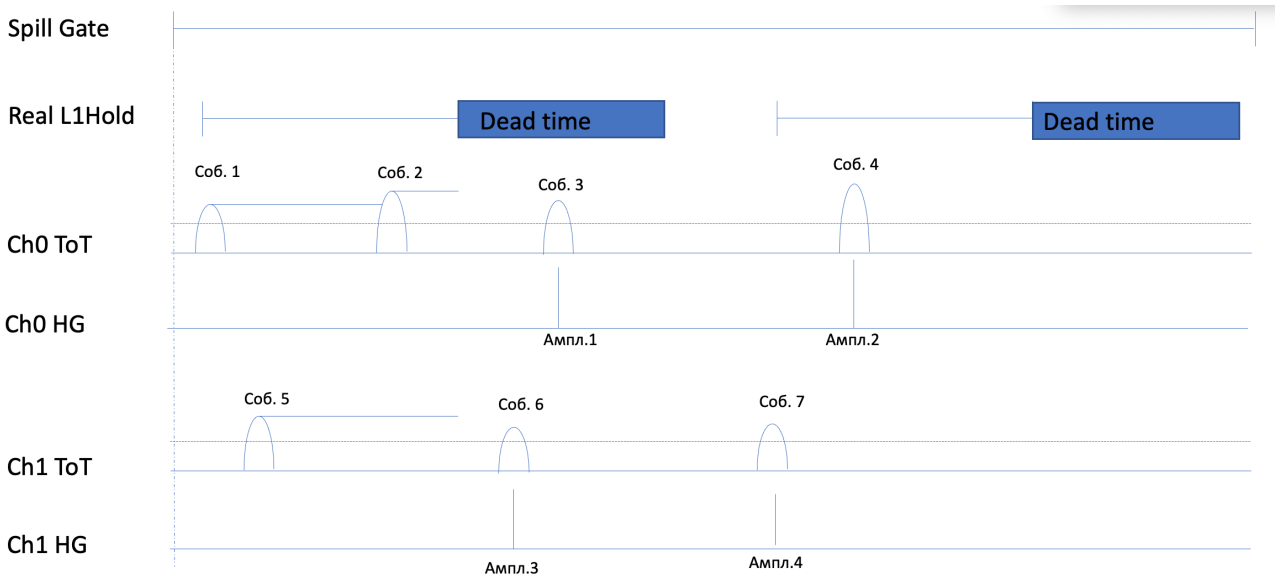


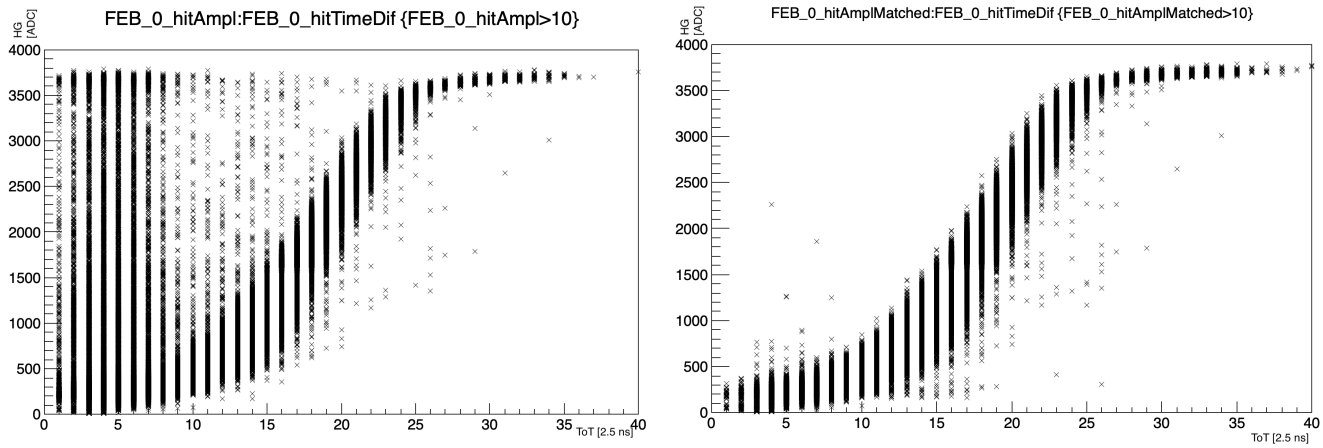
Рис. 4.22. Примеры возможного распределения сигналов на 2ух канала Ch0 и Ch1.

time) и сверху (falling time) для всех событий 1,2,3,5,6 и значения амплитуд события 2 (амплитуда 1) и события 5 (амплитуда 3). В потоке данных с FEB на канале Ch0 амплитуда 1 будет сопоставлена с событием 3 (хотя на даном примере амплитуда 1 должна быть сопоставлена с событием 2). На канале Ch1 амплитуда 3 будет сопоставлена с событием 6, хотя амплитуда 3 соответствует событию 5.

Спустя какое-то время событие 7 открывает L1Hold для каналов на данном FEB. Здесь показана идеальная картина, когда во время L1Hold было только

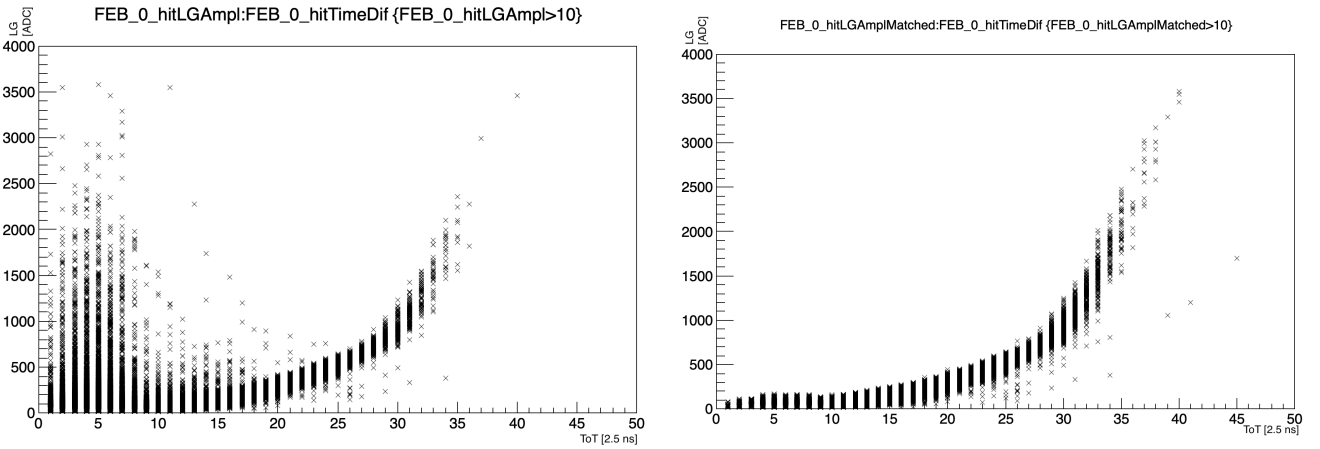
по одному событию, тогда в потоке данных будут все временные и амплитудные значения для событий 4 и 7.

Для сопоставления временных данных с амплитудой автором был разработан алгоритм сопоставления. Во временой промежуток с L1HoldStart по L1HoldStop однозначен для каждого FEB и индивидуален для каждых 96 каналов FEB в утвержденной конфигурации ПЛИС. В заданный промежуток времени на каждом канале каждого FEB идет поиск максимального значения ToT (falling time минус rising time) и для данного ToT фиксируется оцифрованная амплитуда HG и LG. Примеры сравнения данных до совмещения и после совмещения представлены на рисунках 4.23, 4.24.



а б

Рис. 4.23. Графики зависимости амплитуды HG [ADC] от значений времени сигнала над порогом ToT [2.5 нс]. а – Зависимость до сопоставления временных данных с амплитудой. б – Зависимость после сопоставления временных данных с амплитудой.

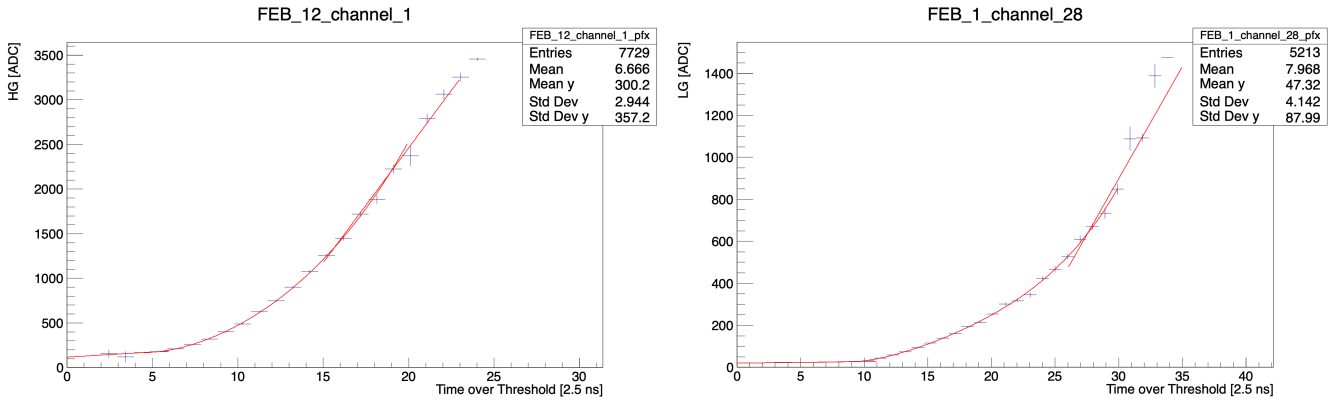


а б

Рис. 4.24. Графики зависимости амплитуды LG [ADC] от значений времени сигнала над порогом ToT [2.5 нс]. а – Зависимость до сопоставления временных данных с амплитудой. б – Зависимость после сопоставления временных данных с амплитудой.

Калибровка зависимости HG и LG от ToT

Согласно спецификации электроники, во время временного окна электроники L1HoldHGDelay оцифровка амплитуды сигнала происходит только единожды для каждого канала, что означает следующее: если за время L1HoldHGDelay поступит два или более сигнала, оцифрован будет только сигнал с большей амплитудой. Для того, чтобы получить амплитуду каждого сигнала, необходимо калибровка для каждого канала HG к ToT и LG к ToT. Для этого в программный комплекс Unpacking была включена возможность автоматической калибровки с созданием базы данных, где хранятся все параметры фитирования для каждого канала.



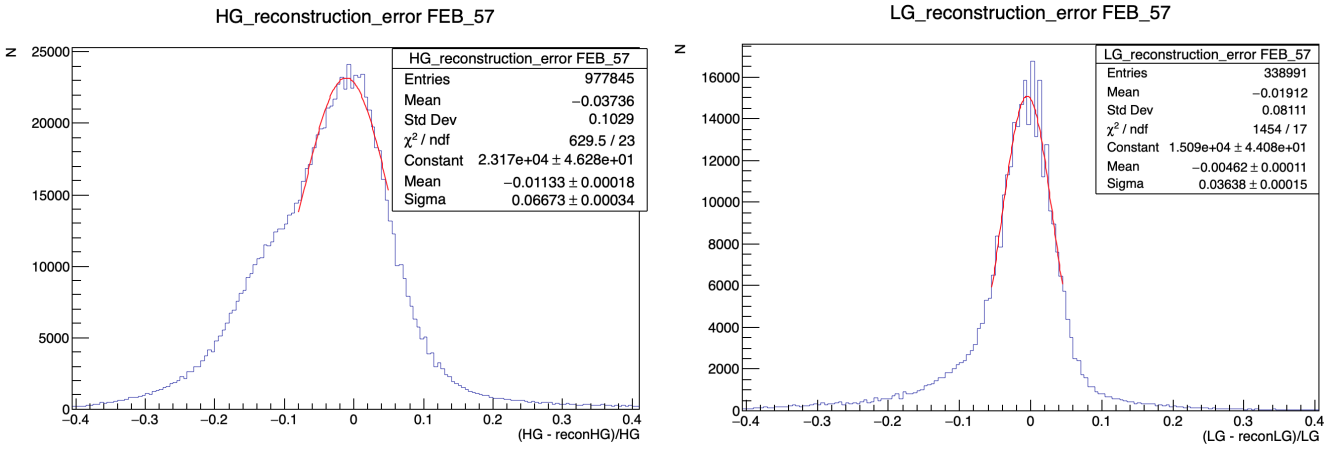
а б

Рис. 4.25. Пример калибровки амплитуды к времени над порогом. а – Калибровка HG к ToT. б – Калибровка LG к ToT.

Фитирование зависимости амплитуды от ToT происходит в два этапа. Первым этапом определяются границы фитирования прямыми и полиномом 4 степени. Второй этап заключается непосредственно в определении параметров фитировок с помощью программного комплекса ROOT. Следует также отметить, что для каждого значения HG, LG и порога регистрации на запись (ASICs и ПЛИС) необходимо проводить свою калибровку. Для восстановления амплитуды сигнала для каждого канала используются параметры из базы данных, полученные при анализе собранной статистики. На рисунке 4.25 изображены примеры фитирования зависимости HG и LG от ToT.

Данные калибровки позволяют восстанавливать амплитуду событий в пределах динамического диапазона кремневых фотоумножителей, что в случае с Hamamatsu MPPCs S12571-025C является 1200 ф.э. Следующим важным моментом являлось определение погрешности восстановления амплитуды, используя

ToT. Результаты анализа представлены на рисунке 4.26



а б

Рис. 4.26. Погрешность восстановления амплитуды сигнала, при использовании данных времени сигнала над порогом. а – Ошибка восстановления HG из ToT. б – Ошибка восстановления LG из ToT.

Погрешность восстановления HG каналов АЦП из времени сигнала над порогом равна 6.7%, а LG каналов АЦП из времени сигнала над порогом равна 3.6%. Данная погрешность, из-за нелинейной зависимости ToT от амплитуды, изменяется в зависимости от уровня сигнала, Данная зависимость представлена на рисунке 4.27.

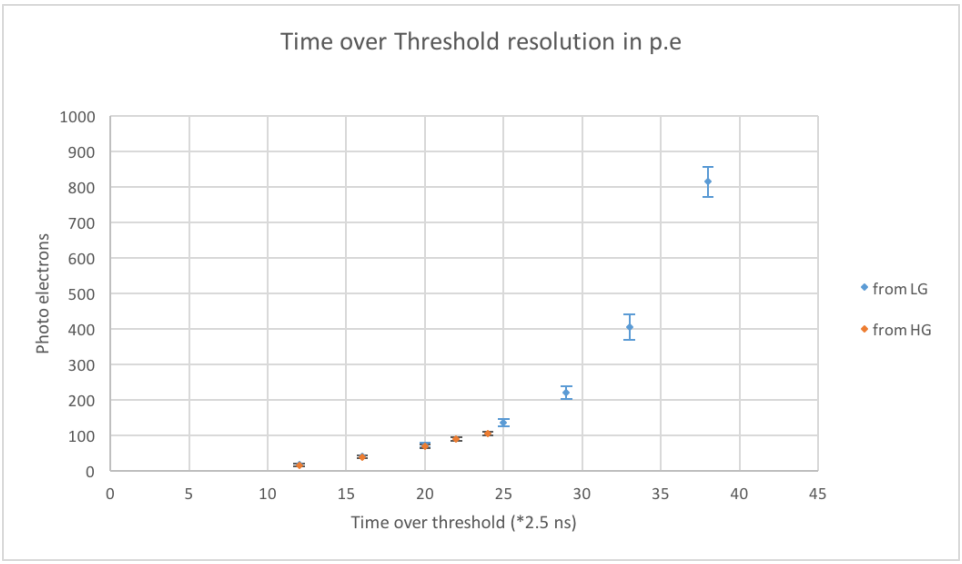
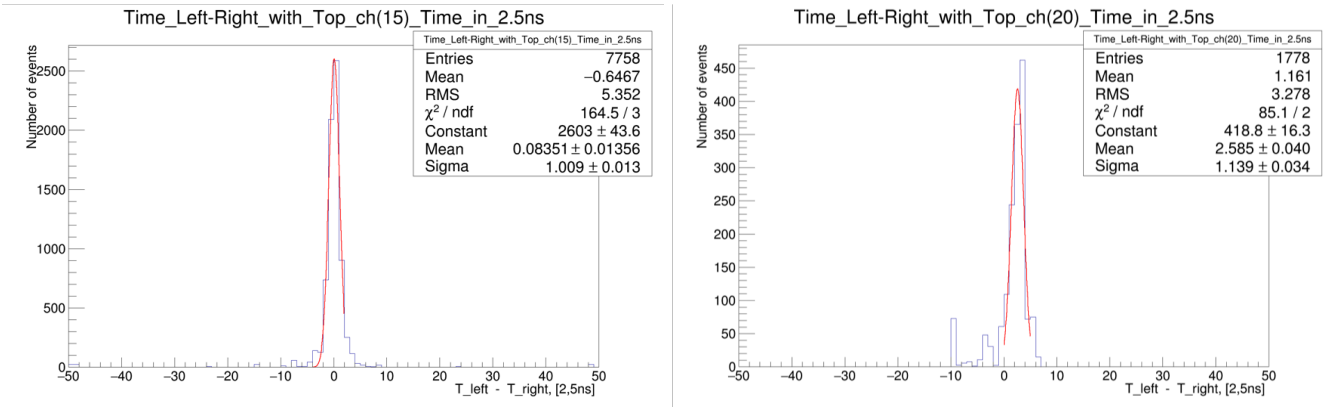


Рис. 4.27. Вычисление погрешности восстановления амплитуды сигнала из данных ToT в зависимости от амплитуды.

4.4.6. Вычисление временного разрешения

Для определения временного разрешения сцинтилляционных счетчиков с электроникой FEBs был проведен анализ по вычислению временной разности

срабатывания разных каналов на горизонтальном сцинтилляционном счетчике. Дополнительным триггером в данном случае служил вертикальный сцинтилляционный счетчик.



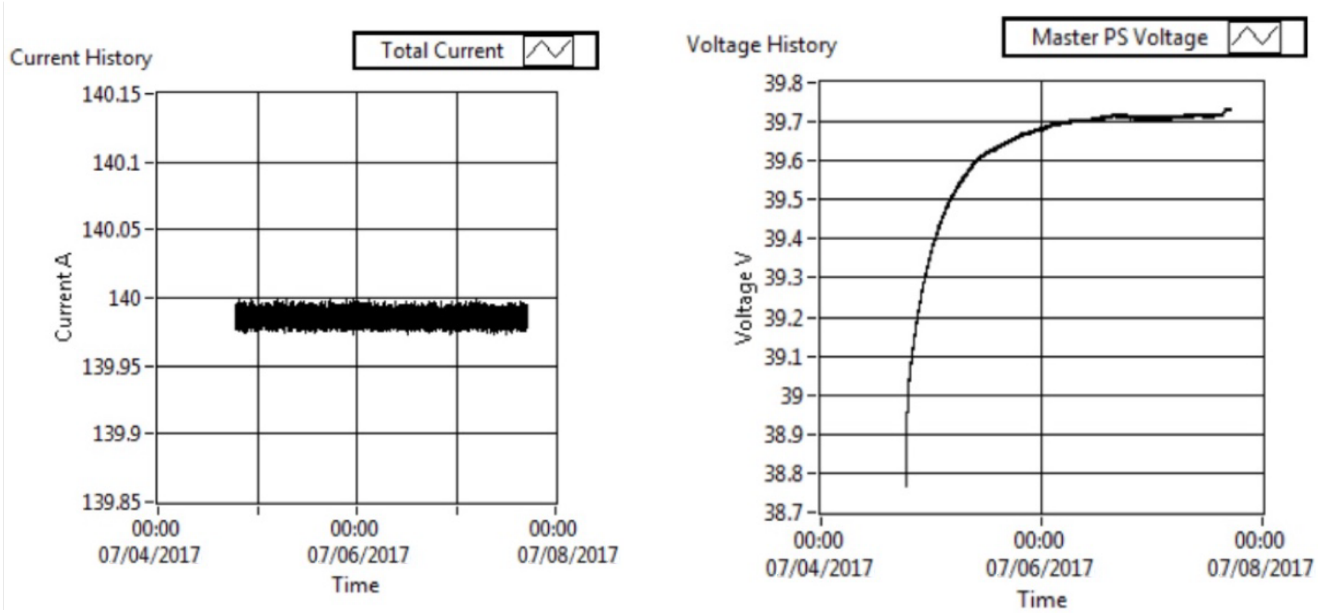
а б

Рис. 4.28. Пример вычисления временного разрешения для 17 сцинтилляционного модуля детектора BabyMIND. а – Вычисление временного разрешения для канала 15. б – Вычисление временного разрешения для канала 20.

Вычисленное временное разрешение $\sigma = 2,7$нс. С помощью полученных данных имеется возможность проверить скорость распространения света в спектросмещающем волокне как разницу длины фибры, деленную на разницу во времени срабатывания каналов. Вычисленная скорость света в спектросмещающем волокне ~ 16 см/сек, что согласуется со спецификацией Kuraray Y11.

4.4.7. Исследование стабильности системы магнитных модулей

За производство и тестирование магнитных модулей отвечала магнитная команда CERN magnet во главе с Алексеем Дударевым. Основной задачей тестирования являлось проведение сравнительного анализа результатов моделирования и реальных данных. Магнитные модули достигали проектной спецификации 1,5 Т при токе 140 А. Магнитные поля рассеяния, измеренные на расстоянии 1 мм от поверхности магнитных модулей, равнялись 1 мТ. Потребляемая мощность, измеренная в ЦЕРНе для 33 магнитных модулей, составила 11,5 кВт. Ток и напряжение достигают стабильных рабочих значений примерно через 30 часов, что показано на рисунке 4.29. На рисунке 4.29(а) показана стабильность источника питания при работе, а на 4.29(б) правом рисунке показано, как изменяется напряжение в зависимости от времени из-за нагрева катушек при фиксированном токе 140 А.



а б

Рис. 4.29. Измерения стабильности источника питания магнитных модулей Baby MIND. а – Изменения тока в магнитных катушках в зависимости от времени. б – Изменения подаваемого напряжение в зависимости от времени из-за нагрева катушек при фиксированном токе 140 А.

4.4.8. Реконструкция мюонных событий

Первоначальной задачей реконструкции было восстановление треков единичных мюонов, для этого использовались данные мюонных тестов различных зарядов и импульсов. Перед реконструкцией трека, заряда и импульса на данные событий накладывались определенные условия:

1. регистрация событий в пределах временного окна в 100 нс от времени срабатывания триггера (детектора TASD);

2. в детекторе TASD события 4 каналов во временном окне были с амплитудой более 10 фотоэлектронов;

3. было совпадение на горизонтальных счетчиках Baby MIND с обеих концов во временном окне;

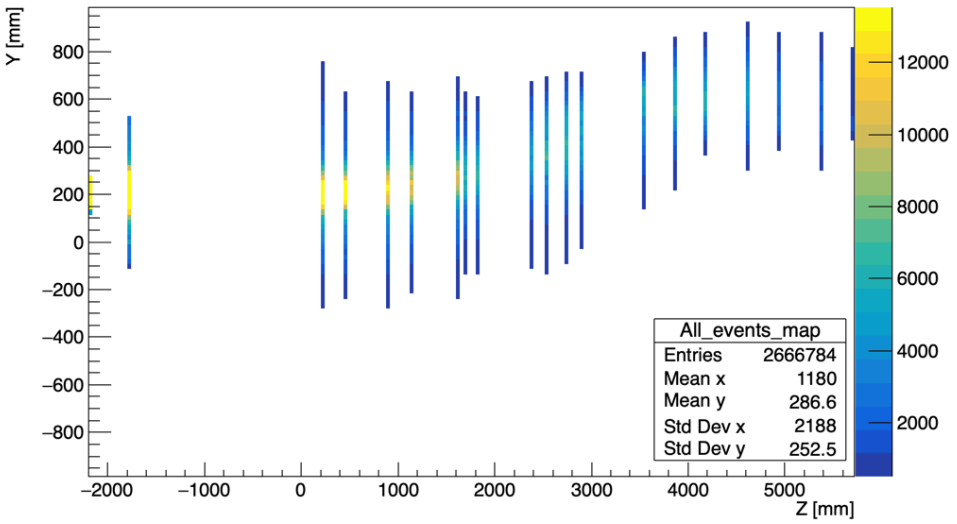
4. амплитуда событий на горизонтальных счетчиках более 5 фотоэлектронов;

5. события в вертикальных сцинтилляционных счетчиках Baby MIND во временном окне;

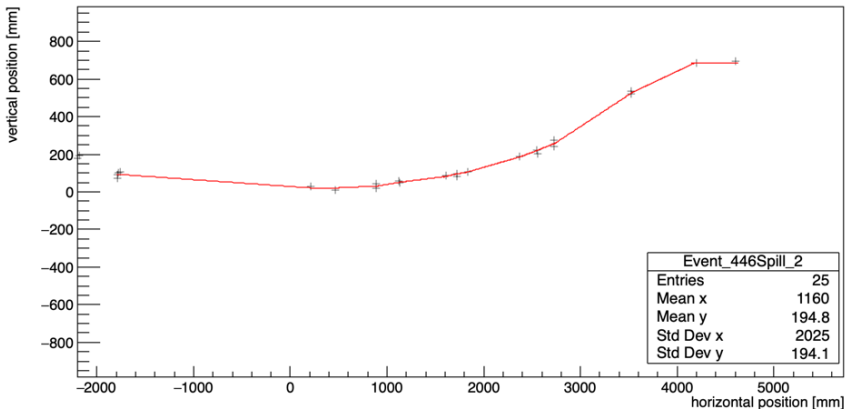
6. амплитуда вертикальных сцинтилляционных счетчиков Baby MIND более 3 фотоэлектронов;

7. события зарегестрированы как минимум в 4х сцинтилляционных модулях;

С использованием данных, прошедших данный отбор, создавался трек каждого события. Создавалась карта всех событий, отдельные треки использовались для определения заряда и импульса каждого мюона. В анализе принимали данные с прямым и обратном подключением магнита, что позволяет менять полярность намагничивания магнитных модулей. На рисунках 4.30 – 4.33 показаны восстановленные треки мюонных событий и карты событий для μ^+, μ^- с заданными импульсами в 1,5 ГэВ/с.



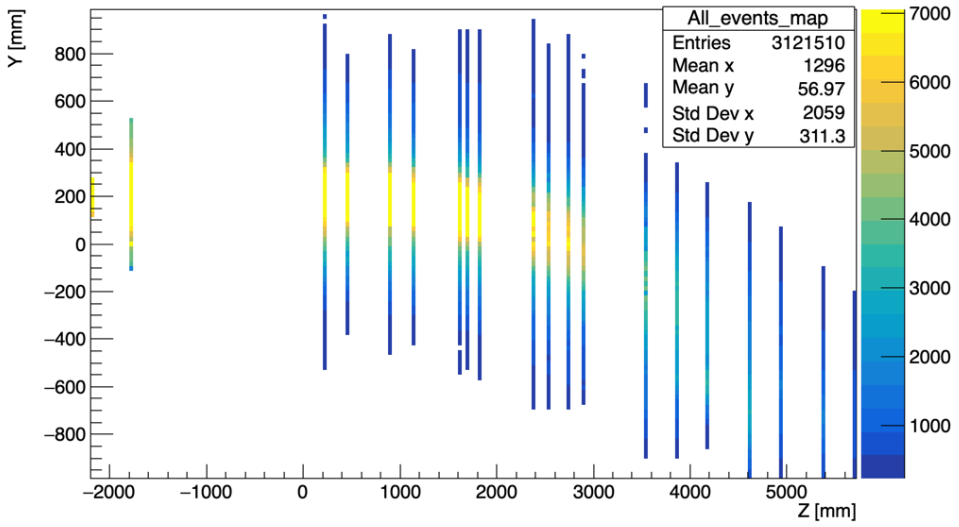
а



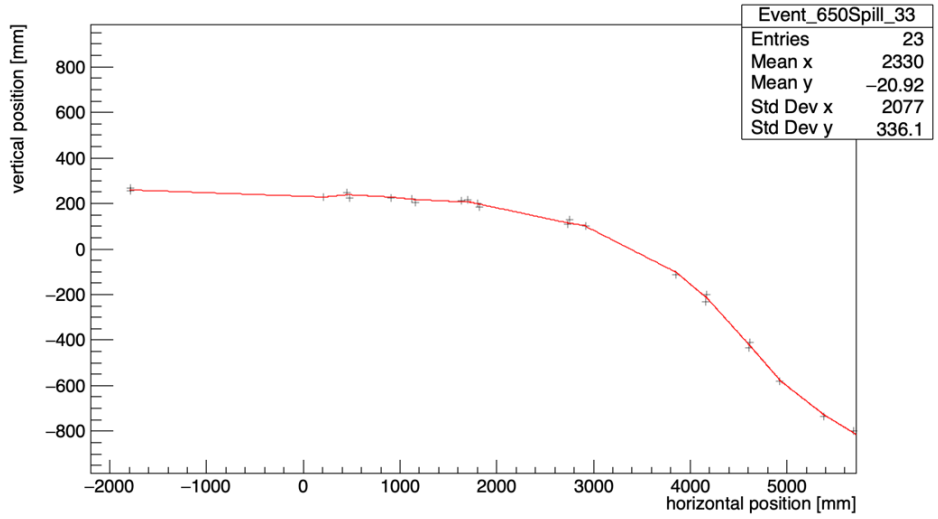
б

Рис. 4.30. Карта всех событий (а) и пример трека (б) регистрируемых μ^+ с импульсом 1,5 ГэВ/с для обратного подключения магнита.

Более сложной задачей является восстановление треков нескольких близких по времени событий (рис. 4.34). Восстановление треков данных событий



а

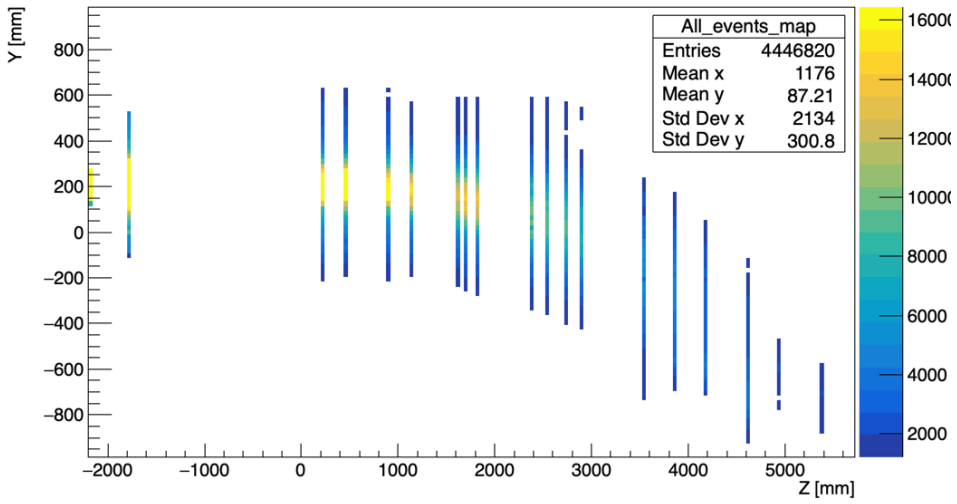


б

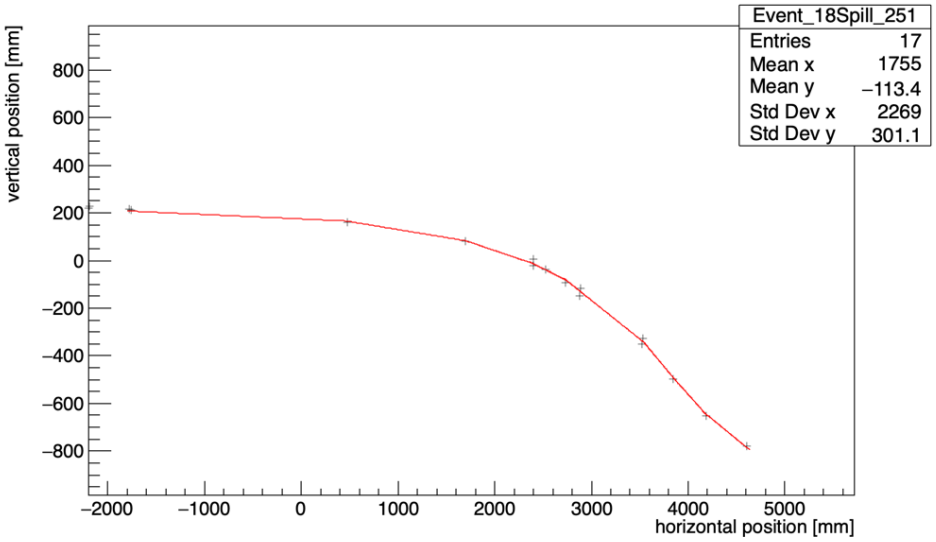
Рис. 4.31. Карта всех событий (а) и пример трека (б) регистрируемых μ^- с импульсом 1,5 ГэВ/с для обратного подключения магнита.

происходит в более узком временном окне и используется Kalman fitter из программного комплекса RecPack.

Основной сложностью можно назвать то, что программное обеспечение может только реконструировать треки и не может реконструировать события ливня. Любая реконструкция ливня должна иметь более комплексный подход, но иногда восстановление ливня как трека вернет неправильное значение заряда и импульса. Это означает, что события, содержащие ливни, должны быть удалены до проведения любого анализа с помощью идентификации ливней (не-мюонов) из мюонов (не-ливней).



а



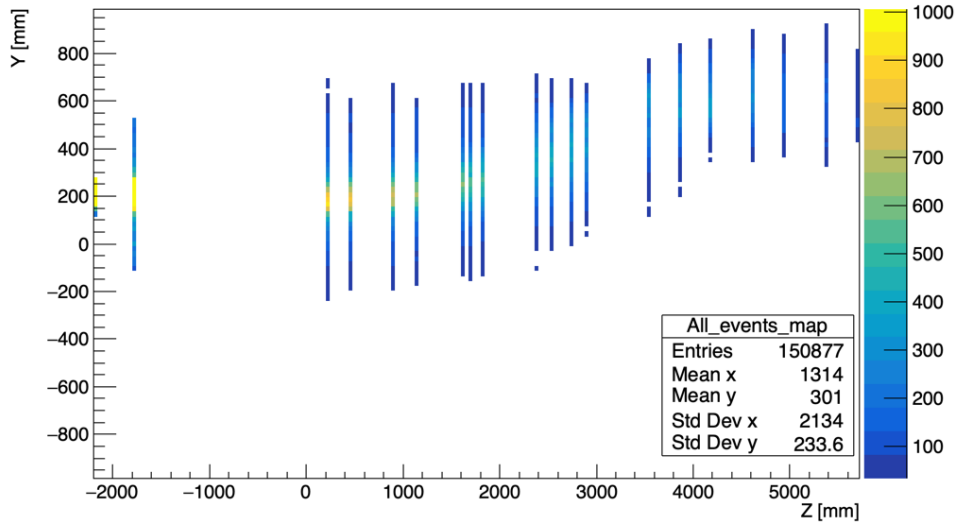
б

Рис. 4.32. Карта всех событий (а) и пример трека (б) регистрируемых μ^+ с импульсом 1,5 ГэВ/с для прямого подключения магнита.

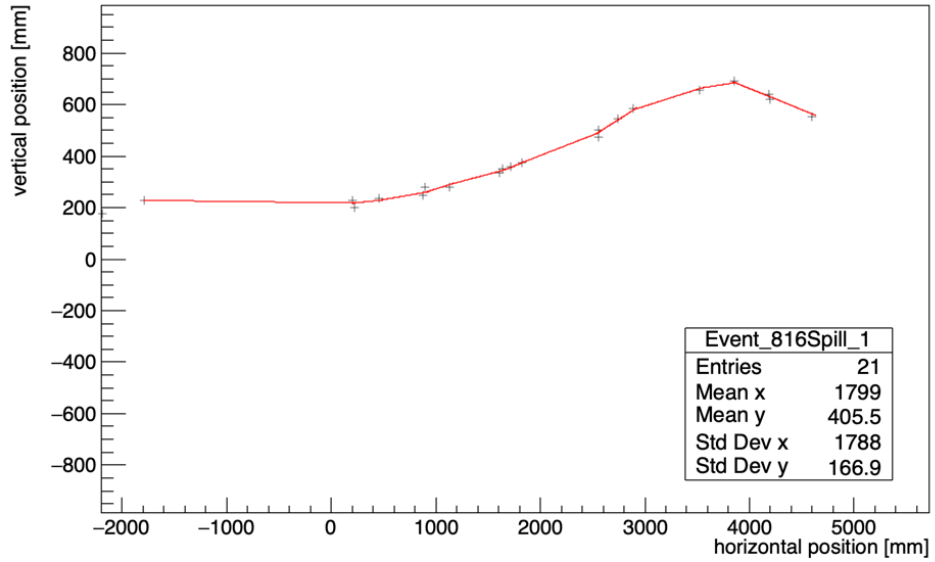
4.4.9. Реконструкция импульсов регистрируемых мюонов

Существуют два разных подхода для оценки энергии регистрируемых мюонов. Первый способ основан на энергии, потраченной для прохождения мюоном через детектор Baby MIND. Данный способ применим для частиц, полностью остановленных в детекторе, и имеет ряд ограничений, связанных с положением и количеством сцинтилляционных модулей.

Второй способ связан с оценкой отклонения мюонов в магнитном поле. Для реконструкции заряда в данном случае используется программный комплекс Kalman fitter RecPack. Но и данный метод имеет ограничения, связанные с количеством сцинтилляционных модулей, зарегистрировавших трек. В случае, если сигнал был получен с 8 и менее сцинтилляционных модулей используется



а



б

Рис. 4.33. Карта всех событий (а) и пример трека (б) регистрируемых μ^- с импульсом 1,5 ГэВ/с для прямого подключения магнита.

алгоритм "самостоятельной оценки импульса".

Реконструкция энергии регистрируемых мюонов методом Kalman fitter

Программный комплекс Kalman fitter RecPack производит восстановление трека, импульса и заряда частицы в несколько этапов. Первым этапом восстановления заряда и импульса зарегистрированных событий с ускорителя идет поиск одиночных треков. На данном этапе отделяются все события, создавшие ливни. Треки создавшие ливни анализируются отдельно от единичных треков. Второй этап заключается в определении изначальной точки в первом модуле,

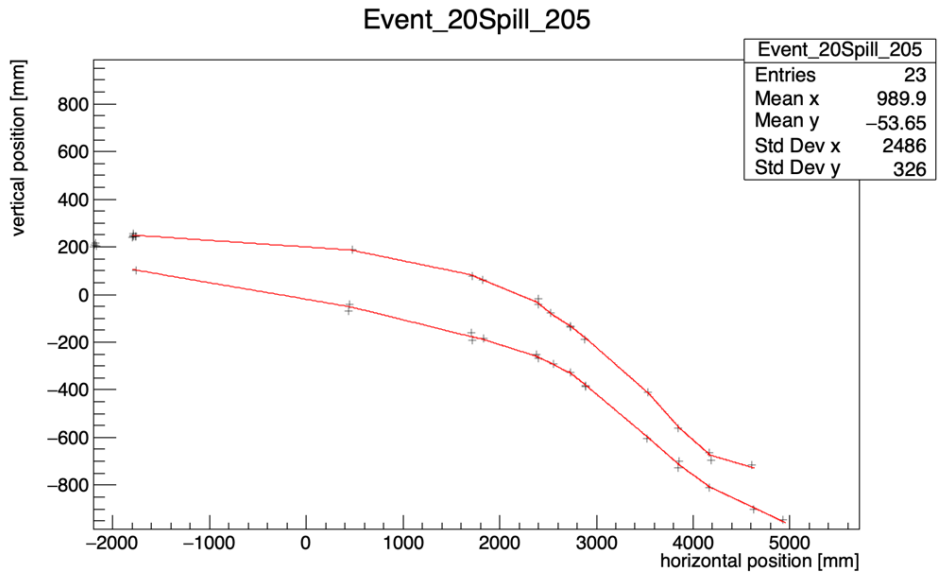


Рис. 4.34. Пример двух событий произошедших во временном окне в 100 нс.

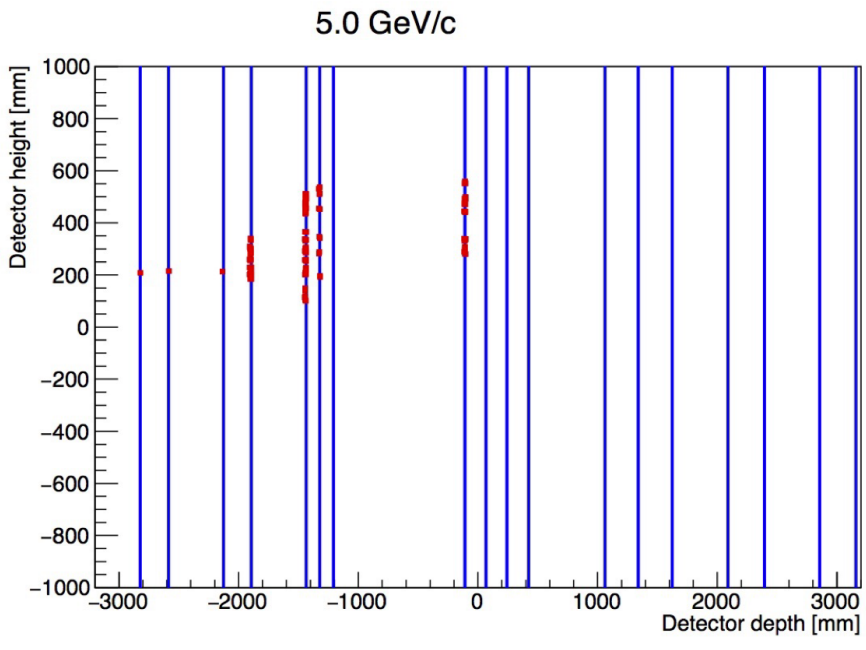


Рис. 4.35. Пример события адронного ливня.

в данном тесте это событие в модуле TASD. Далее идет поиск события во втором модуле детектора TASD. Из полученных данных извлекается угол вылета мюоноподобного события с ускорителя. Третьим этапом строятся все возможные треки между модулями TASD и модулями детектора Baby MIND. Данная процедура продолжается от модуля к модулю. Во время построения трека перебираются все возможные варианты построения треков в заданом временном диапазоне (данный этап проходит только толя треков, создавших ливень).

Программный комплекс, перебирая все возможные варианты треков, пытается восстановить заряд и импульс зарегистрированной частицы и сверяет все возможные треки и восстановленные значения заряда и импульсов между собой. Перебор и сверка возможных треков использует метод χ^2, рисунок 4.36. Данный метод встроен в Kalman fitter, он ищет наиболее подходящие точки трека, а неподходящие точки сохраняет для следующей итерации восстановления треков частиц. На протяжении всего трека Kalman fitter оценивает импульс и заряд частицы и использует данную информацию для финального этапа фитирования трека. Данный метод может быть использован для восстановления треков нескольких частиц, но данное использование подразумевает увеличение количества итераций восстановления треков.

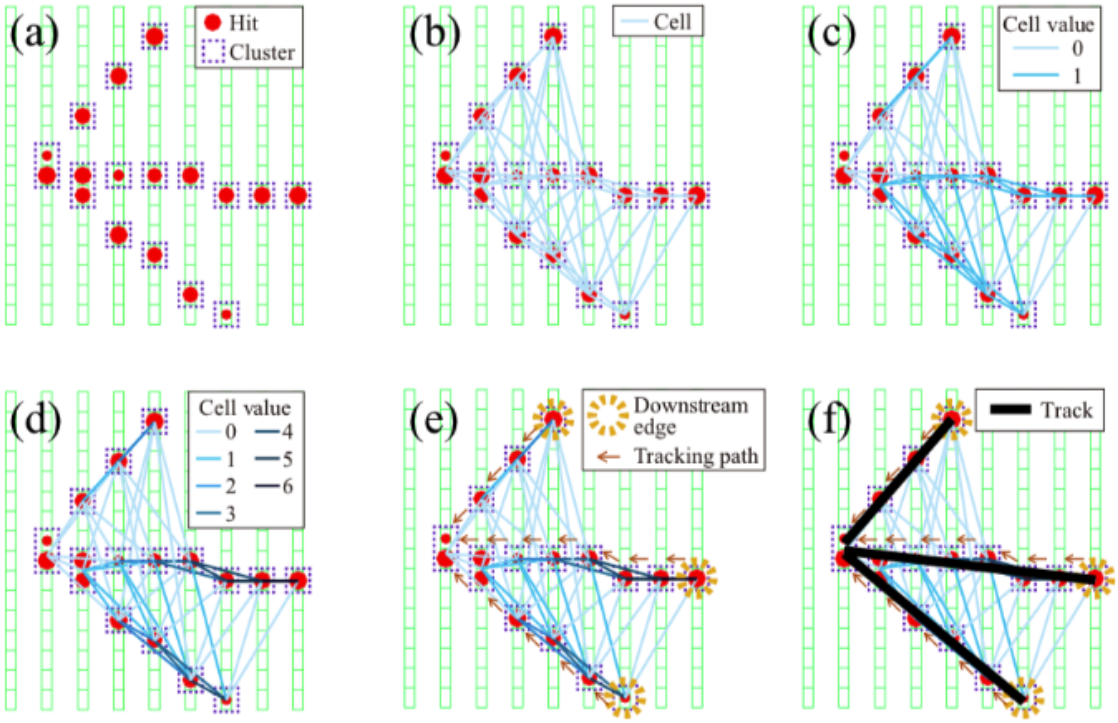


Рис. 4.36. Примеры алгоритма перебора всех возможных треков и восстановление предполагаемого истинного.

В программном комплексе RecPack для восстановления трека используется полное уравнение спирали (уравнения 4.3 - 4.5 и 4.6 - 4.8), имеющее в общей сложности девять параметров и принимающее десять измерений:

$$x(t) = acos(bt + c) + d \tag{4.3}$$

$$y(t) = esin(ft + g) + h \tag{4.4}$$

$$z(t) = kt \tag{4.5}$$

Спираль связана с физическими величинами как:

$$x(\phi) = x_0 + d_p cos(\phi_0) + \frac{\alpha}{\kappa}(cos(\phi_0) - cos(\phi_0 + \phi)) \tag{4.6}$$

$$y(\phi) = y_0 + d_p sin(\phi_0) + \frac{\alpha}{\kappa}(sin(\phi_0) - cos(\phi_0 + \phi)) \tag{4.7}$$

$$z(\phi) = z_0 + d_z - \frac{\alpha}{\kappa} tan(\lambda\phi) \tag{4.8}$$

где $\overrightarrow{X} = (x_0; y_0; z_0)$ – произвольная точка поворота спирали; d_p – расстояние от спирали до точки поворота в плоскости xy; ϕ_0 – азимутальный угол от точки поворота относительно центра спирали; κ – поперечный импульс; d_z –расстояние от спирали в точке поворота в направлении z; $tan\lambda$ – угол падения. Угол отклонения ϕ измеряется от точки поворота и определяет положение заряженной частицы на оси. Переменная κ может быть использована для связи с поперечным импульсом частицы p_T с магнитным полем, как:

$$\kappa = \frac{Q}{p_T} \tag{4.9}$$

$$\rho = \frac{\alpha}{\kappa} \tag{4.10}$$

где Q – заряд частицы, ρ – радиус спирали, и $\alpha \equiv \frac{1}{cB}$ – зависимая от магнитного поля константа, где c в качестве константы и B-напряженность магнитного поля. Полный импульс частицы может быть получен как:

$$\overrightarrow{p} = -\frac{Q}{\alpha}\frac{d\overrightarrow{X}}{d\phi} = \frac{1}{|\kappa|}\begin{pmatrix} -sin(\phi_0 + \phi) \\ cos(\phi_0 + \phi) \\ tan(\lambda) \end{pmatrix} \tag{4.11}$$

На практике данное фитирование также учитывает потери энергии в детекторе и многократное рассеяние при расчете значения χ^2. Многократное рассеяние в методе Kalman рассчитывается в предположении погрешности изме-

рения точки регистрации частицы, что означает, что каждая точка $\overrightarrow{X}$ имеет некую погрешность регистрации и каждая данная точка связана со следующей через экстраполяцию спирального уравнения, а погрешности определения положений связаны. В случае, если восстановление траектории частицы с помощью спирали возможно, RecPack возвращает восстановленную траекторию события, импульс и заряд частицы. Однако для мюонов с низкой энергией данное фитирование невозможно, что приводит к использованию других методов.

Реконструкция мюонов низких энергий

Следующий метод заключается в использовании силы Лоренца (рис. 4.37). Сила, приложенная к частице, движущейся в магнитном поле, задается силой Лоренца:

$$\overrightarrow{F} = q\frac{\overrightarrow{\upsilon} \times \overrightarrow{B}}{c} \tag{4.12}$$

где c-скорость света в вакууме, $\overrightarrow{\upsilon}$-скорость, q-заряд и $\overrightarrow{B}$-вектор магнитного поля.

Согласно второму закону Ньютона:

$$\overrightarrow{F} = m\overrightarrow{a} = q\frac{\overrightarrow{\upsilon} \times \overrightarrow{B}}{c} \tag{4.13}$$

Из (4.13) следует:

$$\overrightarrow{p} = q\frac{\overrightarrow{l} \times \overrightarrow{B}}{c} \tag{4.14}$$

где $\overrightarrow{p}$ - импульс частицы, $\overrightarrow{l} = \overrightarrow{X} - \overrightarrow{X_0}$ - вектор соединяющий начальное и конечное положение частицы при переходе через магнитные модули. В предположении малого угла отклонения (4.14) можно выразить, как:

$$p = 0.3QB_{\perp}\frac{|\overrightarrow{l}|}{\phi} = 0.3QB_{\perp}R \tag{4.15}$$

где p – импульс в МэВ/с, Q – заряд в электронах, $B_{\perp}$ – перпендикулярная составляющая магнитного поля в Тл, R – радиус изгиба в метрах. Реконструкция импульса происходит при каждом прохождении частицы через магнитные модули.

Для восстановления значений импульсов с низкими энергиями были так-

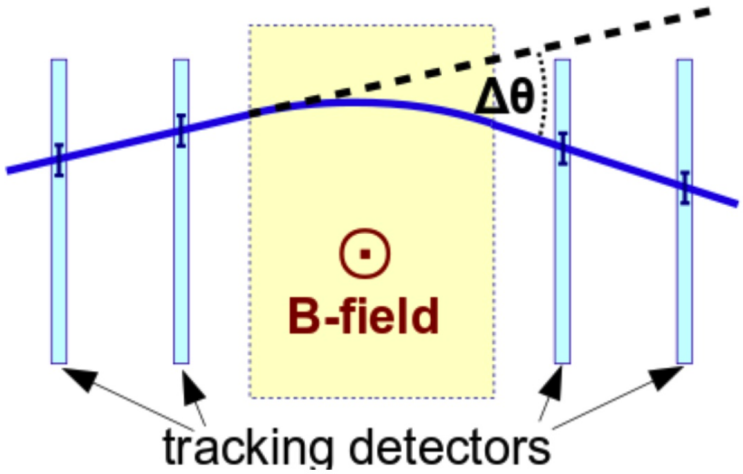


Рис. 4.37. Изгиб траектории в магнитном модуле и регистрация трека в сцинтилляционных модулях.

же использованы методы, использующие длину трека до остановки в детекторе. Данный метод заключается в использовании аппроксимации непрерывного замедления (continuous slowing down approximation – CSDA). CSDA основан на знании потерь энергии в материале, предполагая, что частица оставляет среднюю энергию на протяжении всего пути в металлических модулях, что позволяет восстанавливать энергии остановившихся мюонов. Диапазон частиц в детекторе может быть использован для получения начальной оценки момента частицы, и неопределенность, связанная с этой оценкой, зависит от количества железных пластин между конкретными модулями сцинтиллятора. Например, если между сцинтилляторами есть три железных модуля, то погрешность импульса оценивается примерно $\sqrt{2} \times 90$ МэВ/с.

4.4.10. Реконструкция заряда

На рисунках 4.30 – 4.33 по примерам зарегистрированных событий и карт событий можно оценить заряд мюона (μ^+ или μ^-), однако учитывая многократное рассеяние от модуля к модулю для некоторых событий отклонение в магнитных модулях может иметь противоположный знак. Для этого при анализе траектории зарегистрированной частицы происходит анализ распределения углов отклонений, а выбор выбор знака заряда происходит из соотношения вероятностей (рис. 4.38).

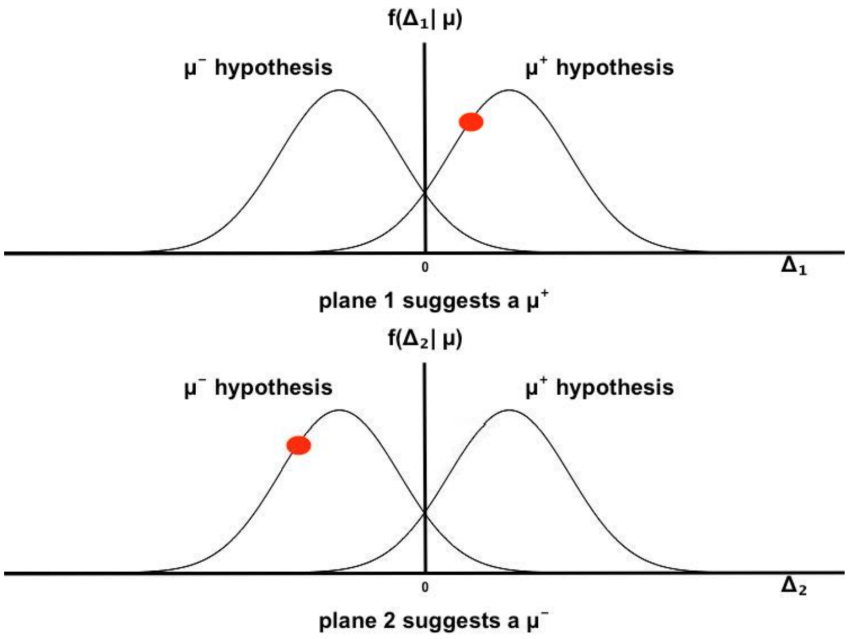


Рис. 4.38. Примеры распределения углов для положительных и отрицательных мюонов и критерии восстановления заряда.

Алгоритм восстановления заряда возвращаем μ^-

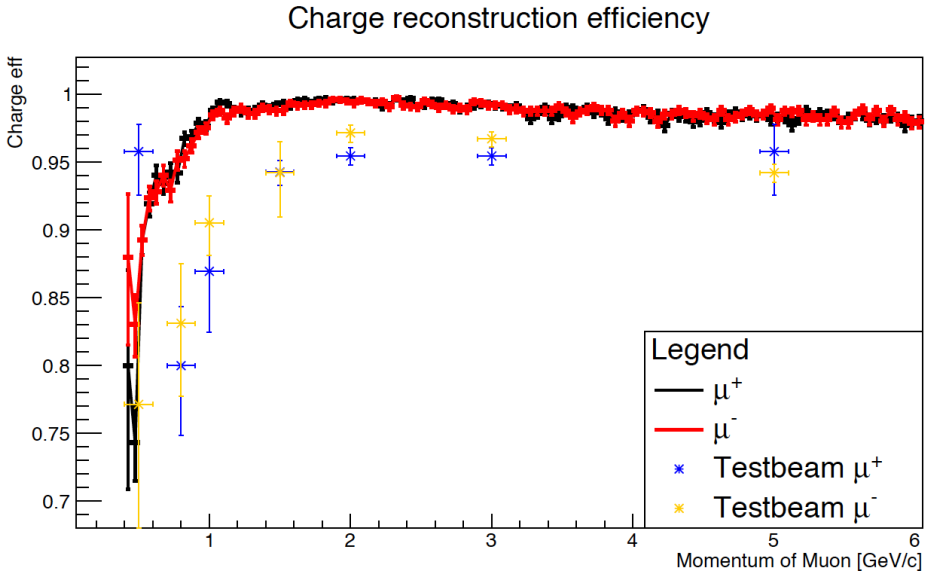
$$\frac{f_{\mu^-}(\Delta_1)}{f_{\mu^+}(\Delta_1)} > \frac{f_{\mu^+}(\Delta_2)}{f_{\mu^-}(\Delta_2)} \tag{4.16}$$

Алгоритм восстановления заряда возвращаем μ^+

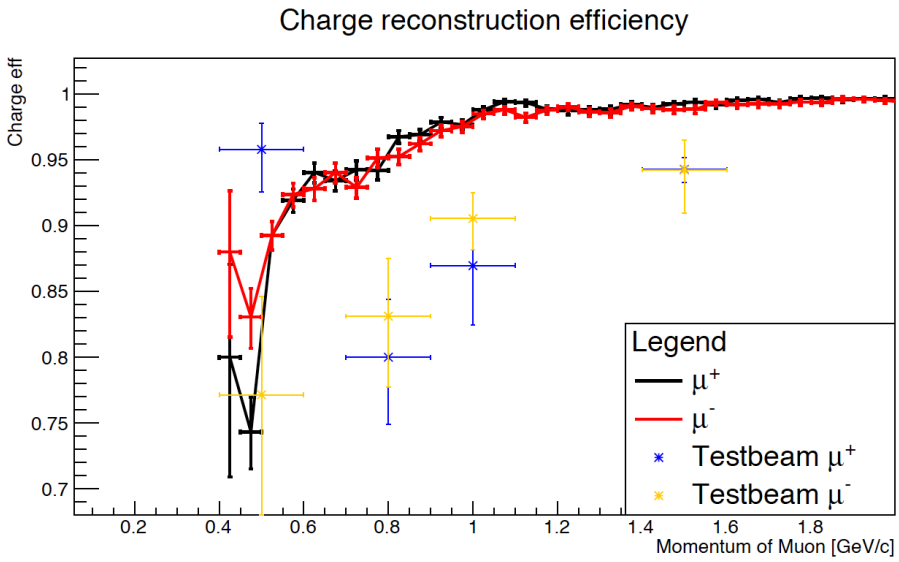
$$\frac{f_{\mu^-}(\Delta_1)}{f_{\mu^+}(\Delta_1)} < \frac{f_{\mu^+}(\Delta_2)}{f_{\mu^-}(\Delta_2)} \tag{4.17}$$

4.4.11. Результаты реконструкции зарядов и энергий мюонов

На рисунке 4.39 показаны основные результаты анализа данных, набранных в хоте финального этапа тестов детектора Baby MIND в ЦЕРНе. Данные графики представляют сравнение результатов моделирования методом Монте-Карло и реальных данных с ускорителя. Полученные результаты подтверждают, что полная цепочка анализа данных работает, однако результаты показывают более низкую эффективность, чем ожидалось от моделирования. Анализ реконструированных треков позволил сделать вывод, что события представляют собой смесь мюонов и пионов даже после первоначального отбора мюонов.



а



б

Рис. 4.39. Полученная эффективность восстановления заряда в детекторе Baby MIND для мюонов с импульсами 0.4 – 6 ГэВ/с.

4.5. Выводы по Главе 4

Проведенные тесты детектора и компонентов детектора Baby MIND в экспериментальной зоне T9 ЦЕРНа позволили оптимизировать электронику Baby MIND FEB. На основе полученных данных была разработана система калибровки кремневых фотоумножителей и электроники Baby MIND FEB. Для получения значений положения пьедестала был разработан механизм калибровки и анализа данных с SiPM. Все полученные результаты были использованы в разработке финальной конфигурации детектора и DAQ системы.

Данные с тестирования магнитных модулей по отклонению заряженных мюонов показали возможность использования магнитных модулей нового дизайна. Анализ собранных данных подтвердил возможность использования созданной DAQ системы с уровнем электромагнитного шума экспериментальной зоны T9 в непосредственной близости к магнитным модулям.

Финальный этап тестирования детектора Baby MIND в экспериментальной зоне T9 позволил провести повторное тестирование каждого компонента детектора и устранить все обнаруженные дефекты. В ходе данных тестов был произведен поиск оптимальных настроек компонентов детектора, проведена калибровка всех SiPM в детекторе и вычислено временное разрешение сцинтилляционных счетчиков в системе DAQ детектора Baby MIND. Полученные данные позволили проверить алгоритмы реконструкции импульсов и зарядов мюонов, внести ряд изменений в конструкцию на основе результатов тестов.

Глава 5

Результаты полученные на нейтринном пучке J-PARC

5.1. Введение к главе

В эксперименте T2K нейтрино получаются с помощью пучка протонов с энергией 30 ГэВ/с, падающего на графитовую мишень для получения пионов, которые затем распадаются с образованием нейтрино со спектром потока, данным в публикации [113]. Детектор INGRID on-axis [31] выполняет измерения направления и потока пучка. В эксперименте ND280 используется пучок под углом 2.5° к оси на расстоянии 280 м, что обеспечивает более узкий энергетический спектр со смещенным энергетическим пиком на 600 МэВ, как показано на рисунке 5.1. Энергетический спектр при угле смещения 1.5° для детектора WAGASCI имеет пик с более высокой энергией, 800 МэВ 5.1.

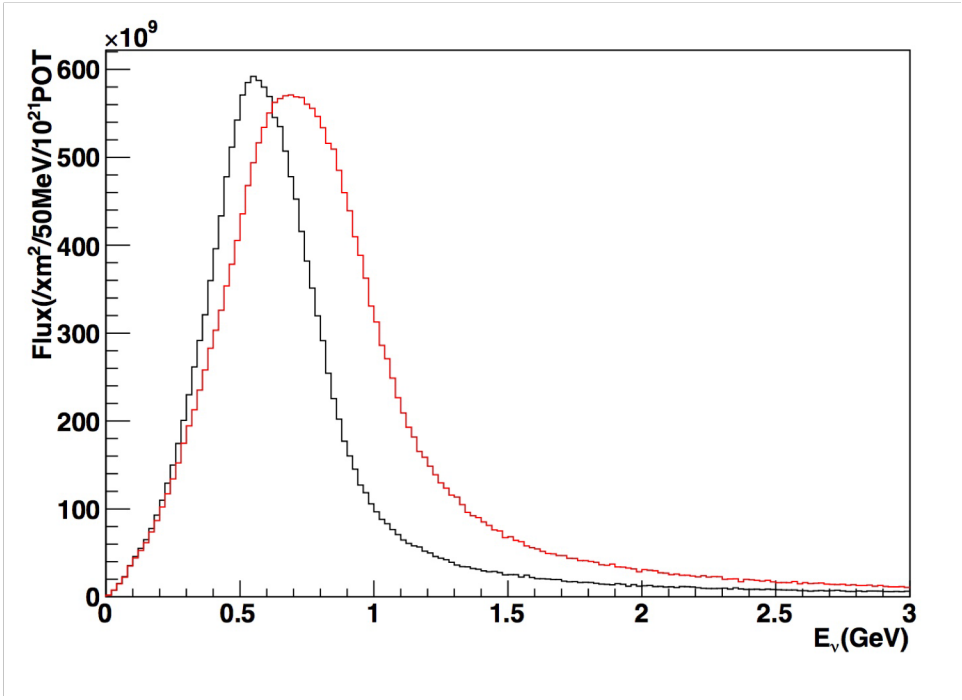


Рис. 5.1. Спектр энергии нейтрино для WAGASCI (красный, при угле смещения 1.5°) и ND280 (черный, при угле смещения 2.5°). Пиковая энергия при 1.5° градусах составляет 800 МэВ, по отношению к пиковой энергии 600 МэВ при 2.5°.

Глава 5 посвящена результатам 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. Представлены 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. Спектр нейтрино и антинейтрино при угле смещения 1.5° для детекторов WAGASCI и Baby MIND можно увидеть на рисунке 5.2. Доля мюонных антинейтрино составляет приблизительно 92% со средней энергией 1,43 ГэВ, а доля мюонных нейтрино составляет приблизительно 9% со средней энергией 0,86 ГэВ.

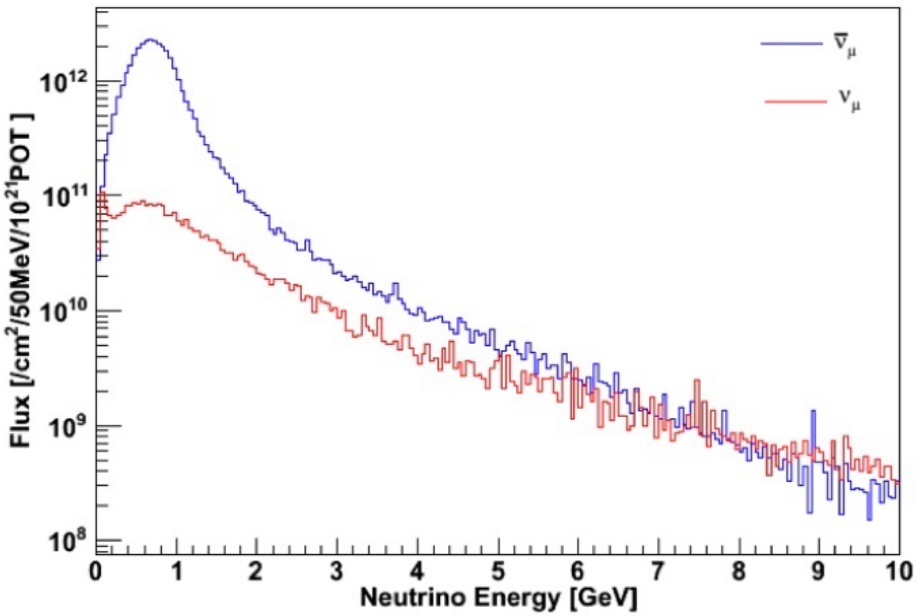


Рис. 5.2. Энергетический спектр для мюонных нейтрино и мюонных антинейтрино в пучке T2K при антинейтринной моде.

5.2. Транспортировка детектора Baby MIND из ЦЕРНа в J-PARC

Транспортировка детектора Baby MIND из ЦЕРНа (Женева, Швейцария) в J-PARC (Токай, Япония) проходила с 1 ноября 2017 года по 14 декабря 2017 года (рис. 5.3). Во время транспортировки детектор был разделен на 4 части и

помещен в специальные контейнеры. При транспортировке на каждый блок был установлен температурный сенсор, сенсор влажности и сенсор механического воздействия.

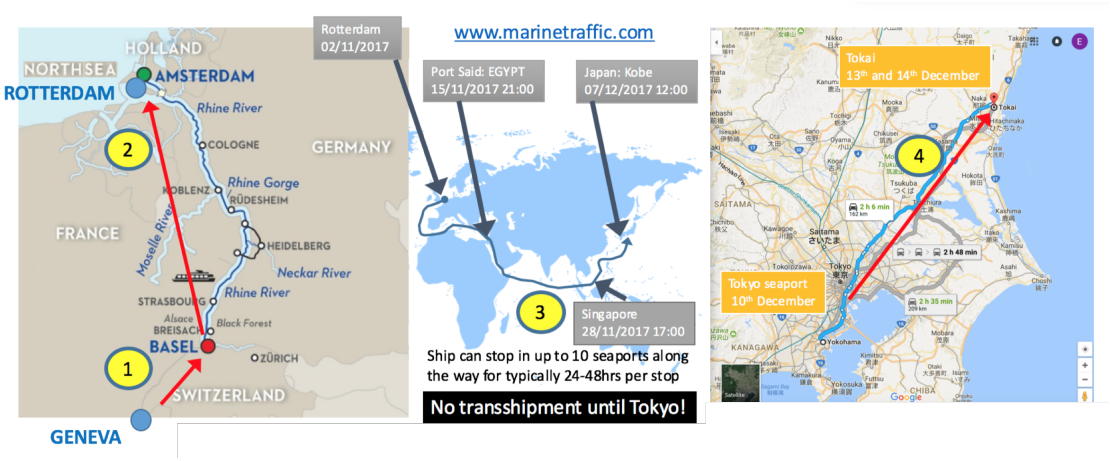


Рис. 5.3. Схема транспортировки детектора Baby MIND из ЦЕРНа в J-PARC.

5.3. Установка детектора Baby MIND в шахте детектора ND280

Шахта детектора ND280 находится в зоне сейсмической активности, что предполагает стресс-тест всех детекторов перед установкой. Данный фактор повлиял на дизайн опорных рам, используемых для установки детектора. Все симуляции были проведены с помощью специального программного обеспечения при различных возможных механических воздействиях на модули. Пример одной из симуляции показан на рисунке 5.4.

Изменения в схеме опорных рам привели к изменениям в конфигурации детектора. Финальная конфигурация из 9 опорных и функциональных блоков показана на рисунке 5.5. Данная конфигурация была обусловлена результатами симуляций методом Монте-Карло и ограниченным пространством на уровне B2 экспериментальной шахты детектора ND280.

Сборка детектора Baby MIND проходила со 2 февраля по 9 марта 2018 года в несколько этапов. Первый этап заключался в сборке и установке магнитных и сцинтилляционных модулей и проходил со 2 февраля по 13 февраля. Второй этап заключался в соединении кабелей и проходил с 14 февраля по 23 февраля. Третий этап заключался в проверке электроники с 26 февраля по 2 марта, 5.8.

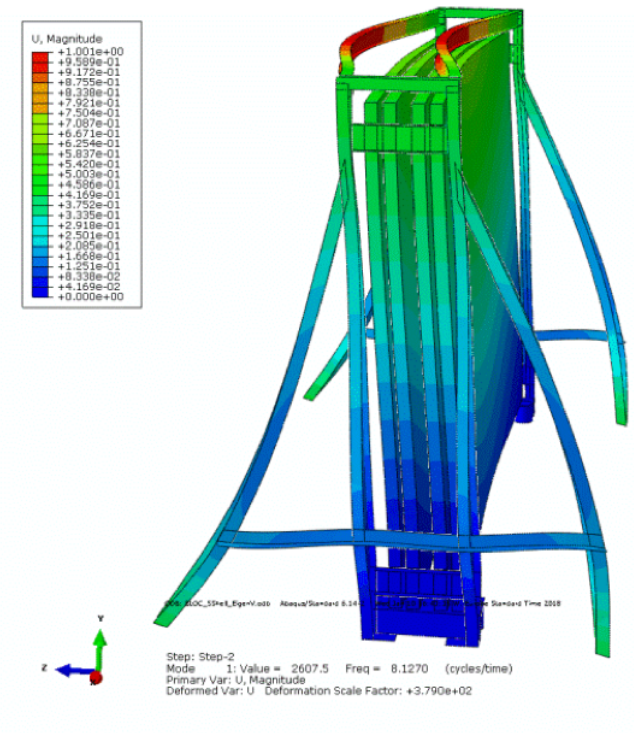


Рис. 5.4. Пример симуляции стресс теста при землетрясении с частотой 8 Гц для опорных рам детектора Baby MIND.

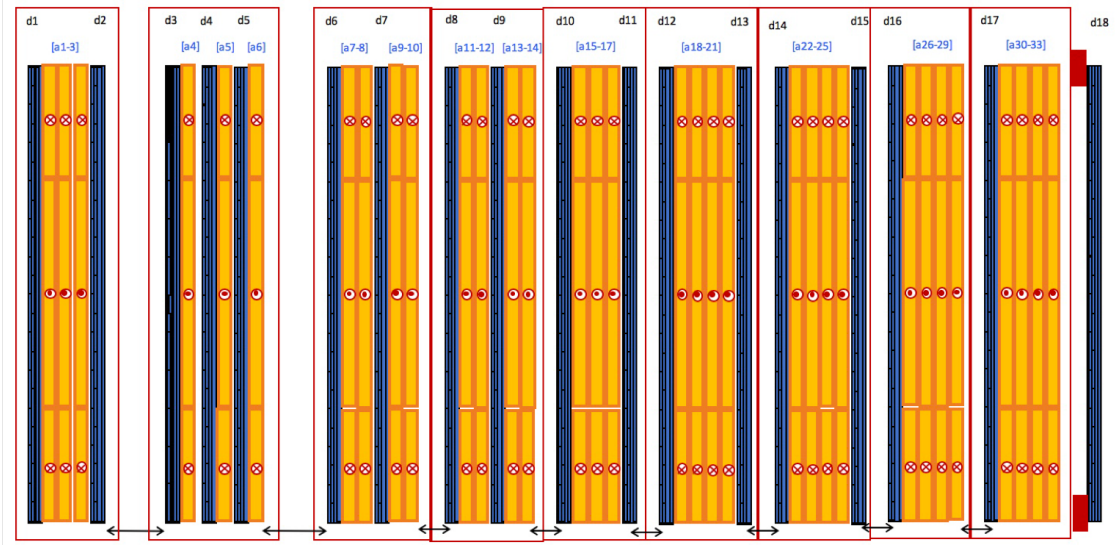


Рис. 5.5. Схематическое изображения конфигурации детектора Baby MIND.

Следующий этап – проверка работы магнита с 5 марта по 9 марта. Финальный этап – синхронизация электроники с пучком T2K.

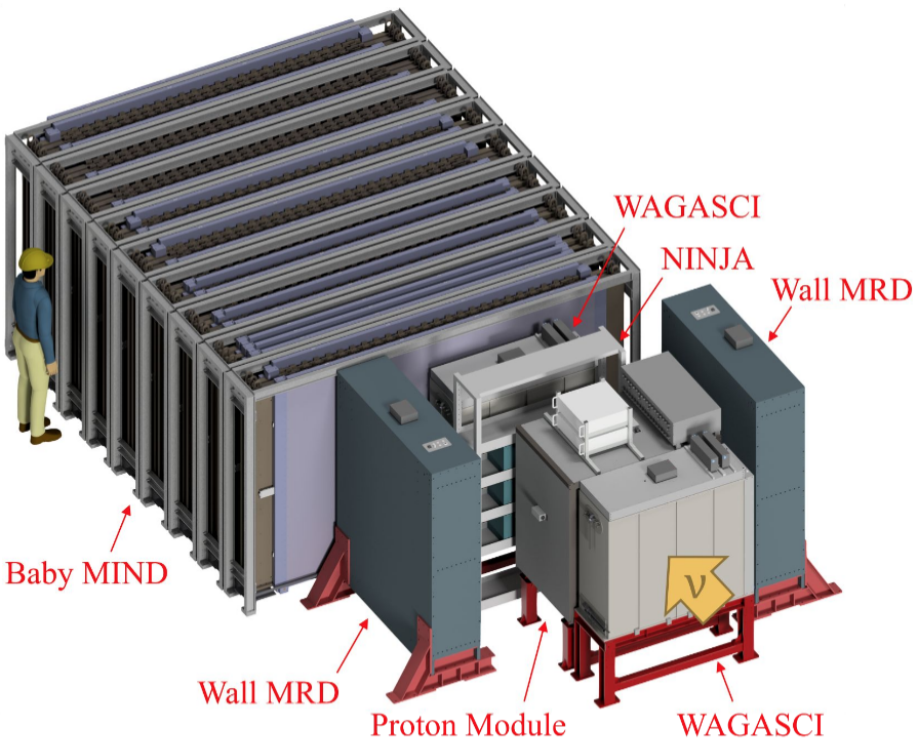


Рис. 5.6. Схематическое изображения эксперимента WAGASCI и относительное положение детекторов Baby MIND и мишеней WAGASCI.

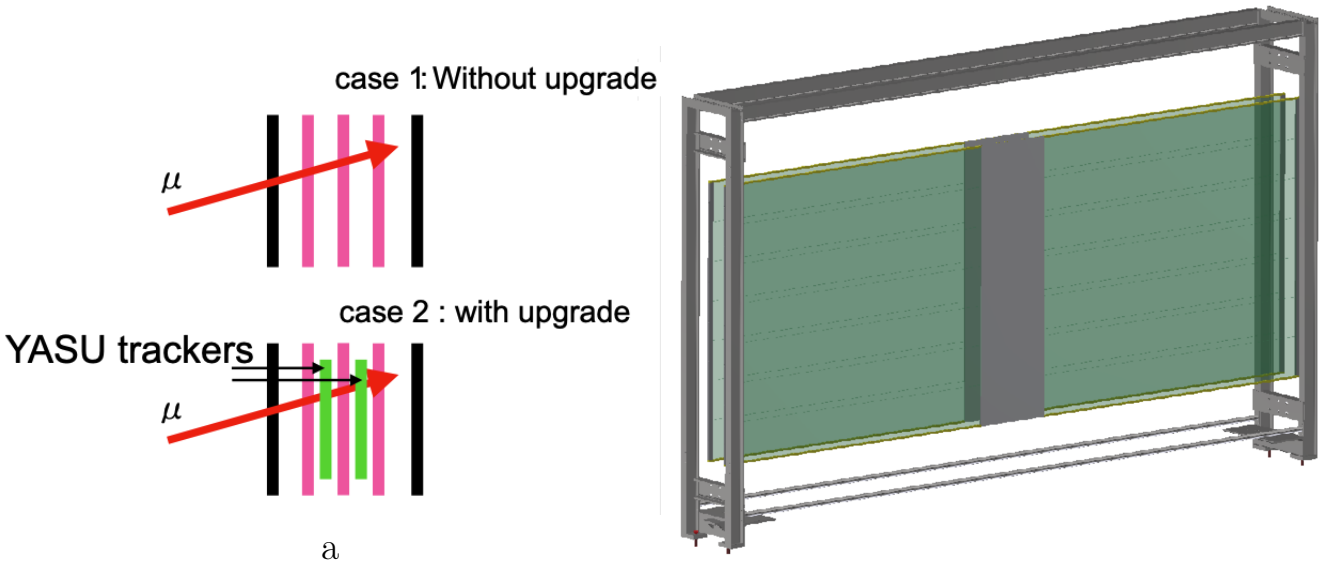
Рис. 5.7. Окончание установки сцинтилляционных и магнитных модулей детектора Baby MIND на уровень B2 в экспериментальной шахте детектора ND280. На фотографии представители компании Daichii Tekko и коллаборации Baby MIND.

Рис. 5.8. Фотография установленного детектора Baby MIND и подключенной электроники FEBs.

5.4. Модификация детектора Baby MIND, установка дополнительных сцинтилляционных модулей

Как показано на рисунке 5.5, конфигурация детектора Baby MIND была изменена. Однако в ходе анализа данных первого технического рана и симуляций методом Монте-Карло было принято решение увеличить количество сцинтилляционных модулей в детекторе Baby MIND. Основной целью данного решения было увеличение эффективности регистрации мюонов, остановившихся в 1 блоке детектора Baby MIND (2 сцинтилляционных модуля и 3 магнитных модуля). Для решения этой задачи было сконструировано 2 модуля сцинтилляторов (YASU трекеры), состоящих из 14 сцинтилляционных счетчиков, использованных в детекторе SMRD (описанных в разделе 2.2.2, рисунок 2.8). На рисунке 5.9 изображено схематическое положение и изображение модулей YASU.

Для регистрации событий с сцинтилляционных счетчиков модулей YASU были использованы SiPM фирмы Hamamatsu серии S13081-050CS, рабочее напряжение которых 57 В, для считывания данных было решено модернизировать электронику Baby MIND FEB для возможности подключения внешнего источника питания данных SiPM. Всего было установлено 28 SiPM S13081-050CS, по 14 фотоумножителей в каждый модуль YASU. Для считывания данных с



а б

Рис. 5.9. а – Схематическое изображение события, регистрация которого возможна благодаря установке модулей YASU. б – Схематическое изображение модулей YASU в первом блоке детектора Baby MIND.

YASU было выделено два модернизированных Baby MIND FEB. Коэффициенты предусилителей HG и LG были подобраны так, чтобы отношение HG [ADC]/ф.э. соответствовало остальным SiPM в детекторе Baby MIND. Фотографии модулей до установки и после установки в детектор Baby MIND изображены на рисунке 5.10.

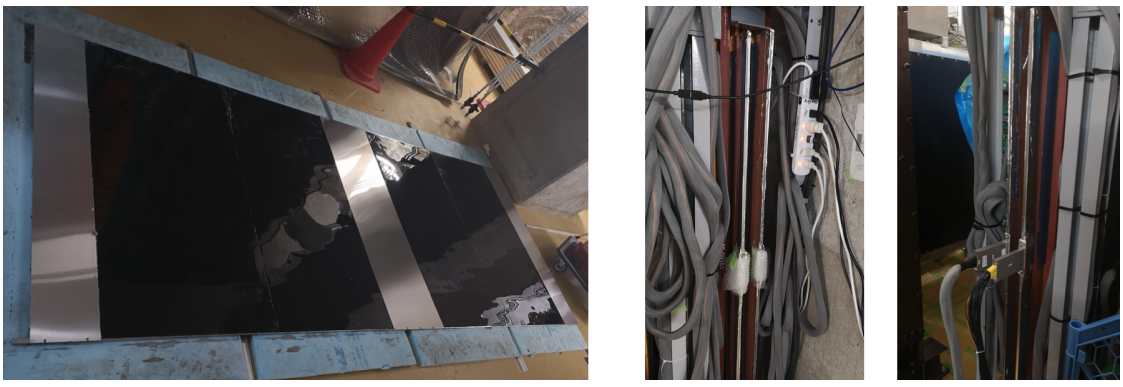


Рис. 5.10. Модули YASU до и после установки в детектор Baby MIND.

В ходе первого физического рана был измерен эффект внесенных изменений в конструкцию детектора Baby MIND. Данные модернизации позволили увеличить число восстановленных треков при больших углах, исходящих из мишени WAGASCI и протонного модуля. Сравнение конфигураций детектора приведено на рисунке 5.11.

Сравнение разрешающей способности детектора Baby MIND до и после модернизации детектора проводилось с помощью моделирования методом Монте-

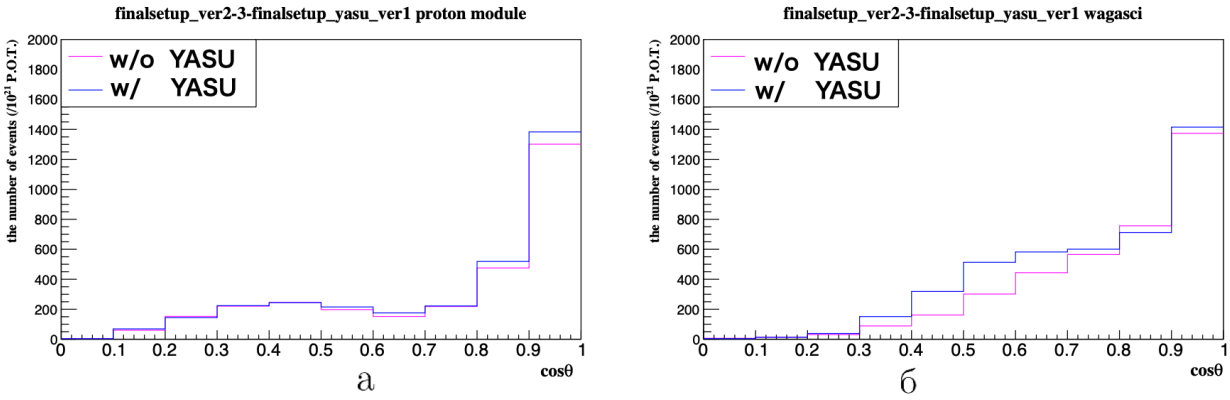


Рис. 5.11. Сравнение количества восстановленных мюонных треков (фиолетовый – конфигурация без модулей YASU; синий – конфигурация с модулями YASU) в зависимости от угла вылета из: а – протонного модуля; б – мишени WAGASCI.

Карло. Для этого проводилось сравнение восстановленных энергий в 3 этапа: для энергий мюонов 0 – 0.5 ГэВ, 0.5 – 1 ГэВ, 1 – 1.8 ГэВ. Для этого использовался один и тот же набор смоделированных событий в мишени WAGASCI, количество восстановленных треков низкоэнергетичных мюонов получилось существенно увеличить. На рисунке 5.12 изображено разрешение восстановления импульса детектора Baby MIND для данных моделирования методом Монте-Карло (по горизонтальной отложена разность между действительным импульсом и восстановленным) без модулей YASU, на рисунке 5.13 изображено разрешение восстановления импульса детектора Baby MIND для данных моделирования методом Монте-Карло с модулями YASU.

5.5. Система синхронизации, питания и сбора данных DAQ

Изменения в конструкции детектора и разработанная плата синхронизации FEBs (Master Clock Board – MCB) послужили причиной для изменений системы сбора данных. В эксперименте T2K каждый пучок длительностью 5 мс имеет свой номер (от 32767 до 65535) и повторяется каждые 2.6 секунды. Пучок имеет структуру, состоящую из восьми "сгустков"(bunches), распределенных между собой по времени (рис. 5.14). Для синхронизации всех детекторов (мишень WAGASCI, протонный модуль, WallMRDs и Baby MIND) используется данный номер пучка.

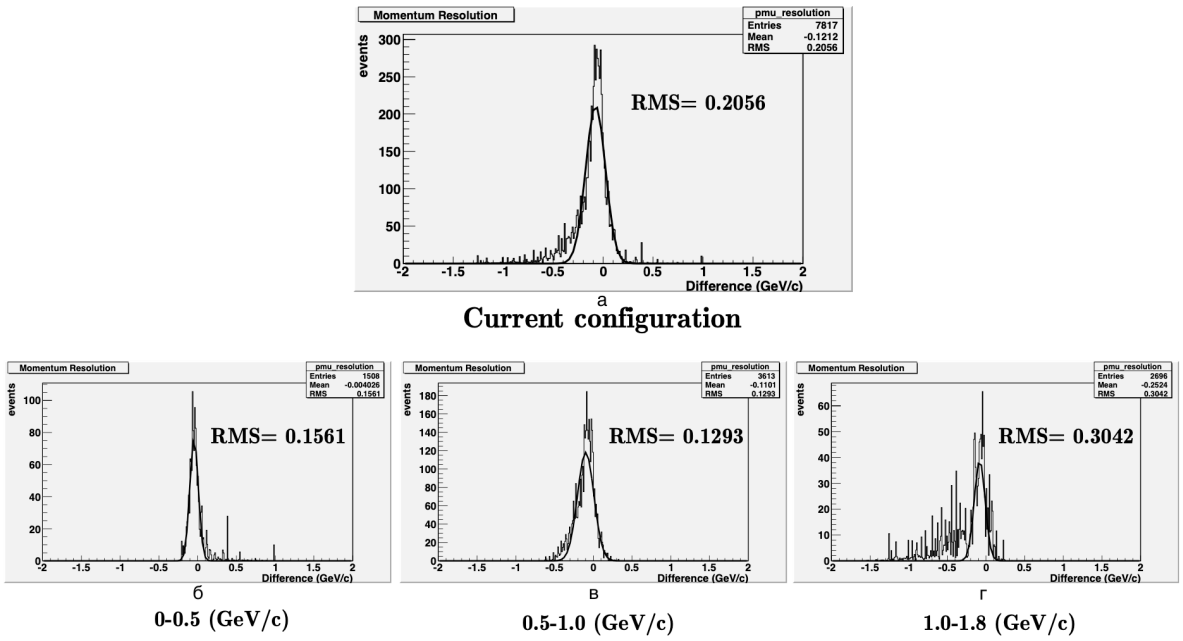


Рис. 5.12. Разрешение восстановление импульса детектора Baby MIND для данных моделирования Монте-Карло (по горизонтальной отложена разность между действительным импульсом и восстановленным) без модулей YASU. а – Энергия смоделированных мюонов 0 – 1.8 ГэВ. б – Энергия смоделированных мюонов 0 – 0.5 ГэВ. в – Энергия смоделированных мюонов 0.5 – 1 ГэВ. г – Энергия смоделированных мюонов 1 – 1.8 ГэВ.

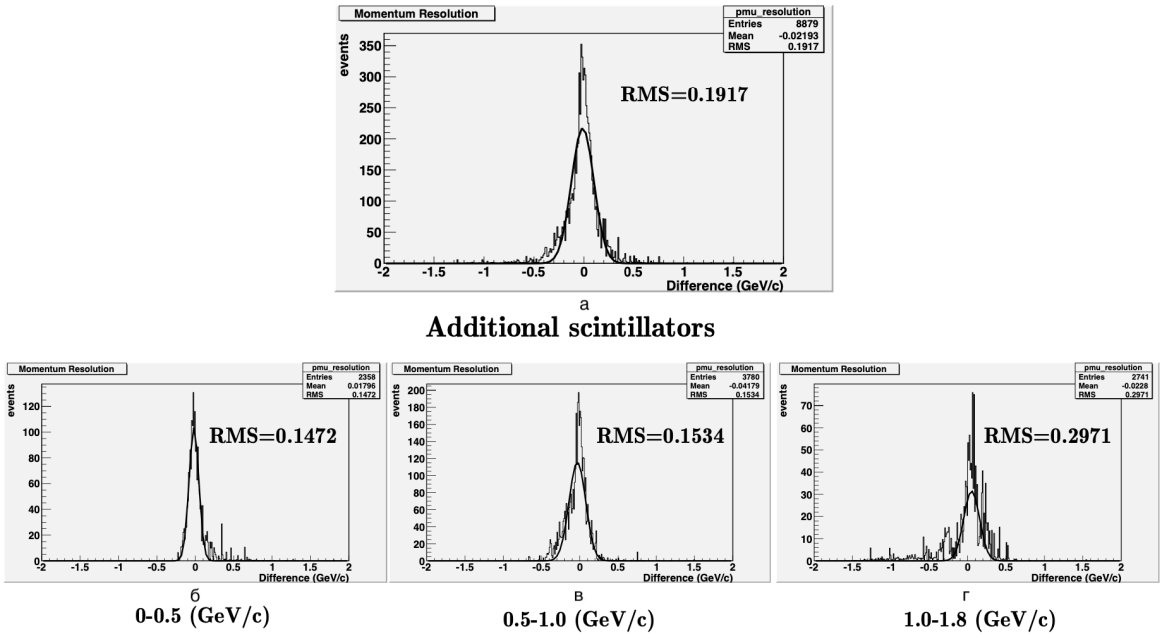


Рис. 5.13. Разрешение восстановление импульса детектора Baby MIND для данных моделирования Монте-Карло (по горизонтальной отложена разность между действительным импульсом и восстановленным) с модулями YASU. а – Энергия смоделированных мюонов 0 – 1.8 ГэВ. б – Энергия смоделированных мюонов 0 – 0.5 ГэВ. в – энергия смоделированных мюонов 0.5 – 1 ГэВ. г – Энергия смоделированных мюонов 1 – 1.8 ГэВ.

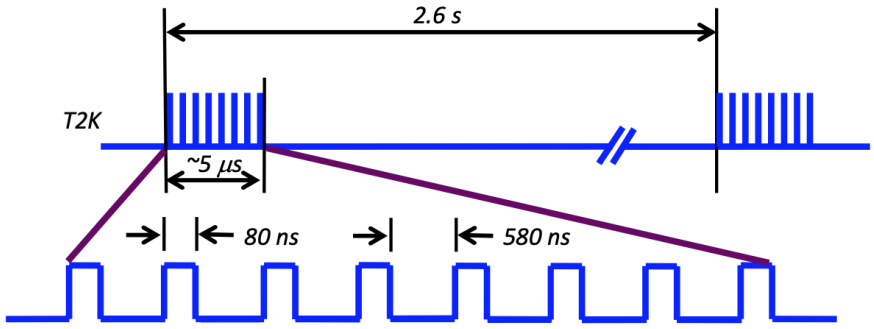


Рис. 5.14. Структура пучка эксперимента T2K.

5.5.1. Система опорного тактового сигнала синхронизации MCB

Система опорного тактового сигнала синхронизации MCB [63] разработана на основе платы DE10-Nano Board TERASIC – платформе для аппаратного проектирования, построенной на основе системы на модуле Intel SoC FPGA, которая сочетает в себе два встроенных ядра Cortex-A9 с программируемой логикой, что обеспечивает максимальную гибкость дизайна. Отладочная плата оборудована высокоскоростной DDR3 памятью, поддерживает аналого-цифровые возможности, сеть Ethernet [114]. Для подключения DE10-Nano Board к триггеру ускорителя эксперимента T2K, Baby MIND FEBs была разработана специальная плата подключения (рис. 5.15). Входными данными для MCB являются триггер с ускорителя и номер пучка, выходными данными являются сигнал начала пучка, опорный сигнал GTRIG (с периодом 10 мкс) и номер пучка. Синхронизация MCB и всех FEBs происходит с помощью RJ45 6a S/FTP и двух плат распределения (fanout boards).

5.5.2. Система контроля питания магнитных модулей детектора Baby MIND

Как было отмечено в разделе 3.2, магнитные модули достигают необходимого магнитного поля в 1,5 T при токе 140 A. Для контроля подаваемого напряжения и тока была создана система DAQ сервер-клиент на основе MIDAS. Напряжение и ток питания магнитных модулей детектора Baby MIND устанавливаются с помощью Baby MIND MIDAS. Данное приложение позволяет контролировать стабильность напряжения и тока (рис. 5.16). В случае возникновения проблем или необходимости отключения магнита MIDAS Control имеет

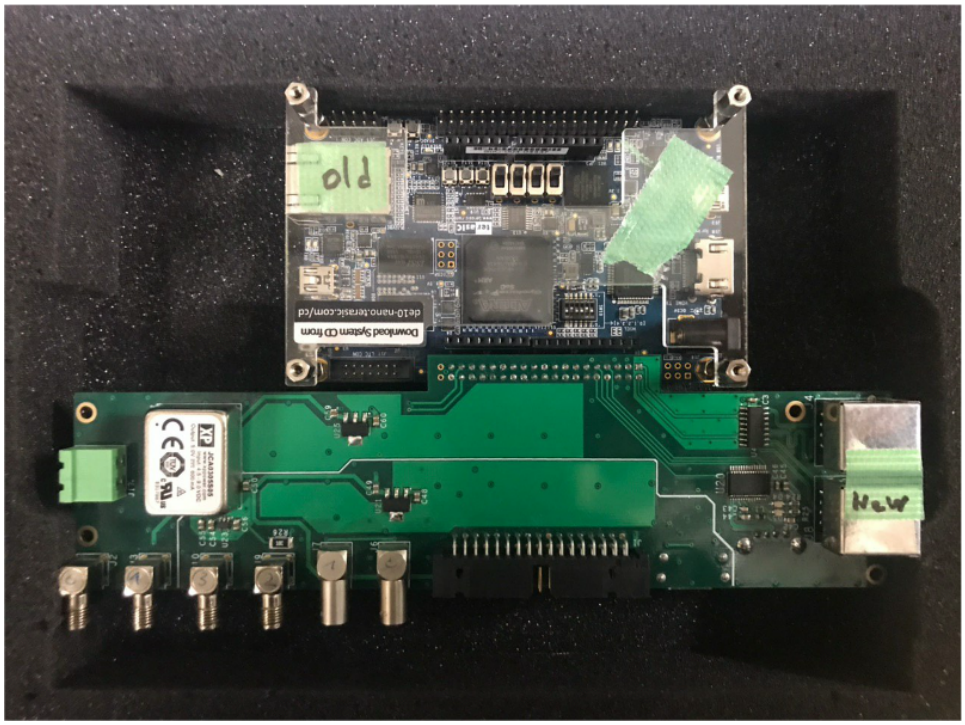


Рис. 5.15. Система опорного тактового сигнала синхронизации MCB.

возможность увеличивать/уменьшать мощность подаваемого питания на магнит, а также возможность включения/выключения магнита.

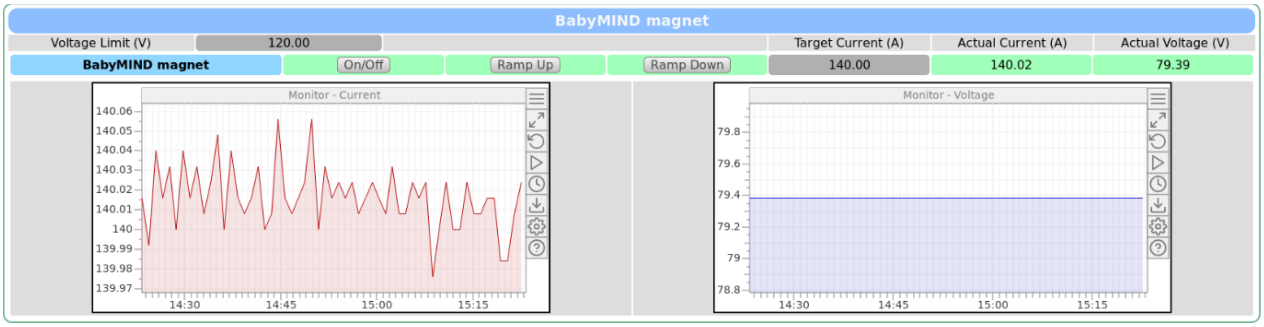


Рис. 5.16. Baby MIND MIDAS – система контроля подаваемого напряжения на магнитные модули детектора Baby MIND.

5.5.3. Система сбора данных DAQ

В общей сложности 46 FEBs установлены в 8 MCRs и обеспечивают считывание с 4024 SiPMs; схема соединения сцинтилляционных модулей и FEBs изображена на рисунке 5.17. Синхронизация электроники происходит с помощью MCB, получающим необходимые данные с ускорителя.

Для записи данных с MCRs используется DAQ сервер, находящийся на

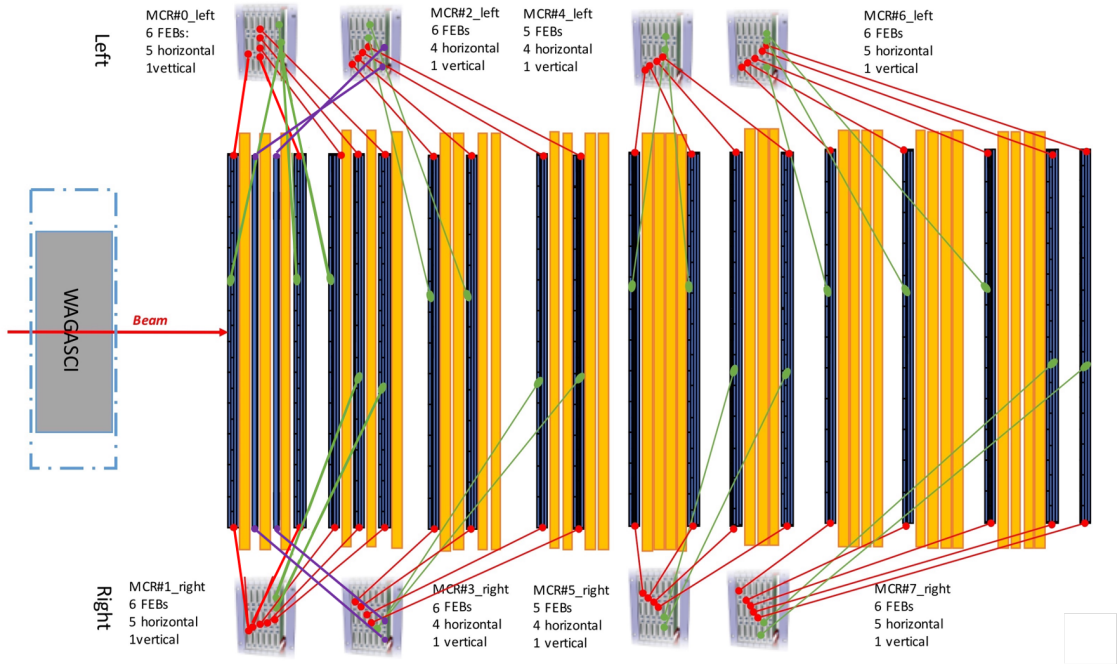


Рис. 5.17. Схематическое изображение схемы подключения детектора Baby MIND.

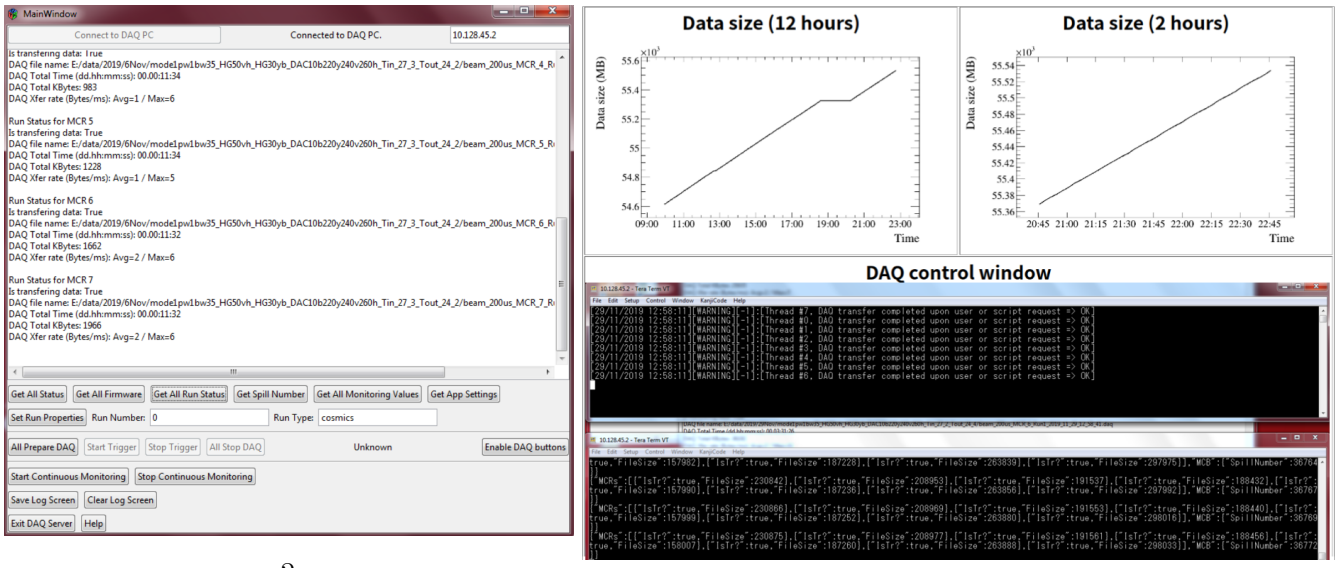
этаже B2 в экспериментальной шахте детектора ND280. С помощью DAQ сервера происходит настройка всех FEB и MCB, контроль системы сбора данных осуществляется с помощью DAQ клиента, запущенном на компьютере, находящимся в той же сети. Подключение DAQ клиента к DAQ серверу происходит с помощью TCP/IP протокола на выбранном порту [65]. На рисунке 5.18 изображены окна DAQ клиента для смены сеансов и контроля сбора данных и ошибок.

5.6. Квалификация собранных данных

Сбор данных с детектора Baby MIND подразумевает ежедневную смену сеанса. Для контроля качества собранных данных в программный комплекс Unpacking был включен код для проверки собранных данных. Данная процедура выполняется ежедневно после смены сеанса, что позволяет в случае возникновения критичных проблем остановить сбор данных, решить проблему и возобновить сбор данных.

Процедура проверки включает в себя шесть этапов:

- количество событий на каждый FEB на пучок/за сеанс;
- проверка количества событий на каждом канале;



а б

Рис. 5.18. а – DAQ клиент обеспечивающий возможность смены сеанса сбора данных. б – DAQ клиент, система контроля сбора данных и извещения в случае ошибок.

- проверка количества событий содержащих амплитудные значения на каждом канале за один пучок/за сеанс;
- проверка синхронизации данных между всеми FEB;
- количество пучков с ускорителя и согласование каждого пучка по номеру;
- структура пучка (структура восьми bunches).

Проверка количества событий на каждый FEB на пучок/за сеанс производится для проверки работы FEB. Необходимым средним значением количества событий, зарегистрированных за один пучок, является 10 событий для FEB, подключенных к MPPCs S12571-025C, и 1 событие для FEBs, подключенных к SiPM S13081-050CS.

Основной целью проверки количества событий на каждом канале является ежедневная проверка наличия поврежденных каналов. В данном случае проверяется наличие шумящих каналов (noisy channels), каналов с меньшим количеством событий (less noisy) и мертвых каналов (dead channels). Шумящими каналами являются каналы, которые имеют в 4 раза больше событий за сеанс, чем среднее значение количества событий всех каналов на данном FEB. Мертвыми каналами считаются те, что имеют в 10 раз меньше событий, чем среднее значение количества событий всех каналов на данном FEB. Каналы с меньшим количеством событий – это каналы, которые имеют в 4 раза меньше событий, но

не являющиеся мертвыми. Пример результатов проверки количества событий на каждом канале представлен на рисунке 5.19

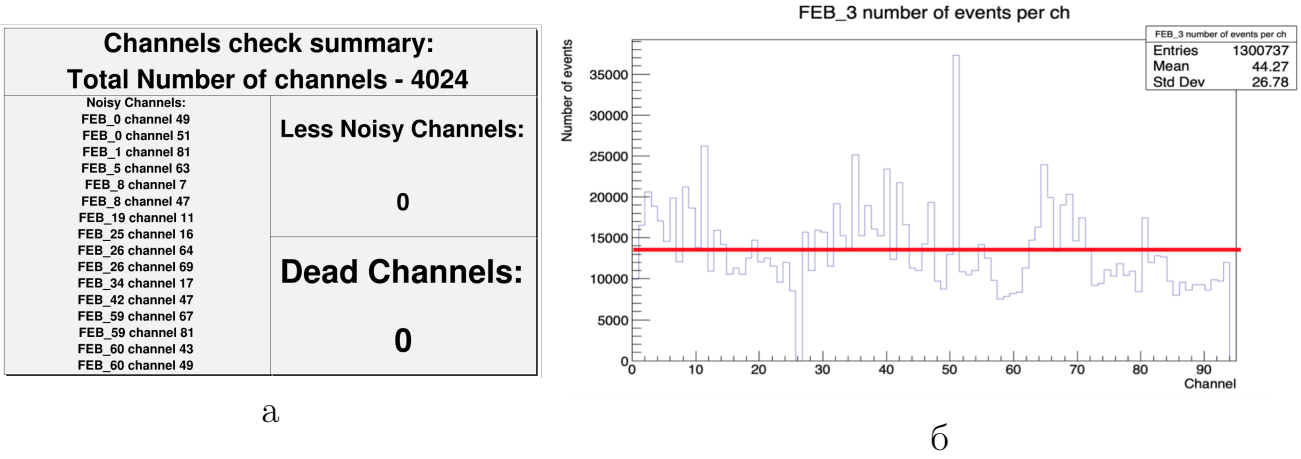


Рис. 5.19. а – Результаты проверки количества событий на каждом канале для всех FEB. б – Пример определения мертвого канала, красной линией отмечено среднее количество событий на данном FEB.

Целью проверки количества событий, содержащих амплитудных значений на каждом канале за один пучок/за сеанс, является определение того, что уровень шума на данном FEB не является подавляющим основные события, а также проверка работоспособности АЦП. Данный параметр измеряется в процентах, пример проверки количества событий содержащих амплитудных значений изображен на рисунке 5.20.

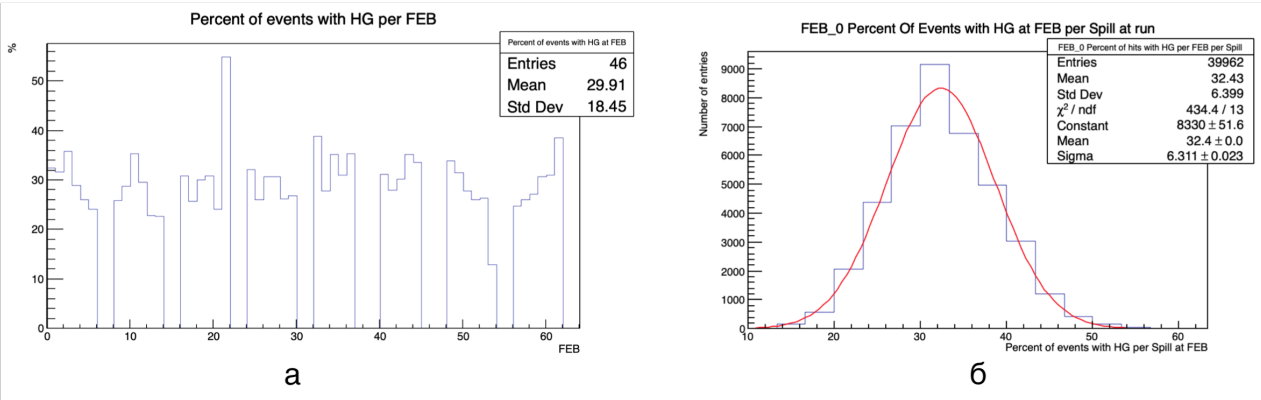


Рис. 5.20. Проверка количества событий содержащих амплитудных значений на каждом канале. а – рисунок для всех FEB. б – Определение количества событий содержащих амплитудное значение.

Проверка синхронизации данных между всеми FEB, определение количества пучков с ускорителя и согласование каждого пучка по номеру осуществляется для каждого FEB единовременно. Для этого 32 битные слова начала пучка проверяются на соответствие между собой по номеру для каждой платы FEB,

а синхронизация проверяется по 32 битному слову временной разницы между тактовым временем GTRIG и сигналом старта спила. Пример определения показан на рисунке 5.21. В случае, если данные слова не согласуются для всех FEB, для каждого индивидуального пучка выдается извещение об ошибке.

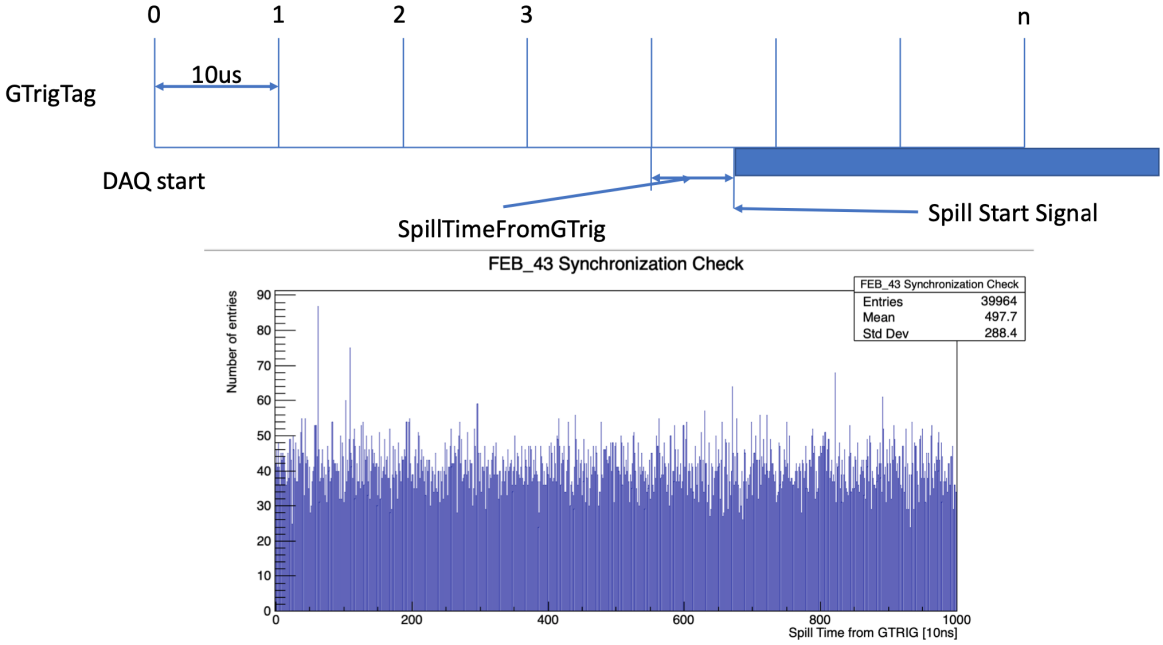
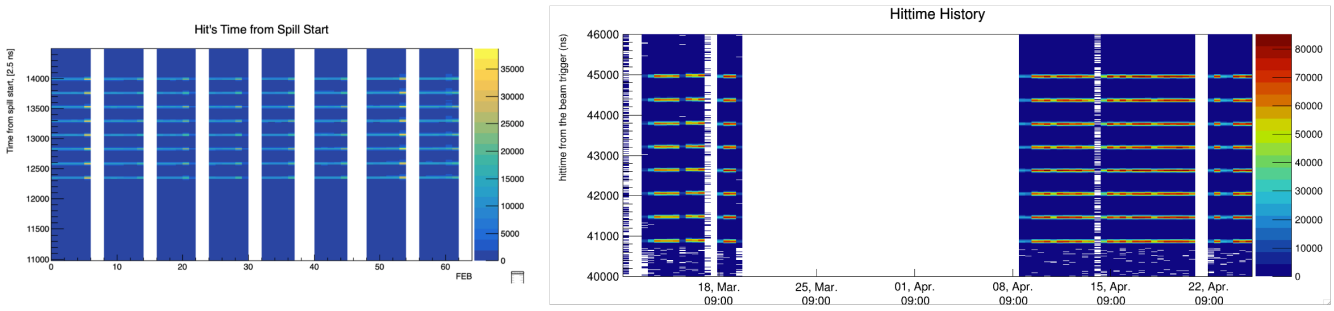


Рис. 5.21. Проверка синхронизации данных между всеми FEB с помощью временной разности между тактовым временем GTRIG и сигналом старта пучка.

Проверка структуры пучка на каждом FEB осуществляется для подтверждения того, что данные пучка успешно записаны. Данная процедура отображает количество событий и распределение их внутри пучка. Основываясь на этих данных, можно проверить работу MCB. Пример отображаемой информации представлен на рисунке 5.22.



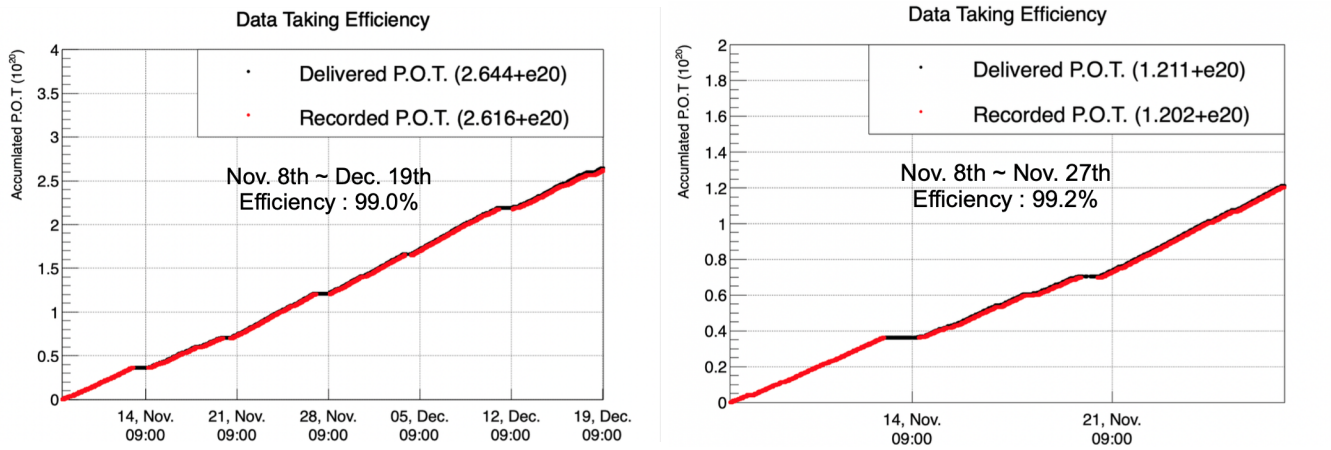
а б

Рис. 5.22. а – Проверка структуры пучка для всех FEB за один сеанс. б – Проверка структуры пучка на каждом FEB за несколько сеансов.

5.7. Стабильность системы сбора данных

Квалификация собранных данных позволяет быстро определить необходимость устранения неполадок в детекторе Baby MIND, однако, для определения стабильности и согласованности данных, необходимо восстановление треков, определение эффективности сбора данных, поиск событий зарегистрированных сразу в нескольких детекторах (мишень WAGASCI, протонный модуль либо WallMRDs), определение светового выхода на MIP. Для решения данных вопросов был разработан алгоритм восстановления треков в детекторе и поиск согласующихся событий в других 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). Необходимым условием эффективной регистрации данного пучка является наличие событий в ROOT файлах. Пример эффективности сбора данных изображен на рисунке 5.23.



а б

Рис. 5.23. а – Определение эффективности сбора данных на количество событий на P.O.T. за первый физический сеанс для детектора Baby MIND. б – Определение эффективности сбора данных на количество событий на P.O.T. за промежуток с 7 ноября 2019 по 28 ноября 2019 для детектора Baby MIND.

После проведения процедуры восстановления треков в детекторе Baby MIND, для определения стабильности системы регистрации событий, вычисляется поток мюонов на P.O.T. Данная процедура позволяет определить,что данные, записанные за каждый промежуток времени, не имеют аномалий, и количество восстановленных треков на P.O.T. примерно одинаково (рис. 5.24).

Для проверки согласованности сразу нескольких детекторов между собой (мишень WAGASCI, протонный модуль либо WallMRDs с Baby MIND) необхо-

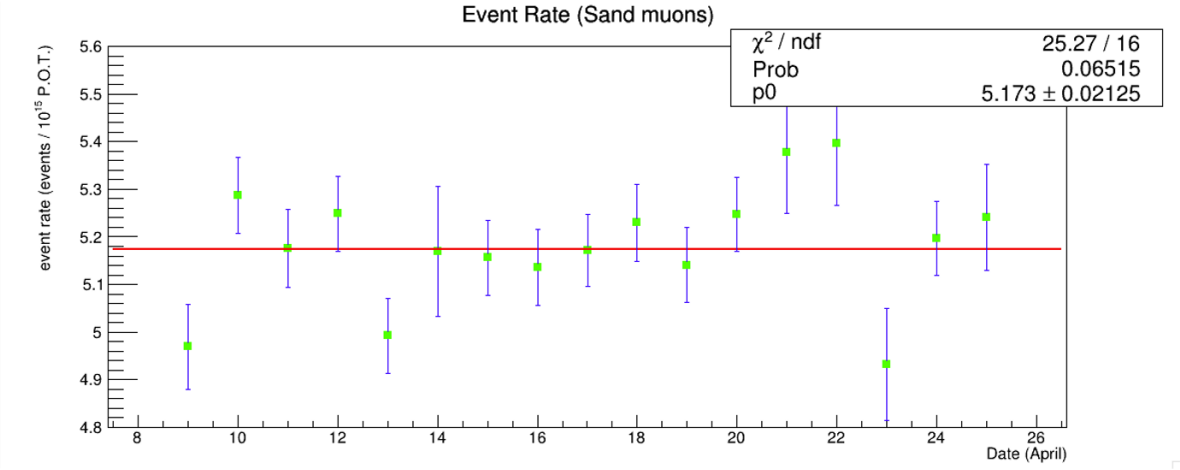


Рис. 5.24. Количество событий, реконструированных в детекторе Baby MIND на P.O.T.

димо восстановление треков и в других детекторах. Примеры событий, зарегистрированных сразу в нескольких детекторах показаны на рисунке 5.25.

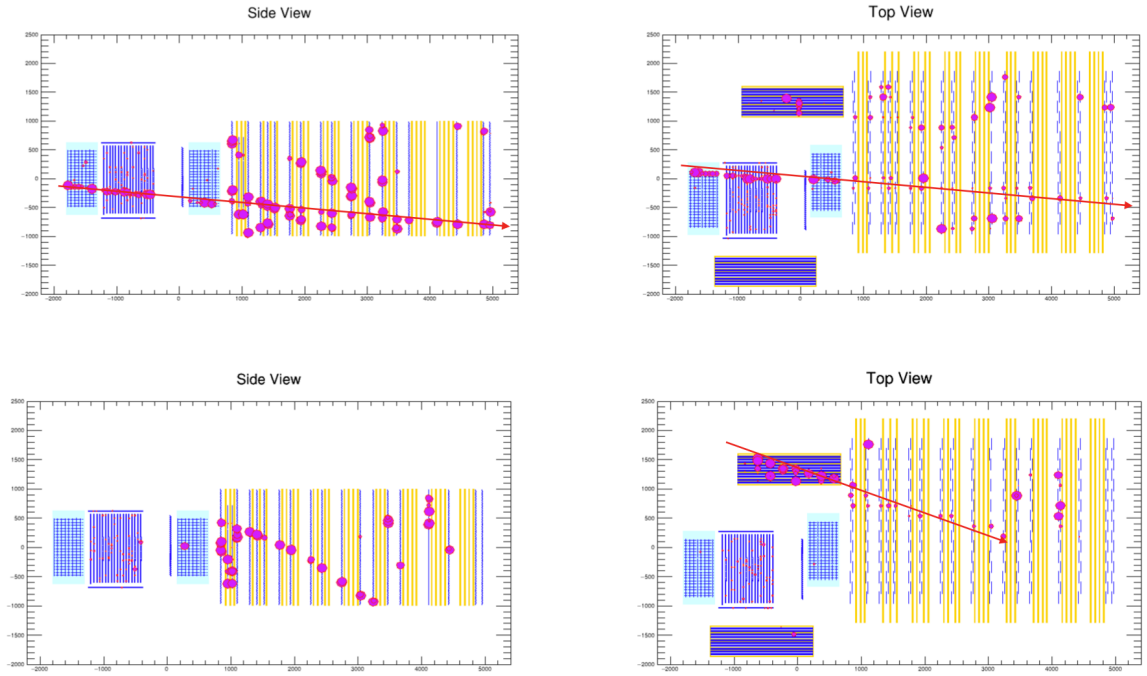
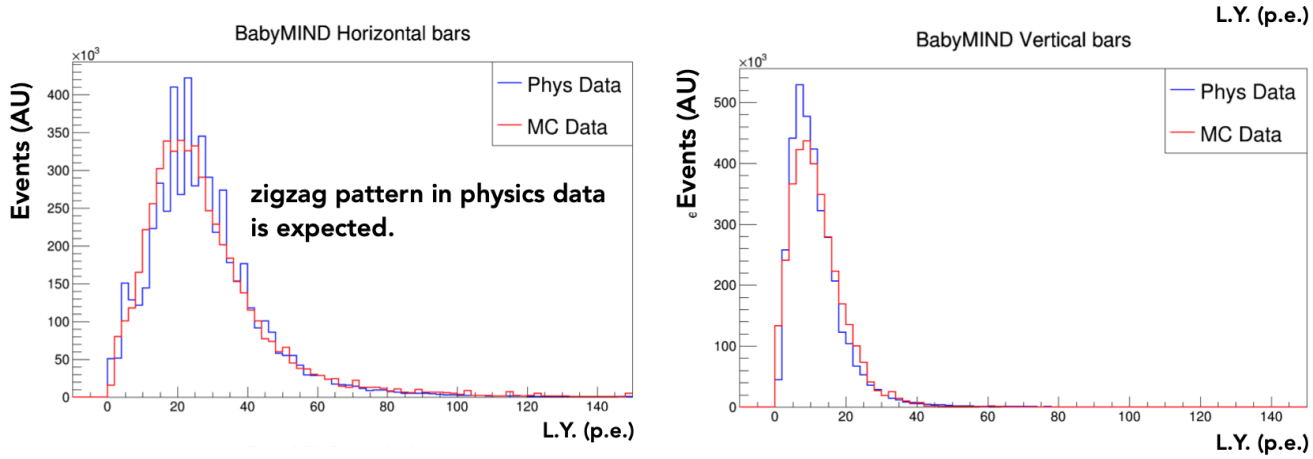


Рис. 5.25. Примеры событий зарегистрированных сразу в нескольких детекторах.

Все результаты по измерению световых выходов каждого из сцинтилляционных счетчиков были учтены при моделировании событий методом Монте-Карло. Световой выход смоделированных событий совпадает с результатами симуляций (рис. 5.26). В симуляциях по моделированию событий Монте-Карло учтено распространение света в сцинтилляционных счетчиках, спектросмещающем волокне и введена поправка на регистрацию света с помощью SiPM.

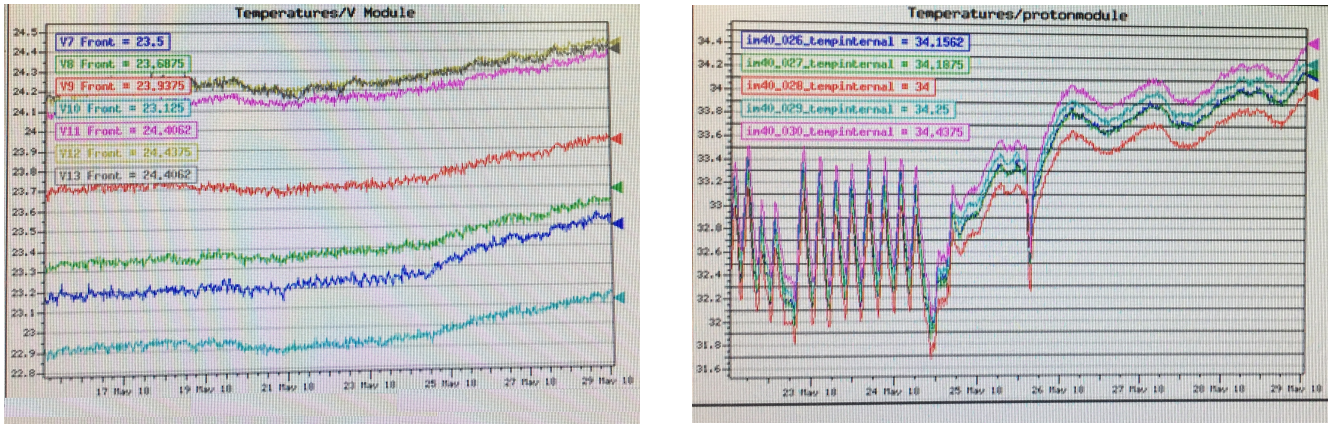


а б

Рис. 5.26. Сравнение светового выхода сцинтилляционных счетчиков полученный с помощью данных и методом Монте-Карло. а – Сравнение светового выхода событий для горизонтальных сцинтилляционных счетчиков. б – Сравнение светового выхода событий для вертикальных сцинтилляционных счетчиков.

5.8. Температурные эффекты

Важным этапом квалификации детектора Baby MIND было исследование изменения температуры при 24-х часовой работе детектора. Детектор Baby MIND оснащен магнитными модулями мощностью 11,5 кВт, что приводит к увеличению температуры на уровне B2 шахты детектора ND280. Для наблюдения температурных эффектов были проанализированы данные с температурных датчиков с детекторов INGRID, WAGASCI и протонного модуля (рис. 5.27).



а б

Рис. 5.27. а – Измерения температуры на горизонтальных модулях INGRID. б – Измерения температуры на протонном модуле.

Круглосуточная работа детектора Baby MIND была одобрена 24 мая 2018 года, чему соответствует точка начала тенденции увеличения температуры на горизонтальных модулях детектора INGRID и протонном модуле. Температура на горизонтальных модулях INGRID в среднем увеличилась на $0,2°C$, а на

протонном модуле на протонном модуле на $2°C$ за 5 дней непрерывной работы. Данный момент был отмечен в ходе технического сеанса на пучке и послужил основанием для разработки системы охлаждения для детектора Baby MIND.

Следующим вопросом, требующим решения, явилось измерение распределения температуры в детекторе Baby MIND в зависимости от положения. Для этого датчик температуры помещался в 5 различных точек магнитного модуля a15 (согласно схеме на рисунке 5.5), находящегося в центре детектора. Результаты измерения представлены на рисунке 5.28.

Рис. 5.28. Измерение распределения температуры в детекторе Baby MIND на 7 день круглосуточной работы. 1 – $23.1°C$; 2 – $23.5°C$; 3 – $24.7°C$; 4 – $34.8°C$; 5 – $35.2°C$.

Учитывая неоднородность распределения температуры внутри детектора, было принято решение о размещении датчиков температуры с возможностью записи измеренных данных на диск. Всего было размещено 8 датчиков в разных точках детектора Baby MIND. На графике 5.29 флуктуации температуры соответствуют смене дня и ночи.

5.9. Калибровка детектора Baby MIND

5.9.1. Калибровка кремневых фотоумножителей

Изменение температуры во время работы детектора подразумевает необходимость постоянной калибровки кремневых фотоумножителей во время се-

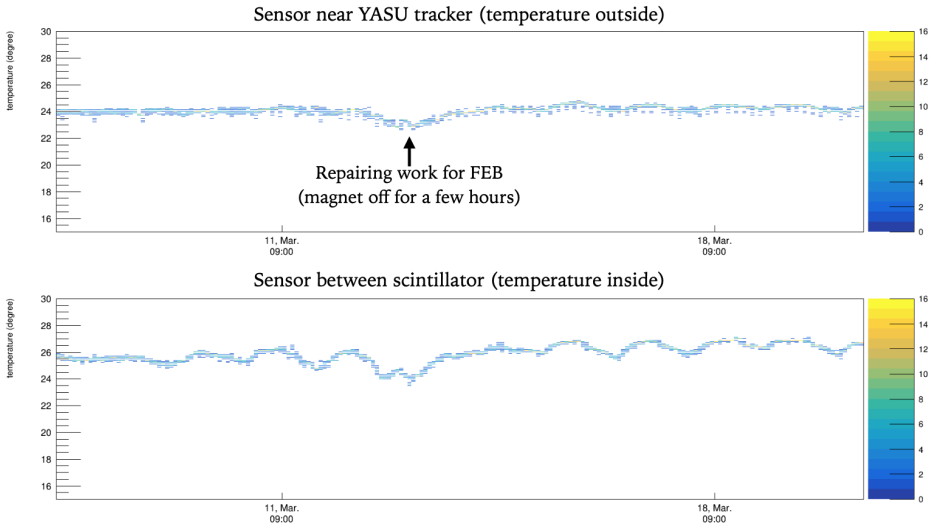
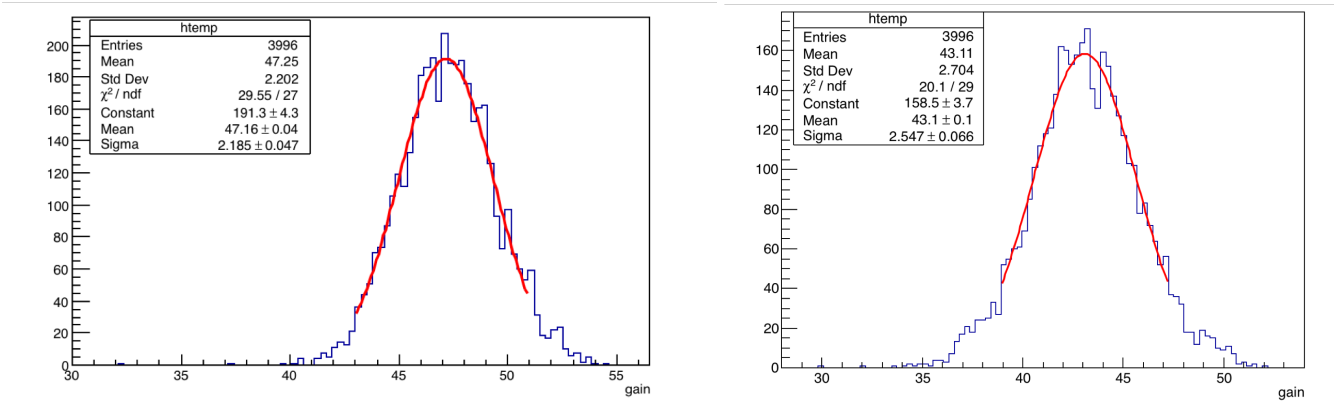


Рис. 5.29. Измерение распределения температуры в детекторе Baby MIND в зависимости от времени для 2ух сенсоров в разных точках детектора.

анса. На момент технического сеанса программного обеспечения, обеспечивающую данную функциональность, не существовало, что приводило к остановке набора данных для калибровки детектора. Метод калибровки детектора представлен в разделе 4.4.4. Результаты калибровки кремневых фотоумножителей при температуре $22°C$ и $34,5°C$ представлены на рисунке 5.30.



а б

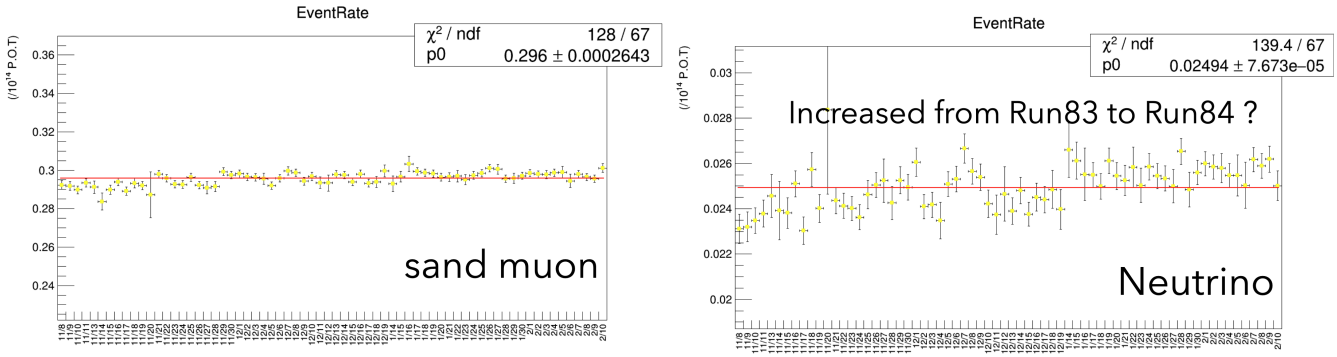
Рис. 5.30. Результаты калибровки кремневых фотоумножителей детектора Baby MIND при температуре на этаже B2 экспериментальной шахты детектора ND280 для температуры: а – $22°C$; б – $34,5°C$.

5.10. Изучение эффективности восстановление импульсов детектором Baby MIND

Основным этапом восстановление импульсов мюонов, зарегистрированных в детекторе Baby MIND, является восстановление треков событий. А восстанов-

ление треков зарегистрированных частиц в детекторе Baby MIND происходит в несколько этапов. Первым этапом восстановления является определение "являлось ли зарегистрированная частица нейтрино?". Для определения нейтрино в детекторе выделяется определенный объем $2000 \times 1000 \times 30$ мм^3 в каждом сцинтилляционном модуле, для определения треков и временное окно со структурой bunches, эквивалентное структуре пучка. Треков вне заданного сцинтилляционного объема обнаружено не должно быть.

Следующим этапом определяется количество событий мюонов и нейтрино на P.O.T. Для получения данной информации используется информация полученная с ускорителя о количестве P.O.T. и строится зависимость реконструированных треков с количеством протонов на мишень (рис. 5.31).



а б

Рис. 5.31. Результаты определения количества событий в детекторе Baby MIND на количество протонов на мишень для событий определенных как мюоны (а) и нейтрино (б).

5.10.1. Эффективность восстановления треков в зависимости от угла

Учитывая геометрические особенности детектора Baby MIND, описанные в разделе 3.4, необходимо определение эффективности восстановления треков в зависимости от угла. Для вычисления эффективности восстановления треков в детекторе выделяется эффективный объем, представленный на рисунке 5.32.

Внутри заданного объема методами, описанными в разделе 4.4.9, восстанавливаются треки, заряды и импульсы зарегистрированных частиц. Реконструированные треки распределяются по группам, в зависимости от угла вылета из остальных детекторов, либо мишени WAGASCI.

Как было отмечено ранее в разделах 3.3.7 и 3.3.8, сцинтилляционные эффективности регистрации сцинтилляционных счетчиков зависят от точки регистрации и порога регистрации. В данном разделе введем эффективность реги-

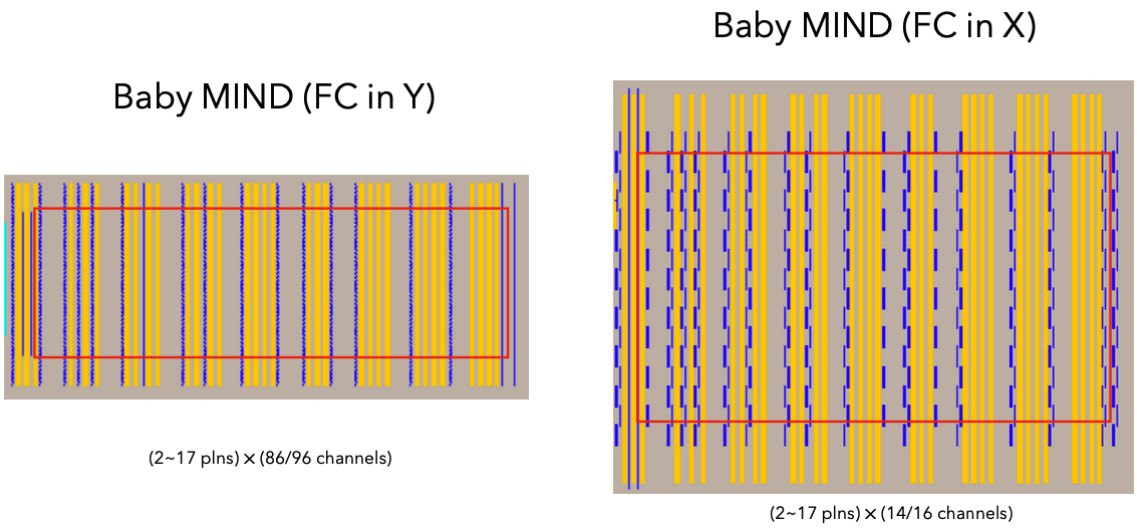


Рис. 5.32. Эффективный объем определенный для восстановления треков.

страции сцинтилляционного модуля, для этого необходимо разделить сцинтилляционный модуль на вертикальны и горизонтальные счетчики и вычислять их эффективность будем отдельно. Введем определение эффективности:

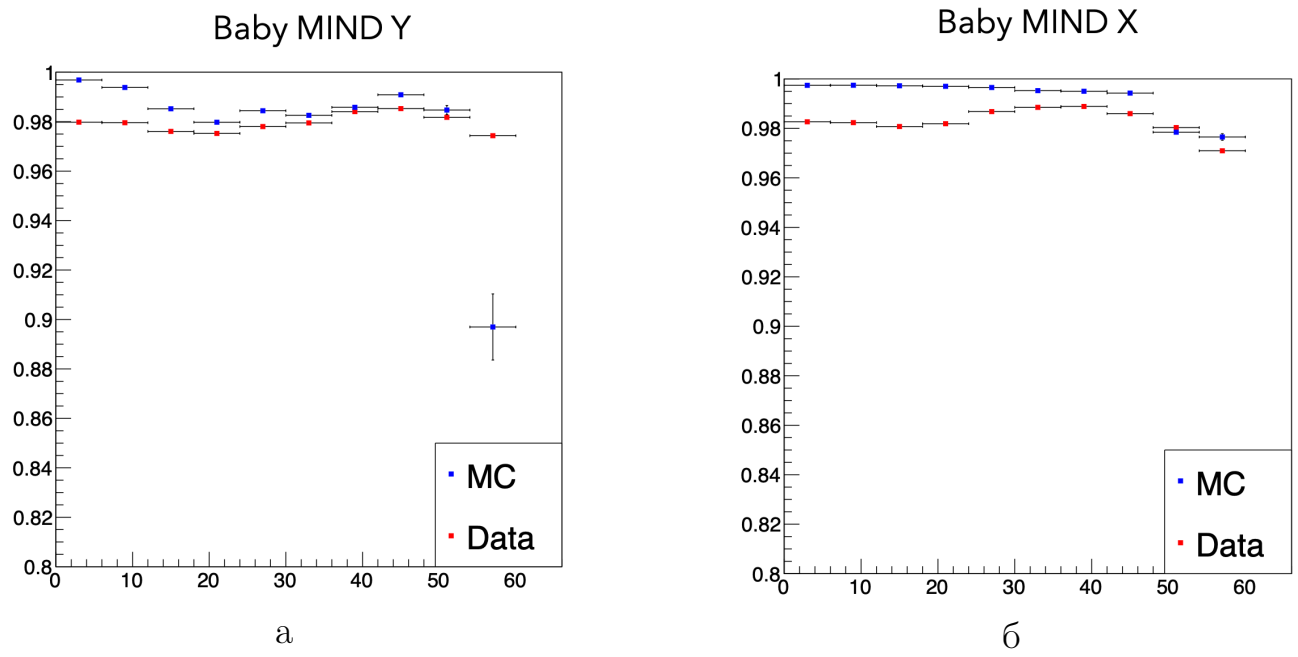
$$Eff = \frac{N_{reg}}{N_{all}}, \tag{5.1}$$

где N_{all} – все события, создавшие событие в соседних сцинтилляционных модулях, N_{reg} – события зарегистрированные в выбранном сцинтилляционном модуле (горизонтальные либо вертикальные счетчики).

Результаты вычисления эффективности регистрации событий сцинтилляционными счетчиками в зависимости от угла представлены на рисунке 5.33.

5.10.2. Эффективность восстановления заряда

Для вычисления эффективности восстановления заряда детектором Baby MIND необходимо моделирование методом Монте-Карло с последующей реконструкцией. Алгоритм восстановления заряда описан в разделе 4.4.10. Согласно данному алгоритму методом χ^2 проверяется гипотеза, что зарегистрированное событие является положительным, либо отрицательным мюоном. Далее методом Монте-Карло разыгрываются события смоделированного нейтринного пучка и реконструируются заряды разыгранных событий.



а б

Рис. 5.33. Результаты вычисления эффективности регистрации событий сцинтилляционными счетчиками в зависимости от угла: а – для вертикальных сцинтилляционных счетчиков; б – для горизонтальных сцинтилляционных счетчиков.

Введем обозначение:

$$\chi^2(\mu^+) \ : \ \chi^2 \text{ предположения, что частица } \mu^+$$
$$\frac{1}{\chi^2(\mu^+)} : \text{ чем больше это значение, тем больше вероятность, что частица } \mu^+$$

$$\chi^2(\mu^-) \ : \ \chi^2 \text{ предположения, что частица } \mu^-$$
$$\frac{1}{\chi^2(\mu^-)} : \text{ чем больше это значение, тем больше вероятность, что частица } \mu^- \quad (5.2)$$

Результаты моделирования событий пучка в антинейтринной моде и результаты реконструкции зарядов представлены на рисунке 5.34. Согласно результатам эффективность реконструкции зарядов смоделированных событий более 90% для всего диапазона спектра пучка в антинейтринной моде и более 99% для мюонов с импульсом более 700 МэВ/с.

5.10.3. Эффективность восстановления импульсов

Восстановление импульсов, как было отмечено ранее в разделе 4.4.9, осуществляется двумя разными способами. Первый заключается в вычислениях энергетических потерь в детекторе, что применимо только для частиц остановившихся в детекторе. Данный способ не применим для мюонов с импульсом

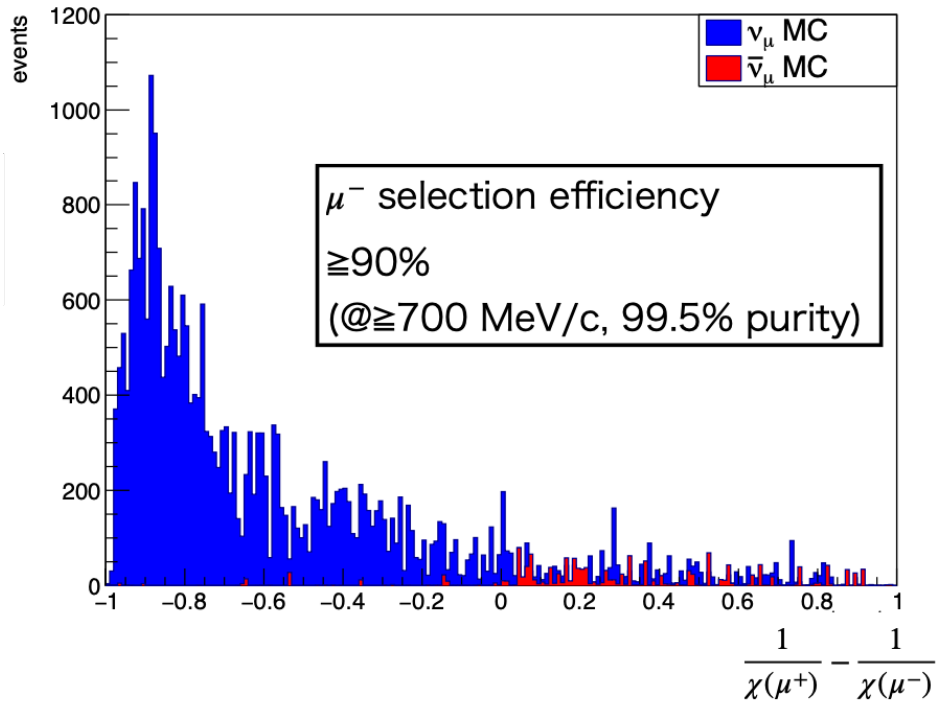
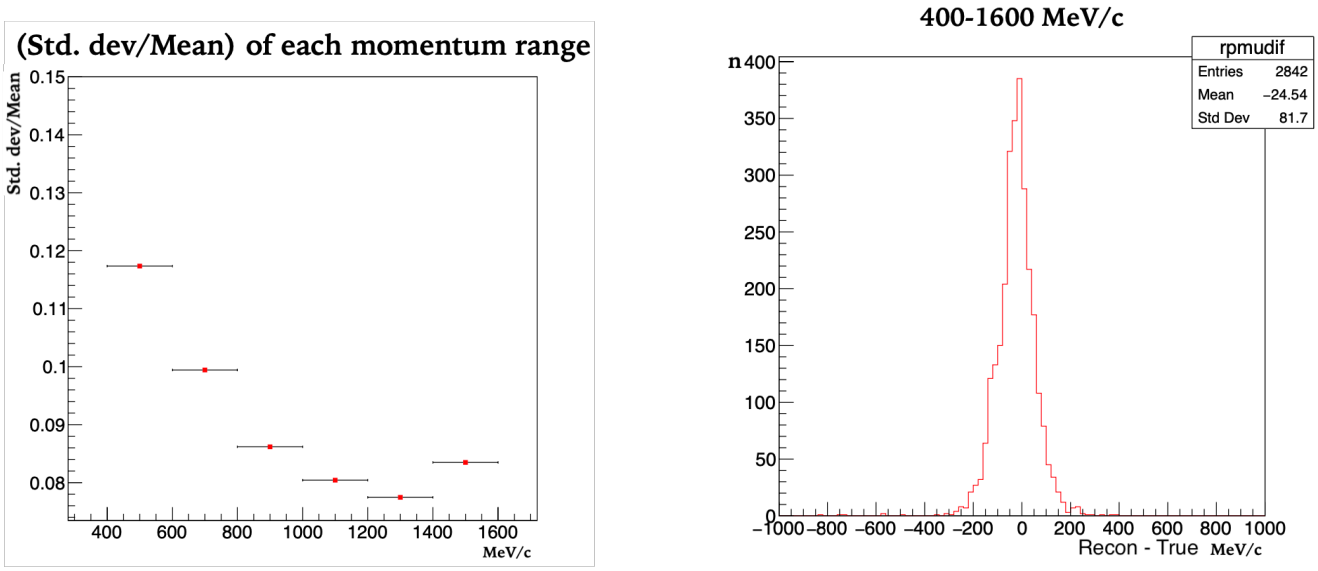


Рис. 5.34. Эффективность определения заряда мюона.

более $\sim$ 1600 МэВ и мюонов вышедших за пределы детектора. Второй способ заключается в реконструкции импульса по отклонению в магнитном поле. Второй способ применим всегда, но его разрешение гораздо меньше, всвязи с многократным рассеянием в железе.

Для определения эффективности восстановления импульсов, регистрируемых мюонов необходимо моделирование методом Монте-Карло с последующей реконструкцией. Важным моментов в ходе моделирования было определение эффективности в зависимости от импульса, поэтому итоговый результат разбивался на группы энергий от 400 до 1600 МэВ/с, и для каждой группы вычислялась погрешность определения импульса. Результаты вычисления импульса разыгранных мюонов и отношение ошибки восстановления к разыгранному значению импульса представлены на рисунке 5.35.

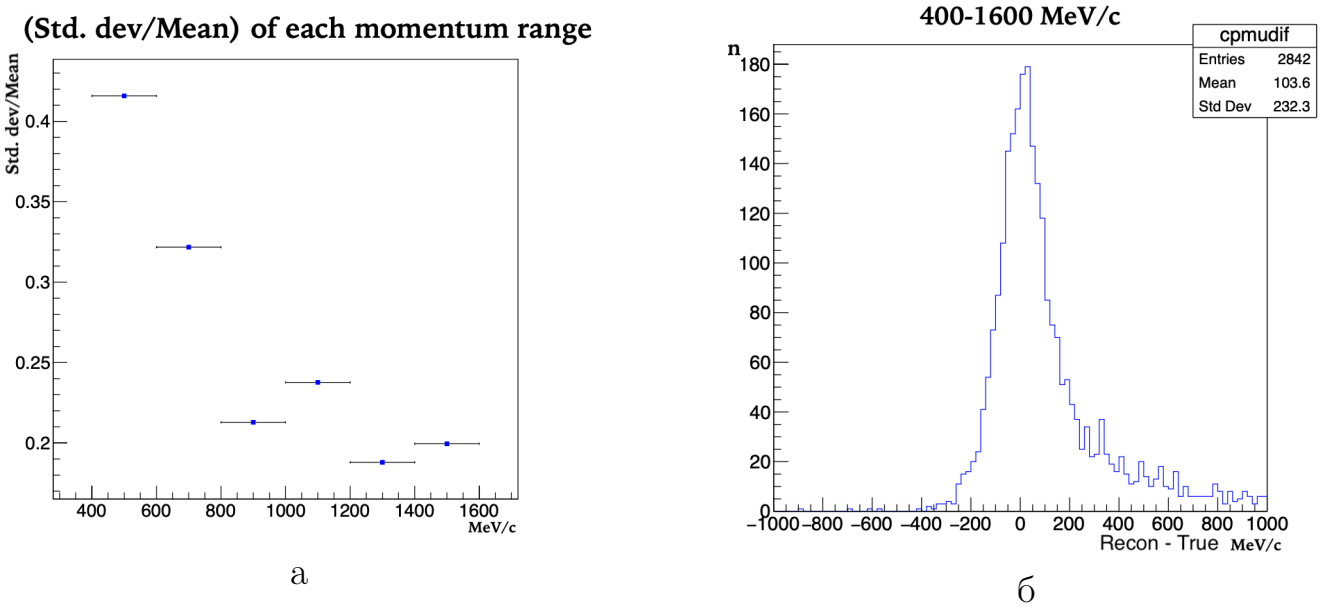
В случае, если регистрируемый мюон покинул пределы детектора, реконструкция заряда происходит по измерению угла отклонения в магнитных модулях. В данном случае импульсы мюонов разыгрывались в промежутке от 400 до 3000 МэВ. Разыграв теже события, что представлены на рисунке 5.35, можно сравнить разность в эффективности между двумя методами (рис. 5.36 и рисунок 5.37). Меньшая эффективность метода измерения импульса по откло-



а б

Рис. 5.35. а – Отношение ошибки восстановления к разыгранному значению импульса в зависимости от значения импульса методом восстановления потерянной энергии. б – Разность между реконструированным значением импульса и разыгранным значением импульса мюона методом восстановления потерянной энергии.

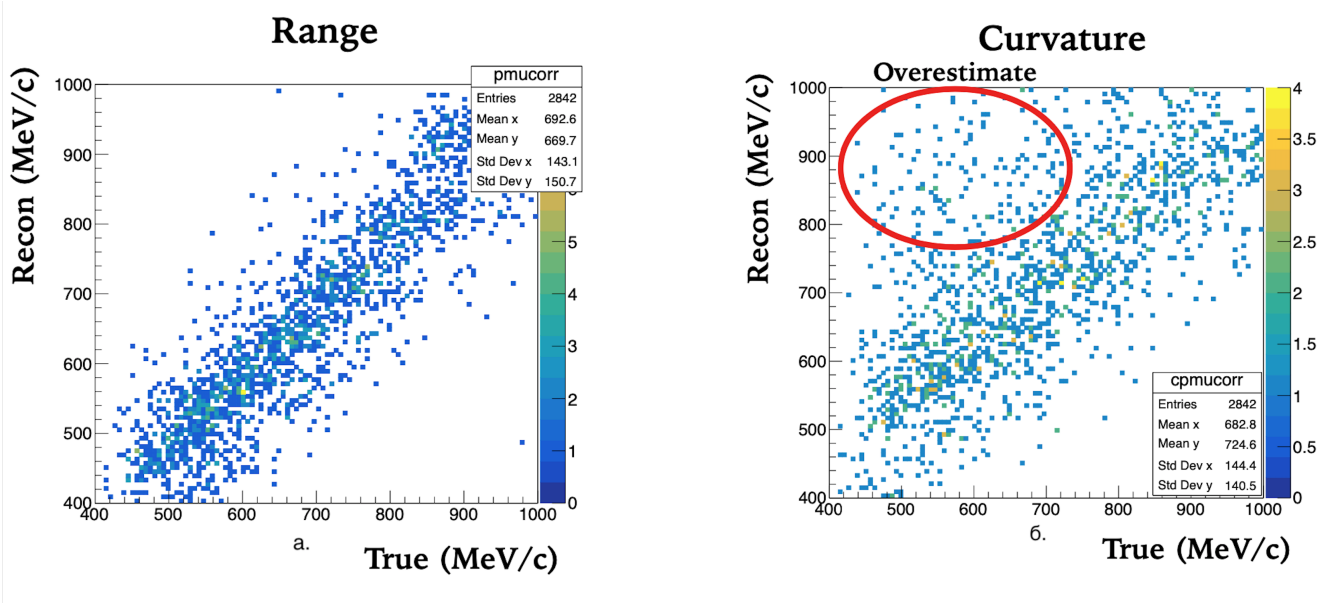
нению в магнитном поле обусловлена многократным рассеянием в магнитных модулях.



а б

Рис. 5.36. Восстановление импульсов событий, покинувших пределы эффективного объема детектора Baby MIND, разыгранных методом Монте-Карло. а – Отношение ошибки восстановления к разыгранному значению импульса в зависимости от значения импульса методом отклонения в магнитном поле. б – Разность между реконструированным значением импульса и разыгранным значением импульса мюона методом отклонения в магнитном поле.

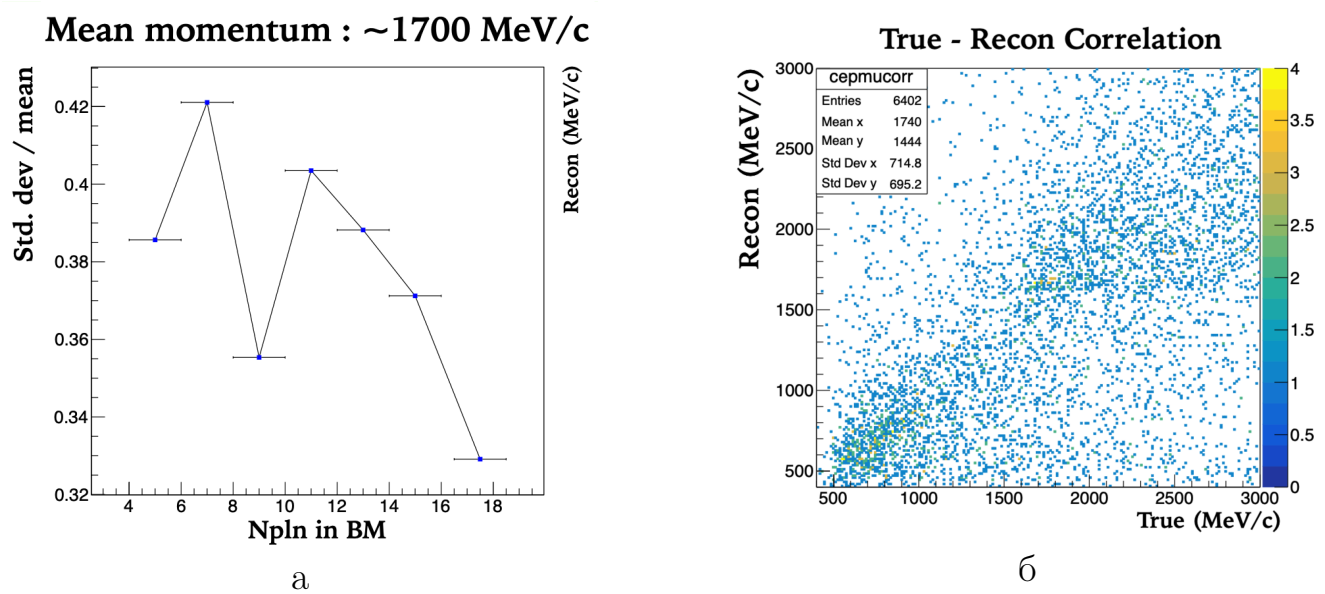
Реконструкция импульсов мюонов, покинувших детектор, и с энергией более $\approx$ 1600 МэВ методом потерь в детекторе не возможна, единственным вари-



а б

Рис. 5.37. Сравнение двух методов восстановления импульсов мюонов для одинаковых событий разыгранных методом Монте-Карло: а – методом вычисления потерянной энергии; б – методом измерения отклонения в магнитном поле. Меньшая эффективность метода измерения импульса по отклонению в магнитном поле обусловлена многократным рассеянием в магнитных модулях.

антом является измерение отклонения частиц в магнитном поле. Разыгрывая данные события в детекторе Baby MIND, измерим отношение погрешности измерения импульса в зависимости от количества пересеченных сцинтилляционных модулей и построим зависимость реконструированного импульса от разыгранного (рис. 5.38).



а б

Рис. 5.38. а – Отношение погрешности реконструкции импульса к значению разыгранного импульса в зависимости от количества сцинтилляционных модулей, зарегистрировавших данное событие. б – Корреляция реконструированного импульса от разыгранного.

5.11. Спектр зарегистрированных событий

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 учтены все особенности детектора, описанные ранее. Эффективность сбора данных на количество протонов на мишень составила 97.4% (рис. 5.39). Эффективность не равна 100%, всвязи с потерями в ходе смены сеансов и проблемы произошедшей с DAQ сервером.

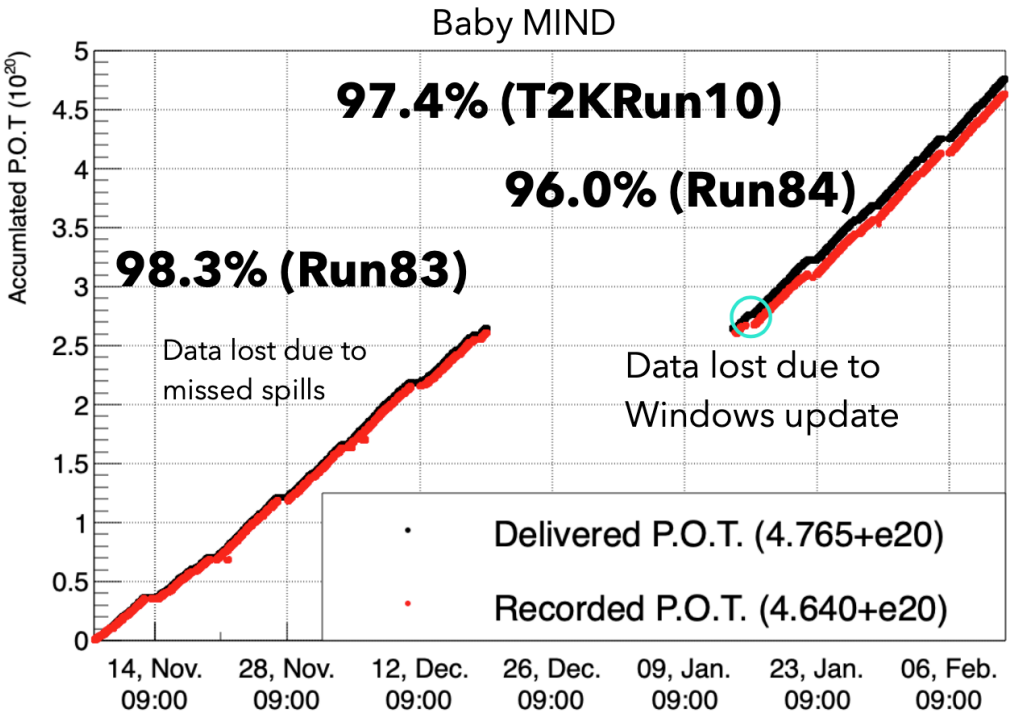


Рис. 5.39. Полученная эффективность сбора данных в ходе первого физического рана.

Реконструкция импульсов зарегистрированных мюонов проведена способами, описанными в разделе 4.4.9, при реконструкции учитывалась эффективности, определенные в разделе 5.10. Результат реконструкции импульсов представлен на рисунке 5.40 [53]. Полученный спектр совпадает с разыгранным спектром методом Монте-Карло.

5.12. Выводы по Главе 5

Детектор Baby MIND был успешно размещен на уровне B2 экспериментальной зоны экспериментальной шахты детектора ND280 на нейтринном ка-

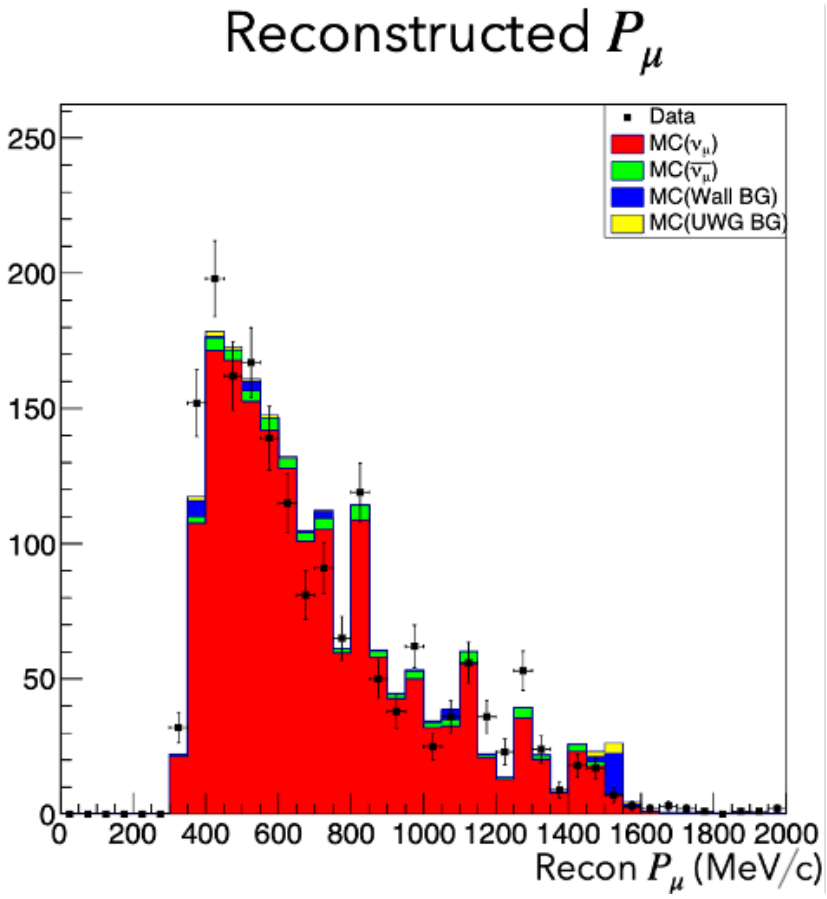


Рис. 5.40. Спектр мюонов, зарегистрированных в детекторе Baby MIND в ходе первого физического сеанса с ноября 2019 года по февраль 2020 года с пучком в нейтринной моде.

нале эксперимента T2K. Данные работы проводились со 2 февраля по 9 марта 2018 года. В ходе первого технического сеанса были зарегистрированы первые нейтринные события в детекторе, проведена синхронизация детектора с нейтринным пучком, проверена синхронизация с мишенью WAGASCI, WallMRDs и протонным модулем. Разработана система сбора данных DAQ, разработаны механизмы контроля качества собранных данных и определены температурные эффекты. По результатам первого технического сеанса в конструкцию детектора Baby MIND было добавлено два сцинтилляционных модуля YASU, для увеличения эффективности восстановления треков мюонов с низким импульсом.

Первый физический сеанс позволил определить стабильность системы сбора данных, определить эффективность восстановления треков, зарядов и импульсов мюонов и получить спектр нейтрино для детектора Baby MIND, установленного под углом 1.5° к пучку нейтрино.

Заключение

Диссертация посвящена разработке и созданию детектора Baby MIND, тестированию данного детектора на мюонном пучке в ЦЕРНе, нейтринном канале T2K и использование в измерениях спектра нейтрино совместно с мишенью WAGASCI.

В данной главе 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./MIP и 37.5 ф.э./MIP 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 исполь-

зованием 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 тестирование 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 количе-

ство нейтринных событий, нормированных на поток протонов. Полученный спектр совпадает с разыгранным спектром методом Монте-Карло.

Благодарности

В заключение автор выражает глубокую признательность своему научному руководителю д.ф.-м.н., профессору Куденко Юрию Григорьевичу за постановку научной задачи, непрерывную поддержку, доверие, ценные советы и конструктивную критику. Также автор выражает благодарность Etam Albert Noah Messomo за неоценимую поддержку, интереснейшие задачи, творческую атмосферу и уникальный опыт совместной работы.

Также автор выражает искренние благодарности: Alain Blondel, М.М. Хабибуллину, О.В. Минееву, Н.В. Ершову, А.Н. Хотянцеву, А. Дудареву, М. В. Медведевой, F. J. Paul Soler, Kenji Yasutome, Atsuko K. Ichikawa, Akihiro Minamino, Toshifumi Tsukamoto, Yannick Favre, Saba Parsa за совместную работу по разработке и созданию детектора Baby MIND.

А также автор хотел бы выразить признательность своим родителям В. Г. Мефодьеву и Л. А. Мефодьевой за поддержку и понимание на всех этапах работ, посвященных разработке и созданию детектора Baby MIND.

Список сокращений и условных обозначений

After pulse – побочный импульс, после основного сигнала

ANS – ответы протокола на команды на FEB

ASIC – application-specific integrated circuit, интегральная схема специального назначения

ARMCO – тонкие намагниченные стальные пластины с высокой проницаемостью

Baby MIND – Magnetized Iron Neutrino Detector, магнитизированный железный нейтринный детектор

Backplane – плата объединения FEB

Daya Bay – Daya Bay Reactor Neutrino Experiment, нейтринный реакторный эксперимент в Гонконге

Double Chooz – нейтринный реакторный эксперимент, установленный на атомной электростанции Chooz во Франции

CCQE – Charge-Current Quasi-Elastic, квазиупругие взаимодействия заряженным током

CHOOZ – нейтринный реакторный эксперимент на расстоянии 1 км от реактора Chooz

CITIROC – Scientific InsTrumentation SiPM Read-Out Chip, чип оцифровки аналогового сигнала с SiPM

CLOCK – часы синхронизации электроники

CMD – команды протокола

Constant fraction – метод постоянной доли, для вычисления временного разрешения

Crosstalk – эффект при котором сигнал в одном из каналов создает нежелательный эффект в другом

DAQ – data acquisition, системы сбора данных

EASIROC – Extended Analogue SiPM ReadOut Chip, чип оцифровки аналогового сигнала с SiPM

ECAL – Electromagnetic CALorimeter, электромагнитный калориметр

Fanout board – плата распределения сигнала

Fast shaper – быстрый интегральный преобразователь сигнала

FEBv1 – Front End Board version 1, первое поколение разработанных печатных плат для детектора Baby MIND

FEB – Front End Board version 2, второе поколение разработанных печатных плат для детектора Baby MIND

FGD – Fine Grained Detector, высоко-гранулированный детектор

FIFO – First In First Out, протокол обработки цепочки данных "первым в, первым из"

FS – Frame Synchronization, блок синхронизации информации между FEB для передачи данных

Gain – усиление

GALLEX – Gallium Experiment, эксперимент по обнаружению радиохимических нейтрино, который проводился в период с 1991 по 1997 год в Национальной лаборатории Gran Sasso

GTRIG – опорный сигнал синхронизации событий

HG – High Gain, канал высокого усиления сигнала на FEB

Hold mask – временная маска запрета оцифровки аналогово сигнала

HVCoax – High Voltage Coax, система контроля короткого замыкания и напряжения

INGRID – Interactive Neutrino GRID (Интерактивная нейтринная сетка из ячеек)

J-PARC – Japanese Particle Accelerator Research Centre

K2K – KEK to Kamioka, ускорительный эксперимент с длиной базой в Японии

KamiokaNDE – Kamioka Nucleon Decay Experiment, эксперимент в Японии, состоящий из трех килотонного черенковского детектора

KamLAND – Kamioka Liquid scintillator Anti-Neutrino Detector, реакторный большой нейтринный детектор, совместный американо-японский эксперимент

L1HoldDelay – время поиска максимальной амплитуды

LED driver – Light-Emitting Diode driver, печатная плата для управления светодиодом

LG – Low Gain, канал низкого усиления сигнала на FEB

MCB – Master Clock Board, плата генератора тактового сигнала

MCR – mini crate, цепочка FEB

MIDAS – Maximum Integration Data Acquisition System, современная система сбора данных, разработанная в PSI и TRIUMF

MINOS – Main Injector Neutrino Oscillation Search, ускорительный нейтринный эксперимент в США

MIP – Minimum ionizing particles, минимально ионизирующие частицы

MPPC – Multi-Pixel Photon Counters, многопиксельные счетчики фотонов

ND280 – Ближний детектор эксперимента T2K

NOvA – NuMI Off-Axis ν_μ Appearance, нейтринный эксперимент с длинной базой в Национальной ускорительной лаборатории им. Ферми

OPERA – Oscillation Project with Emulsion-tRacking Apparatus, эксперимент по изучению нейтринных осцилляций, расположенный в подземной лаборатории Гран-Сассо

P0D – детектор нейтральных пионов

PCB – printed circuit board, печатная плата, пластина из диэлектрика, на поверхности и/или в объёме которой сформированы электропроводящие цепи электронной схемы

PS – proton synchrotron, протонный синхротрон

PTP – паратерфенил

RENO – Reactor Experiment for Neutrino Oscillation, нейтринный реакторный эксперимент у атомной электростанции Yonggwang

RESET – сигнал сброса данных в FIFO

SAGE – Soviet–American Gallium Experiment, Советско-Американский нейтринный эксперимент с галлием

SiPM – Silicon photomultiplier, кремниевый фотоумножитель

SMRD – Side Muon Range Detector, детектора мюонного пробега

SNO – Sudbury Neutrino Observatory, нейтринная обсерватория в Садбери

Spill – пучек ускорителя

Spill header – стартовое слово слота спила пучка

Spill trailer – завершающее слово слота спила пучка

Spill time ID – временные данные с разрешением 10 мс

SPIROC – SiPm InsTrumentation Read-Out Chip, чип оцифров-

ки аналогового сигнала с SiPM

Super-K – Super Kamiokande, Super-Kamioka Neutrino Detection Experiment, нейтринный детектор в Японии

T2K – Tokai to Kamioka, ускорительный нейтринный эксперимент в Японии

TASD – Totally Active Scintillator Detector, полностью актиный сцинтилляционный детектор

TDM – Time Divided Multiplexed, схема мультиплексирования с разделением по времени

Time Slot Start - специальное слово для разграничения данных с каждой FEB в режиме TDM

ToT – Time over Threshold, Время сигнала над порогом

TPC – Time Projection Chamber, время проекционная камера

WAGASCI – WAter-Grid-AndSCintillator, мишень детектор WAGA

Wall MRDs – wall muon range detector, детекторы мюонного пробега в эксперименте WAGASCI

WLS – Wave-Length Shifting optical fibers, спектросмещающее волокно

АЦП – аналогово цифровой преобразователь сигнала

ИЯИ РАН – Институт ядерных исследований Российской академии наук

ОИЯИ – Объединенный Институт ядерных исследований Российской академии наук

ПЛИС – программируемая логическая интегральная схема

НИЯУ МИФИ – Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (Московский инженерно-физический институт)

ССМ – Стандартная солнечная модель

ФЭУ – фотоэлектронный умножитель

ЦЕРН – Европейская организация по ядерным исследованиям, крупнейшая в мире лаборатория физики высоких энергий

Список литературы

1. *Bahcall J. N., Sears R. L.* Solar neutrinos // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 1972. — Vol. 10. — Pp. 25–44.
2. *Filippone B. W., Schramm David N.* Neutrinos From a Standard Solar Model // *Astrophys. J.* — 1982. — Vol. 253. — P. 393.
3. *(мл.) Р. Дэвис.* Полвека с солнечным нейтрино // *Усп. физ. наук.* — 2004. — Vol. 174, no. 4. — P. 408. — URL: `https://ufn.ru/ru/articles/2004/4/g/`.
4. Measurement of the solar neutrino capture rate in SAGE / V. N. Gavrin, J.N. Abdurashitov, T.J. Bowles et al. // 12th International Seminar on High-Energy Physics (QUARKS 2002). — 2002. — 6.
5. Measurement of the solar neutrino capture rate with gallium metal. III: Results for the 2002–2007 data-taking period / J. N. Abdurashitov, V. N. Gavrin, V. V. Gorbachev et al. // *Phys. Rev. C.* — 2009. — Vol. 80. — P. 015807.
6. Solar neutrino flux measurements by the Soviet-American Gallium Experiment (SAGE) for half the 22 year solar cycle / J. N. Abdurashitov, E. P. Veretenkin, V. M. Vermul et al. // *J. Exp. Theor. Phys.* — 2002. — Vol. 95. — Pp. 181–193.
7. GALLEX solar neutrino observations: Results for GALLEX IV / W. Hampel, J. Handt, G. Heusser, et al. // *Phys. Lett. B.* — 1999. — Vol. 447. — Pp. 127–133.
8. GALLEX results from the first 30 solar neutrino runs / P. Anselmann, W. Hampel, G. Heusser, et al. // *Phys. Lett. B.* — 1994. — Vol. 327. — Pp. 377–385.

9. *Hallin A. L. for the SNO collaboration.* Neutrino physics from SNO // *Prog. Part. Nucl. Phys.* — 2010. — Vol. 64. — Pp. 199–201.
10. *Formaggio J. A. for the SNO collaboration.* Measurement of atmospheric neutrinos at the Sudbury Neutrino Observatory // *Nucl. Phys. A.* — 2009. — Vol. 827. — Pp. 498C–500C.
11. Electron energy spectra, fluxes, and day-night asymmetries of B-8 solar neutrinos from measurements with NaCl dissolved in the heavy-water detector at the Sudbury Neutrino Observatory / B. Aharmim, S.N. Ahmed, A.E. Anthony, et al. // *Phys. Rev. C.* — 2005. — Vol. 72. — P. 055502.
12. *Ю. Смирнов О.* Неускорительная нейтринная физика // *Письма в ЭЧАЯ.* — 2012. — Vol. 9, no. 9-10. — Pp. 70–128.
13. *Inoue K.* Results from Kamiokande and status of Super-Kamiokande // *Nucl. Phys. B Proc. Suppl.* — 1997. — Vol. 59. — Pp. 267–276.
14. *Nakamura K. for the K2K collaborations.* Results from Super-Kamiokande and status of K2K // *Nucl. Instrum. Meth. A.* — 2000. — Vol. 472. — Pp. 329–342.
15. *Kielczewska D. for the K2K collaborations.* Neutrino oscillations in Super-Kamiokande and K2K experiments // *Nuovo Cim. B.* — 2005. — Vol. 120. — Pp. 877–885.
16. Three flavor neutrino oscillation analysis of atmospheric neutrinos in Super-Kamiokande / J. Hosaka, K. Ishihara, J. Kameda, et al. // *Phys. Rev. D.* — 2006. — Vol. 74. — P. 032002.
17. Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos / Y. Fukuda, T. Hayakawa, E. Ichihara et al. // *Phys. Rev. Lett.* — 1998. — Vol. 81. — Pp. 1562–1567.

18. Observation of the east - west anisotropy of the atmospheric neutrino flux / T. Futagami, Y. Fukuda, T. Hayakawa et al. // *Phys. Rev. Lett.* — 1999. — Vol. 82. — Pp. 5194–5197.
19. First results from KamLAND: Evidence for reactor anti-neutrino disappearance / K. Eguchi, S. Enomoto, K. Furuno et al. // *Phys. Rev. Lett.* — 2003. — Vol. 90. — P. 021802.
20. *Markoff D. M. for the KamLAND collaboration.* An overview of the KamLAND experiment // *J. Phys. G.* — 2003. — Vol. 29. — Pp. 1481–1484.
21. Measurement of Neutrino Oscillation by the K2K Experiment / M. H. Ahn, E. Aliu, S. Andringa et al. // *Phys. Rev. D.* — 2006. — Vol. 74. — P. 072003.
22. Evidence for muon neutrino oscillation in an accelerator-based experiment / E. Aliu, S. Andringa, S. Aoki et al. // *Phys. Rev. Lett.* — 2005. — Vol. 94. — P. 081802.
23. Search for electron neutrino appearance in a 250 km long baseline experiment / M. H. Ahn, S. Aoki, Y. Ashie, et al. // *Phys. Rev. Lett.* — 2004. — Vol. 93. — P. 051801.
24. *Whitehead Leigh H.* Neutrino Oscillations with MINOS and MINOS+ // *Nucl. Phys. B.* — 2016. — Vol. 908. — Pp. 130–150.
25. *Evans Justin for the MINOS collaboration.* The MINOS Experiment: Results and Prospects // *Adv. High Energy Phys.* — 2013. — Vol. 2013. — P. 182537.
26. *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.
27. Measurements of neutrino oscillation in appearance and disappear-

ance 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.

28. Neutrino oscillation physics potential of the T2K experiment / K. Abe, J. Adam, H. Aihara et al. // *PTEP.* — 2015. — Vol. 2015, no. 4. — P. 043C01.
29. 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.
30. 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.
31. The T2K Experiment / K. Abe, N. Abgrall, H. Aihara et al. // *Nucl. Instrum. Meth. A.* — 2011. — Vol. 659. — Pp. 106–135.
32. First Measurement of Neutrino Oscillation Parameters using Neutrinos and Antineutrinos by NOvA / M. Acero, P. Adamson, L. Aliaga, et al. // *Phys. Rev. Lett.* — 2019. — Vol. 123, no. 15. — P. 151803.
33. Measurement of the Electron Antineutrino Oscillation with 1958 Days of Operation at Daya Bay / D. Adey, F. P. An, A.B. Balantekin et al. // *Phys. Rev. Lett.* — 2018. — Vol. 121, no. 24. — P. 241805.
34. Measurement of electron antineutrino oscillation based on 1230 days of operation of the Daya Bay experiment / F. P. An, A. B. Balantekin, H. R. Band, et al. // *Phys. Rev. D.* — 2017. — Vol. 95, no. 7. — P. 072006.

35. The Detector System of The Daya Bay Reactor Neutrino Experiment / F.P. An, J.Z. Bai, A.B. Balantekin et al. // *Nucl. Instrum. Meth. A*. — 2016. — Vol. 811. — Pp. 133–161.
36. Observation of Reactor Electron Antineutrino Disappearance in the RENO Experiment / J. K. Ahn, S. Chebotaryov, J. H. Choi et al. // *Phys. Rev. Lett.* — 2012. — Vol. 108. — P. 191802.
37. *Joo K. K. for the collaboration.* Status of the RENO Reactor Neutrino Experiment // *Nucl. Phys. B Proc. Suppl.* — 2012. — Vol. 229-232. — Pp. 97–100.
38. *Seo Hyunkwan.* Recent Result from RENO // *J. Phys. Conf. Ser.* — 2019. — Vol. 1216, no. 1. — P. 012003.
39. *for the Double Chooz collaboration J.I. Crespo-Anadón.* Double Chooz: Latest results // *Nuclear and Particle Physics Proceedings*. — 2015. — Vol. 265-266. — Pp. 99–104. — Proceedings of the Neutrino Oscillation Workshop. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405601415003673.
40. *Suekane Fumihiko, Junqueira de Castro Bezerra Thiago.* Double Chooz and a history of reactor Θ_{13} experiments // *Nucl. Phys. B*. — 2016. — Vol. 908. — Pp. 74–93.
41. 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.
42. *Kim Jiae for the T2K collaboration.* Latest Results and Future Prospects from T2K // *PoS*. — 2018. — Vol. NuFact2017. — P. 007.
43. 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. — P. C07028.

44. Baby MIND: A magnetised spectrometer for the WAGASCI experiment / Sven-Patrik Hallsjö, M. Antonova, R. Asfandiyarov et al. // *PoS*. — 2018. — Vol. NuFact2017. — P. 078.
45. Baby MIND detector first physics run / A. Ajmi, M. Antonova, R. Asfandiyarov et al. // Prospects in Neutrino Physics. — 2020. — 4.
46. New experiment WAGASCI to measure cross sections of neutrino interactions in water and hydrocarbon using J-PARC beam / T. Ovsiannikova, M. Antonova, A. Izmaylov et al. // *Phys. Part. Nucl.* — 2017. — Vol. 48, no. 6. — Pp. 1014–1017.
47. Measurement of neutrino and antineutrino oscillations by the T2K experiment including a new additional sample of ν_e interactions at the far detector / K. Abe, J. Amey, C. Andreopoulos et al. // *Phys. Rev. D*. — 2017. — Vol. 96, no. 9. — P. 092006. — [Erratum: Phys.Rev.D 98, 019902 (2018)].
48. *Minamino Akihiro*. WAGASCI and ND280 Upgrades // *JPS Conf. Proc.* — 2016. — Vol. 12. — P. 010038.
49. 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.
50. 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.
51. The new experiment WAGASCI for water to hydrocarbon neutrino cross section measurement using the J-PARC beam /

T. Ovsiannikova, M. Antonova, O. Basille et al. // *J. Phys. Conf. Ser.* — 2016. — Vol. 675, no. 1. — P. 012030.

52. *Kudenko Yury.* The Near neutrino detector for the T2K experiment // *Nucl. Instrum. Meth. A.* — 2009. — Vol. 598. — Pp. 289–295.
53. Measurements of $\overline{\nu}_\mu$ and $\overline{\nu}_\mu + \nu_\mu$ 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`.
54. 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.
55. 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, no. 6. — Pp. 1014–1017.
56. Readout scheme for the Baby-MIND detector / Etam Noah, A. Blondel, F. Cadoux, et al. // *PoS.* — 2016. — Vol. PhotoDet2015. — P. 031.
57. *Мефодьев А., Куденко Ю.* Разработка Прототипа TASD (Totally Active Scintillator Detector) // *Ядерная физика и инжиниринг.* — 2014. — Vol. 5, no. 11-12. — Pp. 924–930.
58. Study of timing characteristics of a 3 m long plastic scintillator counter using waveform digitizers / A. Blondel, D. Breton,

A. Dubreuil et al. // *Nucl. Instrum. Meth. A*. — 2018. — Vol. 877. — Pp. 9–15.

59. Baby MIND: a magnetized segmented neutrino detector for the WAGASCI experiment / A. Mefodev, M. Antonova, R. Asfandiyarov et al. // *Journal of Instrumentation*. — 2017. — Jul. — Vol. 12, no. 07. — P. C07028–C07028. — URL: http://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/12/07/C07028.
60. Measurement of parameters of scintillating bars with wavelength-shifting fibres and silicon photomultiplier readout for the SHiP Muon Detector / W. Baldini, A. Blondel, A. Calcaterra et al. // *Journal of Instrumentation*. — 2017. — Mar. — Vol. 12, no. 03. — P. P03005–P03005. — URL: http://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/12/03/P03005.
61. *Basille, O. and Blondel, A. and Calcaterra, A. and Jacobsson, R. and Khotjantsev, A. and Kudenko, Y. and Kurochka, V. and Lanfranchi, G. and Mefodiev, A. and Mineev, O. and et al.* Baby MIND Readout Electronics Architecture for Accelerator Neutrino Particle Physics Detectors Employing Silicon Photomultipliers // *JPS Conf. Proc.* — 2019. — Vol. 27. — P. 011011.
62. Исследование параметров мюонного детектора SHIP на пучке в ЦЕРН / В.Л. Лихачева, Ю.Г. Куденко, А.В. Мефодьев, другие. // *Письма в ЭЧАЯ*. — 2018. — Vol. 49, no. 1б. — Pp. 67–69.
63. Synchronization of the distributed readout frontend electronics of the Baby MIND detector / M. Antonova, O. Basille, A. Blondel et al. // 2017 International Scientific Conference Electronics. — 2017. — 12.

64. Нейтринный детектор Baby-MIND / А.В. Мефодьев, Ю.Г. Куденко, О.В. Минеев, Хотянцев А.Н. // *Письма в ЭЧАЯ*. — 2017. — Vol. 48, no. 6. — Pp. 1002–1004.
65. Development of electronics and data acquisition system for the J-PARC T59 (WAGASCI) experiment / Naruhiro Chikuma, M. Antonova, O. Basille et al. // *PoS*. — 2017. — Vol. EPS-HEP2017. — P. 780.
66. The Baby MIND spectrometer for the J-PARC T59(WAGASCI) experiment / M. Antonova, O. Basille, A. Blondel et al. // *PoS*. — 2017. — Vol. EPS-HEP2017. — P. 508.
67. Baby MIND Experiment Construction Status / M. Antonova, O. Basille, A. Blondel et al. // Prospects in Neutrino Physics. — 2017. — 4.
68. The design, construction and testing of TASD (Totally Active Scintillator Detector) / A. Mefodiev, M. Antonova, O. Basille et al. // *PoS*. — 2016. — Vol. PhotoDet2015. — P. 067.
69. Performance test of new MPPC for a new neutrino detector WAGASCI / Fuminao Hosomi, M. Antonova, O. Basille et al. // *PoS*. — 2016. — Vol. PhotoDet2015. — P. 046.
70. *Mefodiev A. V., Kudenko Y. G.* The design of the totally active scintillator detector // *J. Phys. Conf. Ser.* — 2015. — Vol. 653, no. 1. — P. 012016.
71. *Понтекорво Б.М.* Мезоний и антимезоний // *ЖЭТФ*. — 1957. — Vol. 6. — P. 429.
72. *Maki Ziro, Nakagawa Masami, Sakata Shoichi.* Remarks on the unified model of elementary particles // *Prog. Theor. Phys.* — 1962. — Vol. 28. — Pp. 870–880.

73. *Wolfenstein L.* Neutrino Oscillations in Matter // *Phys. Rev. D.* — 1978. — Vol. 17. — Pp. 2369–2374.

74. *Михеев С. П., Смирнов А. Ю.* Резонансные осцилляции нейтрино в веществе // *Усп. физ. наук.* — 1987. — Vol. 153, no. 9. — Pp. 3–58. — URL: `https://ufn.ru/ru/articles/1987/9/a/`.

75. *Hiebert R. D., Thiessen Henry A., Obst A. W.* Photomultiplier Tube Base for High Pulsed Anode Currents // *Nucl. Instrum. Meth.* — 1977. — Vol. 142. — Pp. 467–469.

76. Development of Multianode Photomultiplier Tube / Fumihiko Takasaki, Hitoshi Saito, Tohru Fukui et al. // *Nucl. Instrum. Meth. A.* — 1987. — Vol. 260. — P. 447.

77. Atmospheric Neutrino Oscillation Analysis with Improved Event Reconstruction in Super-Kamiokande IV / M Jiang, K Abe, C Bronner et al. // *PTEP.* — 2019. — Vol. 2019, no. 5. — P. 053F01.

78. *Michael D.* The MINOS experiment // *Prog. Part. Nucl. Phys.* — 2002. — Vol. 48. — Pp. 99–109.

79. *Ochoa-Ricoux J.P. for the collaboration.* Physics with the MINOS experiment // *Prog. Part. Nucl. Phys.* — 2006. — Vol. 57. — Pp. 147–149.

80. Measurement of Neutrino Oscillations with the MINOS Detectors in the NuMI Beam / P. Adamson, C. Andreopoulos, K. E. Arms et al. // *Phys. Rev. Lett.* — 2008. — Vol. 101. — P. 131802.

81. *Habig Alec.* MINOS neutrino oscillation results // *Mod. Phys. Lett. A.* — 2010. — Vol. 25. — Pp. 1219–1231.

82. *Kafka T.* MINOS Experiment at Fermilab // *Prog. Part. Nucl.*

Phys. — 2010. — Vol. 64. — Pp. 184–186.

83. Measurement of neutrino oscillation by the K2K experiment / M. H. Ahn, E. Aliu, S. Andringa et al. // *Physical Review D.* — 2006. — Oct. — Vol. 74, no. 7. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.74.072003.
84. 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.
85. Initial results from the CHOOZ long baseline reactor neutrino oscillation experiment / M Apollonio, A Baldini, C Bemporad et al. // *Phys. Lett. B.* — 1998. — Vol. 420. — Pp. 397–404.
86. Limits on neutrino oscillations from the CHOOZ experiment / M Apollonio, A Baldini, C Bemporad et al. // *Phys. Lett. B.* — 1999. — Vol. 466. — Pp. 415–430.
87. Discovery of τ Neutrino Appearance in the CNGS Neutrino Beam with the OPERA Experiment / N. Agafonova, A. Aleksandrov, A. Anokhina et al. // *Phys. Rev. Lett.* — 2015. — Vol. 115, no. 12. — P. 121802.
88. Final Results of the OPERA Experiment on ν_τ Appearance in the CNGS Neutrino Beam / N. Agafonova, A. Alexandrov, A. Anokhina et al. // *Physical Review Letters.* — 2018. — May. — Vol. 120, no. 21. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.120.211801.
89. First measurement of electron neutrino appearance in NOvA / P. Adamson, C. Ader, M. Andrews et al. // *Phys. Rev. Lett.* —

2016. — Vol. 116, no. 15. — P. 151806.

90. The T2K ND280 Off-Axis Pi-Zero Detector / S. Assylbekov, G. Barr, B.E. Berger et al. // *Nucl. Instrum. Meth. A*. — 2012. — Vol. 686. — Pp. 48–63.
91. The T2K Fine-Grained Detectors / P.-A. Amaudruz, M. Barbi, D. Bishop et al. // *Nucl. Instrum. Meth. A*. — 2012. — Vol. 696. — Pp. 1–31.
92. Time Projection Chambers for the T2K Near Detectors / N. Abgrall, B. Andrieu, P. Baron, et al. // *Nucl. Instrum. Meth. A*. — 2011. — Vol. 637. — Pp. 25–46.
93. The T2K experiment and downstream electromagnetic calorimeter / G. Davies, I. Bertram, A. Chilingarov, et al. // *J. Phys. Conf. Ser.* — 2008. — Vol. 110. — P. 122012.
94. The T2K Side Muon Range Detector (SMRD) / S. Aoki, G. Barr, M. Batkiewicz et al. // *Nucl. Instrum. Meth. A*. — 2013. — Vol. 698. — Pp. 135–146.
95. 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`.
96. Review of Particle Physics / C. Patrignani, K. Agashe, G. Aielli, et al. // *Chin. Phys. C*. — 2016. — Vol. 40, no. 10. — P. 100001.
97. New and Optimized Magnetization Scheme for the Baby Magnetized Iron Neutrino Detector at J-PARC / Gabriella Rolando, Philippe Benoit, Alain Blondel et al. // *IEEE Trans. Magnetics*. — 2017. — Vol. 53, no. 5. — P. 8000706.
98. Scintillator counters with multi-pixel avalanche photodiode read-

out for the ND280 detector of the T2K experiment / O. Mineev, A. Afanasjev, G. Bondarenko, et al. // *Nucl. Instrum. Meth. A*. — 2007. — Vol. 577. — Pp. 540–551.

99. Scintillator detectors with long WLS fibers and multi-pixel photodiodes / O. Mineev, Yu. Kudenko, Yu. Musienko et al. // *JINST*. — 2011. — Vol. 6. — P. P12004.
100. Scintillator counters with WLS fiber/MPPC readout for the side muon range detector (SMRD)of the T2K experiment / A. Izmaylov, S. Aoki, J. Blocki, et al. // *Nucl. Instrum. Meth. A*. — 2010. — Vol. 623. — Pp. 382–384.
101. Application of Hamamatsu MPPC to T2K Neutrino Detectors / M. Yokoyama, T. Nakaya, S. Gomi, et al. // *Nucl. Instrum. Meth. A*. — 2009. — Vol. 610. — Pp. 128–130.
102. Development of Multi-Pixel Photon counters for T2K long baseline neutrino experiment / A. Minamino, N. Nagai, D. Orme, et al. // 2008 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference and 16th International Workshop on Room-Temperature Semiconductor X-Ray and Gamma-Ray Detectors. — 2008. — Pp. 3111–3114.
103. Hamamatsu. MPPC – Multi-Pixel Photon Counter. White Paper. — http://hamamatsu.com.cn.
104. CAEN. Digital Pulse Processing in Nuclear Physics. White Paper WP2081. — http://www.caen.it.
105. Large-angle production of charged pions by 3-GeV/c - 12-GeV/c protons on carbon, copper and tin targets / M.G. Catanesi, E. Radicioni, R. Edgecock, et al. // *Eur. Phys. J. C*. — 2008. — Vol. 53. — Pp. 177–204.

106. Forward production of charged pions with incident protons on nuclear targets at the CERN PS / M. Apollonio, A. Artamonov, A. Bagulya, et al. // *Phys. Rev. C.* — 2009. — Vol. 80. — P. 035208.

107. Waveform digitization for high resolution timing detectors with silicon photomultipliers / A. Ronzhin, M.G. Albrow, S. Los, et al. // *Nucl. Instrum. Meth. A.* — 2012. — Vol. 668. — Pp. 94–97.

108. *Mefodiev A.V., Kudenko Yu.G.* The design of the TASD (totally active scintillator detector) prototype // *Phys. Atom. Nucl.* — 2015. — Vol. 78, no. 13. — Pp. 1567–1573.

109. Development of multi-pixel photon counters for the T2K long baseline neutrino experiment / D. Orme, N. Nagai, A. Minamino, et al. // *Nucl. Instrum. Meth. A.* — 2010. — Vol. 623. — Pp. 321–323.

110. *Vacheret Antonin for the T2K collaboration.* Characterization of the 1.3-mm x 1.3-mm MPPC for the T2K near detectors // *Nucl. Instrum. Meth. A.* — 2010. — Vol. 623. — Pp. 201–203.

111. *Cizel Jean-Baptiste.* CITIROC1A Datasheet V2 5. — http://www.weeroc.com/en/products/citiroc-1, 2019. — May.

112. Implementation of CERN secondary beam lines T9 and T10 in BDSIM / Gian Luigi D'Alessandro, Johannes Bernhard, Stewart Boogert et al. // *J. Phys. Conf. Ser.* — 2019. — Vol. 1350, no. 1. — P. 012095.

113. Measurement of the charged-current electron (anti-)neutrino inclusive cross-sections at the T2K off-axis near detector ND280 / K. Abe, H. Aihara, A. Ajmi et al. // *JHEP.* — 2020. — Vol. 10. — P. 114.

114. DE10-Nano (TERASIC TECHNOLOGIES). — https://www.terasic.com.tw/, 2017.