

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

**Отчет по проекту
«Многоцелевой детектор MPD»**

02-1-1065-3-2011/2025

Обоснование второго этапа проекта MPD

Тема: 02-0-1065-2007/2026

Руководители: В.М. Головатюк, В.Д. Кекелидзе, В.Г.Рябов

Отправлено

Научно-технический совет ЛФВЭ

СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение	3
2. Оценка производительности физических измерений на MPD.....	8
3. Детектор MPD.....	23
3.1 Введение.....	23
3.2 Сверхпроводящий магнит.....	28
3.3 Время-проекционная камера (TPC).....	40
3.4 Система идентификации (TOF).....	52
3.5 Быстрый передний детектор (FFD).....	58
3.6 Передний адронный калориметр (FHCAL).....	63
3.7 Электромагнитный калориметр (ECAL).....	70
3.8 Тонкостенная пучковая труба MPD.....	79
3.9 Система сбора данных MPD (DAQ)	80
3.10 Инженерная поддержка.....	84
4. Детекторы второго этапа эксперимента MPD.....	89
4.1 Система внутреннего трекера (ITS).....	89
4.2 Передний трековый детектор для эксперимента MPD	100
4.3 Торцевой времяпролетный детектор ETOF.....	113
5. Основные этапы монтажа MPD в 2024-2025 г.г.....	116
6. План-график и необходимые ресурсы.....	117

1. Введение

В Объединенном Институте Ядерных Исследований (ОИЯИ) ведется строительство Nuclotron-based Ion Collider fAcility (NICA) комплекса на базе Нуклотрона, ввод которого в эксплуатацию ожидается в конце 2025 года. Многоцелевой детектор (MPD) является одним из двух специализированных экспериментов по изучению столкновений тяжелых релятивистских ионов на NICA, и его компоненты в настоящее время находятся в производстве. Основная научная задача эксперимента MPD – это поиск новых явлений в области больших барионных плотностей фазовой диаграммы состояния КХД материи путем столкновения встречных пучков тяжелых ионов в диапазоне энергий $4 \text{ ГэВ} \leq \sqrt{s_{NN}} \leq 11 \text{ ГэВ}$ и/или изучения столкновений пучка с фиксированной мишенью в диапазоне энергий $2.3 \text{ ГэВ} \leq \sqrt{s_{NN}} \leq 3.5 \text{ ГэВ}$.

Структура фазовой диаграммы показана на рис. 1, где обозначены различные фазы состояния КХД материи. Критическая точка возникает там, где фазовый переход из адронной материи к кварк-глюонной плазме (КГП) меняется с перехода первого рода к кроссоверу. Модельные расчеты показывают, что наибольшая барионная плотность достигается в диапазоне энергий NICA, что делает MPD особенно хорошо подходящим для экспериментального поиска существования критической точки. Исследования на NICA также могут внести вклад в изучение свойств ядерной материи внутри нейтронных звезд, что является одной из целей современной астрофизики. Недавнее наблюдение слияния нейтронных звезд как с помощью прямого обнаружения гравитационных волн, так и в электромагнитном спектре положило начало новой эре изучения астрономии с использованием сигналов из различных источников. Недавние модельные расчеты показывают, что при слиянии нейтронных звезд ядерная материя достигает плотности и температуры, аналогичных тем, которые имеют место при столкновениях тяжелых ионов в диапазоне энергий NICA [1,2]. Таким образом, MPD предоставляет уникальную возможность дополнить изучение слияний нейтронных звезд данными наземного лабораторного эксперимента.

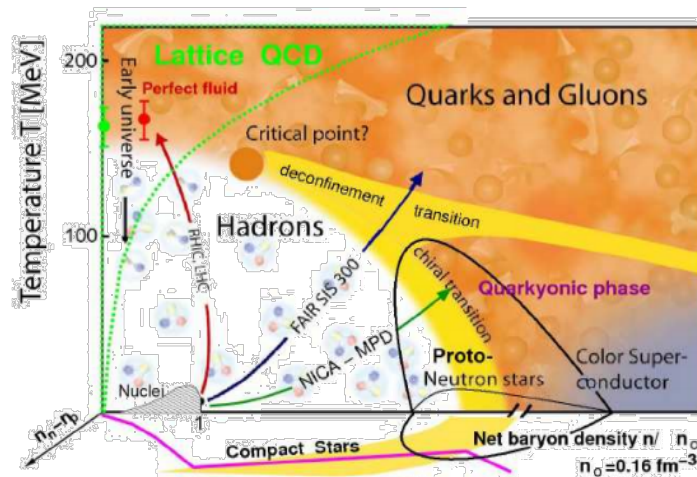


Рис. 1. Схематическое изображение фазовой диаграммы КХД материи.

В качестве первых пучков мы можем ожидать ядра Хе или Ви, которые обеспечат надежную работу инжекционного и ускорительного комплексов NICA во время пусконаладочных работ. Кинетическая энергия пучка на выходе Нуклотрона будет

ограничена 2.5 АГэВ. Таким образом, начальная энергия столкновений может варьироваться от 4 до 7 ГэВ (от 2.3 до 2.9 ГэВ) в случае столкновений встречных пучков ионов (столкновений одного пучка с фиксированной мишенью). Свойства материи, образующейся в столкновениях тяжелых ионов при энергиях NICA, будут изучаться путем измерения целого ряда наблюдательных величин. Глобальные характеристики ядерных столкновений, такие как множественность заряженных частиц (dN/dy) и поперечная энергия (E_T), рассматриваются как основные наблюдаемые для определения плотности энергии, достигнутой в столкновении. Ожидается, что ключевые глобальные наблюдаемые величины, которые можно будет измерить с использованием первых экспериментальных данных, позволят получить информацию о явлениях, связанных с конфайнментом кварков, восстановлением киральной симметрии и поиском критической точки на фазовой диаграмме.

Адроны. Структура фазовой диаграммы КХД изучается путем измерения интегральных выходов адронов, а различные области диаграммы доступны при изменении энергии столкновения ядер. Экспериментальные результаты по интегральным выходам адронов, образующихся в столкновениях тяжелых ионов в диапазоне энергий от AGS до LHC, показывают, что конечное состояние таких столкновений близко к химическому равновесию. Таким образом, выходы адронов могут быть подогнаны под тепловую статистическую модель с использованием двух свободных параметров, а именно T и μ_B . Предполагая, что измеренные множественности сохраняются на протяжении всей эволюции образующейся системы, анализ выявляет точку адронизации вдоль линии партон-адронной границы КХД по полученным значениям T и μ_B . В рамках тепловой статистической модели можно показать, что диапазон энергий NICA охватывает область, в которой вещество, создаваемое в ядерных столкновениях, переходит от чисто барионного к мезонному веществу.

MPD хорошо подходит для измерения и идентификации адронов в широком диапазоне импульсов и быстрот благодаря реконструкции треков заряженных частиц в TPC и идентификации частиц по измерениям их ионизационных потерь ($\langle dE/dx \rangle$) в TPC и времени лета в TOF. Кроме того, нейтральные мезоны могут быть реконструированы в каналах их распада с фотонами в конечном состоянии, где фотоны могут детектироваться непосредственно в ECAL или измеряться как e^+e^- пары, возникшие в результате конверсии фотонов в пучковой трубе и внутренних стенках TPC. Установка MPD обладает превосходными возможностями для измерения широкого спектра идентифицированных адронов, включая различные состояния π , K , p , $\phi(1020)$, Λ , Σ , Ξ , Ω , и т.д., а также легкие (гипер)ядра, такие как d , t , ^3He , ^4He , ^3H , ^4H , и ^4He .

Примером подходящей наблюдаемой величины для изучения начала деконфайнмента [55] является отношение выхода каонов к пионам. На рис. 2а) показаны функции возбуждения для отношений K^+/π^+ , K^-/π^- и Λ/π^+ . В области энергий от AGS до LHC отношения K^+/π^+ и Λ/π^+ имеют пиковую структуру, тогда как отношение K^-/π^- демонстрирует монотонный рост [4]. Эта особенность очень хорошо описывается тепловой статистической моделью, где она, по-видимому, обусловлена падением бариохимического потенциала с ростом энергии столкновений и переходом от барионного доминирования к мезонному. Аналогичное поведение наблюдается и в других модельных расчетах, некоторые из которых даже показывают более резкий пик, за которым следует плато в соотношении K^+/π^+ как функции T/μ_B . MPD позволит охватить этот диапазон энергий с использованием одной экспериментальной установки и получить результаты более высокой точности.

Анизотропные потоки. Предсказанный фазовый переход первого рода из адронной материи в КГП характеризуется резким падением давления, или смягчением уравнения состояния (EoS) [5]. Такие сигналы, как анизотропный поток, очень перспективны для изучения соответствующих явлений благодаря их чувствительности к EoS. Зависимость направленного потока (v_l) от быстроты чувствительна к самым ранним стадиям столкновения, поскольку она генерируется за время прохождения двух сталкивающихся ядер друг через друга, $t_{\text{pass}} = 2R/\gamma_s\beta_s$. Как гидродинамические, так и транспортные модельные расчеты показывают, что направленный поток заряженных частиц, особенно барионов при нулевых быстротах, очень чувствителен к EoS. Наклон зависимости dv_l/du в области нулевых быстрот при этом характеризует общую величину нечетной компоненты сигнала направленного потока. Минимум в зависимости dv_l/du может быть связан со смягчением EoS из-за фазового перехода первого рода между адронной материей и КГП. Эллиптический поток v_2 является одной из наиболее подробно изученных наблюдаемых величин в релятивистских столкновениях ядер и был измерен в различных экспериментах за последние три десятилетия. Однако точные дифференциальные измерения v_2 в зависимости от центральности, p_T и быстроты для различных видов частиц в диапазоне энергий NICA пока недоступны. Для описания существующих результатов $v_2(p_T)$ при энергиях NICA были проведены расчеты с использованием современных моделей [6,7]: гибридные модели с образованием КГП относительно хорошо описывают $v_2(p_T)$ протонов в Au+Au столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 7.7$ ГэВ и выше, чисто адронные транспортные модели недооценивают измеренные значения v_2 , см. рис. 2b). Иная ситуация наблюдается в Au+Au столкновениях при энергиях меньших $\sqrt{s_{NN}} = 4.5$ ГэВ, где чисто адронная транспортная модель объясняет новые измерения $v_2(p_T)$, полученные в эксперименте STAR с фиксированной мишенью, см. рис. 1с). Результаты сравнения модельных предсказаний с данными для $v_2(p_T)$ при $\sqrt{s_{NN}} = 7.7$ ГэВ и 4.5 ГэВ могут указывать на то, что при энергиях NICA происходит переход от партонной к адронной материи. Ожидается, что высокоточные дифференциальные измерения v_n в эксперименте MPD на NICA дадут ценную информацию об этой области энергий, соответствующей партон-адронному переходу.

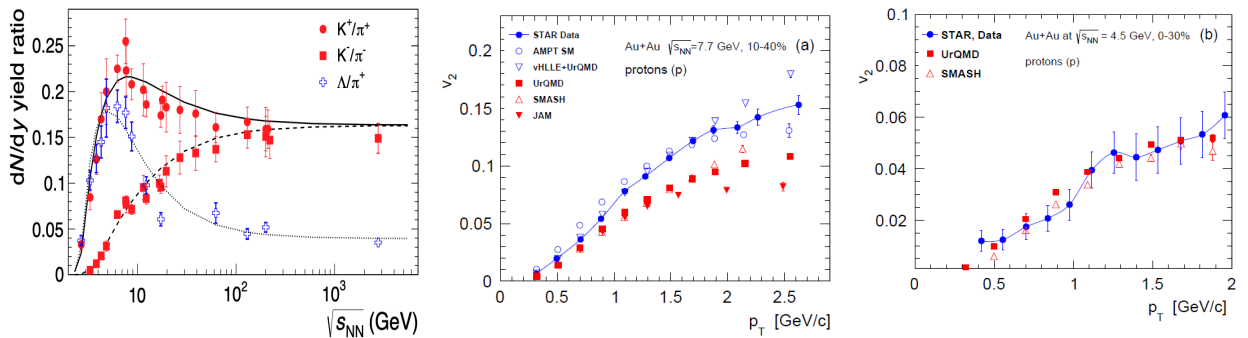


Рис. 2. (a) Функции возбуждения для отношений K^+/π^+ , K^-/π^- и Λ/π^+ . Линии соответствуют предсказаниям тепловой статистической модели. Зависимость v_2 протонов от их поперечного импульса в 10-40% Au+Au столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 7.7$ ГэВ и (b) 0-30% Au+Au столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 4.5$ ГэВ (c). Синие сплошные символы соответствуют данным эксперимента STAR [8].

Фемтоскопия. Фемтоскопия используется в столкновениях тяжелых ионов для определения размера системы, испускающей частицы, и деталей пространственно-временной эволюции этой системы. В частности, фемтоскопические корреляционные измерения для тождественных пионов просты в исполнении благодаря большому выходу пионов и хорошо изученной методике измерений, которая в первом приближении нечувствительна к эффектам ограниченного акцептанса и эффективности регистрации частиц. В результате измерения двухпионных фемтоскопических корреляционных функций обычно являются одними из первых, проводимых в экспериментах на ускорителях сразу после их запуска, и, таким образом, являются отличными кандидатами для физических измерений первого дня. Фемтоскопические измерения проводятся уже несколько десятилетий в зависимости от энергии столкновения, размера сталкивающейся системы, центральности столкновения, поперечного импульса пары частиц, ориентации плоскости реакции [9-10]. Зависимость объема излучающей системы от энергии столкновения, полученная с помощью двухпионной интерферометрии, представляет особый интерес для MPD. В диапазоне энергий NICA наблюдается довольно немонотонная зависимость объема от энергии. Однако подобное поведение пока можно объяснить систематическими неопределенностями измерений. Измерения при энергиях выше $\sqrt{s_{NN}} = 7.7$ ГэВ были выполнены с помощью коллайдерных экспериментов, в то время как результаты, полученные при более низких энергиях, страдают от ограниченной статистики и были выполнены в экспериментах с фиксированной мишенью. Более точные данные, основанные на большой статистической выборке в эксперименте с геометрией коллайдера и проанализированные с помощью современных методов, будут получены в MPD.

Флуктуации. Важной особенностью фазовой структуры КХД является существование критической точки, за которой при больших значениях μ_B следует линия фазового перехода первого рода. Если фазовая траектория системы проходит вблизи этой точки, то ожидаются значительные вариации термодинамических параметров системы [11]. Такие вариации можно обнаружить при анализе событийных флуктуаций сохраняемых зарядов, например, барионного числа или странности. Расчеты на основе КХД показывают, что моменты распределений множественности по событиям, а также их комбинации чувствительны к длине корреляции, характерному параметру фазового перехода, и к восприимчивости сохраняемых зарядов. Более того, высшие моменты распределений сохраняемых величин имеют более сильную зависимость от длины корреляции. Недавние измерения STAR в рамках программы RHIC-BES [12] не показывают заметных признаков немонотонного поведения функции возбуждения для моментов (нет)протонов в центральных Au+Au столкновениях в области энергий ниже $\sqrt{s_{NN}} = 20$ ГэВ, что может быть эффектом диссипации искомого сигнала в адронной фазе или эффектом ограниченного фазового пространства. Эксперимент MPD на NICA сможет просканировать область энергий столкновений $\sqrt{s_{NN}} = 2.3-11$ ГэВ со значительно большей точностью.

Электромагнитные сигналы. Электромагнитные сигналы чувствительны к двум основным характерным свойствам КПП - деконфайнменту кварков и глюонов и восстановлению киральной симметрии. Такие сигналы являются проникающими, т.е. несущими информацию о среде на момент своего рождения. Основным предметом интереса является идентификация теплового излучения, испускаемого на ранней стадии столкновения, когда происходит образование КПП и деконфайнмент, а также на последующей стадии адронизации, когда имеют место эффекты восстановления киральной симметрии. Эксперимент MPD очень хорошо подходит для изучения электронных пар, охватывая весь интересующий нас диапазон инвариантных масс. Этому способствуют большой акцептанс, отличные возможности для идентификации частиц и высокая интегральная светимость коллайдера NICA. Электроны будут идентифицироваться по

величине их ионизационных потерь в ТРС, времени пролета в TOF и $E/p = 1$ в ECAL, где E и p – измеренные энергия и импульс частицы. В эксперимент MPD будет изучаться диапазон энергий, который не был охвачен исследованием электромагнитных сигналов, но имеет решающее значение для понимания теплового излучения. Выход дилептонов в области промежуточных масс (IMR), 1-3 ГэВ/с², был выделен как наиболее подходящий сигнал для наблюдения теплового излучения из КГП. При энергиях NICA вклад от распадов адронов с тяжелыми ароматами пренебрежимо мал, что позволяет проводить относительно чистые измерения теплового излучения в IMR. Параметр обратного наклона T_s спектра инвариантных масс в этом диапазоне масс тесно связан с начальной температурой T_i образующегося файерболла и поэтому может рассматриваться как «термометр» для столкновения тяжелых ионов, см. рис.3 [13]. Очень интересным результатом модельных расчетов является предсказание теплового излучения из КГП вплоть до энергий столкновения $\sqrt{s_{NN}} = 6-8$ ГэВ, что устанавливает начало формирования КГП в пределах энергетического диапазона, охватываемого на NICA.

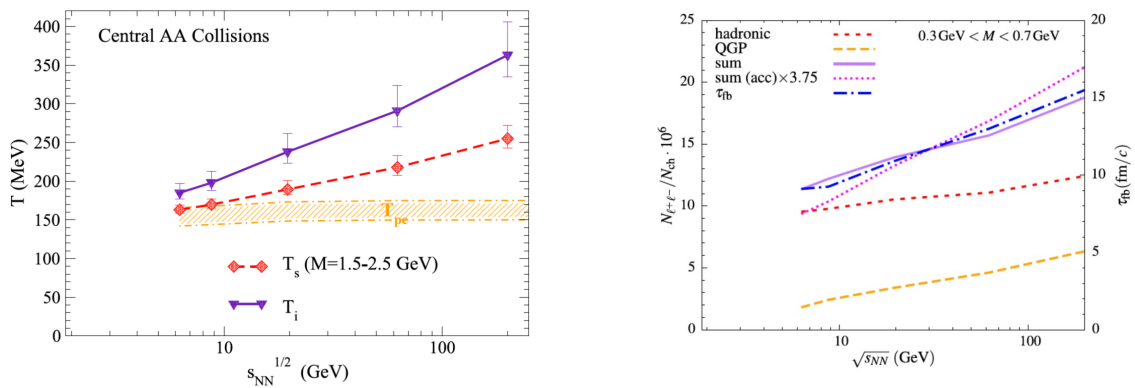


Рис. 3. Функции возбуждения параметра обратного наклона T_s спектра инвариантных масс (a) и выхода пар в области малых масс (b).

В области малых масс (LMR), < 1 ГэВ/с², наблюдается избыточный выход пар во всех сталкивающихся системах тяжелых ионов и при всех энергиях. При энергиях SIS-17, SPS и RHIC избыток, в котором доминирует тепловое излучение адронного газа, связан с восстановлением киральной симметрии, что проявляется в уширении спектральной функции $\rho(770)$ мезона [14]. Дилептонный избыток, проинтегрированный в диапазоне масс 0.3-0.7 ГэВ/с², оказался пропорционален времени жизни файерболла, см. рис. 3. Таким образом, дилептонный избыток в данной области масс можно рассматривать как «хронометр». Отклонения от пропорциональности между дилептонным избытком и временем жизни файерболла могут сигнализировать об изменениях времени жизни, связанных с предполагаемыми критическими явлениями и наступлением фазового перехода первого рода.

Реальные фотоны несут ту же физическую информацию, поэтому они являются важной частью физической программы релятивистских экспериментов с тяжелыми ионами. Инклюзивный выход фотонов включает «прямые» фотоны поверх подавляющего фона от адронных распадов, в основном от распадов π^0 мезонов. Прямые фотоны образуются либо в процессах жесткого рассеяния, либо испускаются в виде теплового излучения из образующейся среды. Действительно, при высоких энергиях RHIC и LHC был обнаружен сигнал прямых фотонов поверх адронного фона [15-16], что согласуется с расчетами

пертурбативной КХД при $E_\gamma > 5$ ГэВ и тепловым излучением из КГП и адронной фазы при более низких энергиях. При более низких энергиях SPS был установлен только верхний предел на выход прямых фотонов [17] или малый сигнал. MPD будет проводить измерения реальных фотонов, детектируя их в ECAL или используя метод конверсии, но в обоих случаях измерения будут представлять сложную экспериментальную задачу.

- [1] S. Blacker, N.U.F. Bastian, A. Bauswein, D.B. Blaschke, T. Fischer, M. Oertel, T. Soultanis, S. Typel, Phys. Rev. D 102(12), 123023 (2020). DOI 10.1103/PhysRevD.102.123023
- [2] E.R. Most, L. Jens Papenfort, V. Dexheimer, M. Hanauske, H. Stoecker, L. Rezzolla, Eur. Phys. J. A 56(2), 59 (2020). DOI 10.1140/epja/s10050-020-00073-4
- [3] M. Gazdzicki, Eur. Phys. J. ST 229(22-23), 3507 (2020). DOI 10.1140/epjst/e2020-000090-9
- [4] A. Andronic, Int. J. Mod. Phys. A 29, 1430047 (2014). DOI 10.1142/S0217751X14300476
- [5] H. Stoecker, Nucl. Phys. A750, 121 (2005). DOI 10.1016/j.nuclphysa.2004.12.074
- [6] A. Taranenko, P. Parfenov, A. Truttse, Phys. Part. Nucl. 51(3), 309 (2020). DOI 10.1134/S1063779620030296
- [7] P. Parfenov, A. Taranenko, D. Idrisov, V.B. Luong, N. Geraksiev, A. Demanov, A. Povarov, V. Kireyeu, A. Truttse, E. Volodihin, (2020)
- [8] J. Adam, et al., Phys. Rev. C 103(3), 034908 (2021). DOI 10.1103/PhysRevC.103.034908
- [9] J. Adamczewski-Musch, et al., Phys. Lett. B 795, 446 (2019). DOI 10.1016/j.physletb.2019.06.047
- [10] C. Adler, et al., Phys. Rev. Lett. 87, 082301 (2001). DOI 10.1103/PhysRevLett.87.082301
- [11] M. Stepanov, Phys. Rev. Lett. 102, 032301 (2009). DOI 10.1103/PhysRevLett.102.032301
- [12] J. Adam, et al., Phys. Rev. Lett. 126(9), 092301 (2021). DOI 10.1103/PhysRevLett.126.092301
- [13] R. Rapp, H. van Hees, Phys. Lett. B 753, 586 (2016). DOI 10.1016/j.physletb.2015.12.065
- [14] J. Adamczewski-Musch, et al., Nature Phys. 15(10), 1040 (2019). DOI 10.1038/s41567-019-0583-8
- [15] A. Adare, et al., Phys. Rev. Lett. 104, 132301 (2010). DOI 10.1103/PhysRevLett.104.132301
- [16] L. Adamczyk, et al., Phys. Lett. B 770, 451 (2017). DOI 10.1016/j.physletb.2017.04.050
- [17] R. Albrecht, et al., Phys. Rev. Lett. 76, 3506 (1996). DOI 10.1103/PhysRevLett.76.3506

2. Изучение физической программы MPD

В период 2020-2024 годов была проведена комплексная программа изучения характеристик и возможностей проведения физических измерений на детекторе MPD с акцентом на коллайдерный режим работы MPD-NICA с пучками тяжелых ионов. Результаты этих исследований были представлены на многих международных конференциях, где члены коллаборации выступили с более чем 200 устными докладами. Количество публикаций по возможностям измерения физических наблюдаемых в реферируемых журналах превысило 60, при этом первая статья коллаборации была опубликована в высоко рейтинговом европейском журнале EPJA («Статус и начальные исследования физических характеристик эксперимента MPD на NICA», Eur.Phys.J.A 58 (2022) 7, 140). Ниже мы приводим основные результаты с их кратким описанием, поддерживаемым ссылками в конце.

2.1. Центральность столкновений

В столкновениях тяжелых ионов центральность характеризуется прицельным параметром, который представляет собой расстояние между центрами ядер в плоскости, перпендикулярной оси пучка. Прицельный параметр определяет область перекрытия ядер и размер системы столкновения. Значение прицельного параметра экспериментально недоступно, но его оценка может быть получена из экспериментальных данных с использованием измеряемых величин, приблизительно пропорциональных области перекрытия ядер. Центральность события может быть охарактеризована множественностью заряженных частиц или поперечной энергией, измеренной в заданном интервале псевдобыстроты, или энергией фрагментов-спектаторов, зарегистрированных в в переднем направлении. Для определения центральности в эксперименте MPD рассматриваются различные процедуры. Ниже мы описываем процедуру, определяющую центральность по множественности рожденных заряженных частиц, измеренной в TPC в области средних быстрот.

Центральность оценивалась для событий с реконструированной вершиной в пределах $|z_{\text{vertex}}| < 130$ см, где эффективность триггера остается постоянной. Для реконструированных треков использовались довольно слабые критерии отбора: количество хитов в TPC $N_{\text{TPC}} > 10$, поперечный импульс $p_T > 0,1$ ГэВ/с, близость трека к первичной вершине $|DCA| < 2$ см и псевдобыстрота трека $|\eta| < 0,5$. Каждый трек корректируется на эффективность реконструкции, оцененную как функцию z-вершины события и псевдобыстроты трека, чтобы учесть неэффективность TPC. Типичное распределение множественности полностью реконструированных заряженных частиц показано на рис. 1. Мы назовем его экспериментальным распределением множественности N_{tracks} . Центральность события оценивается как процентиль общей множественности с максимальным значением, учитывающим ограниченную эффективность триггера, которая отбирает только 91% сечения неупругого взаимодействия.

Монте-Карло версия стандартной модели Глаубера (MCG) использовалась для воспроизведения экспериментального распределения множественности N_{tracks} и оценки геометрических параметров столкновений. Распределение множественности частиц в MCG моделируется как сумма частиц, рожденных из набора независимых источников излучения (N_a), каждый из которых рождает частицы в соответствии с отрицательным биномиальным распределением $NBD(\mu, k)$. Число излучающих источников параметризуется как $N_a = f \cdot N_{\text{part}} + (1-f) \cdot N_{\text{coll}}$, где N_{part} и N_{coll} - число нуклонов-участников и число неупругих бинарных нуклон-нуклонных столкновений в моделируемом событии MCG. Параметры μ , k и f варьируются для лучшего описания экспериментального распределения множественности в диапазоне $N_{\text{tracks}} > 10$. Красная кривая на левой панели Рис. 1 показывает результат выполнения этой процедуры. Можно наблюдать хорошее согласие между

экспериментальным и моделируемым MCG распределением множественности в области перекрытия. Отношение экспериментального и MCG распределений множественности служит оценкой эффективности триггера, средневзвешенная эффективность, оцененная по отношению, составляет $\sim 90\%$, что очень близко к ожидаемому значению 91% . Модель MCG затем используется для оценки начальной геометрии для выбранных классов центральности. Значения прицельного параметра, N_{part} и N_{coll} для 10% интервалов центральности были оценены для событий столкновений $Bi+Bi$ при энергии 9.2 ГэВ с помощью генераторов UrQMD, PHSD, DCM-QGSM-SMM и PHQMD. Правая панель на Рис. 1 показывает пример зависимости средних значений прицельного параметра от центральности, точки для разных генераторов событий смещены для наглядности. Извлеченные значения модельных параметров находятся в хорошем согласии.

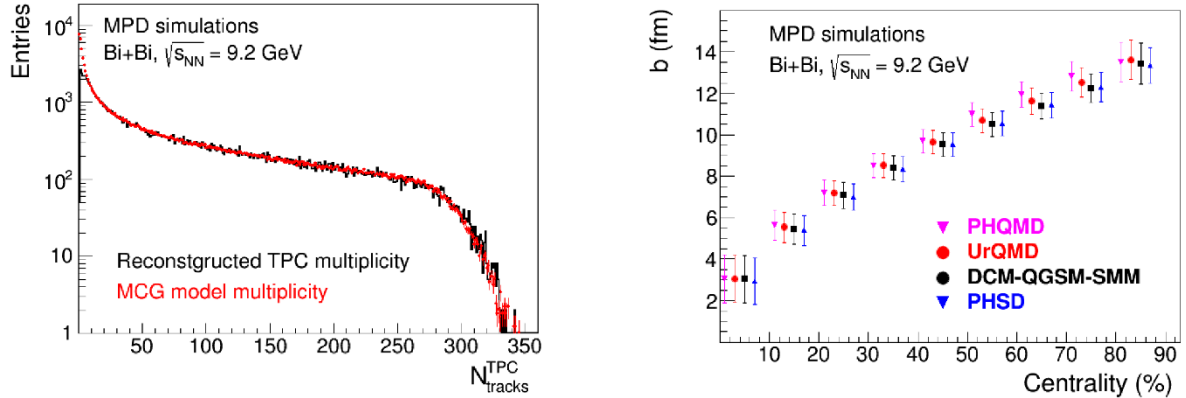


Рис. 1. Экспериментальное (черное) и смоделированное MCG (красное) распределения множественности (слева). Зависимость среднего прицельного параметра от центральности, смоделированные с помощью генераторов событий UrQMD, PHSD, DCM-QGSM-SMM и PHQMD (справа). Результаты представлены для столкновений $Bi+Bi$ при $\sqrt{s_{NN}} = 9.2$ ГэВ.

2.2 Идентифицированные легкие адроны

Легкие адроны образуются в большом количестве и играют важную роль в понимании физики релятивистских столкновений тяжелых ионов. Экспериментальное исследование рождения заряженных пионов, каонов и (анти)протонов используется для определения условий образования горячего и плотного барионного вещества и может дать представление о лежащей в основе динамике реакции. Выходы, спектры и отношения выходов адронов показывают, достигаются ли условия, благоприятные для фазового перехода в QGP. Они также позволяют проверить термическое и химическое равновесие в системе, раскрыть геометрию пространства-времени источника на момент фризаута, а также исследовать коллективные эффекты в продольном и поперечном расширении файерболла.

Идентификация заряженных частиц была достигнута путем комбинации измерений потерь энергии dE/dx в TPC и времени пролета в TOF, были внесены поправки на ошибочную идентификацию адронов, потери при реконструкции, геометрический акцептанс, а также на загрязнение от вторичных взаимодействий в материале детектора и слабыми распадами гиперонов (актуально для пионов и протонов). Выходы заряженных адронов получены в событиях с выбранной центральностью и для нескольких интервалов по быстроте. В качестве примера на Рис. 2 показаны спектры по поперечному импульсу для положительно заряженных пионов (левая панель) и протонов (центральная панель) для $0-10\%$ центральных столкновений $Bi+Bi$ при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 9.2$ ГэВ. Спектры показаны в интервалах по быстроте $\Delta y = 0,2$ в диапазоне $-1 < y < 1$ и масштабированы вниз относительно данных в области средних быстрот. Детектор MPD имеет ограниченное покрытие по p_T при малых поперечных импульсах, и для экстраполяции спектров в не

измеренный диапазон p_T спектры были аппроксимированы соответствующими функциональными формами. Экстраполяция варьируется для разных видов частиц, но не превышает 5%, 10% и 15% для пионов, каонов и протонов соответственно.

Распределения плотности быстроты (dN/dy) для положительно заряженных адронов (π^+ , K^+ , p) получены интегрированием спектров по поперечному импульсу, см. правую панель Рис. 2. Измерения для пионов и каонов покрывают приблизительно 65% полной фазовой области, и распределения быстроты могут быть аппроксимированы гауссовой кривой, таким образом, можно получить интегрированную среднюю полную множественность π , K с точностью $\sim 10\%$. Ситуация с протонами более сложная, поскольку форма их распределений по быстройте меняется в зависимости от центральности. Фазовое пространство MPD для протонов недостаточно для реконструкции полного (4π) выхода протонов без модельных предположений, но может точно предсказать выходы протонов вблизи быстроты пучка.

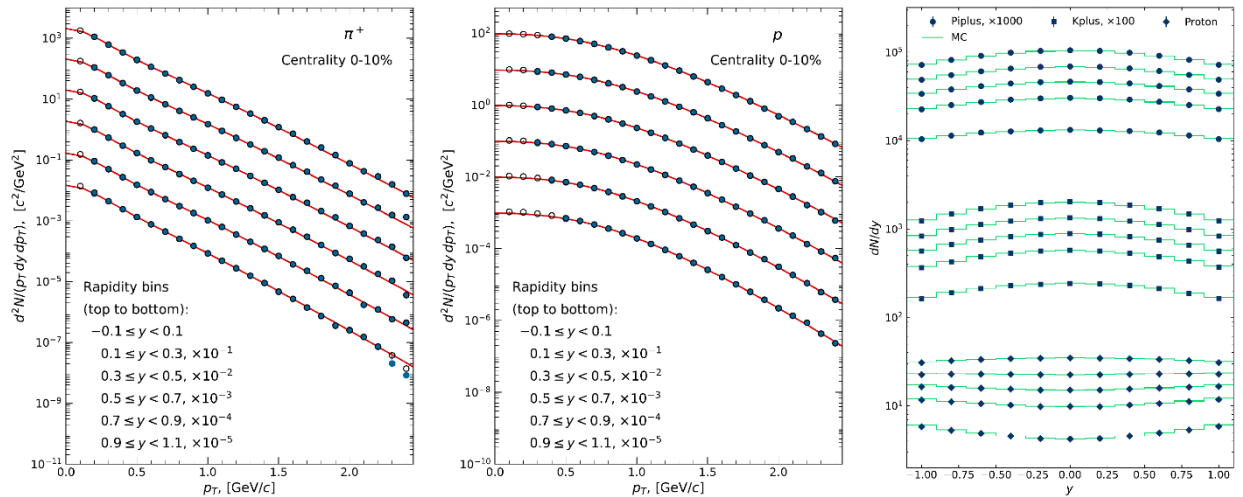


Рис. 2. Инвариантные p_T -спектры π^+ (слева) и p (центр) для разных интервалов по быстройте. Реконструированные и сгенерированные данные показаны сплошными и пустыми символами соответственно. Распределения по быстройте для π^+ , K^+ и p (справа). Реконструированные данные показаны символами, а модельные данные - гистограммами. Примеры показаны для 0-10% центральных столкновений $Vi+Vi$ при энергии столкновения $\sqrt{s_{NN}} = 9.2$ ГэВ.

Нейтральные мезоны реконструируются в канале распада $\pi^0(\eta) \rightarrow \gamma\gamma$, где конечные фотоны измеряются в калориметре (ECAL) или реконструируются как e^+e^- пары из конверсии фотонов (PCM). Метод ECAL-ECAL обладает наивысшей эффективностью, но измерения при низких импульсах страдают от плохого энергетического разрешения, высокого адронного и комбинаторного фонов. Напротив, подход PCM-PCM использует преимущество гораздо лучшего энергетического разрешения системы трекинга и превосходной чистоты реконструкции фотонов при низких импульсах, что приводит к гораздо более узким реконструированным пикам и более низкому фону. Однако метод страдает низкой эффективностью из-за малой вероятности конверсии фотонов. Гибридный метод ECAL-PCM занимает промежуточное положение, сочетая преимущества и недостатки двух вышеупомянутых методов. Тем не менее, измерения с использованием ECAL-PCM и PCM-PCM важны для изучения характеристик и систематических эффектов в калориметре. Доступной статистики достаточно для измерения только интегрального по центральности рождения η -мезонов с использованием метода ECAL-ECAL. Дифференциальные выходы, измеренные для π^0 и η -мезонов в зависимости от поперечного импульса в центральных столкновениях $Vi+Vi$ при $\sqrt{s_{NN}} = 9,2$ ГэВ, показаны на Рис. 3.

Измерения охватывают широкий диапазон p_T от 0,1 до 4,5 ГэВ/с с накопленной статистикой. Реконструированные спектры сравниваются с сгенерированными, показанными гистограммами на тех же рисунках. Реконструированные спектры соответствуют сгенерированным в пределах статистических неопределенностей.

2.3 (Мульти)странные гипероны и гиперядра

Поскольку энергетический порог для рождения странности в фазе QGP меньше, чем в фазе адронного газа, усиленное рождение странных частиц (каонов и гиперонов) было предложено в качестве сигнала фазового перехода. Для гиперонов увеличение скорости рождения по отношению к элементарным pp -реакциям наблюдалось в широком диапазоне энергий от AGS до LHC, сильнее для частиц с большим содержанием странности. Однако существуют и другие возможные объяснения наблюдаемого усиления странности, такие как много-мезонные реакции в плотной ядерной материи, частичное восстановление киральной симметрии, исчезновение канонического подавления с увеличением множественности или расчеты в рамках подхода ядро-короны. p_T -распределения гиперонов предоставляют важную информацию о динамике реакции. Из-за их малых адронных сечений взаимодействия поперечные импульсные спектры каскадов отражают начальные условия столкновения.

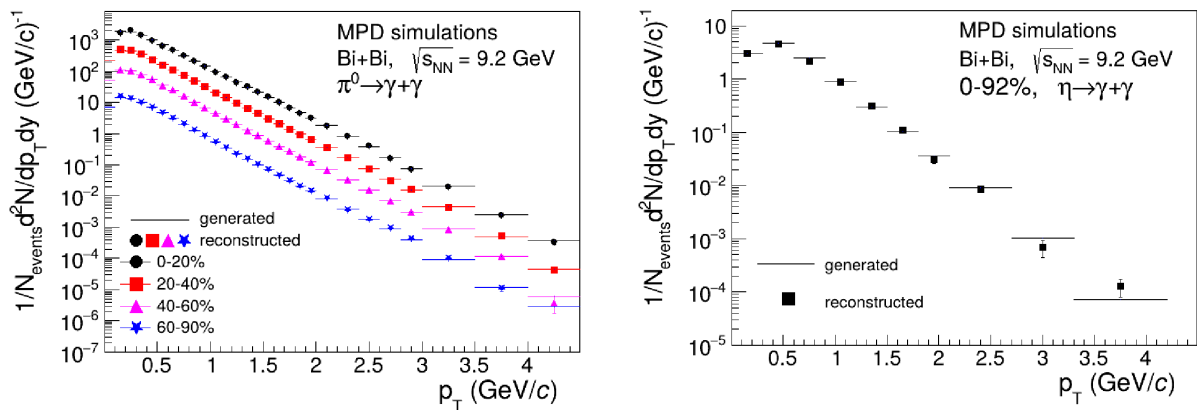


Рис. 3. Дифференциальные спектры рождения π^0 и η мезонов в столкновениях $Bi+Bi$ при $\sqrt{s_{NN}} = 9.2$ ГэВ. Результаты для π^0 мезона показаны для различных интервалов центральности. Измеренные точки сравниваются с истинно сгенерированными спектрами, показанными гистограммами.

Реконструкция Λ -гиперонов проводилась с использованием режима распада «V0» $\Lambda \rightarrow p + \pi^-$ ($\rightarrow \bar{p} + \pi^+$). Для каждого события отбирались все возможные пары (анти)протонов и заряженных пионов. Для каждой пары определялась точка наибольшего сближения траекторий частиц путем экстраполяции треков обратно к оси пучка. Для уменьшения комбинационного фона накладывалось несколько ограничений. К ним относятся: а) расстояние наибольшего сближения (DCA) дочерних частиц к первичной вершине; б) DCA частицы V0 к первичной вершине; в) расстояние между первичной и вторичной вершинами; г) величина угла между направлением вектора импульса V0 и линией, соединяющей первичную и вторичную вершины. Для каждой выбранной пары дочерних частиц затем вычисляется инвариантная масса родительского гиперона. Затем выходы гиперонов, извлеченные из распределений инвариантной массы, корректируются на потери из-за конечного акцептанса детектора, эффективности реконструкции треков и примененных ограничений. Реконструированные инвариантные спектры по поперечному импульсу Λ и $\bar{\Lambda}$ в центральных столкновениях $Bi+Bi$ при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 9.2$ ГэВ показаны на Рис. 4. Реконструированные распределения в области средних быстрот ($|y| < 0.5$) показаны

сплошными символами, а моделированные распределения - пустыми символами. Как видно, реконструированные и сгенерированные спектры согласуются в пределах погрешностей измерения.

После реконструкции Λ -гиперонов проводится анализ каскадных гиперонов с использованием режима распада $\Xi^- \rightarrow \Lambda + \pi^-$. Кандидат Λ определяется требованием, чтобы инвариантная масса находилась в пределах $\pm 5\sigma$ относительно номинального значения. Для повышения чистоты сигнала применяются топологические критерии отбора, аналогичные критериям (а)-(г), описанным выше. На Рис. 4 показаны реконструированные инвариантные p_T - спектры Ξ^- -гиперонов в центральных столкновениях $\text{Bi}+\text{Bi}$. Разница между реконструированными и сгенерированными моделью спектрами невелика. Выход Ω^- -гиперонов в столкновениях тяжелых ионов мал, поэтому анализ проводился в более широком интервале быстрот ($|y| < 1$) для 0-80% центральных столкновений. Правая панель Рис. 4 показывает реконструированный p_T -спектр Ω^- во взаимодействиях $\text{Bi}+\text{Bi}$.

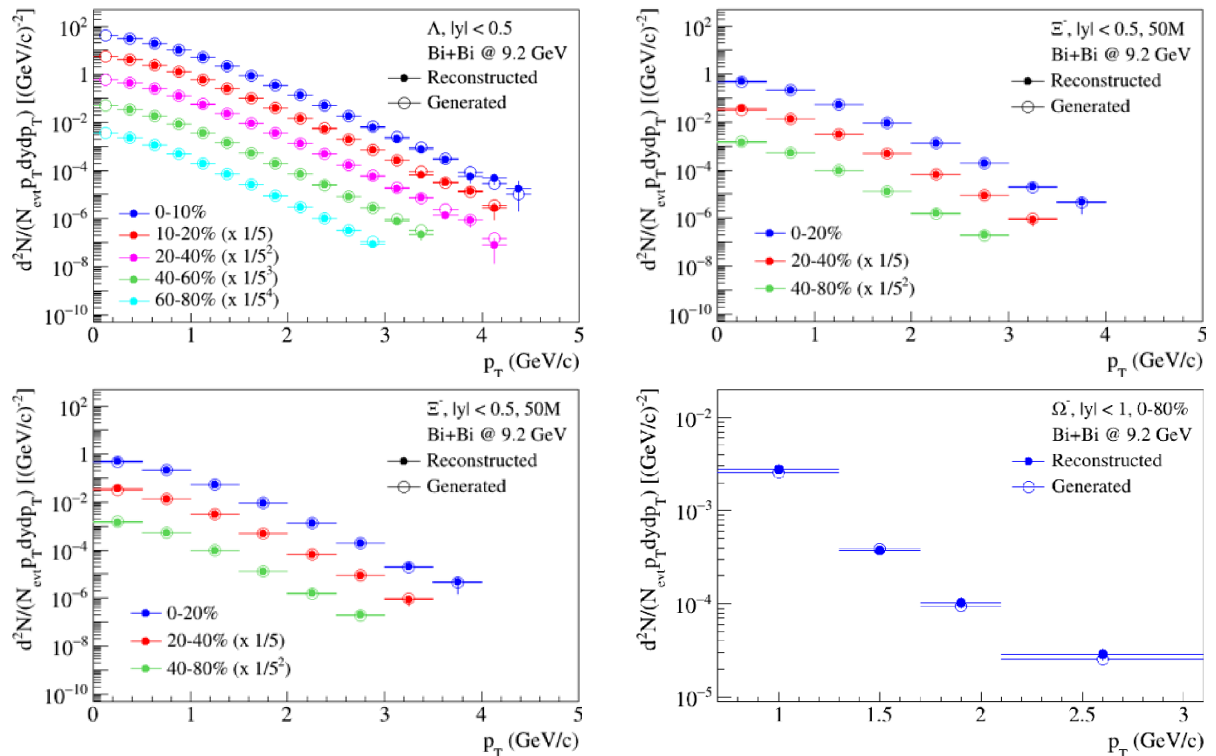


Рис. 4. Спектры по поперечному импульсу для Λ (верхний левый), Ξ^- (нижний левый) и Ω^- (нижний правый) для различных интервалов по центральности для столкновений $\text{Bi}+\text{Bi}$ при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 9.2$ ГэВ. Реконструированные и сгенерированные распределения показаны сплошными и пустыми символами соответственно.

Измерение гиперядер важно для лучшего понимания свойств компактных нейтронных звезд и для изучения потенциалов Λ -N взаимодействия. Выходы реконструированных гипер-трионов, извлеченные из распределения инвариантной массы пар ${}^3\text{He}^-$, были скорректированы на общую эффективность, которая включает аксептанс установки, вероятность распада в данном канале и потери сигнала из-за критериев отбора и идентификации частиц. На левой панели Рис. 5 показан инвариантный p_T - спектр гипертрионов из столкновений $\text{Bi}+\text{Bi}$. Распределение получено для интервала быстроты $|y| < 0.5$ без выбора по центральности столкновения. Реконструированные и сгенерированные распределения показаны треугольниками и прямоугольниками соответственно, согласие между реконструированными и сгенерированными спектрами хорошее во всех интервалах по p_T . Выход гипертрионов анализировался в нескольких

интервалах собственного времени в диапазоне 0.1–1.5 нс для оценки его времени жизни. Правая панель Рис. 5 показывает полностью скорректированное распределение гипертрионов в зависимости от собственного времени. Параметр наклона «p1» кривой аппроксимации является оценкой временем жизни, которое было оценено равным 265 ± 4 пс, что хорошо согласуется со значением времени жизни, используемым в генераторе событий (263 пс). В заключение, согласно оценкам эффективности детектора MPD для гипертрионов на основе моделирования и модельным предсказаниям выходов (гипер) ядер, около 103 гипертрионов могут быть зарегистрированы за одну неделю сбора данных для столкновений $Vi+Vi$ при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 9.2$ ГэВ при светимости $L \approx 10^{25} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$.

2.4. Азимутальная анизотропия

Чувствительность азимутального анизотропного коллективного потока к уравнению состояния (УС) и транспортным свойствам сильно взаимодействующей материи делает его одним из перспективных наблюдаемых величин в экспериментах по изучению столкновений релятивистских тяжелых ионов.

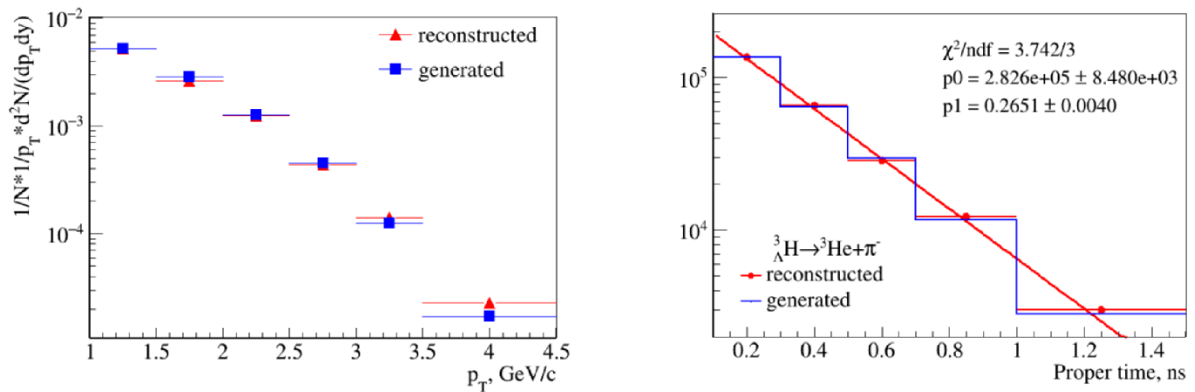


Рис. 5. Инвариантное p_T -распределение выхода для гипертрионов (слева). Распределение числа гипертрионов по интервалам собственного времени (справа). Результаты получены для столкновений $Vi+Vi$ при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 9.2$ ГэВ.

На Рис. 6 показано сравнение сгенерированных и реконструированных сигналов эллиптического $v_2(p_T)$ и направленного $v_1(y)$ потоков для заряженных пионов, каонов и протонов в 10-40% центральных столкновениях $Vi+Vi$ при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 9.2$ ГэВ. Идентификация заряженных адронов была основана на комбинации информации об импульсе, удельных потерях энергии (dE/dx) в ТРС и измерениях времени пролета от детектора TOF. Результаты были получены с использованием различных методов анализа, и реконструированные сигналы согласуются в пределах погрешностей с исходными для всех типов частиц. Направленный поток v_1 пересекает ноль в области средних быстрот. Различные методы измерения потока обладают различной чувствительностью к флуктуациям потока и так называемым непотоковым корреляциям. Они включают общее сохранение поперечного импульса, азимутальные корреляции малого угла из-за взаимодействий в конечном состоянии, распады резонансов, рождение мини-джетов и квантовые корреляции из-за эффекта НВТ.

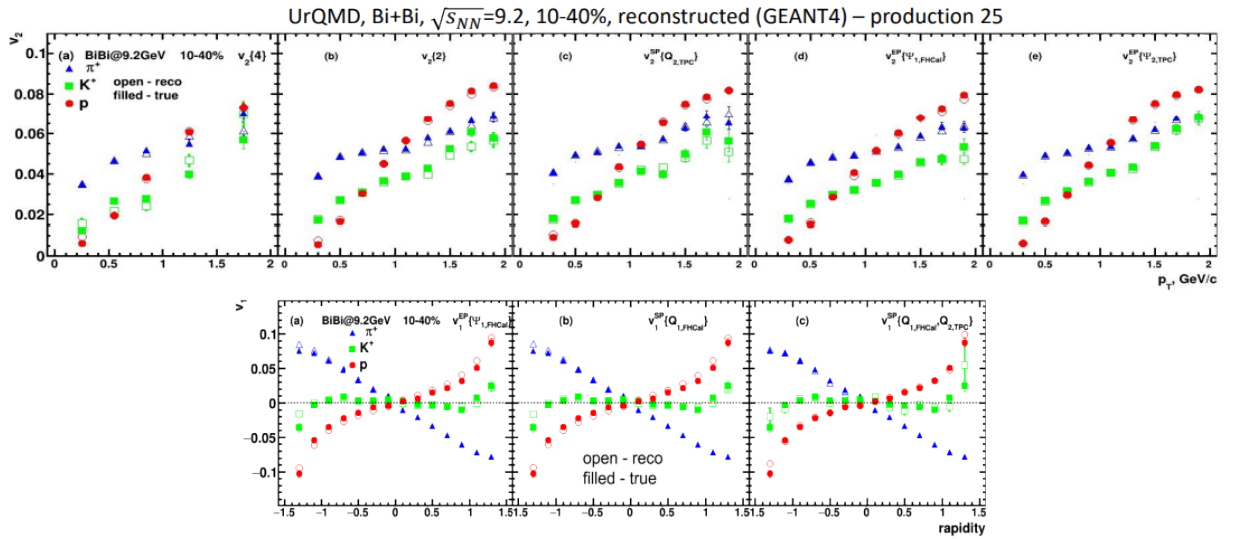


Рис. 6. Реконструированные и сгенерированные сигналы $v_2(p_T)$ и $v_1(y)$ для заряженных пионов, каонов и протонов в столкновениях Bi+Bi при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 9.2$ ГэВ.

Аналогичные исследования были проведены для частиц V_0 , таких как Λ и K_s , используя методы плоскости события и фитирования инвариантной массы. Как и в предыдущем случае, было отмечено очень хорошее согласие между сгенерированными и реконструированными сигналами $v_2(p_T)$ и $v_1(y)$. Измерения потока также были предприняты для инклюзивных фотонов и нейтральных пионов, реконструированных в канале распада $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$, используя различные методы реконструкции фотонов, что показало хорошее соответствие между реконструированными и сгенерированными сигналами. Проведенные исследования подтверждают, что MPD хорошо оснащен для проведения измерений v_1 , v_2 и v_3 для широкого спектра идентифицированных адронов с первыми наборами данных.

2.5. Континуум диэлектронов

Диэлектроны предоставляют возможность измерить температуру горячей материи без синего сдвига, который возникает из-за радиального расширения фаербола. Можно ожидать, что при энергиях NICA вклад распада тяжелых ароматов будет пренебрежимо мал, а доминирующим источником в промежуточной массовой области $1-3 \text{ ГэВ}/c^2$ будет тепловое излучение виртуальных фотонов. Это позволит получить доступ к температуре горячего источника. Тепловое излучение фотонов также появится в области низких масс, $< 0.5 \text{ ГэВ}/c^2$, где можно связать выход виртуальных и реальных фотонов с формулой Кролла-Вады и рассчитать выход реальных прямых фотонов. Наконец, распределение инвариантной массы дилептонов чувствительно к внутрисредовым модификациям спектральной функции ρ -мезона.

MPD хорошо подходит для таких измерений. Точные трекинг и идентификация электронов с помощью TPC, TOF и ECAL позволяют достичь эффективности реконструкции треков электронов $\sim 45\%$ при чистоте сигнала $\sim 100\%$ при $p_T > 200 \text{ МэВ}/c$. Это достигается благодаря комбинированному эффекту измерений средней удельной потери энергии (dE/dx) трека при прохождении через газ в TPC, времени пролета частицы в детекторах TOF и ECAL и энергии частицы в ECAL. Последнее способствует идентификации электронов и отсеву адронов путем требования, чтобы отношение энергии к импульсу E/p частицы было равно единице. Тесная связь реконструированных треков с первичным вертексом также удаляет почти 98% электронов конверсии, образующихся за пределами трубы пучка.

Основной проблемой для измерений диэлектронов является огромный комбинаторный фон, возникающий в результате электронов, образующихся в распадах Далица нейтральных мезонов. Была разработана новая стратегия анализа пар. Для повышения вероятности распознавания электронов, происходящих от π^0 -далица и конверсий гамма-квантов, фазовое пространство быстроты полностью реконструированных электронов делится на фидуциальную ($|\eta| < 0.7$) и вето ($0.7 < \eta < 1.0$) области. Кроме того, общая выборка электронов была разделена на три различные подвыборки или пула. Пул-1 включает полностью реконструированные электронные треки в пределах фидуциальной области приема, $|\eta| < 0.7$, а Пул-2 содержит полностью реконструированные электронные треки в пределах вето-области приема $0.7 < \eta < 1.0$. Пул-3 содержит частично реконструированные электронные треки, т.е. электроны, реконструированные в TPC, и не идентифицированные хотя бы в одном из внешних детекторов, TOF или ECAL. Процедура анализа состоит из трех шагов. На первом шаге треки, принадлежащие к Пулу-1 в данном событии, смешиваются с треками противоположного заряда в том же событии из Пула-1 и Пула-2. Пары с инвариантной массой меньше $120 \text{ МэВ}/c^2$ помечаются как пары от π^0 -далица или конверсий и не используются для дальнейшего спаривания. На втором шаге оставшиеся треки из Пула-1 спариваются с треками противоположного заряда из Пула-3 в том же событии, и оба трека удаляются как потенциальная пара Далица, если их масса меньше $80 \text{ МэВ}/c^2$ и угол раскрытия (θ) меньше 5 или 10 градусов. На третьем шаге оставшиеся треки из Пула-1 с $p_T > 200 \text{ МэВ}/c$ соотносятся между собой для построения спектров инвариантной массы с разноименными зарядами. Накопленное распределение инвариантной массы вместе с комбинаторным фоном, оцененным по парам с одинаковым знаком заряда, показано на рис. 7. Соотношение сигнал/фон составляет около 6% в интегрированном диапазоне масс $0.2\text{--}1.5 \text{ ГэВ}/c^2$, что в два раза лучше, чем предыдущие результаты.

В заключение, эксперимент MPD демонстрирует сильную способность к комплексным измерениям диэлектронов, что обусловлено превосходной идентификацией электронов и высокой чистотой электронов, особенно благодаря критической роли ECAL в уменьшении адронной примеси.

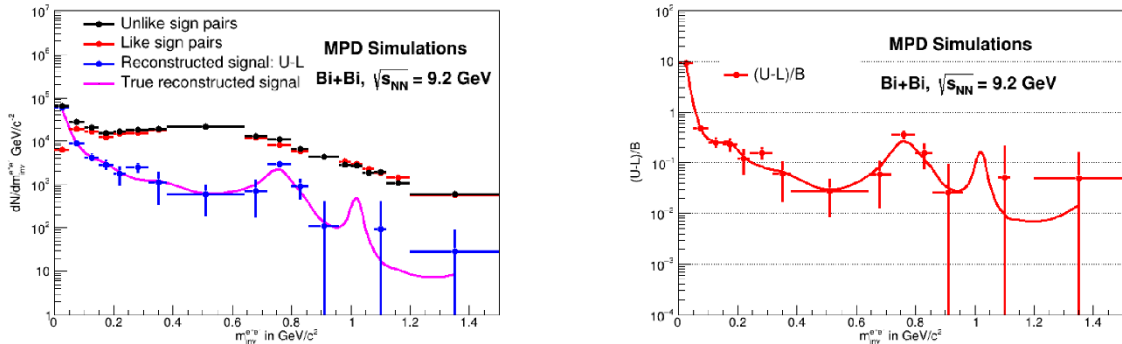


Рис. 7. Континуум диэлектронов и комбинаторный фон, оцененный по парам с одинаковым знаком заряда (слева), и отношение сигнал/фон (справа) в столкновениях $\text{Bi}+\text{Bi}$ при $\sqrt{s_{NN}} = 9.2 \text{ ГэВ}$.

4.5. Остальные главные результаты

В 2020-2024 годах были получены следующие основные результаты исследований осуществимости физики:

1. Определение эффективности системы триггера установки MPD (FFD, FHCAL и TOF) для отбора А-А столкновений при энергиях $\sqrt{s_{NN}} = 4\text{--}11 \text{ ГэВ}$ в зависимости от центральности события и вершины события.
2. Определение центральности событий в столкновениях тяжелых ионов с использованием сигналов от TPC, ECAL и FHCAL, оценка смещений для различных физических наблюдаемых.

3. Измерение геометрии событий (плоскость события) с использованием различных детекторных подсистем (FFD, FHCAL, TPC) и методов анализа.
4. Определение геометрии столкновения с использованием модели Глаубера и метода Г-фита.
5. Сравнительный анализ различных моделей и генераторов событий для идентификации тех, которые обеспечивают наиболее реалистичные оценки сигналов для А-А столкновений при энергиях NICA.
6. Измерение глобальной поляризации гиперонов в столкновениях V_i+V_i при $\sqrt{s_{NN}} = 9.2$ ГэВ.
7. Оценка выходов прямых фотонов в столкновениях Au+Au при $\sqrt{s_{NN}} = 4-11$ ГэВ с использованием модельного расчета и эмпирического масштабирования.
8. Изучение корреляционных функций двух пионов (HBT) с гауссовыми и Леви-формами, функции баланса заряда и факториальных моментов в А-А столкновениях при $\sqrt{s_{NN}} = 4-11$ ГэВ.
9. Измерение рождения легких ядер (d, t, ^3He) в зависимости от поперечного импульса, быстроты и центральности события в столкновениях V_i+V_i при $\sqrt{s_{NN}} = 9.2$ ГэВ.
10. Измерение рождения адронных резонансов ($\rho(770)$, $K^*(892)$, $\phi(1020)$, $\Lambda(1520)$, $\Sigma(1385)$) в зависимости от поперечного импульса и центральности события в А-А столкновениях при $s_{NN} = 4-11$ ГэВ.
11. Измерение распределений множественности средних-протонов и средних-каонов в поисках сигналов флуктуаций, указывающих на приближение к Критической конечной точке в столкновениях Au+Au при $\sqrt{s_{NN}} = 4-11$ ГэВ.
12. Измерение выходов очарованных D и Ds-мезонов в pp и А-А столкновениях при энергиях NICA с использованием будущего детектора ITS.

Список использованных источников:

- [1] Optimization of Techniques for Λ Hyperon Measurement at MPD/NICA
V. Kolesnikov (Dubna, JINR), D. Suvarieva (Dubna, JINR and Plovdiv U.), V. Vasendina (Dubna, JINR), A. Zinchenko (Dubna, JINR)
DOI: 10.1134/S106377962470028X
Published in: Phys.Part.Nucl. 55 (2024) 4, 827-831,
- [2] Prospects of the MPD Detector for Measuring the Spectra of Identified Hadrons in $\mathbf{Bi} + \mathbf{Bi}$ Collisions at Energy $\sqrt{s_{NN}} = 9.2$ GeV
A. Mudrokh (Dubna, JINR)
DOI: 10.1134/S1063779624700291
Published in: Phys.Part.Nucl. 55 (2024) 4, 973-977,
- [3] Anisotropic Flow Measurements of Identified Hadrons with Fixed-Target Mode of MPD Detector at NICA
P. Parfenov (Moscow Phys. Eng. Inst. and Moscow, INR), M. Mamaev (Moscow Phys. Eng. Inst. and Moscow, INR), A. Taranenko (Moscow Phys. Eng. Inst. and Dubna, JINR)
DOI: 10.1134/S1063779624700369
Published in: Phys.Part.Nucl. 55 (2024) 4, 853-858,
- [4] Prospects for Studying the Production of Hyperons and Hypernuclei in the MPD Experiment at the NICA Accelerator Complex
V.I. Kolesnikov (Dubna, JINR), V.A. Vasendina (Dubna, JINR), A.I. Zinchenko (Dubna, JINR)
DOI: 10.1134/S1063779624700205
Published in: Phys.Part.Nucl. 55 (2024) 4, 797-802,
- [5] Initial physics performance and status of the MPD at NICA
MPD Collaboration • Ivonne Maldonado (Dubna, JINR) for the collaboration.
DOI: 10.1393/ncc/i2024-24238-1
Published in: Nuovo Cim.C 47 (2024) 4, 238
- [6] Bayesian approach to particles identification in the MPD experiment
V.A. Babkin (Unlisted, RU), V.M. Baryshnikov (Unlisted, RU), M.G. Buryakov (Unlisted, RU), S.G. Buzin (Unlisted, RU), A.V. Dmitriev (Unlisted, RU) et al.
e-Print: 2406.12879 [physics.ins-det]

DOI: 10.1088/1748-0221/19/08/P08007
 Published in: JINST 19 (2024) 08, P08007
 [7] Performance study of the hyperon global polarization measurements with MPD at NICA
 Elizaveta Nazarova (Dubna, JINR), Vadim Kolesnikov (Dubna, JINR), Petr Parfenov (Dubna, JINR and Moscow Phys. Eng. Inst.), Arkadiy Taranenko (Moscow Phys. Eng. Inst.), Oleg Teryaev (Dubna, JINR) et al.
 DOI: 10.1140/epja/s10050-024-01308-4
 Published in: Eur.Phys.J.A 60 (2024) 4, 85
 [8] Study of bulk properties of the medium produced in heavy ion collisions at MPD
 Anil Sharma (UGC-DAE CSR, Kolkata), Alexey Aparin (Dubna, JINR)
 Published in: DAE Symp.Nucl.Phys. 67 (2024), 1027-1028
 [9] Multilayer Perceptron Neural Model for Particle Identification in MPD
 G. Tolkachev (Moscow Phys. Eng. Inst.), A. Korobitsin (Dubna, JINR), A. Aparin (Dubna, JINR)
 DOI: 10.1134/S1063778823050381
 Published in: Phys.Atom.Nucl. 86 (2023) 5, 845-849
 [10] Machine Learning Application for Particle Identification in MPD
 V. Papoyan (Dubna, JINR and Yerevan Phys. Inst. and Dubna Intl. Univ.), A. Aparin (Dubna, JINR), A. Ayriyan (Dubna, JINR and Yerevan Phys. Inst. and Dubna Intl. Univ. and Yerevan State U.), H. Grigorian (Dubna, JINR and Yerevan Phys. Inst. and Dubna Intl. Univ. and Yerevan State U.), A. Korobitsin (Dubna, JINR) et al.
 DOI: 10.1134/S1063778823050332
 Published in: Phys.Atom.Nucl. 86 (2023) 5, 869-873
 [11] Prospects for Photon Conversion Measurements in the Future MPD Experiment at NICA
 E. Kryshen (St. Petersburg, INP), N. Burmasov (St. Petersburg, INP), D. Ivanishchev (St. Petersburg, INP), D. Kotov (St. Petersburg, INP and St. Petersburg Polytechnic Inst.), M. Malaev (St. Petersburg, INP) et al.
 DOI: 10.1134/S1063779623040226
 Published in: Phys.Part.Nucl. 54 (2023) 4, 613-618,
 [12] Searching for the Baryon-to-Meson Transition Region with the MPD at NICA
 Alejandro Ayala (Mexico U., ICN and Cape Town U. and Santa Maria U., Brazil), Wolfgang Bietenholz (Mexico U., ICN), Eleazar Cuautle (Mexico U., ICN), Rodrigo García Forment n (Mexico U., ICN), Rodrigo Guzmán (Mexico U., ICN)
 e-Print: 2305.02455 [hep-ph]
 DOI: 10.1134/S1063778823050071
 Published in: Phys.Atom.Nucl. 86 (2023) 5, 901-907
 [13] A Monte Carlo Study of Hyperon Production with the MPD and BM@N Experiments at NICA
 Alexander Zinchenko (LHEP JINR, Dubna), Mikhail Kapishin (LHEP JINR, Dubna), Viktor Kireyeu (LHEP JINR, Dubna), Vadim Kolesnikov (LHEP JINR, Dubna), Alexander Mudrokh (LHEP JINR, Dubna) et al.
 DOI: 10.3390/particles6020027
 Published in: Particles 6 (2023) 2, 485-496
 [14] Centrality Determination in MPD at NICA
 MPD Collaboration • A. Aparin (Dubna, JINR) et al.
 DOI: 10.1134/S1547477122050065 , 10.1134/s1547477122050065
 Published in: Phys.Part.Nucl.Lett. 19 (2022) 5, 489-492
 [15] Study of Material Budget of the MPD Detectors
 D. Myktybekov (Dubna, JINR and IPT, Kazakstan and Al Farabi Kazakh Natl. U.), O. Rogachevsky (Dubna, JINR), S. Sabyr (Dubna, JINR and IPT, Kazakstan)
 DOI: 10.1134/S1547477122050314

Published in: Phys.Part.Nucl.Lett. 19 (2022) 5, 497-500
 [16] Hadronic resonances in heavy-ion collisions at NICA energies and their reconstruction in the MPD setup
 Victor Riabov (St. Petersburg, INP and Moscow Phys. Eng. Inst.)
 DOI: 10.1142/S0217751X22440031
 Published in: Int.J.Mod.Phys.A 37 (2022) 34, 2244003
 [17] Centrality Determination in Heavy-Ion Collisions with MPD Detector at NICA
 MPD Collaboration • Dim Idrisov (Moscow Phys. Eng. Inst.) for the collaboration.
 DOI: 10.3103/S0027134922020424
 Published in: Moscow Univ.Phys.Bull. 77 (2022) 2, 206-207
 [18] Anisotropic Flow Measurements in MPD Experiment Using Two- and Three-Particle Correlation Scalar Product Method
 Petr Parfenov (Moscow Phys. Eng. Inst.)
 DOI: 10.3103/S002713492202076X
 Published in: Moscow Univ.Phys.Bull. 77 (2022) 2, 245-246
 [19] Short-Lived Resonances in the Physical Program of the MPD Experiment at NICA
 D.A. Ivanishchev (St. Petersburg, INP), D.O. Kotov (St. Petersburg, INP), M.V. Malaev (St. Petersburg, INP), V.G. Ryabov (St. Petersburg, INP and Moscow Phys. Eng. Inst.), Yu. G. Ryabov (St. Petersburg, INP)
 DOI: 10.1134/S1063779622020368
 Published in: Phys.Part.Nucl. 53 (2022) 2, 347-353, Phys.Part.Nucl. 53 (2022) 2, 347-353
 [20] Performance of the MPD Detector in the Study of Strangeness Production and Event-by-Event Fluctuations in Au + Au Collisions at NICA
 A. Mudrokh (Dubna, JINR), V. Kolesnikov (Dubna, JINR)
 DOI: 10.1134/S1063779622020599
 Published in: Phys.Part.Nucl. 53 (2022) 2, 292-296, Phys.Part.Nucl. 53 (2022) 2, 292-296
 [21] Performance of the MPD Detector for the Study of Strongly-Intensive Multiplicity and Transverse Momentum Fluctuations in Heavy-Ion Collisions
 E. Andronov (St. Petersburg State U.), I. Altsybeev (St. Petersburg State U.), D. Prokhorova (St. Petersburg State U.)
 DOI: 10.1134/S1063779622020095
 Published in: Phys.Part.Nucl. 53 (2022) 2, 122-126, Phys.Part.Nucl. 53 (2022) 2, 122-126
 [22] Perspectives of Strangeness Study at NICA/MPD from Realistic Monte Carlo Simulation
 J. Drnoyan (Dubna, JINR), V. Kolesnikov (Dubna, JINR), A. Mudrokh (Dubna, JINR), V. Vasendina (Dubna, JINR), A. Zinchenko (Dubna, JINR)
 DOI: 10.1134/S1063779622020307
 Published in: Phys.Part.Nucl. 53 (2022) 2, 203-206, Phys.Part.Nucl. 53 (2022) 2, 203-206
 [23] Generative Adversarial Networks for the fast simulation of the Time Projection Chamber responses at the MPD detector
 A. Maevskiy (Higher Sch. of Economics, Moscow), F. Ratnikov (Higher Sch. of Economics, Moscow and Yandex Sch. Data Anal., Moscow), A. Zinchenko (Dubna, JINR), V. Riabov (St. Petersburg, INP), A. Sukhorosov (Higher Sch. of Economics, Moscow) et al.
 e-Print: 2203.16355 [physics.ins-det]
 DOI: 10.1088/1742-6596/2438/1/012087
 Published in: J.Phys.Conf.Ser. 2438 (2023) 1, 012087,
[24] Status and initial physics performance studies of the MPD experiment at NICA
MPD Collaboration • V. Abgaryan (Yerevan Phys. Inst. and Dubna, JINR) et al.
e-Print: 2202.08970 [physics.ins-det]
DOI: 10.1140/epja/s10050-022-00750-6
Published in: Eur.Phys.J.A 58 (2022) 7, 140

- [25] Monte Carlo Studies of the MPD Detector Performance for the Measurement of Hypertritons in Heavy-Ion Collisions at NICA Energies
V.I. Kolesnikov (Dubna, JINR), V.A. Kireyeu (Dubna, JINR), A.A. Mudrokh (Dubna, JINR), V.A. Vasendina (Dubna, JINR), A.I. Zinchenko (Dubna, JINR) et al.
DOI: 10.1134/S1547477122010071
Published in: Phys.Part.Nucl.Lett. 19 (2022) 1, 46-53
- [26] The NICA Complex and the MPD experiment at JINR: status and physics potential
Adam Kisiel (Dubna, JINR and Warsaw U. of Tech.)
DOI: 10.1051/epjconf/202225909002
Published in: EPJ Web Conf. 259 (2022), 09002
- [27] MPD Prospects for the Study of Hadron and (hyper)nuclei Production at NICA Energies
MPD Collaboration • A. Mudrokh (Dubna, JINR) et al.
DOI: 10.1134/S1063778823010386
Published in: Phys.Atom.Nucl. 85 (2022) 6, 1007-1010
- [28] Detailed Study of the MPD Detector Performance for Reconstruction of Hyperons in Heavy-Ion Collisions at NICA Energies
J.R. Drnoyan (Dubna, JINR), V.I. Kolesnikov (Dubna, JINR), E.A. Levterova (Dubna, JINR), A.A. Mudrokh (Dubna, JINR), V.A. Vasendina (Dubna, JINR) et al.
DOI: 10.1134/S1547477121060042
Published in: Phys.Part.Nucl.Lett. 18 (2021) 6, 676-686
- [29] Thermal Photon and Neutral Meson Measurements Using the Photon Conversion Method in the MPD Experiment at the NICA Collider
MPD Collaboration • E. Kryshen (St. Petersburg, INP) et al.
DOI: 10.1134/S1063779621040390
Published in: Phys.Part.Nucl. 52 (2021) 4, 669-674
- [30] Study of Production Features, Modeling and Optimization of Algorithms for Reconstruction of Short-Lived Hadron Resonances in the MPD Experimental Setup at the NICA Collider
MPD Collaboration • D. Ivanishchev (St. Petersburg, INP) et al.
DOI: 10.1134/S1063779621040286
Published in: Phys.Part.Nucl. 52 (2021) 4, 703-709,
- [31] Performance for Directed Flow Measurements of the MPD Experiment at NICA Collider
MPD Collaboration • P. Parfenov (Moscow Phys. Eng. Inst.) et al.
DOI: 10.1134/S106377962104047X
Published in: Phys.Part.Nucl. 52 (2021) 4, 618-623,
- [32] Methods for Elliptic Flow Measurements with the MPD Experiment at NICA
D. Idrisov (Moscow Phys. Eng. Inst.), V.B. Luong (Moscow Phys. Eng. Inst.), N. Geraksiev (Plovdiv U. and Dubna, JINR), A. Demanov (Moscow Phys. Eng. Inst.), P. Parfenov (Moscow Phys. Eng. Inst.) et al.
DOI: 10.1134/S1063779621040274
Published in: Phys.Part.Nucl. 52 (2021) 4, 637-643,
- [33] Measurements of Spectators with Forward Hadron Calorimeter in MPD/NICA Experiment
A. Ivashkin (Moscow, INR), M. Golubeva (Moscow, INR), F. Guber (Moscow, INR and Moscow, MIPT), N. Karpushkin (Moscow, INR), S. Morozov (Moscow, INR and Moscow Phys. Eng. Inst.) et al.
DOI: 10.1134/S1063779621040298
Published in: Phys.Part.Nucl. 52 (2021) 4, 578-583,
- [34] Feasibility Study for the Net-Proton and Net-Kaon Event-by-Event Fluctuations Measurements with the MPD Detector
MPD Collaboration • A. Mudrokh (Dubna, JINR) et al.
DOI: 10.1134/S1063779621040432

Published in: Phys.Part.Nucl. 52 (2021) 4, 644-647,
 [35] Overview of the MPD Experiment
 A. Kisiel (Warsaw U. of Tech. and Dubna, JINR)
 DOI: 10.1134/S1063779621040328

Published in: Phys.Part.Nucl. 52 (2021) 4, 501-505,
 [36] MPD Prospects for the Study of Strangeness Production at NICA Energies
 V. Kolesnikov (Dubna, JINR), A. Mudrokh (Dubna, JINR)
 DOI: 10.1134/S1063779621040341

Published in: Phys.Part.Nucl. 52 (2021) 4, 698-702,
 [37] Event Reconstruction and Physics Signal Selection in the MPD Experiment at NICA
 A. Zinchenko (Dubna, JINR), J. Drnoyan (Dubna, JINR), V. Kolesnikov (Dubna, JINR), A. Mudrokh (Dubna, JINR), I. Rufanov (Dubna, JINR) et al.
 DOI: 10.1134/S1063779621040626

Published in: Phys.Part.Nucl. 52 (2021) 4, 691-697,
 [38] Factorial Moments in the NICA/MPD Experiment
 O. Kodolova (SINP, Moscow), M. Cheremnova (SINP, Moscow), I. Lokhtin (SINP, Moscow), A. Chernyshov (SINP, Moscow), L. Malinina (SINP, Moscow and Dubna, JINR) et al.
 DOI: 10.1134/S106377962104033X

Published in: Phys.Part.Nucl. 52 (2021) 4, 658-662,
 [39] Electron Identification from dE/dx Measurements in the MPD TPC
 I. Rufanov (Dubna, JINR), A. Zinchenko (Dubna, JINR)
 DOI: 10.1134/S1063779621040535

Published in: Phys.Part.Nucl. 52 (2021) 4, 783-787,
 [40] Development of a Vector Finder Toolkit for Track Reconstruction in MPD ITS
 D. Zinchenko (Dubna, JINR), A. Zinchenko (Dubna, JINR), E. Nikonov (Dubna, JINR)
 DOI: 10.1134/S106377962104064X

Published in: Phys.Part.Nucl. 52 (2021) 4, 788-792
 [41] Evaluation of Prospects for Hypernuclei Studies with MPD at NICA
 J. Drnoyan (Dubna, JINR), V. Kolesnikov (Dubna, JINR), A. Mudrokh (Dubna, JINR), I. Rufanov (Dubna, JINR), V. Vasendina (Dubna, JINR) et al.
 DOI: 10.1134/S1063779621040249

Published in: Phys.Part.Nucl. 52 (2021) 4, 720-724
 [42] Monte Carlo Study of Λ Polarization at MPD
 E. Nazarova (Dubna, JINR), R. Akhat (Dubna, JINR and IPT, Kazakstan), M. Baznat (Dubna, JINR and IAP, Chisinau), O. Teryaev (Dubna, JINR), A. Zinchenko (Dubna, JINR)
 DOI: 10.1134/S1547477121040142

Published in: Phys.Part.Nucl.Lett. 18 (2021) 4, 429-438
 [43] Application of FHCAL for Heavy-Ion Collision Centrality Determination in MPD/NICA Experiment
 Vadim Volkov (Moscow, INR and Moscow, MIPT), Marina Golubeva (Moscow, INR), Fedor Guber (Moscow, INR and Moscow, MIPT), Alexander Ivashkin (Moscow, INR and Moscow, MIPT), Nikolay Karpushkin (Moscow, INR and Moscow, MIPT) et al.
 DOI: 10.3390/particles4020022

Published in: Particles 4 (2021) 2, 236-240
 [44] Techniques for Reconstruction of Strange Objects at MPD
 Alexander Zinchenko (Dubna, JINR)
 DOI: 10.3390/particles4020016

Published in: Particles 4 (2021) 2, 178-185
 [45] Production and reconstruction of short-lived resonances in heavy-ion collisions at NICA energies using the MPD detector

MPD Collaboration • Victor Riabov (St. Petersburg, INP and Moscow Phys. Eng. Inst.) for the collaboration.
 DOI: 10.1088/1402-4896/abf212
 Published in: Phys.Scripta 96 (2021) 6, 064002

[46] Anisotropic Flow Measurements of Identified Hadrons with MPD Detector at NICA
 Petr Parfenov (Moscow Phys. Eng. Inst.), Dim Idrisov (Moscow Phys. Eng. Inst.), Vinh Ba Luong (Moscow Phys. Eng. Inst.), Nikolay Geraksiev (Plovdiv U. and Dubna, JINR), Anton Truttse (Moscow Phys. Eng. Inst.) et al.
 DOI: 10.3390/particles4020014
 Published in: Particles 4 (2021) 2, 146-158

[47] Reconstruction of Photon Conversions in the MPD Experiment
 MPD Collaboration • Evgeny Kryshen (St. Petersburg, INP) et al.
 DOI: 10.3390/particles4010008
 Published in: Particles 4 (2021) 1, 55-62

[48] Resonance Reconstruction in the MPD
 Dmitry Ivanishchev (St. Petersburg, INP), Dmitry Kotov (St. Petersburg, INP), Mikhail Malaev (St. Petersburg, INP), Victor Riabov (St. Petersburg, INP and Moscow Phys. Eng. Inst.), Yury Ryabov (St. Petersburg, INP)
 DOI: 10.3390/particles4010003
 Published in: Particles 4 (2021) 1, 29-36

[49] The MPD Experiment and JINR: construction status and physics performance
 MPD Collaboration • A. Kisiel (Dubna, JINR and Warsaw U. of Tech.) for the collaboration.
 DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2020.122006
 Published in: Nucl.Phys.A 1005 (2021), 122006

[50] Performance of the MPD Detector for the Study of Multi-strange Baryon Production in Heavy-ion Collisions at the Nuclotron-based Ion Collider Facility (NICA)
 MPD Collaboration • N. Geraksiev (Dubna, JINR and Plovdiv U.) et al.
 DOI: 10.5506/APhysPolBSupp.14.529
 Published in: Acta Physica Polonica B Proceedings Supplement 14 (2021) 3, 529-532

[51] Detection of (D^{*+}) -meson Decays in the Tracking System of NICA-MPD
 V. Kondratiev (St. Petersburg State U.), C. Ceballos (Dubna, JINR), S. Igolkin (St. Petersburg State U.), A. Kolozhvari (Dubna, JINR), Y. Murin (Dubna, JINR) et al.
 DOI: 10.5506/APhysPolBSupp.14.497
 Published in: Acta Physica Polonica B Proceedings Supplement 14 (2021) 3, 497-501

[52] Centrality Determination in Heavy-ion Collisions with MPD Detector at NICA
 P. Parfenov (Moscow Phys. Eng. Inst.), I. Segal (Moscow Phys. Eng. Inst.), D. Idrisov (Moscow Phys. Eng. Inst.), V.B. Luong (Moscow Phys. Eng. Inst.), A. Taranenko (Moscow Phys. Eng. Inst.) et al.
 DOI: 10.5506/APhysPolBSupp.14.503
 Published in: Acta Physica Polonica B Proceedings Supplement 14 (2021) 3, 503-506

[53] Short-lived Resonances and Neutral Mesons in the Physical Program of the NICA-MPD
 Victor Riabov (St. Petersburg, INP and Moscow Phys. Eng. Inst.)
 DOI: 10.5506/APhysPolBSupp.14.491
 Published in: Acta Physica Polonica B Proceedings Supplement 14 (2021) 3, 491-495

[54] Properties of $\rho(770)$, $K^*(892)$, $\phi(1020)$, $\Sigma(1385)$, $\Lambda(1520)$ and $\Xi(1530)$ resonances in heavy-ion collisions at a center of mass energy of and their reconstruction using the MPD detector at NICA
 MPD Collaboration • D.A. Ivanishchev (St. Petersburg, INP) et al.
 DOI: 10.1088/1742-6596/2103/1/012140
 Published in: J.Phys.Conf.Ser. 2103 (2021) 1, 012140, J.Phys.Conf.Ser. 2103 (2021) 1, 012140

- [55] Prospects for Measuring Short-Lived Resonances in the MPD Experiment on the NICA Accelerator
 D.A. Ivanishchev (St. Petersburg, INP), D.O. Kotov (St. Petersburg, INP), M.V. Malaev (St. Petersburg, INP), V.G. Riabov (St. Petersburg, INP and IITP, Moscow and Lebedev Inst. and Moscow Phys. Eng. Inst. and Moscow, ITEP), Yu. G. Ryabov (St. Petersburg, INP)
 DOI: 10.3103/S1062873821120078
 Published in: Bull.Russ.Acad.Sci.Phys. 85 (2021) 12, 1439-1444, Izv.Ross.Akad.Nauk Ser.Fiz. 85 (2021) 12, 1800-1806
- [56] Perspectives of Neutral Meson Measurements in the MPD Experiment at NICA
 Dmitry Ivanishchev (St. Petersburg, INP), Evgeny Kryshen (St. Petersburg, INP), Dmitry Kotov (St. Petersburg, INP and St. Petersburg Polytechnic Inst.), Mikhail Malaev (St. Petersburg, INP), Victor Riabov (St. Petersburg, INP and Moscow Phys. Eng. Inst.) et al.
 DOI: 10.1142/9789811233913_0063
 Published in:
- [57] Study of $\Phi(1020)$ and $K^*(892)$ Meson Production in Heavy-ion Collision at NICA-MPD
 Dmitry Ivanishchev (St. Petersburg, INP), Dmitry Kotov (St. Petersburg, INP), Mikhail Malaev (St. Petersburg, INP), Victor Riabov (St. Petersburg, INP and Moscow Phys. Eng. Inst.), Yuriy Riabov (St. Petersburg, INP)
 DOI: 10.1142/9789811233913_0061
 Published in:
- [58] Simulating the time projection chamber responses at the MPD detector using generative adversarial networks
 A. Maevskiy (Higher Sch. of Economics, Moscow), F. Ratnikov (Higher Sch. of Economics, Moscow and Yandex Sch. Data Anal., Moscow), A. Zinchenko (Dubna, JINR), V. Riabov (St. Petersburg, INP)
 e-Print: 2012.04595 [physics.ins-det]
 DOI: 10.1140/epjc/s10052-021-09366-4
 Published in: Eur.Phys.J.C 81 (2021) 7, 599
- [59] Hyperons from Bi + Bi Collisions at MPD-NICA: Preliminary Analysis of Production at Generation, Simulation and Reconstruction Level
 Alejandro Ayala (Mexico U., ICN and U. Cape Town (main)), Eleazar Cuautle (Mexico U., ICN), Isabel Domínguez (Sinaloa U.), M. Rodríguez-Cahuantzi (Puebla U., Mexico), Ivonne Maldonado (Sinaloa U.) et al.
 e-Print: 2010.12593 [hep-ex]
 DOI: 10.1134/S1063779621040092
 Published in: Phys.Part.Nucl. 52 (2021) 4, 730-736
- [60] Multipurpose Detector MPD for the Study of Strongly Interacting Matter at the NICA Collider
 V.I. Kolesnikov (Dubna, JINR), A.A. Mudrokh (Dubna, JINR)
 DOI: 10.1134/S1063778820090136
 Published in: Phys.Atom.Nucl. 83 (2020) 9, 1363-1368

3. Детектор MPD

3.1 Введение

Проект "Многоцелевой детектор MPD для изучения свойств горячей и плотной барионной материи на коллайдерном комплексе NICA" посвящен детальному исследованию фазовой диаграммы КХД и поиску сигналов фазового перехода деконфайнмента и критической конечной точки [1]. Всесторонние исследования в неизученной области фазовой диаграммы сильно взаимодействующей материи будут проводиться путем тщательного анализа энергии и размеров системы с использованием ионов различных типов - от протонов до Au^{79+} в диапазоне энергий $4 < \sqrt{S_{NN}} < 11$ ГэВ.

Целью проекта является разработка и создание многофункционального детектора для изучения столкновений тяжелых ионов и исследования базовой квантовой хромодинамической структуры вещества. За последние 20 лет была проведена обширная исследовательская программа в области столкновений тяжелых ионов, в ходе которой был обнаружен ряд новых явлений. Имеются убедительные доказательства фазового перехода в центральных соударениях тяжелых ионов в области низких энергий на SPS [2]. Обширные экспериментальные данные, собранные в ходе экспериментов на ускорителе RHIC [3], свидетельствуют о формировании нового состояния плотной партонной материи — сильно взаимодействующей кварк-глюонной плазмы (sQGP). Однако принято считать, что для гораздо более чувствительного и детального изучения фазовой диаграммы КХД в области большого бариохимического потенциала μ_B требуется следующее поколение экспериментов с тяжелыми ионами [4]. Несколько ускорительных центров недавно запустили новые программы с тяжелыми ионами: SPS в CERN [5], RHIC в BNL [6] и CBM в FAIR [7] могут рассматриваться как дополнительные программы, направленные на изучение актуальных физических проблем горячей и плотной барионной материи.

Основные преимущества проекта NICA/MPD заключаются в том, что ускорительная установка NICA обеспечит широкий выбор пучков (от протонов до ионов золота) в диапазоне энергий, в котором наблюдается деконфайнмент (энергия центра масс от 4 до 11 ГэВ). Высокая светимость NICA ($L = 10^{27} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$) обеспечивает достаточно малые энергетические скачки и высокую скорость взаимодействия. Ключевой особенностью предлагаемой конструкции MPD-детектора, позволяющей с высокой точностью изучать ядерные столкновения, являются:

- Высокая частота событий (до 6 кГц) позволяет очень точно измерить энергетическую и центральную зависимость любого исследуемого явления.
- MPD имеет полное азимутальное покрытие и измеряет большую часть диапазона импульсов частиц в интервале псевдоскоростей $-2 < \eta < 2$.
- Трековая система и система идентификации частиц, включающая TPC для измерения потерь энергии и TOF для измерения времени пролета, дополненная электромагнитным калориметром для регистрации фотонов и электронов с хорошим временным и энергетическим разрешением.

Первая концепция MPD была представлена в Письме о намерениях, опубликованном в феврале 2008 года, а первая версия Концептуального дизайн-проекта была опубликована в декабре 2009 года [8].

В рамках существующего международного сотрудничества, направленного на реализацию проекта, работают около 450 ученых из 16 учреждений России и зарубежья. Этот документ организован следующим образом. Основные физические задачи эксперимента MPD кратко изложены в предыдущем разделе. В разделе 3 представлена общая концепция детектора MPD и некоторые детали основных подсистем MPD. В предыдущем разделе представлен обзор физической программы MPD. В конце документа приведены таблицы с оценкой стоимости и графиком строительства.

Детектор MPD был разработан как 4 π -спектрометр, способный идентифицировать заряженные адроны, электроны и фотоны при столкновениях тяжелых ионов в диапазоне энергий коллайдера NICA и измерять их импульсы. Для достижения этой цели детектор будет включать в себя точную трехмерную трековую систему и высокоэффективную систему идентификации по потерям энергии частиц, времяпролетному принципу и калориметрии. Основные конструктивные параметры многоцелевого детектора были определены с учетом физических процессов, происходящих при ядерных столкновениях в NICA, и ряда технических ограничений, обусловленных сочетанием эффективного трекинга и идентификации с разумным количеством вещества. При расчетной светимости частота событий в области взаимодействия MPD составляет около 6 кГц; общее число заряженных частиц превышает 1000 в центральных столкновениях Au+Au при $\sqrt{s_{NN}} = 11$ ГэВ. Поскольку средний поперечный импульс частиц, образующихся при столкновении при энергиях NICA, составляет менее 500 МэВ/с, конструкция детекторов должна иметь малое количество вещества. Общая схема устройства MPD показана на Рис.3.1.1. Вся установка охватывает область псевдобыстроты $|\eta| < 2$.

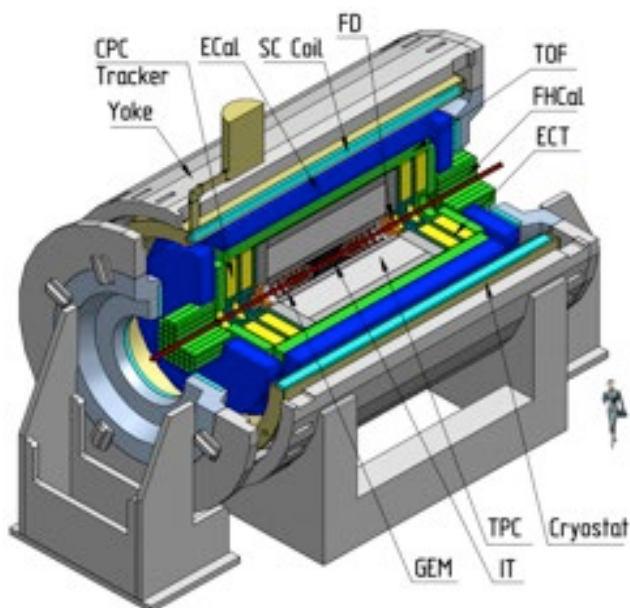


Рис. 3.1.1: Полная конфигурация MPD состоит из магнитопровода (Yoke) и соленоида (SC Coil), времяпроекционной камеры (TPC), времяпролетной системы (TOF), быстрого переднего детектора (FD), переднего адронного калориметра (FHCAL), переднего трекера (CPC и ECT) и внутренней трековой системы (IT)

Поскольку строительство такого детектора требует длительного периода времени, большой группы физиков, инженеров и техников и больших финансовых средств, было принято решение построить его в два этапа.

Целью данного проекта является создание первого этапа установки MPD (рис.3.1.2), которая состоит из сверхпроводящего соленооида, время-проекционной камеры (TPC), цилиндрической части времяпролетного детектора (TOF), электромагнитного калориметра (ECal), переднего адронного калориметра (FHCaI) и быстрого переднего детектора (FD).

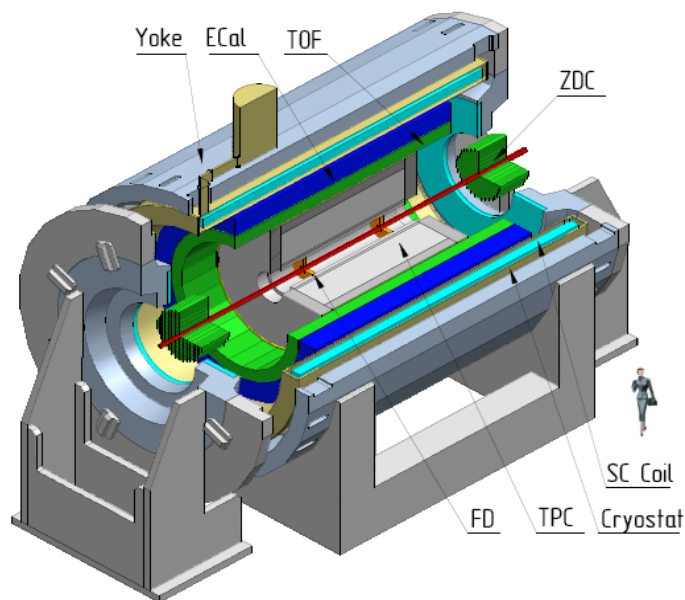


Рис. 3.1.2: Установка MPD на первом этапе состоит из сверхпроводящего соленооида в магнитопроводе (SC Coil, Yoke), времяпроекционной камеры (TPC), цилиндра времяпролетного детектора (TOF), электромагнитного калориметра (ECal), быстрого переднего детектора (FD) и переднего адронного калориметра (FHCaI)

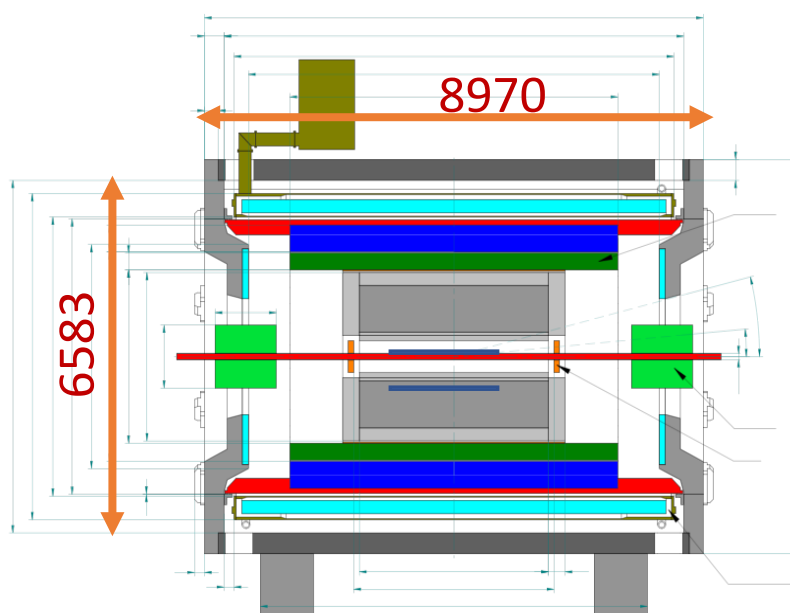


Рис. 3.1.3: Вид сбоку на MPD в базовой конфигурации с указанием основных размеров.

MPD-детектор представляет собой цилиндр длиной 9 м и диаметром около 6,6 м. Поперечное сечение MPD-детектора в базовой конфигурации показано на рис. 3.1.3.

Ссылки:

- [1] A.N. Sissakian and A.S. Sorin, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 36 (2009) 064069.
- [2] C.Alt et al.Phys.Rev.C 77, 2008, 024903.
- [3] Nucl.Phys. A757 (2005), 1-283
- [4] Searching for a QCD mixed phase at the NICA (NICA White paper). Draft v2.01, 30 September 2009. <http://nica.jinr.ru/>
- [5] NA61 experiment. CPOD07 (2007),023. Eprint - 0709.1646.
- [6] G.S.F. Stephans, J. Phys., G32 (2006), S447-S454.
- [7] P.Senger, J. Phys. G30 (2004), S1087-S1090.
- [8] The MultiPurpose Detector (MPD). Conceptual Design Report, v1.0. <http://nica.jinr.ru/>

3.2 Сверхпроводящий магнит

Магнит детектора MPD предназначен для создания однородного магнитного поля с номинальной величиной магнитного поля 0,5 Тл внутри его апертуры. Требуемая объемная средняя неоднородность в дрейфовом объеме ТРС (диаметром около 2,4 м и длиной 3,4 м)

$$\text{Integral}(B_r/B_z) \cdot dz \leq 1,5 \text{ мм.}$$

Сверхпроводящий магнит MPD предназначен для создания высокооднородного магнитного поля напряженностью 0,57 Тл, обеспечивающего высокое разрешение по поперечному импульсу в диапазоне 0,1–3 ГэВ/с². Одной из основных частей соленоида является сверхпроводящий кабель из ниобия и титана, а также магнитопровод, участвующий в формировании магнитного поля.

Магнит MPD состоит из (рис. 3.2.1):

- криостата со сверхпроводящей катушкой и контрольного резервуара Дьюара;
- магнитопровода обратного потока с двумя опорными кольцами, 28 стержнями и двумя полюсами с корректирующими катушками;
- подставки для магнитов;
- вспомогательных платформ для перемещения полюсов;
- роликов для перемещения магнита и его полюсов.

Кроме того, имеются источники питания для сверхпроводящего соленоида и корректирующих катушек в полюсах, система срыва сверхпроводимости сверхпроводящей катушки, криогенная система с криогенным трубопроводом, вакуумная система, гелиевый рефриджиратор и система управления магнитами.

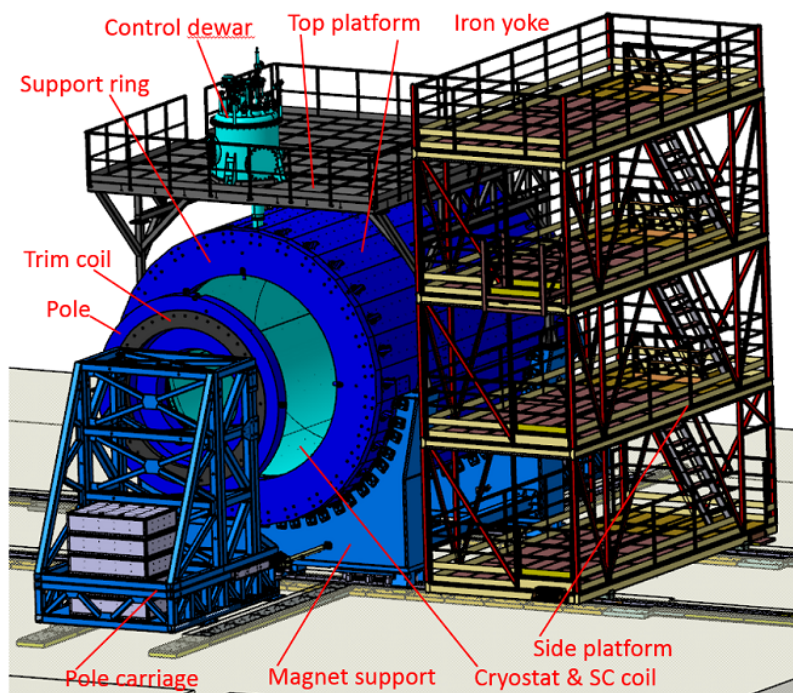


Рис. 3.2.1. Общий вид магнита MPD с платформами.

3.2.1 Сборка и подготовка соленоидального магнита MPD в 2021 году.

3.2.1.1 Распаковка магнита (апрель 2021 г.)

После прибытия магнита в 2020 году в ОИЯИ в апреле 2021 была произведена его распаковка, в результате которой было установлено:

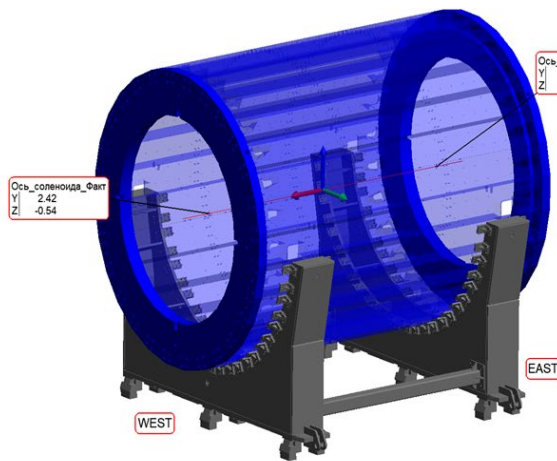
- датчики удара находятся в нормальном состоянии;
- упаковка не повреждена, видимых смещений соленоида с ложементов не наблюдалось;
- отсутствует верхний фланец узла вывода криогенных трубопроводов и сверхпроводящего кабеля (далее по тексту узел чимни);
- по референсным точкам проведено измерение положения холодной массы. Полученные результаты были сравнены с результатами, которые были получены на заводе ASG до транспортировки. Измерения и выявленные отклонения при сравнении результатов представлены в отчете S1-1 были согласованы с ASG и не носят критического характер.
- в соответствии с квалификационным планом сборки был проведен локальный электрический тест на целостность сверхпроводящего кабеля и отсутствие его контакта с корпусом соленоида. Тест проводился на напряжении 500В и 1000В. Результаты испытаний признаны положительными.

3.2.1.2 Установка соленоида в магнитопровод (июль 2021 года).

Следующим этапом работ была установка соленоида в магнитопровод. Для точного позиционирования соленоида относительно магнитопровода требовалось согласовать размеры прокладок опорных кронштейнов соленоида. Основные сложности вызывали 2 составляющие:

- кронштейны соленоида были приварены с отклонением от горизонта, поэтому требовалась высокая точность измерения, компьютерное моделирование положения совмещаемых элементов и дальнейшее формирование профиля прокладки;
- различное положение координатных осей, используемых в ОИЯИ и на заводе ASG.

После проведения этих работ и выборе единой системы координат профиль и размер прокладок был согласован, а соленоид установлен в ядро магнита с допустимыми отклонениями, не влияющими на формирование магнитного поля. Результаты измерения и вычисленное отклонение фактического положения оси соленоида относительно оси ядра (взято за базу) и подписанный отчет показаны на Рис. 3.2.2.



(а)

ASG		RAPPORTO DI NON CONFORMITA'		RNC RNC211029C_rev.1	
In accettazione <input type="checkbox"/> At acceptance <input type="checkbox"/>		In fabbricazione <input type="checkbox"/> In manufacturing <input type="checkbox"/> Construction site <input checked="" type="checkbox"/>		Classa Minor / Class	
A - PRODOTTO					
Commessa/Job: 89128 0001	Impianto/Cliente: JOINT INSTITUTE FOR NUCLEAR	Plant/Customer: NUCLEAR - (S.2.8) 0001	Disegno assemblea/Rev. Assembly/Dep./Rev. 100000000	Disegno Prod. Non conf. / Rev. Non-conf. Prod. Desig./Rev. 100000000	
Descrizione del prodotto / NC / Defect: Non-conform product description		PCF/PCQ applicabile / Rev. / Pos. n. Applicable PCF/PCQ / Rev. / Pos. n. PC00002125		Stampigliatura / Stamping /	
B - FORNITORE					
Fornitore / Supplier: ASG	Ordine / Order:	Articolo / Item: NON APPLICABILE	Posizione SOLI ENDORE NEL GIUOCO		Bolla / DOT /
C - DESCRIZIONE NON CONFORMITA' E CODIFICAZIONE					
The as built position of the solenoid in the iron pipe, in DUBNA premises, is affected by some slight error in positioning the attached documents.					
Tipo codice/Codific type Dimensione		Causa NC / NC Cause Dimensione		Area responsabilità NC/NC Resp area Dimensione	
Preparato (Ent/home):	Verificato (Ent/home):	Approvato (nome):			
Prepared (dept/home):	Checked (Dept/home):	Approved (name):			
Elaborato:	Controllato:	Calcolato:			
D - DISPOSIZIONI PER LA RISOLUZIONE DELLA NON CONFORMITA'					
The available displacement of the actual position of solenoid report 891-21 from the drawing 000000000 does not change the formation of the magnetic field. As the deviation measured are within the limits of the technological deviations evaluated in the ASG Docs. 1000R02014, 1000R01003 and 1000R01012 we propose to accept the situation "as is".					
Preparato (Ent/home):	Verificato (Ent/Adm) (nome):	Approvato (nome):			
Prepared (dept/home):	Checked (Dept/home) (name):	Approved (name):			
Elaborato:	Controllato:	Calcolato:			
E - ATTUAZIONE DISPOSIZIONI					
Close the NCR					
F - RISULTATO FINALE					
Chiusura attuale / Closure implemented: <input checked="" type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> Risultato sul Prodotto / Result on product					
Richiesta ulteriore RNC / Requested further RNC: <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> Prodotto accettato allo stato					
Richiesta approvazione cliente / Customer approval request: <input checked="" type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> Approvazione ASG / ASG Approval					
Firma/Signature: Data/Date: 20/11/2021		Firma/Signature: Data/Date: 20/11/2021			

(в)

Рис 3.2.2. Отклонение фактического положения оси соленоида относительно оси магнитопровода (а) и подписанный отчет (в).

3.2.1.3 Выявленные неисправности в результате локальных тестов и их устранение (август – декабрь 2021 года).

В соответствии с планом работ по сборке и тестированию соленоида была проведена проверка датчиков, расположенные внутри соленоида (датчики температуры, датчики осевого и радиального смещения, датчики падения напряжения на сверхпроводящем кабеле). В результате проверки было установлено, что один из разъемов F2AS1 вышел из строя. Разъем был разобран и отремонтирован.

После ремонта разъема, была собрана и подключена для проверки на прочность и герметичность соленоида, штатная вакуумная система. Промежуточный тест на прочность и герметичность включал в себя испытания кожуховой части соленоида, гелиевого контура охлаждения, контура азотного экрана. Тестирование проводилось по согласованной с ASG схемой, силами специалистов ОИЯИ, с участием контролера ASG. В результате проверки была выявлена и локализована течь азотного контура. Выявленная течь была устранена, а повторная проверка показала полную герметичность контура.

3.2.2. Работы по сборке и пуско-наладке магнита выполненные в 2022 году.

3.2.2.1 Разработка и сборка узла чимни (февраль – июль 2022 г.).

Узел чимни представляет собой место соединения контрольного Дьюара, внутри которого находится оборудование и арматура (трубопроводы, емкость жидкого гелия, место ввода/вывода сверхпроводящего кабеля с переходом на кабель нормальной проводимости, термометрия, клапаны и т.д.) и соленоида. Этот узел включает в себя 4 трубопровода контура азотного экрана, 2 трубопровода гелиевого контура охлаждения, и

два пластины сверхпроводящего кабеля. Эти трубопроводы и кабель установлены внутри вакуумного кожуха. Все элементы этого узла, по договору, должны были быть предоставлены заводом изготовителем ASG. В связи с тем, что условия поставки комплектности этого узла ASG не выполнили, а связь была с в феврале 2022 года ASG была прервана, сотрудниками ЛФВЭ была проведена работа по разработке и глубокой модернизации узла. В частности:

- было принято решение выполнить вакуумный кожух из двух частей. Это позволило иметь доступ к основным элементам (сильфонные узлы, сверхпроводящий кабель, криогенные опоры, термометрия) без полной разборки криогенной части;
- соединение криогенных трубопроводов подачи гелия выполнили разъемным в доступном месте;
- применили сильфонные узлы собственной конструкции, предотвращающие перегиб в случае повышенного давления или изменения линейных размеров вследствие отепления/охлаждения;
- восстановлен верхний фланец узла, отрезанный в ASG (Рис 3.2.3);
- проведены локальные проверки на прочность и герметичность;
- доработана верхняя балка магнитопровода для локального доступа к элементам узла чимни.

Все элементы узла чимни были изготовлены, проведен монтаж и испытания. По результатам локальных испытаний все узлы находятся в рабочем, удовлетворительном состоянии, течей нет. Новая конфигурация, доработанной балки, была смоделирована на предмет влияния на однородность магнитного поля. По итогам расчетов доработанная балка не вносит существенных изменений в однородность магнитного поля в объеме соленоида.



Рис 3.2.3. Подготовка узла чимни специалистами ОИЯИ

3.2.2.2 Окончательная сборка магнитопровода, установка криогенной платформы и размещение оборудования на ней (июль – август 2022 года).

Готовность узла чимни позволила завершить сборку магнитопровода и установить криогенную платформу, начать размещение оборудования и его испытания (Рис 3.2.4). Было выполнено:

- установка опорных колец магнитопровода;
- установка балок магнитопровода;
- проведены измерения положения магнитопровода и опорных колец;
- установка криогенной платформы с размещением на ней системы питания и разрядки соленоида, системы охлаждения соленоида;
- системы контроля и управления соленоидом.



Рис 3.2.4. Размещение инженерных систем соленоида на криогенной платформе.

3.2.2.3. Сборка и установка на стапели корректирующих катушек соленоида (июль 2022 года).

Корректирующие катушки соленоида были изготовлены и доставлены в ОИЯИ в 2020 году. Катушки устанавливаются в полюса с сносностью не хуже, чем 2 мм, устанавливаются в опорные кольца магнитопровода и замыкают магнитное поле соленоида на торцах. Катушка представляет собой кабель, уложенный спиралью и охлаждаемый дистиллированной водой комнатной температуры. Вес каждой катушки составляет 2 тонны, а в сборе с полюсом более 40 тонн. При этом стоит учесть, что катушки при транспортировке были уложены выводами вниз, что противоречило схеме их установки, представленной ASG. Ввиду этого, сотрудниками НЭОМД и КБ ЛФВЭ была разработана специальная траверса для кантования катушки, с защитой от смещения спирали и изменяя формы катушки при перемещении перевороте. После монтажа и установки катушек на подвижные стапели были проведены повторные (финальные) измерения соосности катушка – полюс. По результатам измерений, положение катушки в горизонтальном положении отклонение соосности составили: для катушки TRIM1 – 1.3 мм, для катушки TRIM 2 – 0.47 мм при допустимом отклонении в 2 мм (Рис 3.2.5).



(a)

(b)

Рис 3.2.5. Сборка корректирующих катушек, где (а) – сборка катушка- полюс, (в) – измерение соосности.

3.2.2.4. Подготовка криогенной системы соленоида (июль – декабрь 2022 года).

Криогенная система соленоида должна обеспечивать надежную работу и охлаждение сверхпроводящего кабеля до 4.5 К. Основными элементами системы является:

- контрольный Дьюар;
- сателлитный рефрижератор;
- система поддержания температуры азота в режиме охлаждения (NTSS);
- гелиевые и азотные резервуары хранения и выдачи;
- система трубопроводов и распределения гелия и азота между потребителями;
- система прямого и обратного потока технических газов (гелий, азот, воздух) включая систему подогрева обратного потока.

Основная сложность сборки этих систем заключалась в том, что часть исполнителей (заводы изготовители ASG, ILK, Ferox, AS Scientific и т.д.) ссылаясь на форс-мажорные обстоятельства, отказались от выполнения своих обязанностей по сборке и наладке этого оборудования. Ввиду этого в июле 2022 года было принято решение силами сотрудников ОИЯИ провести сборку и наладку имеющегося оборудования, а часть заказов, учитывая изменения в схему охлаждения, разместить на предприятиях РФ. Таким образом были выполнены следующие работы:

- начата сборка и испытания рефрижератора, который был доставлен в разобранном состоянии (Рис 3.2.6);
- установлен на рабочее место контрольный Дьюар и проведено его соединение с соленоидом;
- проверен и налажен алгоритм работы системе поддержания температуры азота MFS;
- проведена переработка схемы охлаждения соленоида с учетом изменений инфраструктуры;
- проведено размещение заказов на трубопроводы и резервуары у производителей в РФ.



(a)



(b)

Рис 3.2.6. Сборка компонентов криогенной системы соленоида, где (a) – сборка рефрижератора, (b) – сборка и тестирование контрольного Дьюара.

3.2.3. Работы по сборке и пуско-наладке магнита выполненные в 2023 году.

3.2.3.1 Подготовка криогенной системы.

В 2023 году работы по сборке рефрижератора продолжились. В результате сборки и подготовки рефрижератора к работе было выявлено отсутствие подготовленного ПО. Сотрудниками ЛФВЭ и компанией ООО «Системы расширенного диапазона» была проведена работа по разработке схемы и подготовке нового ПО с возможностью работы в ручном режиме и визуализации телеметрии, на базе имеющихся ПЛК. Ввиду отсутствия градуировочных таблиц низкотемпературных датчиков Serpox их восстановление не представлялось возможными, и было принято решение изготовить и откалибровать собственные датчики силами ЛФВЭ. В результате работы в настоящее время спутниковый рефрижератор готов к работе в ручном режиме и встроен в общую систему охлаждения соленоида.

Продолжилась работа по сборке криогенного оборудования на технологической платформе. После установки на платформу контрольного Дьюара и его локальных испытаний, была проведена его обвязка с трубопроводами соленоида. К тоководом были смонтированы выводы сверхпроводящего кабеля. После электрических тестов СП кабеля была проведена его заливка компаундом. На СП кабель, в узле соединя с контрольным Дьюаром (самая теплонагруженная часть), были добавлены дополнительные датчики температуры для определения температуры кабеля в процессе ввода тока и стационарном режиме работы. После тестирования и изоляции трубопроводов и тоководов, контрольный Дьюар был герметично закрыт. В это же время в рабочее положение была установлена и подключена вакуумная система откачки полости соленоида. Датчики от соленоида и вакуумной системы были подключены в систему контроля и управления Master control (более 500 кабелей). В мае была проведена откачка вакуумной полости соленоида до

рабочего вакуума $5 \cdot 10^{-5}$ Торр. Время откачки составило 48 часов. Испытания на герметичность прошли успешно, протечек и течей не выявлено. В процессе испытаний в трубопроводы системы охлаждения соленоида подавался гелий под рабочими давлениями.

Летом 2023 года получены перезаказанные в РФ компоненты криогенной системы охлаждения соленоида MPD, проведено размещение всех элементов системы на технологической платформе и проведена обвязка оборудования гибкими криогенными трубопроводами. Закончен монтаж теплых трубопроводов прямого и обратного потоков гелия и азота по крыше полукольца W от корпуса 1Б до пом. 101 (зал MPD) задания 17, общей протяженностью 500 м. Осенью смонтированы подвесы zip line, на которые размещены гибкие трубопроводы, позволяющие перемещать магнит от положения «сборка» до положения «пучок» не отепляя магнит и сохраняя температуру 80К в любом положении магнита. Гибкие и стационарные трубопроводы были испытаны на прочность и герметичность, включая испытания при криогенных рабочих температурах (Рис 3.2.8).



Рис 3.2.8. Общий вид технологической платформы, с установленным оборудованием.

Для подогрева газообразного гелия и азота обратного потока были разработаны нагреватели, компания поставщик из Великобритании AS Scientific отказалась от выполнения своих обязательств по их изготовлению в рамках контракта. В декабре 2022 года, переработанная версия нагревателей была перезаказана в компании ООО «Аккорд» РФ. В июле нагреватели были доставлены в ОИЯИ и сентябре 2023 смонтированы на и интегрированы в общую систему охлаждения соленоида.

После сборки криогенного оборудования, было проведено пробное охлаждение соленоида в течение 8 часов. Этот этап предполагал циркуляцию рабочих газов в контурах

системы охлаждения в теплом режиме. В данном этапе работы было выяснены алгоритмы работы оборудования, определены параметры давлений, положение вентилях, отклик системы ПО на команды оператора, проверка герметичности системы, отработка взаимодействия с отделом НИКО, а также действия персонала. Этап был завершен в 20 ноября 2023 года. В результате этой работы определили, что скорость охлаждения составляет 1.2 К/час, а разница не превышает 7 К, что укладывается в проектные параметры. За время 8 часового охлаждения было выяснено, что регулировкой потоков гелия в рефрижераторе удаётся довольно точно выдержать заданный темп охлаждения и температуру выходящего потока в соленоид.

3.2.3.2 Система контроля, управления и защиты Master control.

В апреле 2023 года система контроля и управления соленоидом была установлена на технологическую платформу и была начата ее обвязка. Благодаря подрядчикам ООО «Системы расширенного диапазона» удалось подобрать пароли для входа в систему, было произведено ее обновление, восстановлена электрическая схема и проверены управляющие сигналы. Диагностика показала, что автоматического режима эта система не имеет связей датчик – сигнал – команда отсутствует, хотя по документации она должна присутствовать. В процессе наладки ПО, удалось исправить ряд ошибок, обновить и добавить ряд градуировочных таблиц и связей. В настоящее время система может функционировать в ручном режиме и готова к криогенным испытаниям. В процессе наладки ПО на СП кабель, в тестовом режиме, было подано напряжение 10 В и ток в 1,2 А. Эти данные были зафиксированы системой контроля на вкладке Voltage taps (Рис 3.2.9). Таким образом, на данный момент датчики температуры, напряжения стержней подвесов, токовые отводы, контрольный Дьюар, вакуумная система корректно отображаются в системе корректно, есть возможность управления в ручном режиме.

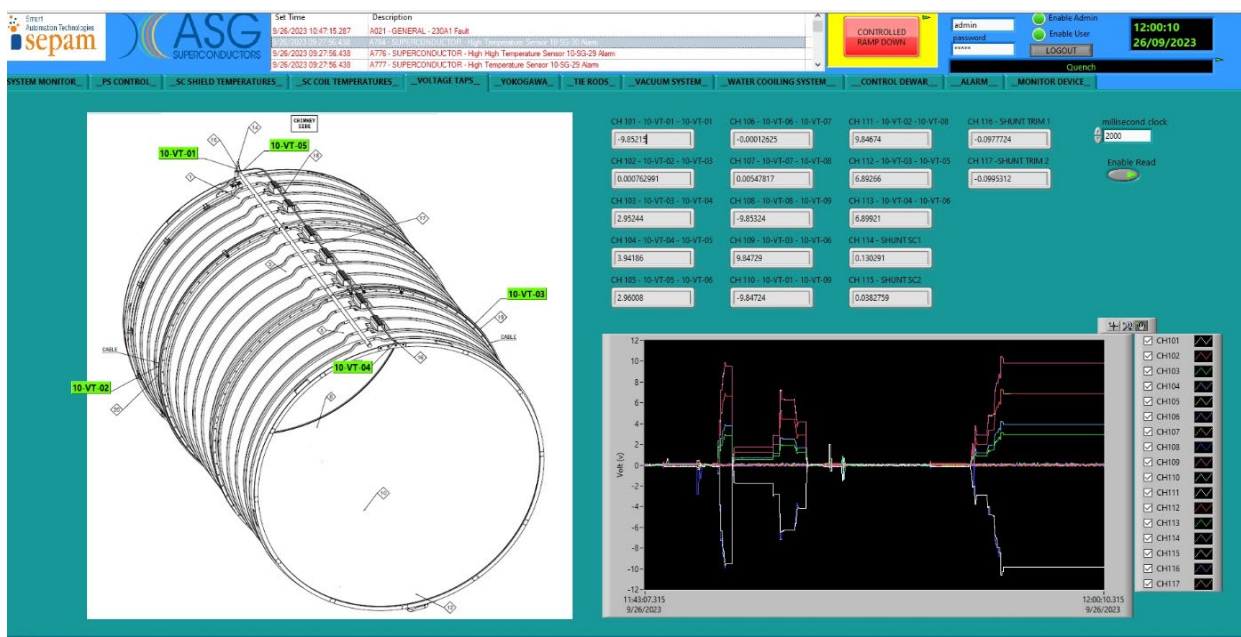


Рис 3.2.9. Тестирование системы защиты СП кабеля.

3.2.4. Пуско-наладочные работы магнита MPD в 2024 году.

3.2.4.1 Криогенные испытания.

После проведения первого этапа криогенных испытаний в 2023 году, в феврале-марте 2024 года было праведно охлаждение соленоидального магнита до температуры 72 К. В результате испытаний установили отсутствие холодных течей, были отработаны режимы охлаждения с переходом от азотного к гелиевому, определены теплопритоки, отработаны режим работы соленоида без циркуляции гелия под азотными экранами, праведно отопление соленоида. График охлаждения представлен на Рис 3.2.10..

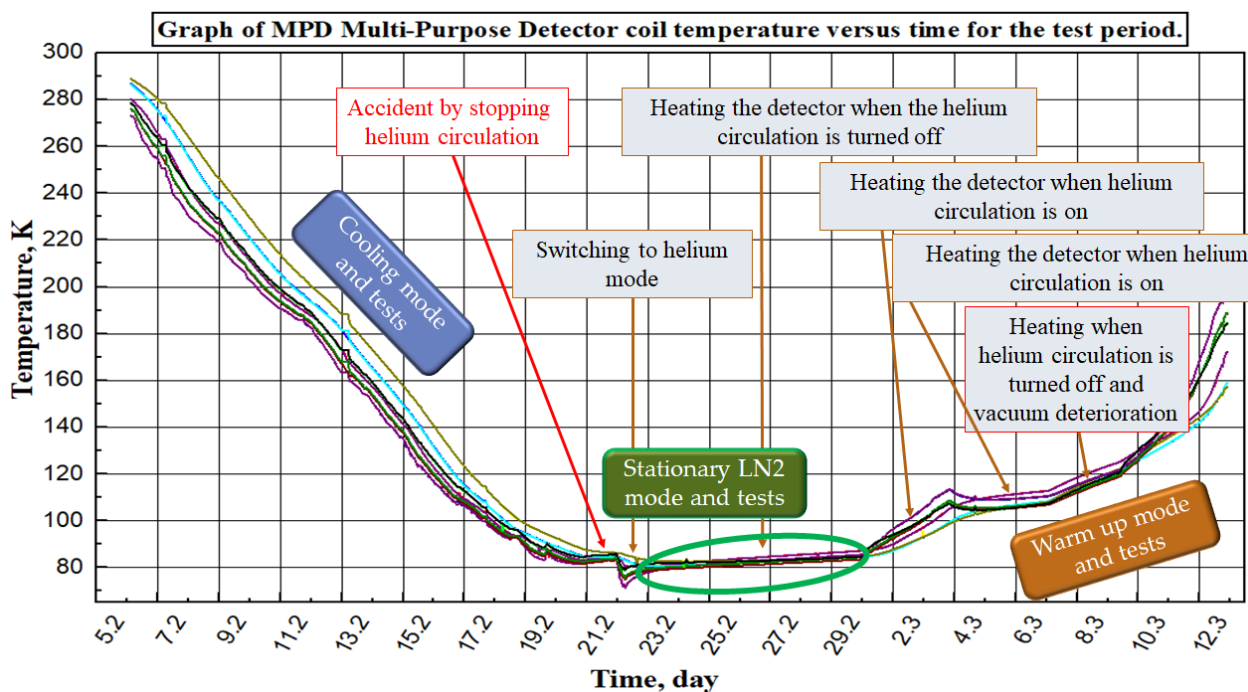


Рис 3.2.10. График охлаждения (отопления) соленоида в феврале – марте 2024 года.

Из графика видно, что охлаждение соленоида до температуры жидкого азота 77 К длилось 15 дней. Средняя скорость охлаждения составила 0,6 К/ч, что значительно ниже проектной 1-2 К/ч. Более низкая скорость охлаждения была выбрана с целью детального изучения процесса охлаждения и работы оборудования. Также был проведен эксперимент по переходу с азотного режима охлаждения на гелиевый, который показал плавный переход без значительного повышения давления. В процессе эксперимента был смоделирован режим работы на азотном экране без циркуляции в гелиевом контуре. Такой режим возможен в случае инцидентов, проведения ППР на криогенном комплексе НИКА или в режиме ожидания эксперимента на пучке (ожидаемая выдержка магнита при температуре 80 К без отепления). Этот эксперимент показал общий теплоприток к системе де более 100 Вт.

Также в течении 2024 года были выполнены работы по оптимизации работы технологического оборудования и локальной автоматизации систем. Были выполнены работы по глубокой доработке ПО рефрижератора и пневмо-электрических клапанов. Проведен монтаж и испытания магистрального азотного трубопровода, позволяющего объединить криогенную систему магнита и азотные танки 25 м3. Таким образом, основные

элементы криогенной системы собраны и готовы к работе в штатном режиме. Есть существенная задержка в изготовлении гелиевого магистрального трубопровода. В связи с этим была разработана новая временная схема для охлаждения магнита до 4.5 К. Дальнейшая работа по измерению магнитного поля также, будет выполняться с временным трубопроводом подачи жидкого гелия в рефрижератор. До конца 2024 года планируется выйти на рабочую температуру сверхпроводящего кабеля 4.5 К.

3.2.4.2 Системы питания магнита.

С июня по декабрь 2024 года выполняются работы по размещению и обвязки источников питания корректирующих катушек и СП катушки. В настоящее время выполнена обвязка источника питания с магнитом и внешнем разрядным сопротивлением (Рис 3.2.11). Начинается тестирование источников на уровне 10% от номинала. К концу года будут проведены испытания с моделированием срыва сверхпроводимости и работы внешнего сопротивления.



Рис 3.2.11. Шинопровод от внешнего сопротивления до тоководов магнита.

3.2.4.3 Система водяного охлаждения магнита.

Система водяного охлаждения обеспечивает стабильную температуру корректирующих катушек и источников питания. В январе – мае 2024 году разработан проект охлаждения от внешнего источника до системы охлаждения магнита, в настоящее время проведен монтаж трубопроводов и систем КИПиА до шкафа контроля и управления. Ведется промывка системы и к началу декабря 2024 будут выполнены тепловые испытания и приемка системы в штатную эксплуатацию.

3.2.4.4 Разработка объемного измерителя поля.

После отказа CERN от поставки измерителя магнитного поля в объеме магнита. Сотрудники ОИЯИ совместно с сотрудниками ИЯФ им. Будкера выполнили работы по разработке объемного измерителя на основе 3Д датчиков Холла. В настоящее время на финальной стадии изготовления элементов измерителя. В декабре 2024 года ожидается сборка и испытания измерителя на базе ИЯФ им. Будкера. Ожидание поставки измерителя в ОИЯИ конец 2024 года.

План работ по пуско-наладке магнита MPD в 2025 году.

В 2025 году планируется провести измерения и картографирование магнитного поля детектора. Выполнить работу по прокладке магистрального гелиевого трубопровода. Оптимизировать работу оборудования и начать подготовку к вводу в штатную эксплуатацию и регистрацию органах Ростехнадзора оборудования, работающего под давлением. Провести монтаж силового каркаса в соленоид. Собрать и установить подъемную платформу загрузки детекторов с западной стороны. Установить подвесы для крепления оптоволоконной сети, а также гибких трубопроводов подачи инженерных газов. Будет выполнена сборка суб-детекторов.

3.2.5 Основные работы, запланированные в рамках проекта на 2026-2030 гг.

Основной задачей 2026-2030 года будет эксплуатация детектора на физический эксперимент с доработками всех систем и автоматизацией инженерного оборудования. Также требуется разработка и реализация проекта автономного снабжения криогенной системы газообразным гелием от внешнего локального компрессора, системы очистки и хранения гелия. В рамках продления проекта будет выполнена работа по организации резервного автономного питания технологического оборудования соленоида от внешнего генератора. Такие меры позволят минимизировать риски отказа оборудования и пролить жизненный цикл детектора.

3.3. Время-проекционная камера (TPC).

Время-проекционная камера TPC – основной трековый детектор установки MPD. С помощью этого детектора восстанавливаются треки заряженных частиц и осуществляется их идентификация по удельным потерям в рабочем газе детектора.

Расчетные параметры TPC:

- акцептанс $\eta < 1.2$;
- импульсное разрешение $\sim 3\%$ ($0.1 < p_t < 1 \text{ GeV}/c$);
- 2-х трековое разрешение – порядка 1 см;
- разрешение по dE/dx – не хуже 8%.

Указанные параметры должны обеспечиваться для расчетной светимости коллайдера NICA (при множественности событий - до 1000 треков для центральных Au+Au соударений и частоте событий - 7 кГц).

Радиационная длина цилиндрической части TPC для $\eta = (0 \div 1.04)$ составляет величину $X/X_0 \sim (9.2 \div 14.7)\%$. Для торцевых частей ($\eta = (1.14 \div 2.06)$) X/X_0 составляет величину $\sim (46 \pm 1)\%$ (в том числе для середины ROC камеры ($\eta = 1.51$) это: оболочки C1+C2 и газовая смесь $\sim 5.65\%$, ROC камера $\sim 14.23\%$, FE карты электроники $\sim 3.3\%$, радиаторы охлаждения электроники $\sim 11.9\%$, LV провода питания FE карт $\sim 9\%$, торцевой тепловой экран TPC $\sim 1.62\%$. В сумме $X/X_0 = 45.7\%$)

3.3.1. Конструкция TPC

TPC состоит из 4-х цилиндров (из кевлара) с высокой жесткостью (прогиб по центру не более 0.1 мм) и малым количеством вещества на пути частиц ($0.4 \text{ г}/\text{см}^2$). Зазор между цилиндрами C1-C2 и C3-C4 продувается азотом для предотвращения попадания кислорода и воды из воздуха в рабочий объем TPC и для защиты от высоковольтных пробоев (рабочее напряжение – около - 25 кВ). На Рис. 3.3.1 показана схема конструкции TPC, расположение считывающей электроники и направление прохождения пучков заряженных частиц.

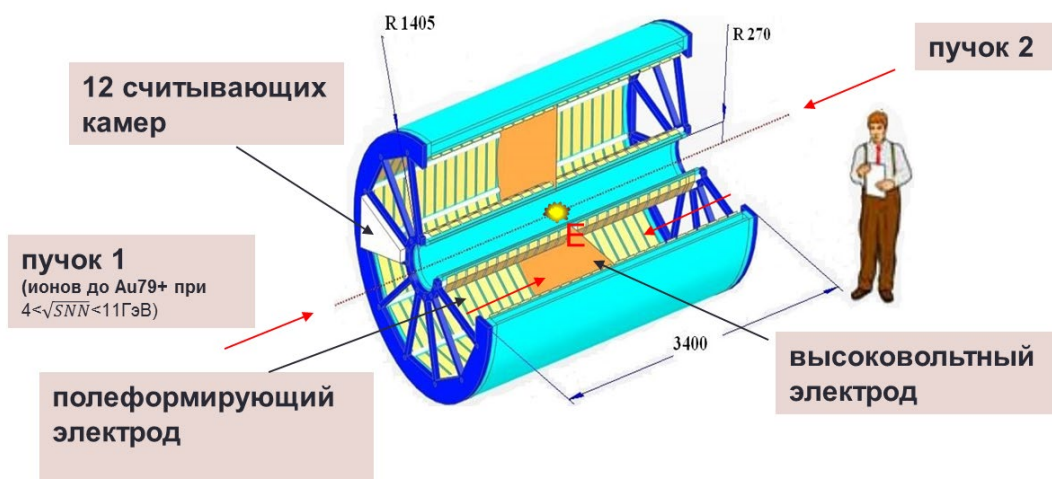


Рис. 3.3.1 Схема конструкции TPC.

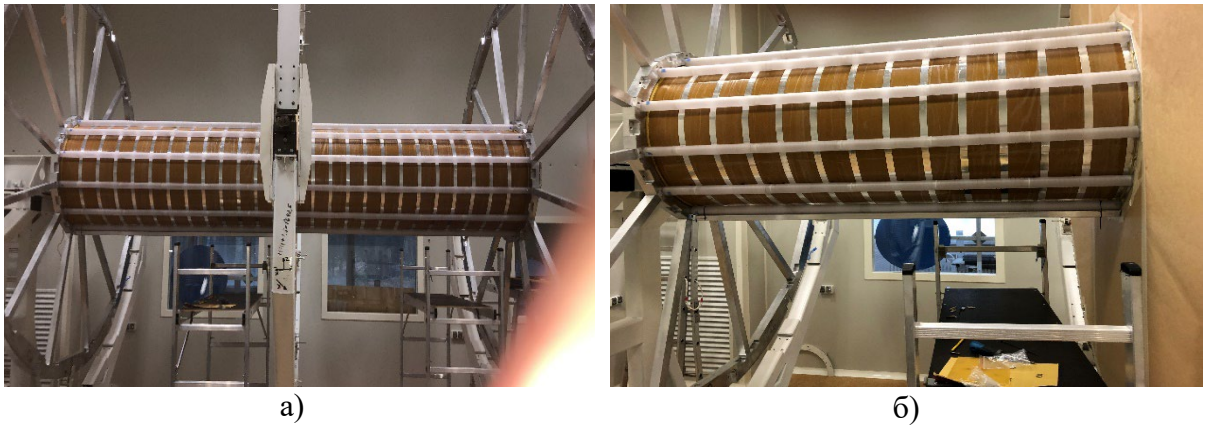


Рис. 3.3.2. Склейка 2-х фланцев и высоковольтного электрода с трубой C1-C2 (а). 12 труб системы field cage на малом радиусе TPC (б).

На каждом торце TPC устанавливается по 12 камер. Сборка из 2-х фланцев и высоковольтного электрода с трубой C1-C2 (корпус 217 ЛФВЭ) показана на Рис. 3.3.2а. Взаимная не параллельность 2-х фланцев и высоковольтного электрода между собой – не более ± 0.5 мм. Установлены 24 трубы системы field cage на внутреннем диаметре TPC (Рис. 3.3.2б). Готовятся к установке трубы внешнего диаметра (24 шт.). В 8 трубах смонтированы микрзеркала системы лазерной калибровки TPC.

3.3.2 Подсистемы TPC

3.3.2.1 Считывающие камеры ROC

В качестве считывающей системы выбраны многопроводные пропорциональные камеры MWPC со считыванием сигналов с площадок на катодном электроде. Ширина рамки у камер всего 13 мм с каждой стороны, что обеспечивает максимальную чувствительную рабочую площадь камер. зону. Радиационная длина $X/X_0 \sim 7\%$ достигается за счет минимизации количества вещества на пути пролета частиц за счет сокращения толщины Al рамы ROC камеры до 5 мм без ущерба для её механической стабильности. Изготовлено и протестировано 24 (+ 2 запасных) ROC камеры (Рис. 3.3.3-3.3.4).



Рис. 3.3.3. Серийные ROC камеры на стеллажах (26 шт.)

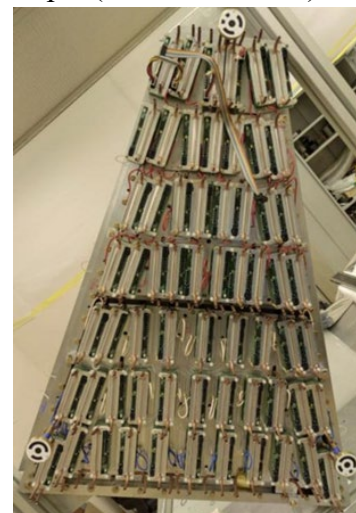


Рис. 3.3.4. Вид ROC камеры с установленной электроникой считывания и радиаторами охлаждения

Каждая камера тестировалась сначала на газовой смеси Ar/CO₂ (80/20), а затем на смеси Ar/CH₄ (90/10). Методика тестирования включает в себя измерение величины темнового тока, плато счетной характеристики, амплитудного разрешения, однородности газового усиления по площади и тестирование на долговременную стабильность работы.

Для всех ROC камер величина темнового тока в рабочем диапазоне не превышает I=1 нА. Диапазон рабочих напряжений - +(1400÷1550) вольт. Среднее значение амплитудного разрешения при равномерной засветке излучением от радиационного источника Fe⁵⁵ для всех камер составляет порядка 19 %. Неоднородность газового усиления при сканировании по площади и вдоль линии (перпендикулярно анодным проволокам) - порядка 16% при анодном напряжении +1450 вольт для смеси Ar/CH₄ (90/10). Тест на долговременную стабильность работы показал, что изменение центра тяжести основного пика в амплитудном спектре не превышает нескольких процентов и хорошо согласуется с изменениями атмосферного давления.

Распределение заряда, наведенного на пэдтовую плоскость, было проверено с 32 канальным прототипом регистрирующей карты (FEC32S) на основе специализированной микросхемы ASIC SAMPA. Показано, что заряд наводится на 3 пэда, что хорошо согласуется с результатами расчетов функции отклика пэдов.

Все камеры проверены на герметичность. Газовая течь менее 50 микролитров/час (10⁻³ см³/мин). Проверена работа модуля запирающей сетки, разработанного в Минске. Время открытия и закрытия запирающей сетки ~ 500 нс. Для контроля температуры на корпусе каждой камеры установлено по 4 термодатчика Pt100.

Усовершенствована схема расположения электроники на ROC камере. Для этого была проведена модернизация больших и малых радиаторов и оптимизирована длина каптоновых кабелей между камерой и FE картами. Теперь все FE карты расположены в один слой, что упрощает сборку и сокращает радиационную длину электроники с радиаторами до X/X₀ ~15%. Показана возможность монтажа электроники после установки ROC камер в ТРС.

Совместно с коллегами из ПромГеодезии векторно-геометрическим методом и методом фотограмметрии были произведены измерения положения пэдов. Положение 3968 пэдов в каждой ROC камере привязано к положению 3-х фотограмметрических меток на корпусе камеры. Измерения сделаны для всех ROC камер.

3.3.2.2 Газовая система

Газовая смесь для ТРС состоит из (10 ± 0,1)% CH₄ в Ar при избыточном давлении в ТРС dP=(2 ± 0,01) мбар. Скорость продува смеси через ТРС – (200÷3000) л/ч.

Газовая система (Рис. 3.3.5) тестируется с тестовым газовым объемом в лабораторных условиях и в настоящее время находится в рабочем состоянии.



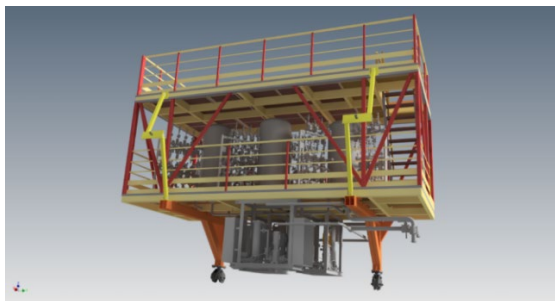
Рис. 3.3.5. Тестирование газовой системы с тестовым объемом в корп.217 ЛФВЭ.

3.3.2.3 Система охлаждения

Система охлаждения служит для температурной стабилизации детектора ТРС и охлаждения электроники считывания. Целью является стабильность температуры газа внутри объема ТРС в пределах $0,5^\circ \text{C}$. Система использует 235 датчиков Pt100, размещенных на корпусе ТРС, ROC камерах и радиаторах охлаждения FE карт и обеспечивающих измерение температуры с точностью $\sim 0,1^\circ \text{C}$. Дистиллированная/деионизованная вода используется в качестве теплоносителя.

Весь комплект панелей для системы термостабилизации ТРС и весь набор радиаторов для охлаждения электроники считывания изготовлены и поставлены в ОИЯИ.

Системы охлаждения и термостабилизации детекторов ТРС и ECAL состоят из баков с насосами, коллекторов раздачи и приёма воды (Рис. 3.3.6), систем трубопроводов по внешней поверхности установки МРД и трубопроводов, расположенных внутри МРД. Для предотвращения течей воды внутри установки МРД, вся вода в трубопроводах находится под давлением ниже атмосферного (leakless system). Автоматика обеспечивает контроль и мониторинг состояния всей системы. Разработана компоновка баков с коллекторами и 3-х насосных групп на 2-м этаже «Южной» платформы. На данный момент идёт проверка принятых технических решений на специализированном стенде, закупка оборудования и компонентов, поставки в ОИЯИ и монтаж систем. Продолжается согласование компоновки оборудования, трассировки труб и системы термометрии между Исполнителем (НИИ ЯП БГУ, г. Минск) и ОИЯИ.



а)



б)

Рис. 3.3.6 Общий вид компоновки систем охлаждения и термостабилизации детекторов ТРС и ECAL (а). Вид 3-х баков с коллекторами (б) на «Южной» платформе.

3.3.2.4 Система лазерной калибровки

Система лазерной калибровки ТРС необходима для минимизации погрешности в абсолютном измерении координат треков частиц. В объеме ТРС с помощью системы распределения первичного лазерного луча генерируется 8 плоскостей с 28 вторичными лазерными лучами в каждой.

Разработана конструкция для установки сборок микрозеркал в трубы системы field cage ТРС. Процесс юстировки сборок в трубе показан на Рис. 3.3.7а). Микросборки установлены во все 8 труб. Изготовлен детектор положения лазерного луча (Оломоуц, Чехия). Детектор испытан с рабочим лазером (см. Рис. 3.3.7б). Измерены углы между лучами для сборок микрозеркал. Разработано компьютерное управление 2-мя рабочими лазерами системы лазерной калибровки ТРС.

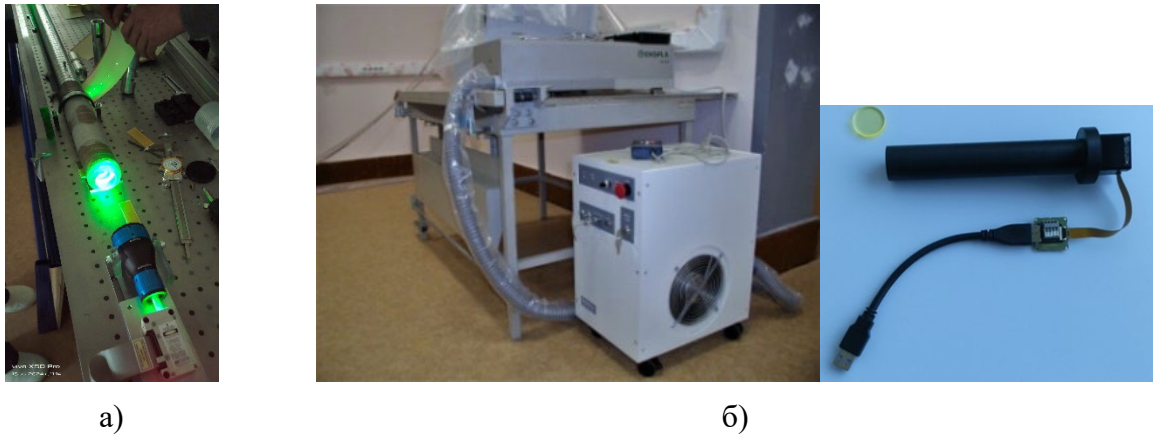


Рис. 3.3.7 Оснастка для юстировки сборок с микрозеркалами в трубе (а). UV лазер с детектором положения луча (б).

3.3.2.5 Система сбора данных и электроника считывания FEE

Система сбора данных TPC (**DAQ** - Data AcQuisition system) спроектирована для приёма данных с детектора TPC и содержит 95232 канала регистрации. Основными элементами DAQ являются 1488 модулей детекторной электроники (**FEC** - Front-End Card), 24 контроллера считывающей камеры (**RCU** - Readout and Control Unit) и 6 концентраторов данных (**DCU** - Data Concentrator Unit). Структурная схема системы сбора данных TPC показана на Рис. 3.3.8

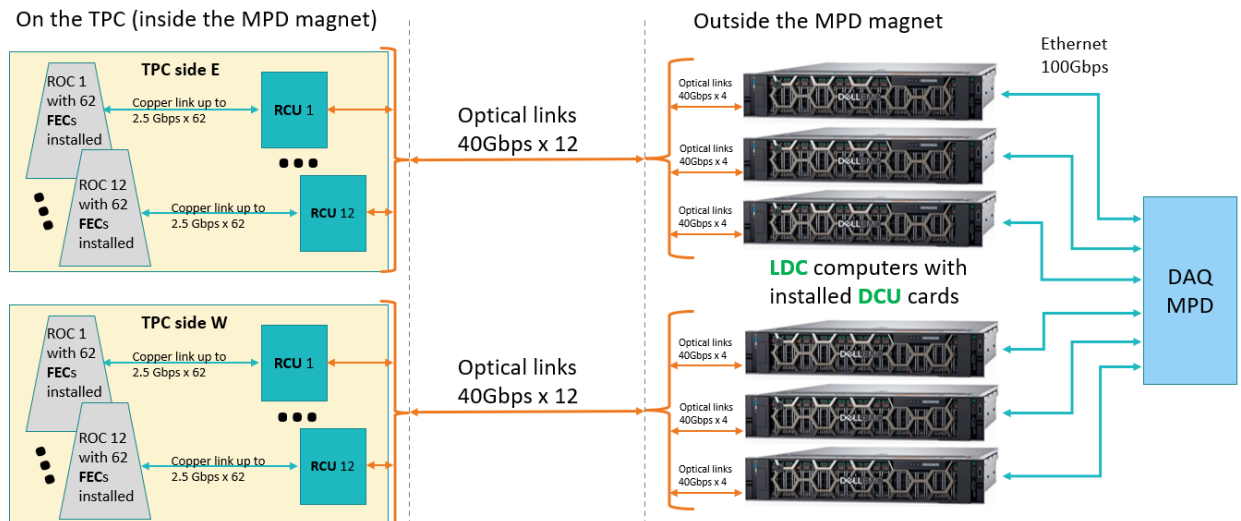


Рис. 3.3.8 Структурная схема системы сбора данных TPC

Модули FEC содержат 64 канала регистрации каждый и базируются на специализированных микросхемах (ASIC SAMPA), микросхемах программируемой логики (FPGA) и скоростных последовательных интерфейсах передачи данных. Общий вид FEC показан на Рис. 3.3.9. В данный момент изготовлено 102% всех версий FEC. Идет подготовка к запуску в производство резервной партии модулей FEC. Продолжается тестирование изготовленных модулей электроники.

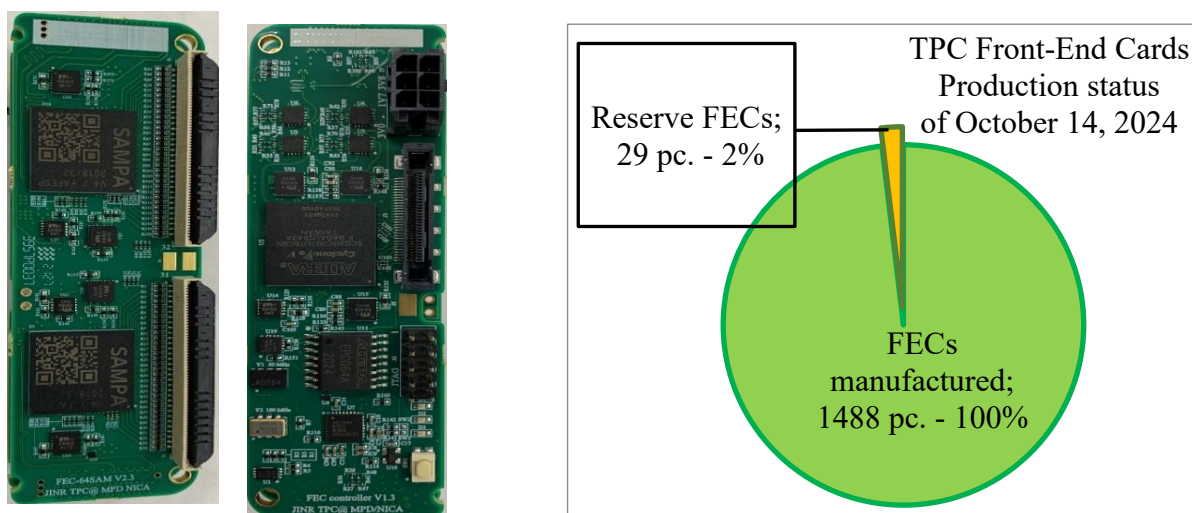


Рис. 3.3.9 Модули FEC: слева - общий вид; справа - статус изготовления

Контроллер RCU предназначен для управления и приема данных с 62 FEC модулей, установленных на одной считывающей ROC камере (Рис. 3.3.10). В данный момент завершается тестирование контроллера RCU и ведется подготовка к массовому производству устройства.



Рис. 3.3.10 Общий вид контроллера RCU

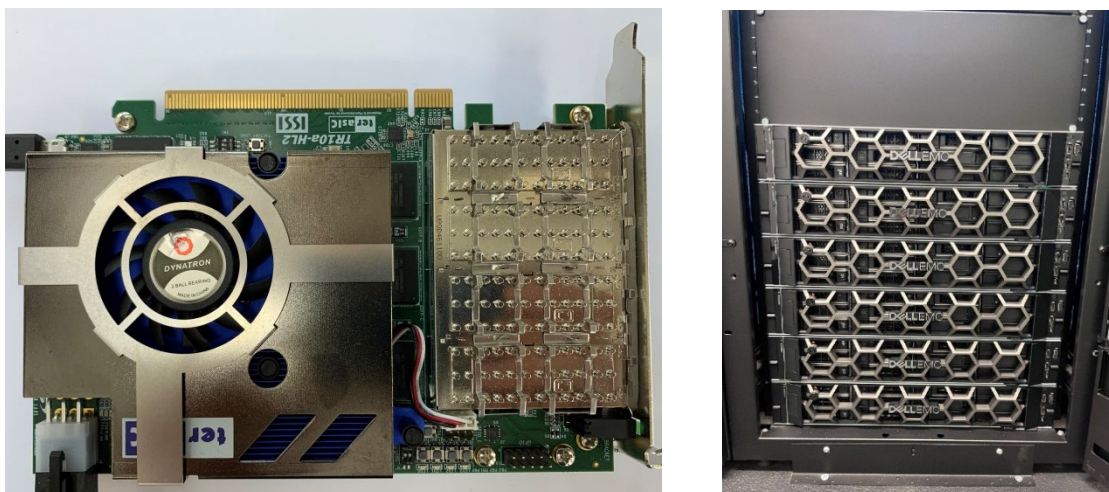


Рис. 3.3.11 Концентратор DCU и накопитель данных LDC (слева) и стойка с серверами LDC в ЦОД MPD (справа).

Концентратор DCU и накопитель данных LDC (Рис. 3.3.11) являются элементами системы сбора данных, расположенными вне магнита MPD. DCU базируется на коммерческих устройствах на базе FPGA со специально разработанным встраиваемым ПО. В качестве накопителей данных LDC выбраны серверные компьютеры DELL R740XD.

Каждый отдельный концентратор DCU принимает данные от 4-х RCU и установлен в отдельный накопитель данных LDC. Система сбора данных полностью оснащена необходимым количеством DCU устройств (6 шт. + 2 резервных), подготовлено встраиваемое ПО с базовым функционалом и выполняются испытания устройства в составе системы сбора данных. Закуплены все необходимые 6 серверов + 1 тестовый образец и установлены в стойку в ЦОД MPD.

3.3.2.6 Испытательные стенды DAQ.

К текущему моменту изготовлены 3 испытательных стенда с системами сбора данных со считывающей камерой (Рис. 3.3.12). Первый стенд находится в корпусе 201 ЛФВЭ и предназначен для проведения испытаний с выключенной считывающей ROC камерой. Второй стенд находится в корпусе 40 ЛФВЭ и предназначен для тестирования системы сбора данных с работающей ROC камерой и серийными (CAEN) источниками низковольтного и высоковольтного питания (в том числе с источниками ионизирующего излучения). Третий стенд находится в НИИ ЯП при БГУ (г. Минск) и предназначен для выявления и устранения проблем при тестировании FES карт с системой сбора данных со штатными радиаторами охлаждения, а также для верификации работы ROC камеры с электроникой считывания в различных условиях (заземление, качество электросети и т.д.).

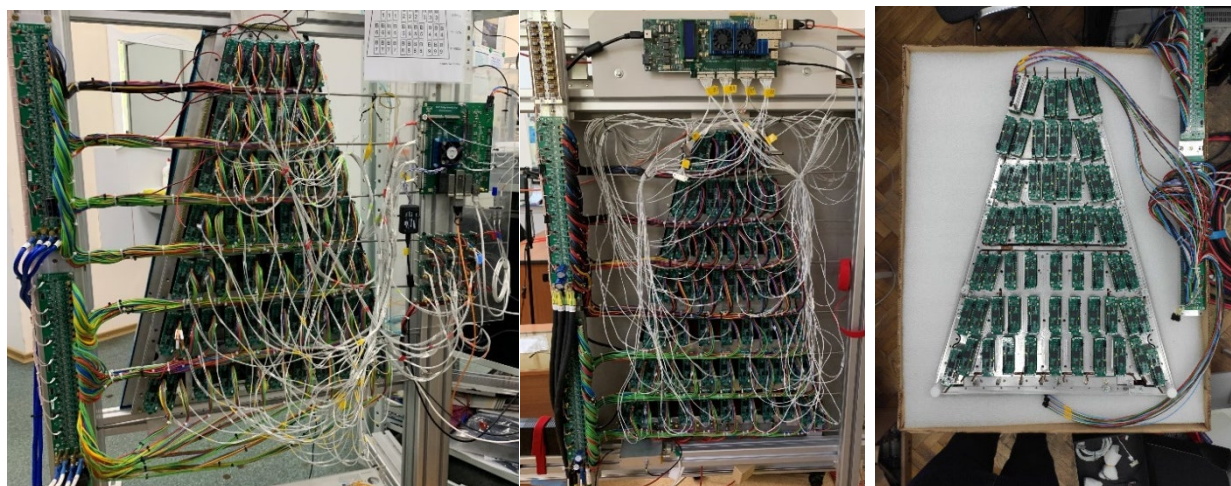


Рис. 3.3.12 Испытательные стенды с системами сбора данных для одной считывающей камеры. Слева - кор. 201 ЛФВЭ; в центре - кор.40 ЛФВЭ, справа – НИИ ЯП БГУ (г. Минск)

На Рис. 3.3.13 представлена визуальная картина RMS шумов для 3968 каналов электроники считывания, подключенных к пэдovým площадкам ROC камеры, для испытательного стенда в кор. 201 ЛФВЭ. Красным цветом обозначены каналы с небольшим превышением шума относительно референсного значения $RMS=1.2ch$ ADC.

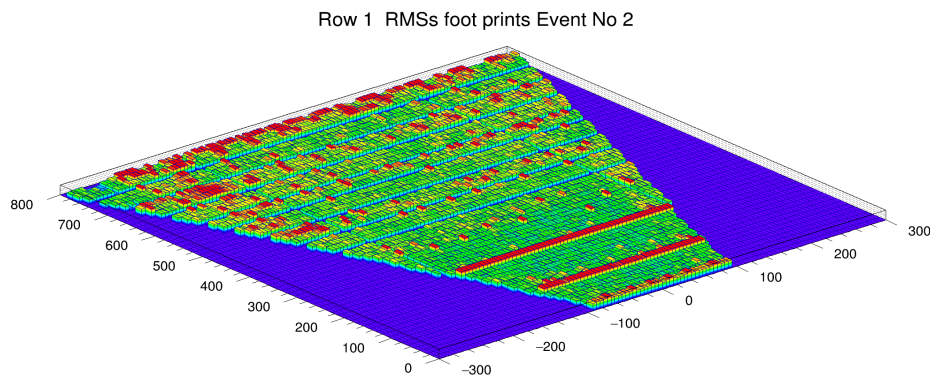


Рис. 3.3.13 RMS шумов для 3968 каналов электроники считывания, подключенных к пэдovým площадкам ROC камеры (стенд в кор. 201 ЛФВЭ). Красным цветом обозначены каналы с небольшим превышением шума относительно референсного значения

3.3.2.7 Система низковольтного (LV) и высоковольтного (HV) питания

Низковольтная и высоковольтная системы питания ТРС разработаны на основе радиационно-стойкого оборудования фирмы CAEN (Рис. 3.3.14). Полный комплект оборудования с запасными модулями имеется в наличии.

3.3.2.7 Система медленного контроля

В состав ТРС входят газовая система, система охлаждения, лазерная система, низковольтная и высоковольтная системы, источник высоковольтного питания для мембраны и другое оборудование. Все эти системы и оборудование имеют собственное управление и мониторинг параметров. Для удобства работы и обслуживания ТРС необходимо иметь общую управляющую систему – ТРС SC. Для создания такой системы выбрана MasterScada 4D на 10 тыс. параметров. На настоящий момент реализован интерфейс управления для системы низковольтного питания (см. Рис. 3.3.15) через OPC UA сервер, разработанный и предоставленный фирмой CAEN. В дальнейшем система ТРС SC будет интегрирована с системами MPD SC и RUN CONTROL.

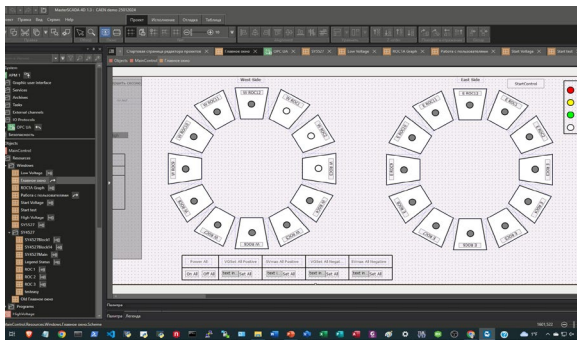


а)



б)

Рис. 3.3.14 Тестовая система LV питания. Mainframe SY5527 фирмы CAEN (а) и 3-х фазный источник питания А3486 AC/DC с 4-мя модулями питания А3100В в крейте EASY3000 (б).

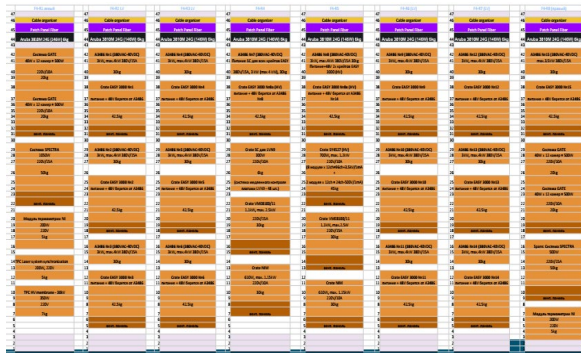


Name	PowerON/OFF	IOSet	Imon	VOSet	Vmon	Status	Temp	Trip	SerNum	RemBdIn
CH000	ON	0.0	0.0	0.0	0.0					
CH001	ON	0.0	0.0	0.0	0.0					
CH002	ON	0.0	0.0	0.0	0.0					
CH003	ON	0.0	0.0	0.0	0.0					
CH004	ON	0.0	0.0	0.0	0.0					
CH005	ON	0.0	0.0	0.0	0.0					
CH006	ON	0.0	0.0	0.0	0.0					
CH007	ON	0.0	0.0	0.0	0.0					
CH008	ON	0.0	0.0	0.0	0.0					
CH009	Main PowerON/OFF									
CH010	Power									

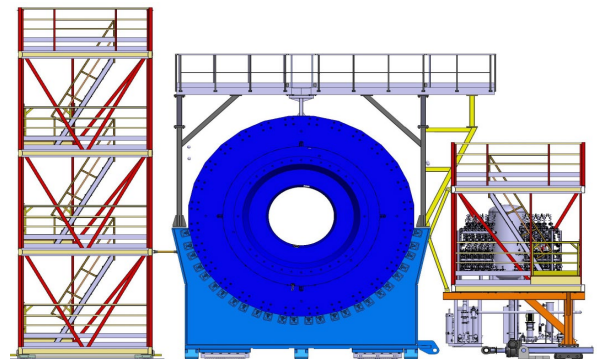
Рис. 3.3.15 Система медленного контроля низковольтного питания электроники TPC

3.3.2.8 Оборудование для TPC и её интеграции в MPD

Продолжаются работы по интеграции оборудования детектора TPC в установку MPD. На 4-м этаже северной «Электронной» платформы расположены 8 стоек для оборудования TPC. Разработана схема заполнения этих 8 стоек (Рис. 3.3.16а). На «Южной» платформе располагаются системы охлаждения для детекторов TPC и ECAL (Рис. 3.3.16б).



а)



б)

Рис. 3.3.16 Заполнение 8 стоек оборудованием для TPC на северной «Электронной» платформе (а) и расположение систем охлаждения для детекторов TPC и ECAL на «Южной» платформе (б).

Для установки ТРС в МРД разработано специализированное загрузочное устройство (Рис. 3.3.17а). Поставка загрузочного устройства и специализированной оснастки в ОИЯИ запланирована на декабрь 2024 года (Рис. 3.3.17б).

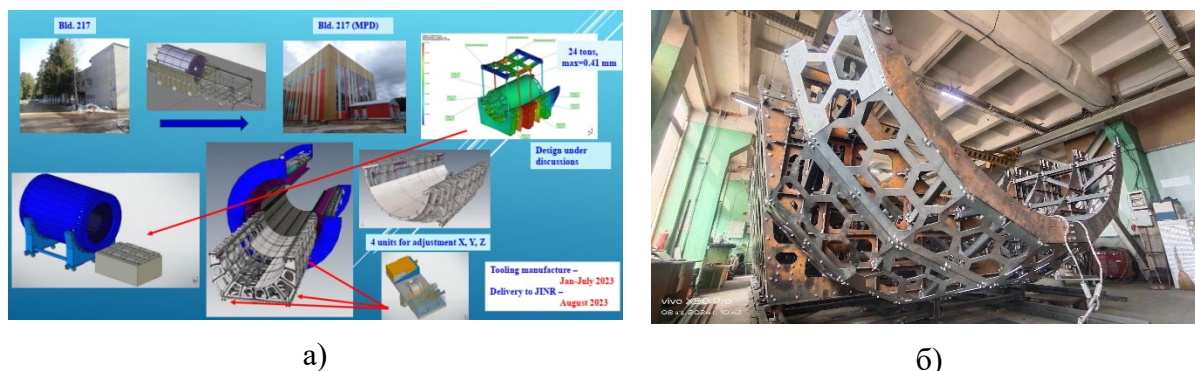


Рис. 3.3.17 Концепция установки ТРС в МРД (а). Загрузочное устройства для установки ТРС в МРД (б).

Ссылки

1. V. Abgaryan et al. (MPD Collaboration). Status and initial physics performance studies of the MPD experiment at NICA. *Eur. Phys. J. A*, V. **58**, 140 (2022). (IF=2.6)
<https://doi.org/10.1140/epja/s10050-022-00750-6>
2. A.Averyanov¹⁾, I.Balashov¹⁾, A.Bazhazhin¹⁾, V.F.Chepurnov¹⁾, V.V. Chepurnov¹⁾, G.Cheremukhina¹⁾, O. Fateev¹⁾, J. Lukstins¹⁾, A. Makarov¹⁾, G. Mescheryakov¹⁾, S.Movchan¹⁾, A.Pilyar¹⁾, D.Potapov¹⁾, A.Ribakov¹⁾, V.Samsonov¹⁾, V.Serdyuk¹⁾, S.Vereschagin¹⁾, S.Zaporozhets¹⁾, V.Zruev¹⁾, J.Fedotova²⁾, Ya.Galkin²⁾, A.Kunts²⁾, A.Litomin²⁾, S.Savitsky²⁾, V.Tchekhovskii²⁾. MPD TPC status // *Physics of Atomic Nuclei*, Vol. 86 (2023), No 5, pp. 796-804, DOI: 10.1134/S106377882305006X. (IF=0.3)
3. S.V.Vereschagin, S.A.Zaporozhets, S.A.Movchan, and D.S.Potapov. Data Acquisition System of the TPC/MPD Detector for the NICA Project // *Physics of Atomic Nuclei*, Vol. 86 (2023), No 5, pp. 805-809, DOI: 10.1134/S1063778823050411. (IF=0.3)
4. Ya.D.Galkin, V.N.Zruev, A.V Kunts, A.V Litomin, A.A.Makarov, G.V Meshcheryakov, S.A.Movchan, A.A.Rybakov, O.V.Fateev and V.A.Chekhovskii. Controlling Temperature Regimes of Electronics of the ROC Chamber of the TPC Detector for the MPD Experiment: Comparison of Experimental and Calculated Results.// *Physics of Particles and Nuclei*, 2023, Vol. 54, No. 6, pp. 1120–1131. (IF=0.6)
5. Y.Ghoniem, A.Pilyar and T.Smolyanin. Slow control for MPD TPC LV and HV systems based on CAEN Equipment // *Physics of Particles and Nuclei Letters*, 2024, Vol. 21, No. 6, pp. 1145–1151. ISSN 1547-4771, © Pleiades Publishing, Ltd., 2024 (IF=0.4)

¹⁾ ОИЯИ; ²⁾ ЯФ БГУ

Конференции

1. Sergey Movchan, TPC MPD Collaboration. TPC Assembling // VI-th Collaboration Meeting of the MPD Experiment at the NICA Facility, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia, 2021.

https://indico.jinr.ru/event/2002/contributions/12063/attachments/9844/15924/61_Movchan_TPC_status_Collab_meeting_v02_20_04_2021.pdf

2. S. Movchan, TPC MPD Collaboration. MPD TPC STATUS // 6th International Conference on Particle Physics and Astrophysics (ICPPA), National Research Nuclear University “MEPhI”. Moscow, Russia, 2022.

https://indico.particle.mephi.ru/event/275/contributions/3141/attachments/1852/3260/76_MPD_TPC_Status_ICPPA-2022_v03_30_11_2022-fin.pdf

3. Bazhazhin A., TPC MPD Collaboration. STATUS OF THE TIME PROJECTION CHAMBER FOR THE MPD/NICA PROJECT // IV International Scientific Forum “NUCLEAR SCIENCE AND TECHNOLOGIES” dedicated to the 65th anniversary of the Institute of Nuclear Physics, , Алматы, Казахстан, 2022.

https://indico.alem.cloud/event/1/attachments/1/100/Abstract_v3.pdf

4. Sergey Movchan, TPC MPD Collaboration. MPD TPC status // IX Collaboration Meeting of the MPD Experiment at the NICA Facility, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia.

https://indico.jinr.ru/event/2933/contributions/15779/attachments/12036/20611/70_Movchan_TPC_status_v03_25_04_2022.pdf

5. Sergey Movchan, TPC MPD Collaboration. MPD TPC status // X Collaboration Meeting of the MPD Experiment at the NICA Facility, JINR, Dubna, Russia, 2022.

https://indico.jinr.ru/event/3251/contributions/17606/attachments/13642/22652/75_Movchan_TPC_status_v05_08_11_2022_eng_mov.pdf

6. Stepan Vereschagin, on behalf of the TPC/MPD group. Time Projection Chamber Assembling // XII Collaboration Meeting of the MPD Experiment at the NICA Facility, JINR, Vinca Institute of Nuclear Sciences, Belgrade, Serbia , 2023.

https://indico.jinr.ru/event/3746/contributions/20806/attachments/16941/28847/XII_MPD_collab_meeting_Vereschagin.pdf

7. Stepan Vereschagin, on behalf of the TPC/MPD group. Data acquisition system of the TPC/MPD detector of the NICA project”. 6th International Conference on Particle Physics and Astrophysics (ICPPA2022), Moscow, Russia, December 2, 2022.

[https://yandex.ru/search/?text=6th+International+Conference+on+Particle+Physics+and+Astrophysics+\(ICPPA2022\)%2C+Moscow%2C+Russia%2C+December+2%2C+2022.&clid=2052601&banerid=6400000000%3A58f49f054bd85c0019c5755a&win=250&lr=215](https://yandex.ru/search/?text=6th+International+Conference+on+Particle+Physics+and+Astrophysics+(ICPPA2022)%2C+Moscow%2C+Russia%2C+December+2%2C+2022.&clid=2052601&banerid=6400000000%3A58f49f054bd85c0019c5755a&win=250&lr=215)

8. Stepan Vereschagin, on behalf of the TPC/MPD group . Time-projection chamber for MPD // IUPAP Conference "Heaviest nuclei and atoms", National Academy of Sciences of the Republic of Armenia, 2023, Republic of Armenia.

<https://indico.jinr.ru/event/3622/>

9. Stepan Vereschagin, on behalf of the TPC/MPD group . Data acquisition system of the TPC/MPD detector for the NICA project.// The 6th Technology and Instrumentation in Particle Physics (TIPP 2023) conference, iThemba LABS, IUPAP, Department of Science and Innovation of South Africa, Cape Town, South Africa, 4-8 September 2023

<https://indico.tlabs.ac.za/event/112/contributions/2773/>

10. A.Bazhazhin. TPC MPD Collaboration. Status of some parts of the TPC for the MPD at the NICA facility // The XV-th International School-Conference "The Actual Problems of Microworld Physics", 2023, Minsk, Belarus.

<https://indico.jinr.ru/event/3604/contributions/22636/>

11. S.Movchan, TPC MPD Collaboration. MPD TPC STATUS // The XV-th International School-Conference "The Actual Problems of Microworld Physics", Joint Institute for Nuclear Research (Dubna, Russia), Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University (Minsk, Belarus), B.Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Belarus), Minsk, Belarus, 2023

https://indico.jinr.ru/event/3604/contributions/22633/attachments/16599/28318/82_MPD_TPCstatus_v06_30_08_2023_K.pdf

12. A.S. Fedotov, I.Zur. The computer-aided design of cooling system for MPD detector of NICA // The XV-th International School-Conference "The Actual Problems of Microworld Physics": Scientific Program (Minsk, Belarus, 27 August – 3 September, 2023). – Minsk, 2023. – P.3.

3.4 Система идентификации (TOF)

3.4.1. Конструкция TOF

The time-of-flight (TOF) system is the basic identification system for charged hadrons of the Времяпролетная система (TOF) является базовой системой идентификации заряженных адронов многоцелевого детектора MPD. В начальной конфигурации TOF будет представлена как цилиндр длиной около 6 метров и диаметром 3 метра, собранный из 28 модулей (Рис. 1). Каждый модуль содержит 10 субдетекторов МРПК (Рис. 2). Система детектора TOF организована по модульному принципу, чтобы минимизировать количество компонентов и стоимость. Помимо самих модулей TOF, система включает в себя следующие сервисные подсистемы: источники питания низкого и высокого напряжения, газовая система, электроника сбора данных, охлаждение и медленный контроль.

Каждый модуль TOF состоит из 10 идентичных многозачерных резистивных плоскопараллельных камер (МРПК) с 24 каналами считывания каждый. Разработка и тестирование прототипов МРПК проводились в период с 2013 по 2017 год. За это время тестировались несколько различных версий МРПК с использованием космических лучей и пучка дейтронов Нуклотрона. Окончательный вариант МРПК изготовлен из коммерческого термополированного стекла толщиной 280 мкм. Он имеет 15 газовых промежутков шириной 200 мкм и обеспечивает временное разрешение 50 пс.

Моделирование в MPDRoot показало высокую эффективность идентификации (Рис. 2) при использовании такой конструкции детекторов МРПК и конфигурации TOF.

Массовое производство детекторов и модулей TOF началось в 2019 году. Производство 300 МРПК и 28 модулей TOF было завершено в 2023 году. Все модули TOF проходили долгосрочное тестирование на космическом излучении. В настоящее время готовые к установке модули TOF хранятся в специальных стеллажах (Рис. 3).

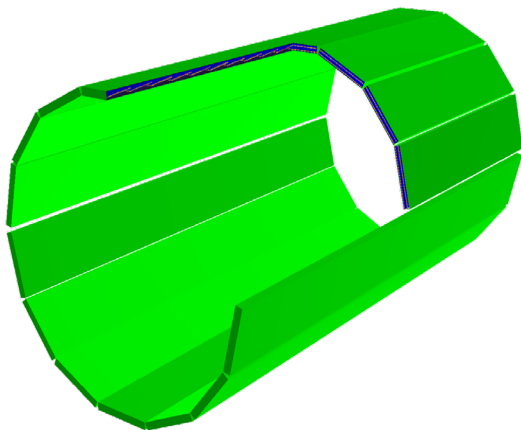


Рис. 1. Геометрия TOF в MPDRoot.

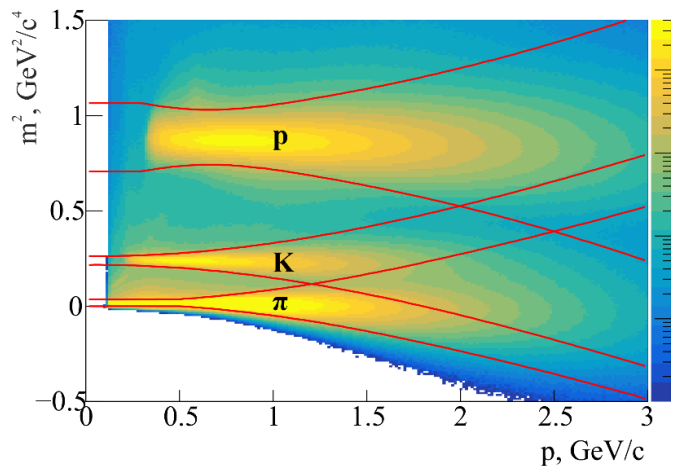


Рис. 2. Идентификация в TOF по m^2 .



Рис. 3. Собранные и протестированные модули TOF на хранении в стеллажах

3.4.2. Электроника считывания и система сбора данных

Для TOF MPD был разработан 24-канальный предусилитель-дискриминатор PA2402V4 на основе чипа NINO (Рис. 4). Эта плата предусилителя специально адаптирована для двухстороннего считывания сигналов с полосковых электродов МРПК в эксперименте MPD. Отличительными особенностями платы предусилителя MPD TOF являются: стабилизированное напряжение питания NINO; входной импеданс, согласованный с импедансом электродов детектора и кабелей; конденсаторы на входах для двустороннего считывания сигналов со стрипов МРПК; дистанционное мониторингирование и управление порогом дискриминации и питанием усилителя, а также наличие датчиков для измерения температуры платы усилителя и газового объема под ним. Производство и тестирование всех 560 шт. предусилителей было завершено в конце 2019 года.

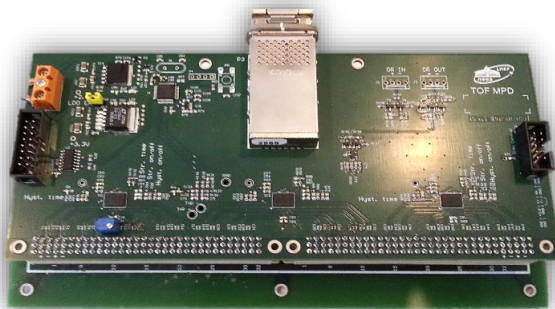


Рис. 4. 24-канальный предусилитель PA2402V4 на базе чипа NINO.



Рис. 5. 72-канальный время-цифровой преобразователь TDC72VXS на базе NPTDC.

Время-цифровой преобразователь TDC72VXS (Рис.4) на основе чипа NPTDC был разработан для считывания с систем MPD TOF и FFD. Он используется для оцифровки LVDS сигналов, поступающих с выхода усилителя NINO с использованием кабелей Molex P/N11102512xx с разъемами Molex 76105-0585. Время дискретизации TDC72VXS составляет 24 пс. Измеренное временное разрешение ВЦП после учета нелинейностей, в

среднем, составляет около 20 пс. Модуль ВЦП обеспечивает возможность точной временной синхронизации с другими устройствами использованием технологии “White Rabbit”. Общее количество ВЦП необходимое для MPD TOF составляет 196 (14 модулей на каждый из 14 крейтов WIENER VME-VXS).

Все крейты VXS были куплены и доставлены в ОИЯИ в 2017 – 2019 годах. Модули TDC72VXS также произведены в полном объеме с запасом в 2020 году. Тестирование и калибровка считывающей электроники было завершено в 2022 году.

3.4.3. Система газоснабжения с рециркуляцией

Детекторы TOF будут работать с негорючей газовой смесью, содержащей 90% $C_2H_2F_4$ + 5% $i-C_4H_{10}$ + 5% SF_6 . Общий объем газа в барреле TOF составляет примерно 3000 литров с учетом объема, занимаемого детекторами. В связи с таким большим объемом газа было принято решение использовать замкнутую систему газоснабжения с рециркуляцией и очисткой газовой смеси.

В 2024 году закупка оборудования для газовой системы завершена. Ведутся монтажные работы. Собраны стойки (шкафы) управления, смесителя, блока рециркуляции, анализатора и очистителя газовой смеси. Также готовы к монтажу на 3 этаж электронной платформы MPD стойки системы газораспределения смеси в модули TOF. Все основные элементы газовой системы TOF вместе с баллонами будут размещены в западной половине зала MPD (Рис. 6). Стойки системы газоснабжения в зале и на платформе будут связаны магистралями из стальной трубы, проложенной вдоль стен, а также гибким металлорукавом из нержавеющей стали, необходимым для перемещения детектора MPD из сервисного в рабочее положение. Монтаж газовой системы планируется завершить в начале 2025 года. В первой половине 2025 года будет произведена настройка и отладка автоматической системы управления газоснабжением. До июля 2025 года планируется протестировать и ввести систему в эксплуатацию.

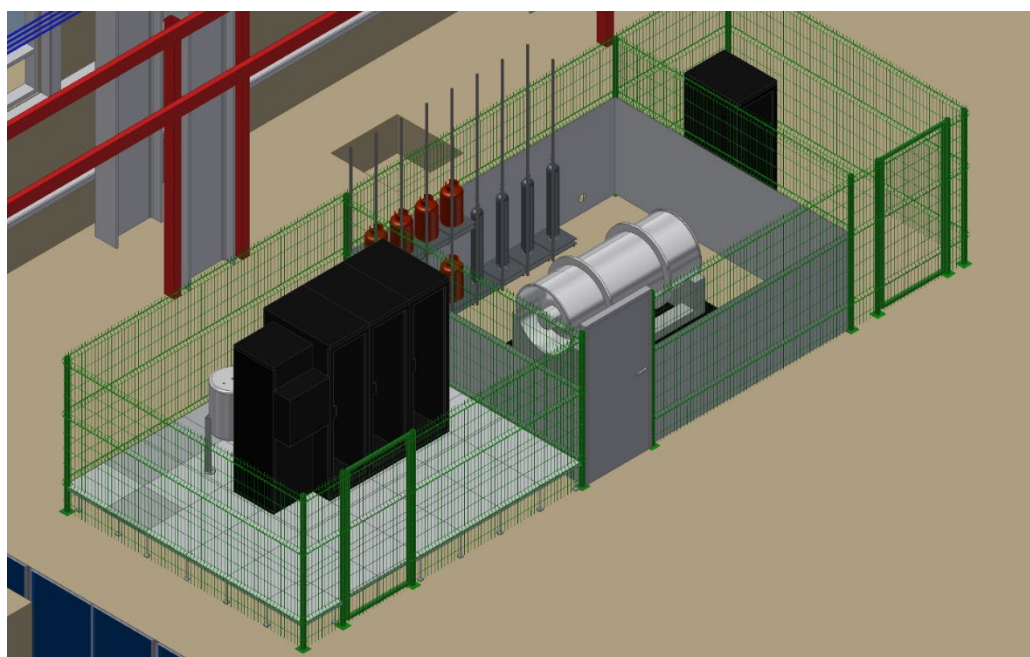


Рис. 6. Модель расположения оборудования газовой системы в зале MPD.

3.4.4. Высоковольтная и низковольтная системы питания

Для подачи высоковольтного питания на детекторы в модулях TOF используются высоковольтные источники производства компании iSeg (Германия) в стандарте WIENER MPod. Вся система высоковольтного питания TOF состоит из 28 4-канальных источников питания iSeg EHS4080p(n) (до 8 кВ/1 мА), размещенных в четырех крейтах MPod. Все высоковольтные модули iSeg и крейтами MPod закуплены в 2017-2019 годах. Кабели и разъемы, необходимые для подачи высокого напряжения, закуплены в 2020 году. Распределение высокого напряжения на детекторы осуществляется при помощи специального распределительного устройства HVDCM. К 2023 году все распределители были изготовлены и протестированы.

Для питания 560 предусилителей системы TOF достаточно 14 источников низковольтного питания WIENER MPV8016I в стандарте MPod. Каждый модуль низкого напряжения MPV8016I имеет по 8 каналов питания с максимальной мощностью 50 Вт на канал при напряжении питания от 0 до 15 В. Модули низковольтного питания и кабели для подачи напряжения на модули TOF были приобретены и поставлены в ЛФВЭ в 2017 - 2020 годах в полном объеме.

Крейты с модулями высоковольтного и низковольтного питания планируется установить на 3 этаже электронной платформы в первой половине 2025 года.

3.4.5. Интеграция модулей TOF в MPD

Установка модулей TOF начнется после завершения установки электромагнитного калориметра ECal. Каждый модуль TOF будет устанавливаться на свое место с обеих сторон ярма магнита по одному. Установка будет осуществляться при помощи мобильной опорной конструкции (Рис. 7). Конструкция снабжена направляющими рельсами такого же типа, что и внутри силового каркаса MPD. Для того, чтобы установить модуль в MPD, достаточно закрепить опорную конструкцию на подъемной платформе перед необходимым сектором и соединить рельсы вместе так, чтобы образовалась единая линия скольжения, которая позволит задвинуть модуль в нужное положение.

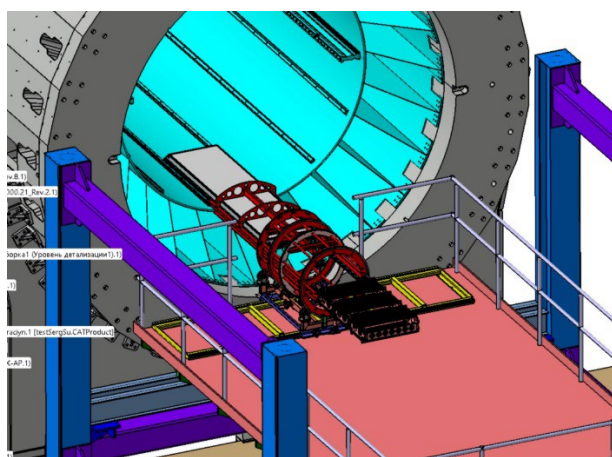


Рис. 7. Интеграционное оборудование TOF Рис. 8. Проверка оборудования интеграции

Все интеграционное оборудование TOF было разработано и произведено с 2020 по 2023 год. В 2023 году на силовой каркас были установлены направляющие рельсы. В 2024 году процедура установки модуля на рельсы в силовом каркасе была отработана на полностью собранном модуле TOF (Рис. 8).

Окончательную установку модулей TOF на силовой каркас MPD планируется завершить во второй половине 2025 года. После этого будет производиться прокладка кабелей питания, считывания и медленного контроля, а также шлангов газоснабжения и охлаждения.

3.4.6. Система медленного контроля

Система медленного контроля и мониторинга необходима для управления и наблюдения за параметрами сервисных подсистем TOF MPD, таких как газовая система, высоковольтная и низковольтная системы, камерная электроника и т.д. В настоящее время большая часть системы управления разработана, активно используется при тестировании и продолжает совершенствоваться. В 2025 году планируется закончить создание системы медленного контроля TOF и интегрировать ее с глобальную систему детекторную систему контроля (DCS).

3.4.7. Система охлаждения

Охлаждение камерной считывающей электроники необходимо для удовлетворения температурных требований центральной области MPD (поверхность детектора должна иметь температуру не выше 25°C). Камерная электроника всех модулей TOF выделяет до 1 кВт тепловой мощности. То есть, 18 Вт на квадратный метр поверхности модулей TOF. В таком случае наиболее оптимальным способом охлаждения для отвода тепла от модулей TOF является использование воздушной системы охлаждения. Этот вариант более приемлем, чем водяное охлаждение, из-за его низкой стоимости, меньшей вероятности повреждения электроники и отсутствия лишнего вещества в модулях, влияющего на характеристики частиц. Однако этот метод не позволяет контролировать процесс термостабилизации.

Проектирование системы воздушного охлаждения TOF проводилось в 2024. В соответствии с проектом в 2025 году будет закуплено и смонтировано на MPD оборудование системы охлаждения.

Статьи за 2021-2024 г.

1. *Статус времяпролетной системы TOF эксперимента MPD на коллайдере NICA.* В.М. Барышников, В.А. Бабкин, С.Г. Бузин, А.С. Бурдыко, М.Г. Буряков, В.М. Головатюк, А.В. Дмитриев, П.О. Дулов, М.М. Румянцев, С. Ромахов, Т. Смолянин, А.А. Федюнин, С.П. Лобастов и др., Ученые записки физического факультета Московского университета, 3, 2330204, 2023.
2. *Status of the Time-of-Flight System of the MPD Experiment at the NICA Collider.* V. Baryshnikov, V. Babkin, S. Buzin, A. Burdyko, M. Buryakov, V. Golovatyuk, A. Dmitriev, P. Dulov, M. Rumyantsev, S. Romakhov, T. Smolyanin, V. Dronik, E. Kidanova, A. Pyatigor, K и др., *Physics of atomic nuclei*, 86, 5, p. 788 - 795, 2023.

3. *Bayesian Approach to Particles Identification in the MPD Experiment*. V.A. Babkin, V.M. Baryshnikov, M.G. Buryakov, S.G. Buzin, A.V. Dmitriev, V.I. Dronik, P.O. Dulov, A.A. Fedyunin, V.M. Golovatyuk, E.Yu. Kidanova, S.P. Lobastov, A.D. Pyatigor, M.M. Rump., Journal of instrumentation, 19, P08007, 2024.

Выступления на конференциях за 2021-2024 г.

1. V. Baryshnikov, *Software method of determination of the event collision time with the TOF detector of the MPD at NICA*, IV International Scientific Forum “NUCLEAR SCIENCE AND TECHNOLOGIES”, Almaty, Kazakhstan, 26.09.2022.
2. V. Baryshnikov, *Status of the Time-of-Flight and ECal Particle Identification Systems of the MPD Experiment at the NICA Collider*, 21st Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics, Moscow State University, Moscow, Russia, 27.08.2023.
3. V. Babkin, *Overview of MRPC based ToF systems developed in JINR*, The 2023 International Workshop on the High Energy Circular Electron Positron Collider, Nanjing University, Nanjing, China, 24.10.2023.
4. Бабкин В.А., *Наука и технологии на ускорительном комплексе NICA*, Всероссийская научная конференция студентов-физиков (ВНКСФ-28), СО РАН, Россия, Новосибирск, 01.04.2024.
5. V. Babkin, *Status and Prospects of the MPD Time-of-Flight Identification System at NICA*, The 2nd China-Russia Joint Workshop on NICA Facility, Shandong University, Tsinghua University, Qingdao, Beijing, China, 13.09.2024.

Защищенные диссертации.

Бабкин В.А. *Времяпролетная система идентификации частиц Многоцелевого детектора (MPD)*. 01.04.01: приборы и методы экспериментальной физики, физико-математические, 20.4.2021.

3.5. Быстрый передний детектор (FFD)

FFD предназначен для быстрого обнаружения событий столкновения ядра с ядром в центре установки MPD, определения положения точки взаимодействия, генерации необходимых триггерных сигналов для эксперимента MPD и импульса T0 для TOF-детектора.

Детектор FFD состоит из двух идентичных субдетекторов FFD_E и FFD_W, расположенных вдоль оси пучка на расстоянии 140 см от центра установки MPD, как показано на рис. 1. Каждый из них имеет модульную структуру и содержит 20 черенковских модулей и 80 независимых каналов считывания.

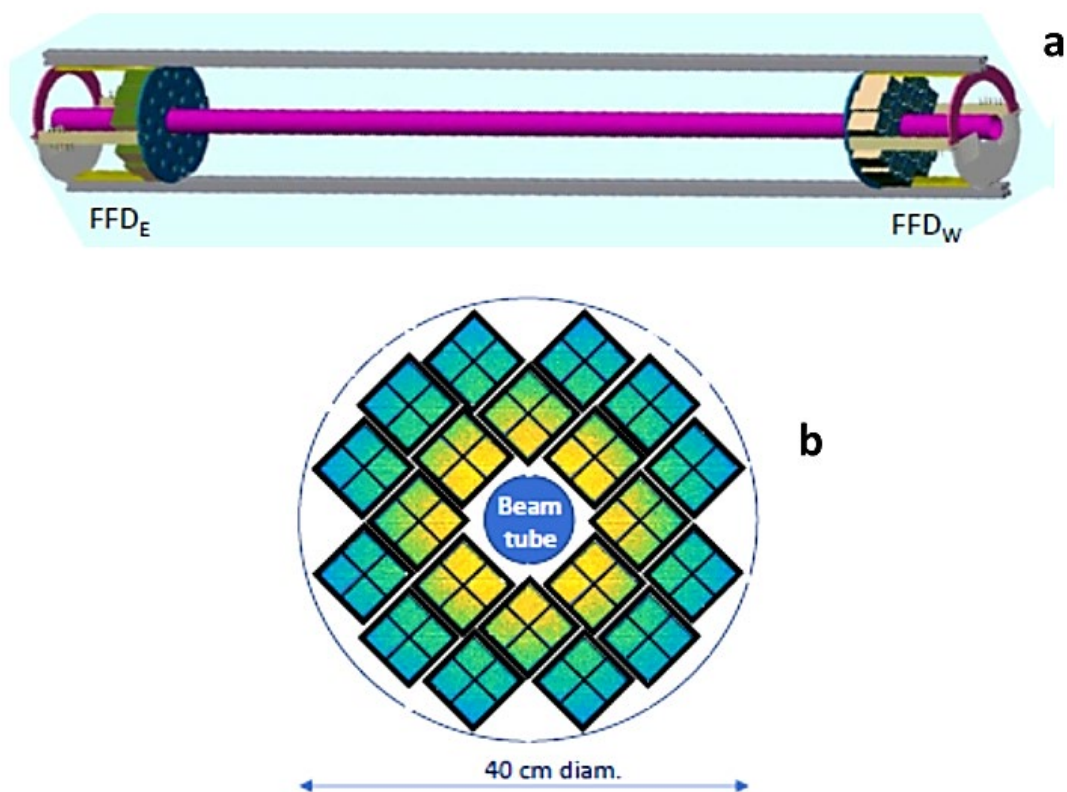


Рис. 1. Вид детектора FFD (а) и модульной сборки одного субдетектора (б).

В дополнение к субдетекторам, FFD включает в себя другие подсистемы, которые обеспечивают его работу, обработку сигналов для достижения целей FFD, калибровку и управление. Этими подсистемами, показанными на рис. 2, являются: электроника для приема и разветвления импульсов LVDS модулей детектора, которая также включает в себя низковольтный источник питания для интерфейсной электроники модулей (Fanout + LV); электроника для обработки импульсов LVDS и генерации сигналов для запуска MPD (FFD триггерный блок); высоковольтная система питания фотоумножителей детекторных модулей (высоковольтный блок); система контроля аналоговых импульсов детектора (мультиплексоры + диджитайзеры CAEN); система лазерной калибровки на основе пикосекундного лазера (лазерный и реф.детектор + лазерные патч-боксы); система охлаждения и контроля температуры модулей детектора; система управления подсистемами детектора и взаимодействия с система управления MPD (Detector Control System - DSC) и кабельная система.

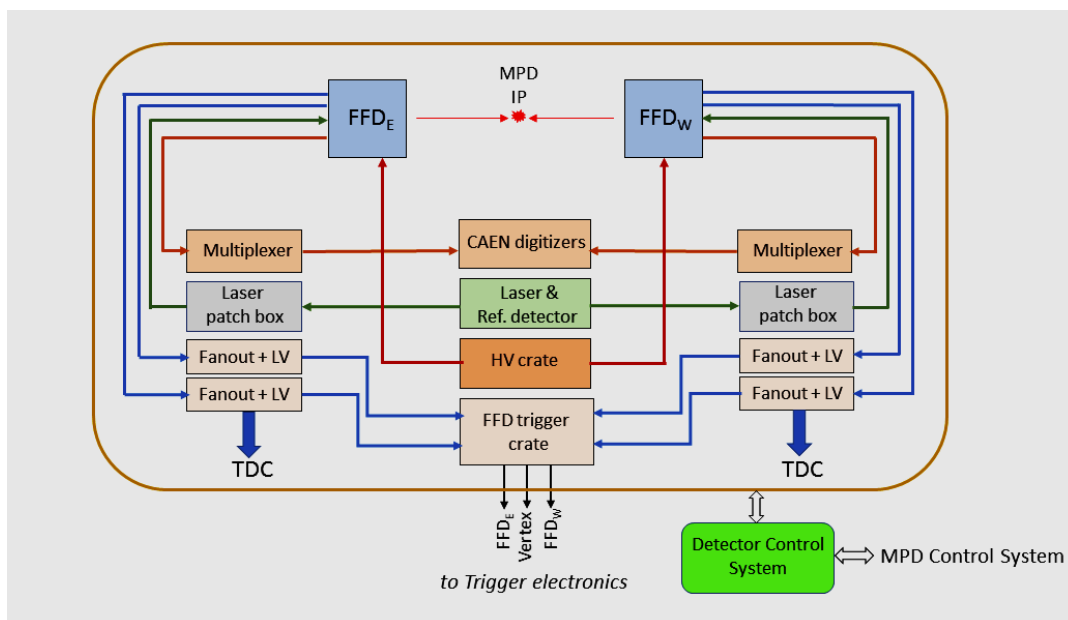


Рис. 2. Схема подсистем FFD.

Ниже описаны результаты реализации проекта «Детектор FFD» за прошедший период.

Субдетекторы FFD_E и FFD_W , созданы в полном объеме (20 + 20 модулей). Каждый модуль включает в себя 4 кварцевых радиатора, фотоумножитель XR85012/A1 на базе двух микроканальных пластин, интерфейсную электронную плату, свинцовый конвертер гамма-излучения перед излучателями, высоковольтный делитель напряжения и корпус. Фотография модуля показана на рис. 3 слева. Механическая конструкция субдетекторов показана на рис. 3 справа.

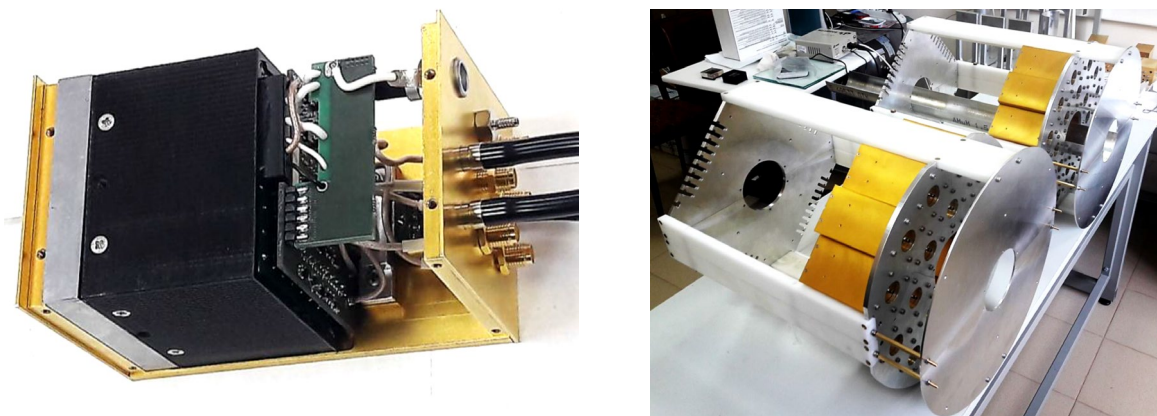


Рис.3. Модуль детектора FFD (слева) и модульные сборки субдетекторов FFD_E и FFD_W (справа).

Субдетекторы FFD_E и FFD_W готовы к окончательному лабораторному тестированию.

Электроника для приема/разветвления импульсов LVDS и низковольтного источника питания интерфейсной электроники состоит из 4 электронных модулей для каждого субдетектора, размещенных в мини-крейте. Низковольтное питание

контролируется системой DCS. Модули и крейты были разработаны и изготовлены в ЛФВЭ ОИЯИ, а их создание и испытания были завершены в 2024 году.

Электроника для обработки импульсов LVDS и генерации триггерных сигналов была разработана, изготовлена и протестирована в ЛФВЭ ОИЯИ. Она имеет модульную структуру и состоит из 4+4 модулей, размещенных в крейте VME. В 2024 году было завершено создание этих модулей и крейта. В 2025 году планируется изготовление последнего модуля этой подсистемы, отвечающего за генерацию вершинного сигнала для триггера MPD. Электронные модули используют технологию FPGA с управлением от системы DCS.

Высоковольтная система питания детектора FD состоит из крейта Wiener MPod и трех 16-канальных модулей производства /ISeg (Германия). Все выходы модуля имеют независимое плавающее заземление и регулируемое напряжение до -3 кВ. Высоковольтная система управляется через систему постоянного тока с помощью пользовательского интерфейса и прошла необходимые испытания. В настоящее время она используется в лаборатории для тестовых измерений с помощью модулей FFD.

Система управления аналоговыми сигналами с детекторов предназначена для установки оптимального режима работы детектора и выполнения оперативного контроля и анализа формы импульсов, генерируемых модулями FFD. Электроника мультиплексоров субдетекторов позволяет в 4 раза сократить количество выходных импульсов за счет управляемого переключения входных каналов. Модули этой электроники разрабатывались, изготавливались и тестировались в течение последних 5 лет. Измерение формы импульса выполняется с помощью цифровых модулей N6742 фирмы CAEN, приобретенных в прошлом году вместе с системой передачи данных на компьютер. Теперь эта подсистема полностью готова к окончательному тестированию.

Лазерная система калибровки была изготовлена в предыдущий период реализации проекта FFD на базе пикосекундного лазера PiLas с длительностью импульса 30 пс и длиной волны 405 нм (производитель Advanced Laser Diode Systems, Германия). Система включает в себя: модуль управления лазером PiLas, лазерный излучатель с оптической системой для равномерного освещения, 130 кварцевых волокон WF100/140/300N, NA 0,22 (производитель CeramOptec Co.). Световые импульсы передаются на передние концы модулей детектора FFD и эталонного детектора. В 2024 году был разработан интерфейс управления лазерной системой как часть системы DCS.

Система охлаждения и контроля температуры детекторных модулей была разработана для минимизации и контроля тепловыделения внутри детекторных модулей FFD. Это достигается путем продувки модулей сжатым охлажденным воздухом или азотом со скоростью потока 100 л/мин на один субдетектор, что обеспечивает отвод половины вырабатываемой тепловой энергии. В то же время оставшаяся тепловая мощность субдетектора составляет всего 10 Вт. Предполагается, что рабочая температура внутри модулей не будет превышать 25°C. Все компоненты локальной системы охлаждения FFD доступны, и система была успешно протестирована в лаборатории. Для измерения температуры внутри и снаружи модулей используются термодатчики. Считываемая с них информация используется для автоматической регулировки расхода воздуха и одновременно выводится на монитор для оперативного управления.

Система управления детекторами DCS построена с использованием клиент-серверной архитектуры и включает в себя управление и мониторинг всех подсистем FFD. При этом используется несколько уровней контроля состояния подсистем, обеспечивающих своевременное принятие решений в случае существенного отклонения режима работы от установленного, включая аварийное отключение. В настоящее время разработанная система проходит отладку при тестовых измерениях в лабораторных условиях.

Кабельная система включает в себя наборы всех типов кабелей, используемых в подсистемах FFD: кабели HDMI и Molex для передачи импульсов LVDS, коаксиальные кабели для передачи аналоговых импульсов, оптические кабели для лазерной системы, высоковольтные кабели для питания ФЭУ, кабели питания, кабели управления DCS. Все кабели изготавливаются, тестируются и используются в ходе полномасштабных испытаний FFD в лаборатории.

Считывающая электроника, используемая для чтения LVDS-импульсов из FD, состоит из двух модулей TDC72VXS для каждого субдетектора и расположено в крейтах VME системы считывания TOF.

В нашей лаборатории проводятся длительные испытания субдетекторов FFD и всех подсистем с использованием космических мюонов и лазера. В предыдущие годы для этой цели был разработан и изготовлен специальный стенд с четырьмя слоями сцинтилляционных детекторов для генерации триггера событий, вызванных космическими мюонами. Мы планируем начать тестовые измерения в декабре 2024 года, и они будут продолжаться в течение первой половины 2025 года. Основная цель исследования - обеспечить стабильную работу подсистем FFD с требуемыми параметрами под контролем DCS.

Во второй половине 2025 года FFD будет готов к установке в MPD.

Готовность FFD к декабрю 2024 года:

- Подсистемы FFDE и FFDW – 100%
- Система высокого и низковольтного напряжения – 100%
- Электроника – 95% (модуль Vertex в производстве, требуется финальное тестирование)
- Лазерная система – 100%
- Система охлаждения – 100%
- Система управления детекторами – 95% (требуется окончательная проверка)
- Кабельная система – 95% (требуется специальные кабели и коммутационные панели)

Полная готовность запланирована на сентябрь 2025 года.

Публикации

V. I. Yurevich, S. A. Sedykh, S. V. Sergeev, D. N. Bogoslovski, V. Yu. Rogov, V. V. Tikhomirov and N. A. Lashmanov, *Development of scintillation detectors with SiPM readout for the NICA project*, Applications of Nuclear Techniques (CRETE19), International Journal of Modern Physics: Conference Series Vol. 50 (2020) 2060008.

Доклады на конференциях

V. I. Yurevich, S. A. Sedykh, S. V. Sergeev, V. Yu. Rogov, V. V. Tikhomirov, N. A. Lashmanov, A. A. Timoshenko, N. A. Kozlenko, Fast Interaction Trigger for MPD Experiment at NICA (Poster), The International Conference "Instrumentation for Colliding Beam Physics" (INSTR-20), Novosibirsk, Budker Institute of Nuclear Physics, 24-28 February 2020.

3.6 Передний адронный калориметр (FHCaI)

Передний адронный калориметр (FHCaI) является одним из базовых детекторов экспериментальной установки MPD и предназначен для измерений геометрии ядроядерных столкновений (центральности и плоскости реакции), а также для организации триггера событий со всеми центральностями столкновений. Калориметр создан в рамках сотрудничества между ОИЯИ и ИЯИ РАН (Москва).

FHCaI состоит из двух идентичных плеч, расположенных с противоположных сторон от точки столкновения ядер. Модульная структура одного плеча калориметра, схема и фото модуля калориметра представлены на рис.1.

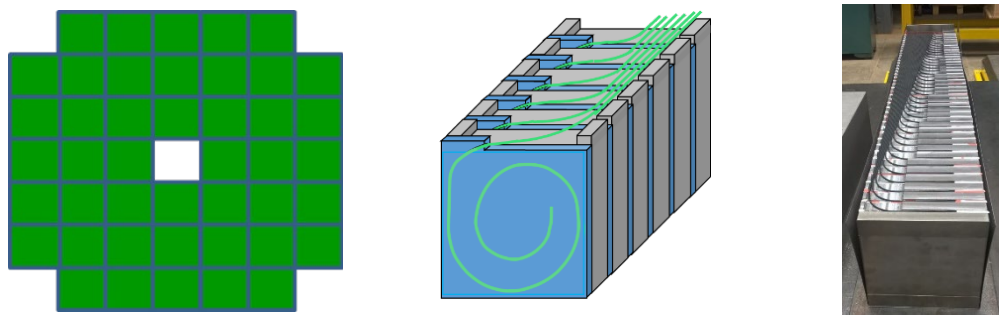


Рис.1. Слева – модульная структура FHCaI. В центре – схема одного индивидуального модуля FHCaI. Справа- фото одного собранного модуля калориметра.

3.6.1. Структура FHCaI калориметра

Каждое плечо адронного калориметра состоит из 44 отдельных модулей с поперечными размерами $15 \times 15 \text{ см}^2$. Центральное отверстие имеет такой же размер для обеспечения позиционирования пучковой трубы. Каждый модуль состоит из 42 свинец-сцинтиллятор сэндвичей, пластин с толщиной свинцовых пластин и сцинтилляционных пластин 16 и 4 мм, соответственно. Полученное соотношение толщин 4:1 удовлетворяет условию компенсации и обеспечивает оптимальное энергетическое разрешение. Согласно моделированию, флуктуации адронного ливня обеспечивают энергетическое разрешение калориметра следующим образом: $\sigma E/E \sim \sqrt{55\%/E}$ (ГэВ). Тесты такого калориметра на пучке протонов подтверждают результаты моделирования.

Свет сцинтиллятора считывается WLS-волокнами, встроенными в спиральные канавки пластины, что обеспечивает высокую эффективность и равномерность сбора света по объему сцинтиллятора в пределах нескольких процентов. Для сборки FHCaI использовались WLS-волокна Y-11(200) с двойной оболочкой и диаметром 1 мм. Один конец WLS-волокна внутри канавки сцинтиллятора покрашен зеркальной серебряной краской, что улучшает сбор света примерно на 30%. WLS-волокна от каждой из 6 последовательных сцинтилляционных пластин собираются вместе в оптический разъем на торце модуля и полируются для улучшения оптического контакта с фотодетектором. Такая схема считывания света обеспечивает продольную сегментацию модуля на 7 секций, что компенсирует неравномерность сбора света вдоль модуля, вызванную разной длиной WLS-волокон. Как следствие, в модуле используется 7 оптических разъемов. Такое же количество фотодетекторов расположено на задней стороне каждого модуля.

Все 42 слоя свинца/сцинтиллятора модуля FHCa1 загружаются в коробку из листа нержавеющей стали толщиной 0,5 мм и стягиваются в один блок длиной около 90 см (4 длины ядерных взаимодействий) с помощью ленты из нержавеющей стали толщиной 0,5 мм. После сборки модуль накрывается другим таким же коробом из нержавеющей стали, а затем эти два короба скрепляются точечной сваркой, обеспечивая механическую устойчивость конструкции. Вес каждого модуля составляет около 200 кг.

3.6.2. Считывание сигналов с калориметра FHCa1

Как уже упоминалось выше, 7 оптических разъемов на задней стороне каждого модуля просматриваются компактными фотодетекторами. Для FHCa1 требуется особый тип фотоприемников с высоким внутренним усилением, устойчивостью к магнитным полям и отсутствием ядерного взаимодействия. Кремниевые фотоумножители, SiPMs, являются оптимальным выбором для этого случая. Для обеспечения высокого динамического диапазона регистрируемых энергий были выбраны Hamamatsu MPPC S14160-3010PS с размером пикселя $10 \times 10 \text{ mm}^2$. Плата с 7 SiPM показана на рис.2, слева. Аналоговая электроника включает в себя усилитель и формирователь с дифференциальными выходными сигналами, который увеличивает длину сигнала до 0.2 ns. Этот относительно длинный сигнал оцифровывается со скоростью 62,5 Ms/c 64-канальной платой ADC64 производства дубненской компании AFI Electronics, рис.2, справа.

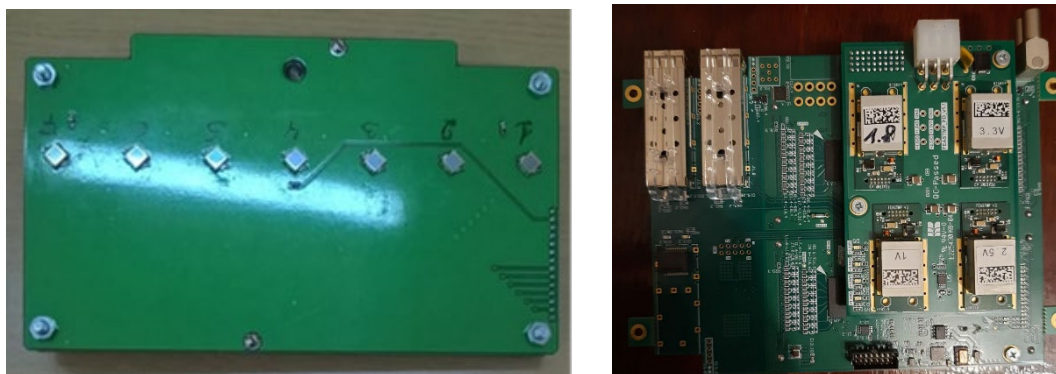


Рис.2. Фотография считывающих компонентов FHCa1. Слева - плата с SiPM. Справа - аналогово-цифровой преобразователь ADC64.

Полная схема считывания для одного плеча FHCa1 представлена на рис.3. Основными компонентами системы считывания являются: аналоговая электроника (FEE), расположенная на задних сторонах модулей; 5 блоков АЦП, расположенных на боковых сторонах несущей рамы FHCa1; источники питания и система сбора информации (DAQ), установленные на электронной платформе. Несколько типов кабелей, включая коаксиальные и оптические, длиной около 20 м, передают сигналы от АЦП к DAQ и триггерным модулям на электронной платформе.

Полюса магнита с установленными плечами FHCa1 должны перемещаться за пределы сверхпроводящего соленоида, чтобы обеспечить доступ к внутреннему объему магнита для сборки и обслуживания отдельных детекторов, особенно на начальном этапе интеграции MPD. Поэтому необходимо иметь возможность отсоединять кабели от системы

схема информации FHCaI. Для этого на несущей раме FHCaI будет установлена патч-панель, соединяющая кабели от электронной платформы и кабели от АЦП.

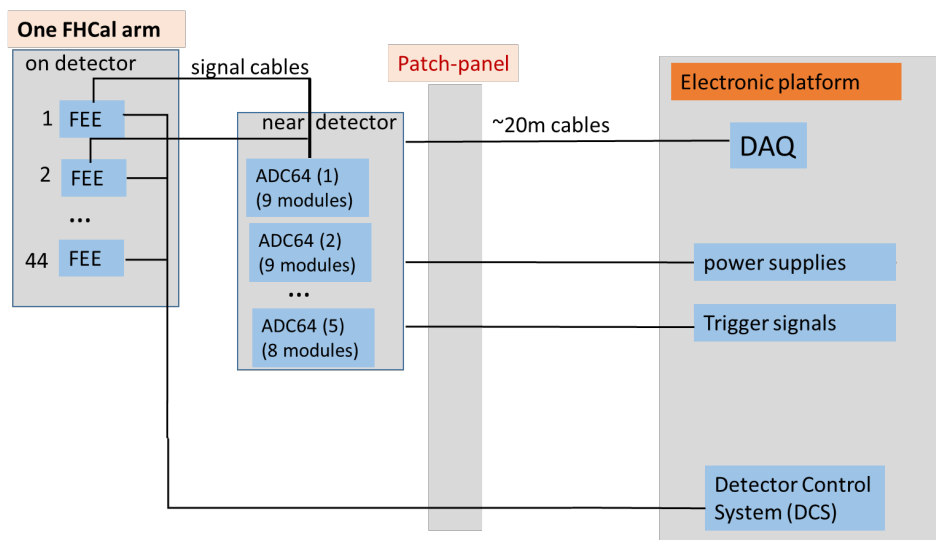


Рис.3. Схема считывания для одного плеча FHCaI.

3.6.3. Система управления параметрами FHCaI (DCS)

Система управления FHCaI (Detector Control System, DCS) должна обеспечивать быстрый и стабильный доступ ко всем параметрам плат с аналоговой электроникой. Эти платы включают в себя точные источники питания высокого напряжения и калибровочный светодиодный генератор, управляемые двумя микроконтроллерами с общей последовательной шиной RS-485. Микроконтроллер HV контролирует несколько параметров: состояние, установленное и измеренное напряжение канала, установленное или измеренное общее базовое напряжение, время нарастания HV, состояние HV и температуру SiPMs. Контроллер светодиодов обеспечивает статус, частоту и амплитуду импульсов светодиодов.

Электронные платы соединены общей шиной RS-485 с блоком управления (CBU). Поскольку каждый модуль имеет два приемопередатчика, к CBU можно подключить до 64 электронных плат (модулей FHCaI). При установке FHCaI используются два CBU. CBU имеют возможность подключаться к локальной сети и управляться напрямую с однокомпьютера DCS. Схема подключения к DCS показана на рис.4.

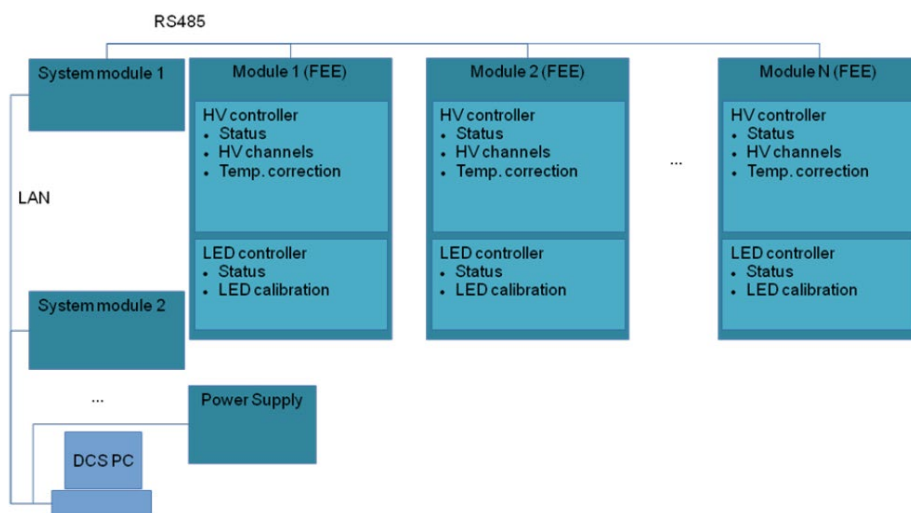


Рис.4. Схема подключения к системе контроля FHCAL.

Функции DCS также включают коррекцию температуры в режиме онлайн, регистрацию параметров в базе данных и должны обеспечивать быстрое соединение с несколькими устройствами. Все части детектора имеют возможность чтения или записи регистров контроллера, доступных на шине. Регистры могут быть описаны в конфигурационных файлах.

3.6.4. Энергетическая калибровка FHCAL

Адронные ливни от свободных спектаторов выделяют видимую энергию в диапазоне от нескольких МэВ до сотен МэВ в сцинтилляторах продольных секций FHCAL. Поэтому необходима энергетическая калибровка калориметра в этом диапазоне энергий. Положение FHCAL в установке MPD фиксировано и не позволяет сканировать пучком модули калориметра. Поэтому единственным вариантом энергетической калибровки является использование космических мюонов. Как было измерено в испытаниях с мюонными пучками, спектр горизонтальных мюонов имеет четкий пик MPV (Maximum Probability Value), соответствующий выделению энергии около 5 МэВ в сцинтилляторах одной продольной секции. В отличие от пучка, космические мюоны имеют широкий диапазон углов входа в калориметр, а длина треков мюонов в сцинтилляторах сильно зависит от геометрии этих треков. Как следствие, выделение энергии мюонов в продольных секциях модулей FHCAL имеет широкий спектр.

Проблема может быть решена двумя способами. Во-первых, можно регистрировать космические мюоны с горизонтальными треками, проходящими через все 7 продольных секций модуля, см. рис.5, слева. Полученные амплитудные спектры в секциях показаны на рис.6, справа. Видны узкие пики, соответствующие выделениям с энергией 5 МэВ. К сожалению, этот метод требует почти недельного сбора данных.

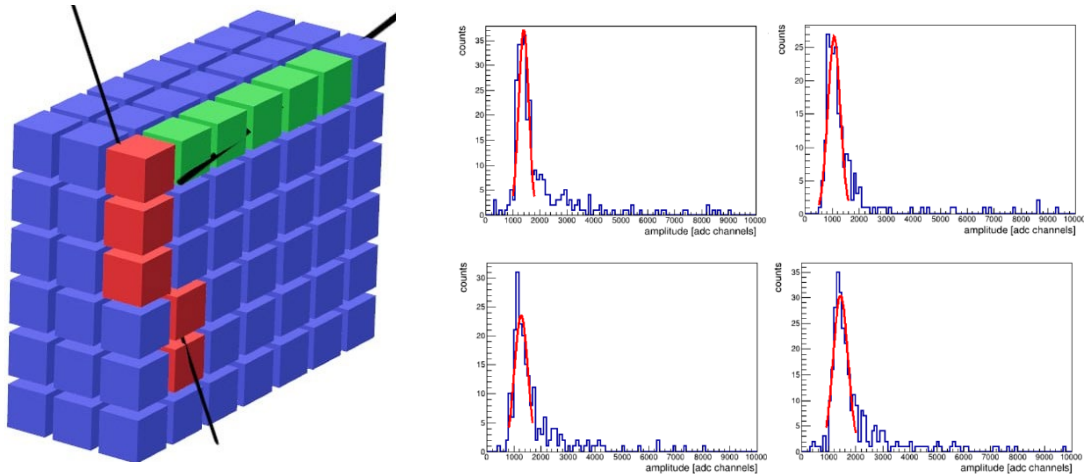


Рис.5 Слева - схема сборки модулей FNCal, использованной для проверки энергетической калибровки космических мюонов. Справа - амплитудные спектры в сцинтилляторах одной продольной секции для горизонтальных треков космических мюонов.

Поэтому был разработан другой метод энергетической калибровки с помощью треков мюонов со всеми углами с последующей коррекцией энергетических выделений. Амплитудная поправка к длине трека в сцинтилляторах основана на восстановлении геометрии мюонных треков следующим методом. Каждая секция модуля FNCal может рассматриваться как одна ячейка трекового детектора размером $15 \times 15 \times 12$ см³, где учитываются поперечные размеры модуля и длина продольной секции. Несмотря на большой размер ячейки, она позволяет восстановить геометрию трека в случае детектирования мюонов несколькими модулями FNCal. Для этого был собран массив модулей, см. рис.5, слева. Реконструкция трека возможна, если мюон проходит несколько продольных секций в разных модулях собранного массива. И одновременно в этих секциях с определенной точностью определяются длины треков мюона. Последующая коррекция амплитуд по длине трека создает в спектре структуру с хорошо выраженным пиком. Положение пика в амплитудном спектре соответствует 5 МэВ выделенной энергии и используется для энергетической калибровки.

3.6.5. Интеграция FNCal в эксперимент MPD

Все 90 модулей FNCal были изготовлены в ИЯИ РАН и отправлены в ОИЯИ в конце 2023 года. Параллельно в 2024 году в ОИЯИ были изготовлены монтажный стол и несущие платформы для установки FNCal в полюса сверхпроводящего магнита. В настоящее время несущие платформы установлены в полюса соленоида.

Первое плечо калориметра FNCal было собрано на полу в экспериментальном зале MPD в начале 2024 года, см. рис. 6, слева. После сборки на столе плечо FNCal было установлено в магнитный полюс (рис. 6, справа). В настоящее время первое плечо FNCal оснащено аналоговой электроникой.

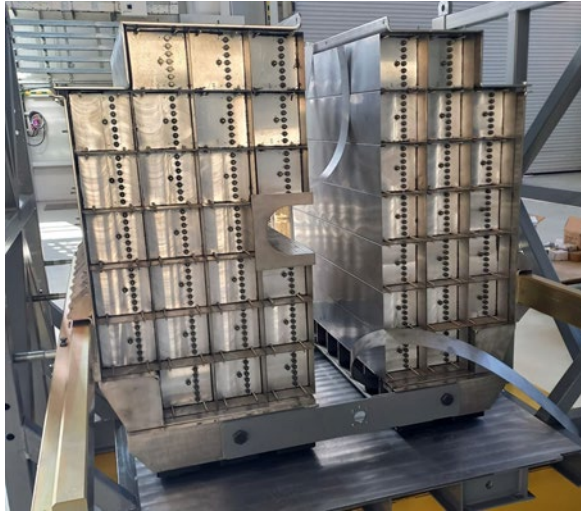


Рис.6 Слева - Сборка одного плеча FHCAL на монтажном столе. Справа - плечо FHCAL установлено в полюс соленоида.

Следующие этапы интеграции FHCAL включают: монтаж и установку второго плеча FHCAL, сборку и испытания систем съема информации и управления, прокладку кабелей, изготовление патч-панели и разработку системы охлаждения АЦП. На заключительном этапе будет проведена энергетическая калибровка модулей FHCAL космическими мюонами. Согласно текущему графику, полная интеграция FHCAL в экспериментальную установку MPD будет завершена в середине 2025 года.

Литература:

1. A. Ivashkin, et al., Amplitude parameters of modules for hadron calorimeter at MPD/NICA, JINST 15 (2020) 06, C06044
DOI: 10.1088/1748-0221/15/06/C06044
2. V. Volkov, et al., Approaches in centrality measurements of heavy-ion collisions with forward calorimeters at MPD/NICA facility, 2020, J. Phys.: Conf. Ser. **1690**, 012103
DOI:10.1088/1742-6596/1690/1/012103
3. A. Ivashkin, et al., Measurements of Spectators with Forward Hadron Calorimeter in MPD/NICA Experiment, Phys.Part.Nucl. 52 (2021) 4, 578-583
DOI: 10.1134/S1063779621040298
4. V. Volkov, et al., Application of FHCAL for Heavy-Ion Collision Centrality Determination in MPD/NICA Experiment, Particles 4 (2021) 2, 236-240
DOI: 10.3390/particles4020022
5. A. Strizhak, Reconstruction of energy and collision point of heavy ions with forward hadron calorimeter at MPD setup, AIP Conference Proceedings 2377, 030015 (2021).

DOI: 10.1063/5.0063348

6. A Izvestnyy, et al., Performance of Forward Hadron Calorimeter at MPD/NICA, 2020, J. Phys.: Conf. Ser. 1667 012016.

DOI: 10.1088/1742-6596/1667/1/012016

7. V Volkov, et al, Approaches in centrality measurements of heavy-ion collisions with forward calorimeters at MPD/NICA facility, 2020, J. Phys.: Conf. Ser. 1690 012103.

DOI: 10.1088/1742-6596/1690/1/012103

8. O Petukhov and S Morozov, Development of Detector Control System (DCS) for forward hadron calorimeters in the BM@N and the MPD experiments, 2020, J. Phys.: Conf. Ser. 1690 012063

DOI: 10.1088/1742-6596/1690/1/012063

Конференции:

1. A. Strizhak, Reconstruction of energy and heavy ion collision point at FHCAL (MPD). The XXIV International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists (AYSS-2020), JINR, Dubna, Russia
2. S. Musin, Centrality determination method based on observables from TPC and FHCAL at MPD/NICA, the XXVth International Baldin Seminar on High Energy Physics Problems "Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics", 2023, JINR, Dubna, Russia
3. A. Strizhak, Determination of the ion collision point in the MPD/NICA facility using the Forward Hadron Calorimeter, 2020, 63rd MIPT scientific conference, MIPT, Moscow, Russia
4. A. Strizhak, Energy calibration of Forward Hadron Calorimeter at MPD with cosmic muons. The XXVth International Baldin Seminar on High Energy Physics Problems "Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics", 2023, JINR, Dubna, Russia
5. A. Baranov and A. Strizhak, Status of Forward Hadron Calorimeter at MPD/NICA. The 28th International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists (AYSS-2024), JINR, Dubna, Russia

3.7. Детектор ECal

Электромагнитный калориметр (ECal) имеет цилиндрическую форму и предназначен для исследования электромагнитных наблюдаемых, таких как прямые фотоны и лептонные пары, распадов нейтральных мезонов, а также значительно улучшает разделение электронов и адронов.

3.7.1. Конструкция ECal

Крупноразмерный (6 метров в длину и 4,5 метра в диаметре) электромагнитный калориметр цилиндрической формы (ECal) является важной частью Многоцелевого Детектора (MPD) на коллайдере тяжелых ионов NICA и перекрывает центральную область псевдобыстрот $|\eta| < 1.2$. ECal оптимизирован для обеспечения точных измерений положений хитов и энергий для фотонов и электронов в энергитическом интервале от примерно 40 МэВ до 2-3 ГэВ. Для обеспечения возможности работы в условиях высокой множественности вторичных частиц из центральных столкновений ионов золота ECal имеет мелкую сегментацию и состоит из 38400 ячеек ("башен"). Принимая во внимание все требования (хорошее энергитическое разрешение, достаточно большое расстояние до точки столкновения пучков, маленький радиус Мольера, возможность работы в магнитном поле, хорошее временное разрешение, стойкость к радиации и приемлимая цена) был выбран электромагнитный калориметр типа "шашлык". Каждая "башня" состоит из структуры чередующихся 210 сцинтилляторов из полистирола и 210 свинцовых пластин, через которую проходят 16 спектросмещающих волокон (WLS) для сбора сцинтилляционного света; толщина каждой пластины сцинтиллятора составляет 1,5 мм, толщина каждой пластины свинца -- 0,3 мм (Рис. 3.6.1). Монте-Карло (MC) моделирование показало, что такая пропорция сцинтиллятора и свинцовых конверторов обеспечивает сэмплинг фракцию (sampling fraction) в пределах 34-39 % (в зависимости от энергии) и приводит к относительно небольшому статистическому вкладу и хорошему энергитическому разрешению в интервале энергий менее 1 ГэВ. Ограниченное доступное пространство внутри магнита MPD приводит к необходимости ограничить толщину ECal на уровне $11 X_0$ и связанной с этим утечке энергии из калориметра. Однако эта утечка не превышает 10-12 % в рабочем энергитическом интервале калориметра.

На основании MC исследований было принято решение создавать калориметр с проективной геометрией (когда "башни" имеют разный наклон с осью пучка для того, чтобы ось каждой башни была направлена на зону пересечения пучков). Главными преимуществами такой геометрии являются сокращение "мертвых зон", увеличение эффективности, улучшение линейности отклика и энергитического разрешения калориметра в условиях высокой множественности вторичных частиц.

3.7.2. Изготовление модулей

ECal модуль состоит из 16-ти склеенных друг с другом (Рис. 3.7.1). Геометрия каждого модуля от его Z положения (вдоль направления пучка) по отношению к точке пересечения пучков. Всего ECal будет состоять из 2400 модулей 8-ми различных типов. Изготовление модулей ECal поделено между производственными площадками в России и КНР.

Для улучшения светосбора свинцовые пластины окрашены белой глянцевой полиэфирной порошковой краской Element (производства Турция). Была разработана технология нанесения отражающего покрытия, которая внедрена на двух предприятиях Московской области. С этой же целью была разработана клей-краска для склейки башен модулей и налажено ее производство. Испытания клея-краски (как клея) проведены в сертифицированной лаборатории по испытанию композитных материалов Государственного университета "Дубна". Испытания показали, что склейки из 16 башен (модули) обладают достаточным запасом прочности для их монтажа уже в полусектора.

Более 8 миллионов сцинтилляционных пластин было изготовлено компаниями "Полипак" в Дубне и "Унипласт" во Владимире, что достаточно для всего ECal. Компанией "Полипак" произведен полный комплект стягивающих крышек башен модулей и коронок сбора WLS башни в один пучок для всего Ecal. Необходимое количество свинцовых пластин было изготовлено в ИФВЭ (Протвино) и компанией "Армул" (Московская обл.).

Первоначально мы использовали для сбора света WLS волокно Kuraray Y11 (200) диаметром 1,2 мм. Позднее (из-за санкций) это волокно (после дополнительных исследований) было заменено на волокно OSL8 с похожими характеристиками производства компании "Технологический Центр Полимерного Оптического Волокна" (Россия, Тверь). Был закуплен полный объем WLS волокна производства Kuraray, необходимый для производства всех модулей в КНР и 800 модулей из российского вклада; WLS волокно для оставшихся модулей сейчас в процессе производства.

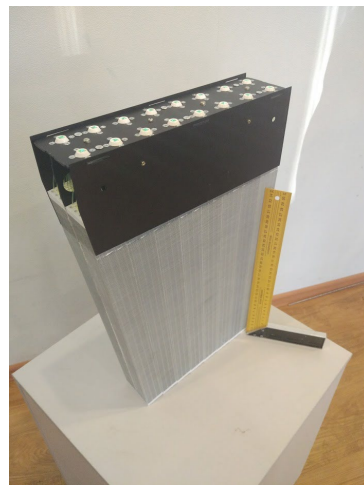
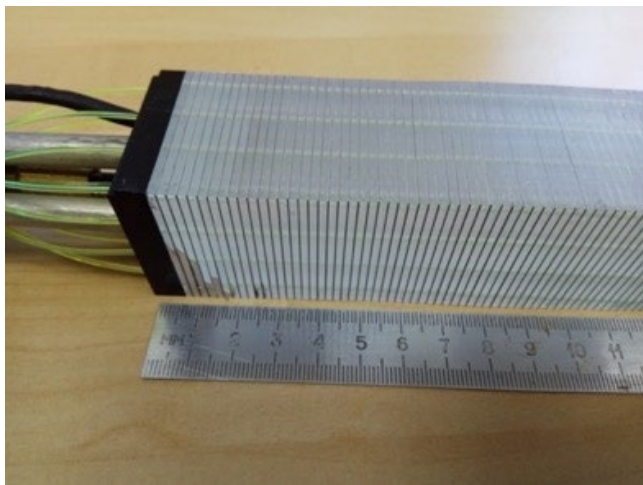


Рис. 3.7.1. Слева: структура "башни" ECal. Справа: модуль ECal.

3.7.3. Электроника считывания

Электроника считывания будет расположена непосредственно на калориметре. Для каждого типа модулей в ОИЯИ были разработаны front-end платы (Fig. 3.6.2) с расположенными на ней 16-ю кремниевыми фотоумножителями ($6 \times 6 \text{ мм}^2$ Hamamatsu S13360-6025PE MPPC с максимумом спектральной чувствительности на 450 нм), предусилителями и электроникой медленного контроля, которая контролирует температуру и производит соответствующую коррекцию (примерно 45 мВ.градус) на питание фотодетекторов. Эти платы были произведены в России (1200 штук) и в КНР (1200 штук).

Для определения рабочего напряжения для каждого фотодетектора кремниевые фотоумножители на платах освещались короткими вспышками света с длиной волны 300-500 нм от светодиодного генератора. В процессе калибровки напряжение на фотодетекторах менялось в интервале от 56 до 64 В (с шагом 0,2 В) при помощи контроллеров HVSys SM-G761. После анализа спектров, набранных при различных напряжениях питания, выбиралось оптимальное напряжение, обеспечивающее максимальную эффективность фотодетектора при минимальном шумовом вкладе. Стенд позволяет одновременно калибровать три платы. В настоящее время откалиброваны 1622 front-end платы. Мы ожидаем, что еще примерно 2000 плат будут откалиброваны до конца 2024 года. Принимая во внимание текущую скорость калибровки (от 10 до 30 плат в день), оставшиеся 400 плат будут откалиброваны до начала апреля 2025 года.



Рис. 3.7.2. Слева: front-end платы. Справа: ADC платы перед установкой.

Для оцифровки сигналов были использованы разработанные в ОИЯИ 64-канальные 14-битные Pipelined ADC64ECAL с частотой 62,5 мегасэмплов в секунду. Эти платы содержат вычислительное ядро и контроллер интернета с возможностью синхронизации времени по сети White Rabbit. Чтение данных, триггер и функция синхронизации производятся по одиночному оптоволоконному каналу связи. Дополнительный разъем QSFP может быть использован для обеспечения внешней синхронизации для высокоточных измерений, а также для триггера и каналов чтения данных.

Платы ADC помещены в термоизолированные контейнеры для минимизации влияния на фотодетекторы; один контейнер содержит 4 платы ADC. Контейнеры также обеспечивают необходимые коммуникации (т.е., кабели и оптические волокна) и системы охлаждения. С одной стороны контейнера располагается патч-панель с разъемами для кабелей и воды и воздуха для систем охлаждения. Все 600 плат ADC, которые необходимы для ECal, приобретены. В настоящее время собраны 135 контейнеров с электроникой; доставка остающихся 15 контейнеров ожидается. Учитывая скорость сборки контейнеров 1 шт. в день, мы планируем завершить сборку всех контейнеров в течение месяца после поставки недостающих комплектующих.

3.7.4. Тест модулей на космических мюонах

Предварительная калибровка отклика "башен" модулей производилась с использованием минимально ионизирующих частиц (космических мюонов). Первоначально зона калибровки состояла из 4-х светозащитных тентов, в каждом из которых была возможна одновременная калибровка 8-ми модулей двух типов. Общая скорость калибровки составляла 32 модуля в день. Каждый тент оснащен двумя источниками питания (Mean Well MDR-60-12); прерывателем (ABB SH202L C6); двумя платами ADC (ADC64ECAL), одним контроллером (HVSys SM-G761), and 8 прекалиброванными front-end платами. Отбор космических мюонов был организован в режиме "самотриггера": в каждом вертикальном ряду из 8-ми "башен" совпадения двух крайних "башен" используются в качестве триггера, в то время как тестируются "башни" между ними. Для калибровки крайних "башен" используются совпадения двух ближайших к ним башен. Рис. 3.7.3 показывает распределение максимумов распределений интегралов ADC для "башен" от различных изготовителей. "Башни" от различных изготовителей имеют заметные различия в распределениях, что сигнализирует о разнице в откликах модулей в результате небольших различий в технологии сборки (вероятно). В настоящее время протестированы 1499 модулей. Принимая во внимание текущую скорость тестирования (примерно 16 модулей в день в 2-х тентах) мы планируем завершить тестирование к марту 2025 года.

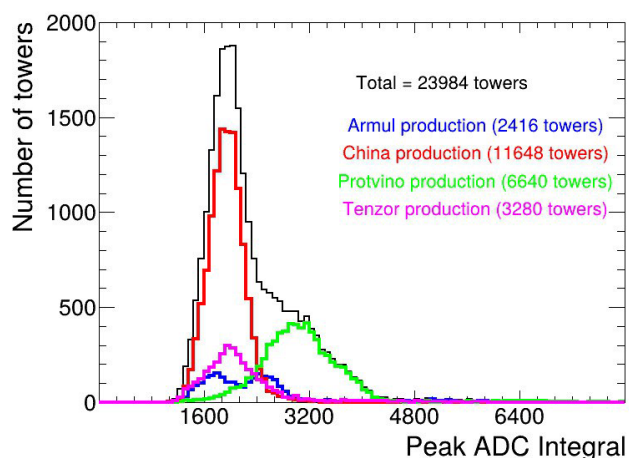


Рис. 3.7.3. Результаты тестирования модулей на космических мюонах.

3.7.5. Тесты модулей на пучках электронов

Тесты одиночных прототипов модулей были выполнены на пучках электронов в DESY (Гамбург, Германия) и ФИАН (Троицк, Россия). При измерениях на пучке электронов с энергией выше 1 ГэВ в DESY было обнаружено заметное отклонение от линейности отклика ECal. Было найдено, что это отклонение связано с насыщением сигнала из-за ограниченного количества пикселей в MPPC; поправка на этот эффект восстановила линейность.

Энергетическое разрешение одиночного модуля ECal было измерено недавно на пучке электронов относительно низких энергий в Троицке. Полученные данные (показанные красным на Рис. 3.7.4) находятся в хорошем согласии с результатами МС моделирования для одиночного модуля (показаны синим на Рис. 3.6.4). Такое же МС моделирование для всего калориметра позволяет сделать предварительную оценку ожидаемого энергетического разрешения ECal:

$$\Delta E/E \approx \frac{3.0\%}{\sqrt{E(\text{GeV})}} \oplus 2.4\%$$

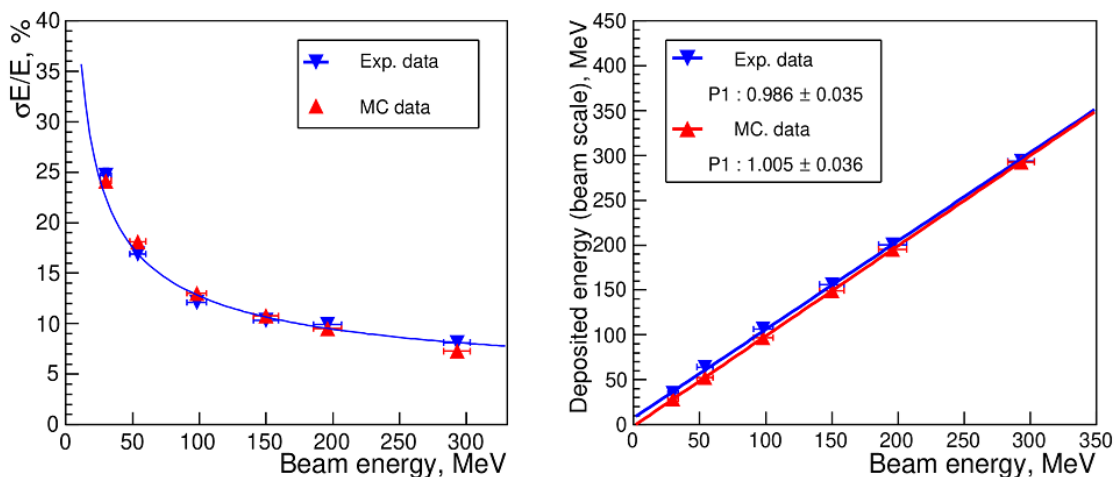


Рис. 3.7.4. Энергетическое разрешение (слева) и линейность (справа), полученные при тестировании модулей на пучке электронов в Троицке.

3.7.6. Производство полусекторов

С точки зрения геометрии ECal разделен на 25 секторов или 50 полусекторов; каждый полусектор содержит $6 \times 8 = 48$ модулей 8-ми различных типов (Рис. 3.7.5). Модули помещены в контейнер полусектора ("корзину"), сделанный из стекловолкна. "Корзина" имеет длину 3,12 м и сечение $0.56 \times 0.56 \text{ м}^2$. Стенки "корзины" имеют толщину 6 мм; они покрыты снаружи специальным составом для снятия статического электричества и обеспечения лучшего скольжения при установке полусектора в силовой каркас MPD. Жесткость "корзины" была испытана, и она оказалась достаточной для обеспечения деформации менее 0,5 мм при нагрузке от собранного полусектора 1,5 т.

На Рис. 3.7.6 (справа) показана фотография "корзины" с вклеенными модулями и частично установленной электроникой. К настоящему времени компания "ЦНИИСМ" (г. Хотьково, Моск. обл.) поставила по контракту полный набор "корзин" (51 шт.).

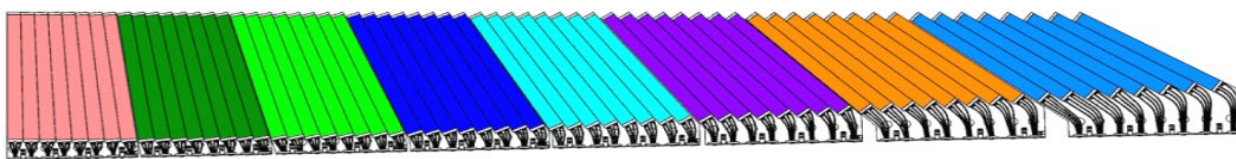


Рис. 3.7.5. Расположение модулей в полусекторе.

После процедуры проверки поступающих от производителей модулей на качество склейки башен и геометрические параметры, согласно конструкторской документации, модули поступают на стенды для их проверки на космике. Затем из них формируются на

двух созданных для этого устройствах склеенные сборки по 16 модулей. На третьем этапе модули в трех сборках вклеиваются в полусектор на специально сконструированном и изготовленном в ООО Полипак стапеле. Для этого используется специальный клей, разработанный для угле- и стеклопластиков в АО "ЦНИИСМ".

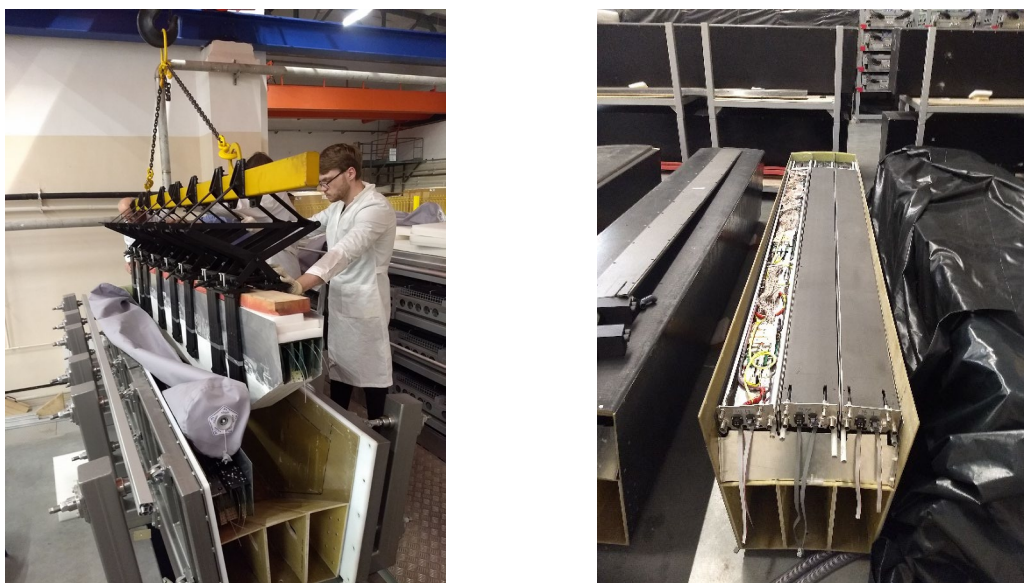


Рис. 3.7.6. Склейка кластеров в "корзине (слева) и собранный полусектор (справа)".

Примерно 800 модулей были изготовлены в 4-х университетах в КНР и 1320 модулей были изготовлены в России (Протвино, Армул и Тензор). К концу 2024 года все эти модули будут склеены в 40 полусекторов, что составит 80% от общего числа башен в ECal. Согласно плану оставшиеся 10 полусекторов будут изготовлены в 2025 году. Контракты на производство недостающих компонентов и модулей подписаны с отечественными производителями.

3.7.7. Системы охлаждения ECal

Производство тепла оценивается в 180 Вт на полусектор (или примерно 9 кВт для всего ECal), поэтому две независимые системы были разработаны для эвакуации тепла из полусекторов. Водяная система охлаждения удаляет тепло от плат ADC и стабилизирует температуру с помощью медных трубок и радиаторов; это необходимо для бесперебойной корректной работы ADC. Каждая плата ADC имеет максимальное выделение тепла 15 Вт, и она оснащена водяным радиатором, который подсоединен к системе медных трубок для подачи воды для охлаждения. Допустимая температура ADC ограничена 45 °С и контролируется встроенным температурным сенсором. Все компоненты для водяной охлаждающей системы приобретены (Рис. 3.7.7), и 135 из 150-ти систем водяного охлаждения установлены в теплоизолированные контейнеры с электроникой и проверены на течи на вакуумном стенде. Доставка оставшихся 15 контейнеров ожидается в ноябре 2024 года, и установка в них систем водяного охлаждения ожидается до конца 2024 года.



Рис. 3.7.7. Системы водяного охлаждения перед установкой.

Воздушная система охлаждения была разработана для эвакуации тепла от электроники ECal из объема полусектора (и внутри, и снаружи теплоизолированных контейнеров). Главная система воздушного охлаждения эвакуирует тепло из объема рядом с front-end платами (т.е., SiPM). Резервная система воздушного охлаждения служит для вывода тепла из объема около плат ADC (в дополнение к системе водяного охлаждения). Для работы системы требуется поток воздуха около 30 м^3 в час на один полусектор. Системы воздушного охлаждения обеспечили стабильную работу SiPM и ADC без участия системы водяного охлаждения в течение нескольких месяцев набора данных на космических мюонах. В настоящее время закончены изготовление и установка в полусектора 12-ти из 50-ти систем воздушного охлаждения. Необходимые материалы приобретены; установка происходит по мере сборки полусекторов. Изготовление и установка в контейнеры с электроникой закончены для 120 из 150 систем воздушного охлаждения. Материалы приобретены, и установка происходит по мере сборки контейнеров. Воздушные коллекторы собраны и будут установлены и проверены при проверке собранных полусекторов на стенде.

3.7.8. Система контроля стабильности ECal

Электромагнитный калориметр контролируется и управляется с использованием системы контроля источников напряжения, а также системы контроля фотодетекторов и считывающей электроники. В цели последней системы не входит обеспечение точной калибровки детекторов и электроники; задачи системы ограничиваются контролем общей работоспособности элементов калориметра и отслеживанием возможных значительных изменений характеристик детектора. Исходя из этих задач и принимая во внимание ожидаемое энергетическое разрешение калориметра, точность мониторингования на уровне 1-2% была признана достаточной. Необходимость контроля значительного количества ячеек калориметра накладывает дополнительные требования: система мониторингования должна быть достаточно простой и надежной, стоимость мониторингования каждой ячейки калориметра (канала электроники считывания) не должна быть слишком высокой.

Была разработана система мониторинга, основанная на волокнах бокового свечения SOF-2. Волокно бокового свечения способно излучать свет в поперечном направлении. Был разработан дизайн системы мониторинга ЭМК, где свет от одного светодиода распределяется на 256 "башен", то есть один кластер, который соответствует одному контейнеру электроники считывания сигналов с фотоприемников. Волокна бокового свечения SOF-2 диаметром 2 мм и длиной ~3 м помещены в поликарбонатные трубки с внутренним диаметром 3 мм и толщиной стенки 1 мм. Для сопряжения волокон со светодиодом был разработан и изготовлен на 3-D принтере специальный держатель, к одной стороне которого крепился светодиод с драйвером и мониторным фотодиодом производства HVSYS, к другой стороне четыре волокна бокового свечения. Каждое волокно распределяет свет на 64 жгута WLS волокон, как показано на Рис. 3.7.8.

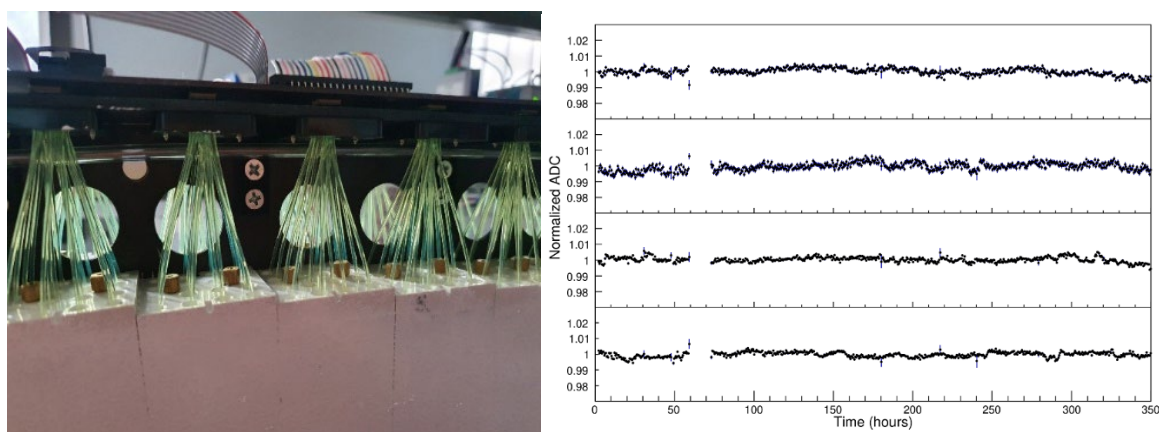


Рис. 3.7.8. Слева: распределение света на волокне WLS. Справа: результаты длительной проверки стабильности системы для нескольких каналов.

Была исследована долговременная стабильность прототипа системы мониторинга. Измерения для четырех каналов продолжались 350 часов, температурная компенсация сигналов фотодетекторов при этом была включена, использовалось воздушное охлаждение электроники, нормировка на сигнал от фотодиода не производилась. Частота поджига светодиодов составляла 0.1 Гц. Результаты измерений представлены на рис. 8. Каждая точка на рисунке представляет собой результат усреднения сигналов с АЦП в течение 30 минут. Видно, что разброс сигналов составил менее 1% по абсолютной величине, а перерыв в работе продолжительностью примерно 13 часов не оказал заметного влияния на стабильность системы мониторинга калориметра.

3.7.9. Интеграция ECal в MPD

Первоначально электромагнитный калориметр планировался как самонесущая конструкция, где каждый сектор вносит свой вклад в качестве силового элемента во всю конструкцию. Однако после разделения производства модулей ECal между российскими и китайскими площадками (с разными временными графиками) была запрошена возможность установки и переустановки секторов калориметра (полусекторов) без демонтажа всего калориметра и MPD. Для удовлетворения этим требованиям мы будем использовать специальный силовой каркас (длиной около 8 метров и диаметром около 4,5 метров) из композитного материала на основе углеродного волокна, которая может выдерживать всю нагрузку от детекторов MPD без поддержки секторов ECal (Рис. 3.6.9).

Этот каркас состоит из внутренней (толщиной 20 мм) и внешней (толщиной 15 мм) цилиндрических оболочек с 25 переборками (толщиной 10 мм) между ними, образующими 25 ячеек для установки секторов калориметра. Были выполнены расчеты жесткости для упрощенной модели каркаса, которые показали, что запланированная общая нагрузка 120 тонн вызовет максимальные деформации каркаса около 2-3 мм, что соответствует нашим требованиям иметь деформации менее 5 мм для сохранения возможности установки и повторной установки полусекторов ECal. Расчеты прочности гарантируют способность каркаса выдерживать нагрузку примерно в 10 раз превышающую наши максимальные ожидания, а расчеты и испытания на прочность гарантируют 15-летнюю эксплуатацию каркаса. В марте 2023 года каркас был доставлен в ОИЯИ и будет установлена в магнит MPD после завершения магнитного картирования.

Для установки полусекторов ECal в каркас был спроектировано и изготовлено специальное устройство (Рис. 3.7.9). Оно позволяет осуществлять точное позиционирование и вращение полусектора массой 1,5 тонны в трехмерном пространстве, а также перемещение полусектора с малым трением вдоль оси устройства. Устройство было доставлено в ОИЯИ в октябре 2024 года для окончательной настройки.



Рис. 3.7.9. Слева: силовой каркас MPD. Справа: устройство для установки полусекторов.

Литература

- [1] [ECal/MPD Collaboration JINR "TDR of the Electromagnetic calorimeter \(ECal\)" 2018, Rev. 3.6.](#)
- [2] I. Tyapkin et al., "NICA/MPD Electromagnetic Calorimeter based on Multipixel Avalanche Photodetector", PoS PhotoDet2015 (2016) 053.
- [3] [Basylev, S.](#) et al., Projective geometry for the NICA/MPD Electromagnetic Calorimeter. Journal of Instrumentation, V.13, Is. 02, pp. C02030 (2018); doi:13(02):C02030-C02030.
- [4] Durum et al., Optimization of a light collection in the Shashlyk-type electromagnetic calorimeter with projective geometry for the NICA/MPD experiment. EPJ Web Conf. 222 (2019) 02007, DOI: 10.1051/epjconf/201922202007

3.8 Тонкостенная пучковая труба MPD

Пучковая труба MPD представляет собой тонкостенную УФ-совместимую трубу длиной девять метров, показанную на Рис. 3.8.1. Изготовление пучковой трубы MPD - очень сложный процесс. Требуемый вакуум внутри трубы должен быть не менее 10-12 торр. Рассматривается пучковая труба, которая выполнена из бериллия в центральной части, в области взаимодействия, и алюминия по краям. Минимальная толщина стенки, как правило, составляет 1 мм как для бериллиевых, так и для алюминиевых деталей. Российская компания "Композит – Бериллиевый институт" изготовила два образца бериллиевой трубы длиной 1700 мм.

Наружные части пучковой трубы будут изготовлены из специального алюминиевого сплава.

В первый раз, чтобы получить опыт, планируется изготовить полностью алюминиевую пусковую трубу с той же геометрией, что и у базовой бериллиевой версии.

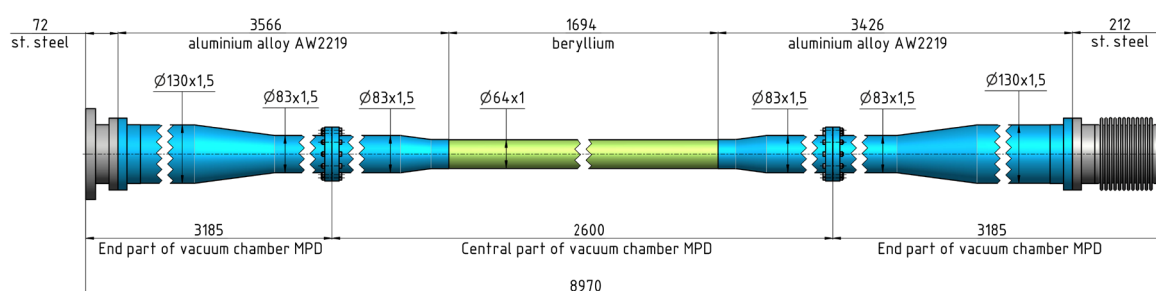


Рис. 3.8.1. Примерный дизайн пучковой трубы MPD. Отсутствуют какие-либо указания на вакуумное оборудование на концах пучковой трубы. Согласно сценарию интеграции, пучковая труба прогревается на вакуумном стенде и заполняется сухим неоном и только после этого отправляется на сборочный стенд вместе с корпусом внутреннего трекера ITS MPD.

3.9 Система сбора данных MPD

Основной задачей системы сбора данных является передача данных от детекторов в систему хранения. В систему сбора данных входит передача данных от считывающей электроники на процессоры первого уровня (FLP — First Level Processors), затем в систему построения событий (EvB — Event Building), на логику триггера верхнего уровня (HLT — High Level Trigger) и в систему хранения данных. Основными компонентами системы сбора данных являются сети передачи данных, сервера обработки данных, онлайн-система хранения данных, пакеты программного обеспечения, протоколы сетевого общения. Также к системе сбора данных относятся различные интерфейсы электроники чтения данных, система временной синхронизации и триггерная система.

3.9.1 Электроника чтения данных

Чтение данных с времяпролётного детектора (TOF) осуществляется двумя типами модулей — TDC72VHL и TTVXS (Рис. 3.9.1). TDC72VHL — это 72 канальный модуль время-цифрового преобразования с точностью измерения времени в 20 пс на канал. Временные метки входных сигналов могут храниться в кольцевой памяти до 52 мкс, таким образом общая задержка триггера чтения не должна превышать этого значения. TTVXS — это модуль временной и триггерной синхронизации. Этот модуль раздаёт сигнал триггера и синхронные тактовые импульсы на модули TDC72VHL, установленные в одном с ним крейте VXS. Также модуль TTVXS собирает данные с модулей TDC72VHL и передаёт их через сеть 10G Ethernet в систему сбора событий (EvB). Модуль TTVXS использует протокол WhiteRabbit для временной синхронизации со всей системой сбора данных. Для чтения данных с времяпролётного детектора будет использоваться 14 VXS крейтов, в каждом по 14 модулей TDC72VHL

Система сбора данных детектора FFD схожа с системой сбора данных TOF, но будет использовать 1 VXS крейт и 4 модуля TDC72VHL.

Всего для чтения данных с детекторов TOF и FFD необходимо 200 модулей TDC72VHL и 15 модулей TTVXS. Произведено 219 модулей TDC72VHL и 20 модулей TTVXS. Дополнительно модули TTVXS будут задействованы в распространении триггерного сигнала.

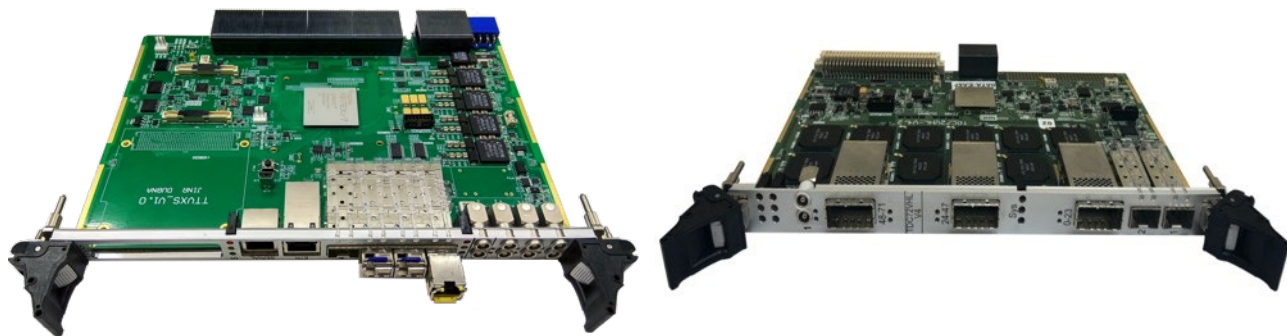


Рис 3.9.1. TTVXS (слева) и TDC72VHL (справа) модули

Для чтения данных с электронного калориметра (ECAL) разработаны модули ADC64ECAL (Рис. 3.9.2). Это 64 канальные модули аналогово-цифрового преобразования (АЦП), с квантованием 14 бит и дискретизацией в 62.5 МГц. Для синхронизации этих

модулей и раздачи триггера им был разработан модуль CRU16 (Рис. 3.9.3). CRU16 может синхронизировать до 16 модулей, подключённых к нему, раздавать на них триггерные сигналы и собирать с них данные. Все собранные данные передаются через оптический интерфейс со скоростью 40 Гб/с. Модуль CRU16 использует протокол WhiteRabbit для временной синхронизации со всей системой сбора данных.

Для четяния данных с электронного калориметра необходимо 600 модулей ADC64ECAL и 38 модулей CRU16.

По 4 модуля ADC64ECAL будут размещены внутри одного короба ECAL (рисунок 3.10.4). Уже произведены и получены специально разработанная система жидкостного охлаждения (СЖО) и все внутренние коммуникации (кабели питания, передачи данных и т.п.). 130 коробов полностью собраны и проверены на герметичность. Ожидается, что ещё 20 коробов будут готовы к концу 2024 года.

Для чтения данных с переднего адронного калориметра (FHCAL) будут использоваться 10 модулей ADC64S2 (Рис. 3.9.2). Это 64 канальные АЦП модули, с квантованием 14 бит и дискретизацией в 62.5 МГц. Временная и триггерная синхронизации будут осуществляться двумя модулями CRU16.

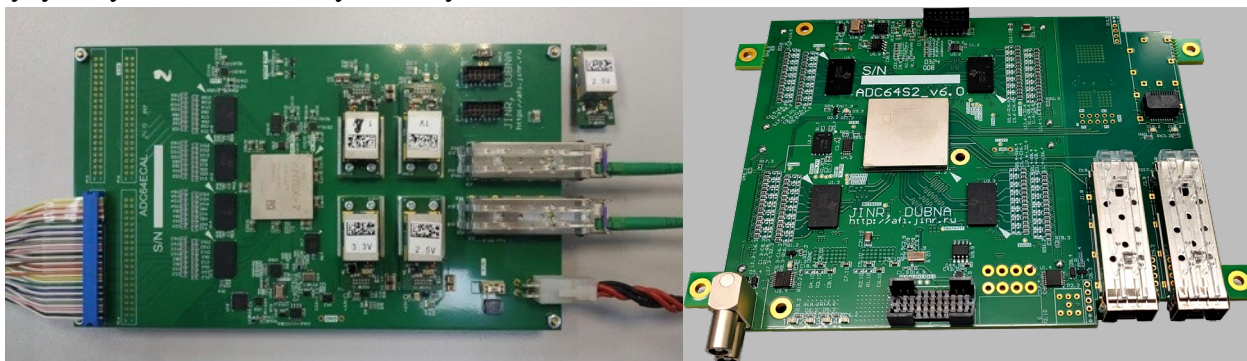


Рис. 3.9.2. Электронные модули ADC64ECal (слева) и ADC64S2 (справа).



Рис. 3.9.3. Электронный модуль CRU16.

Все электронные модули для чтения детекторов ECAL и FHCAL изготовлены и протестированы: 630 ADC64ECAL (105%), 12 ADC64S2 (120%) и 45 CRU16 (112%). Некоторые модули CRU16 будут задействованы в распространении триггерного сигнала.

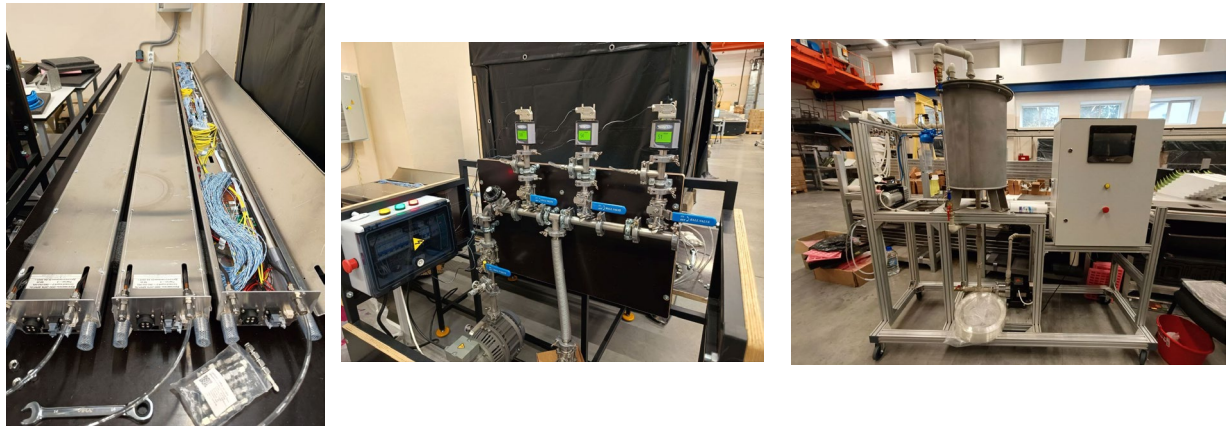


Рис. 3.9.4. Короб для электроники ECAL (слева), стенд проверки герметичности воздухом СЖО ECAL (в центре), тестовый стенд СЖО (справа).

3.9.2 Триггерная электроника MPD

Триггерная система обрабатывает информацию с триггерных детекторов и вырабатывает триггер чтения для всех детекторов MPD. Всего 4 триггерных детектора: FFD, TOF, FHCAL и детектор светимости. Для минимизации потерь в трековой информации с время-проекционной камеры (TPC) необходимо минимизировать время обработки информации с триггерных детекторов. Ожидается, что полная задержка триггера чтения будет около 1 мкс.

Триггерная информация с детектора FHCAL обрабатывается модулями ADC64S2. Для времяпролётного детектора (TOF) и детектора светимости были разработаны новые модули для обработки триггерной информации — TLU40LVDS и TLU16SFP (рисунок 3.9.5).

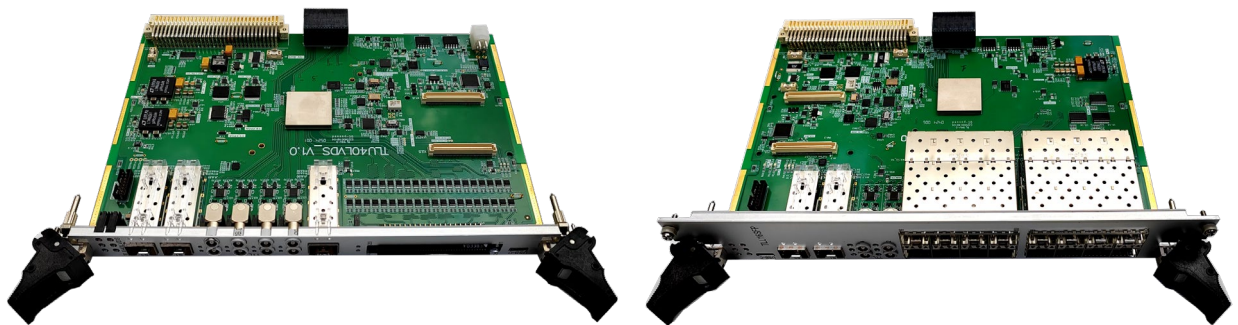


Рис. 3.9.5. TLU40LVDS (слева) и TLU16SFP (справа).

Группа FFD разработала свою триггерную электронику и предоставляет 3 триггерных сигнала в центральный триггерный модуль.

В качестве центрального триггерного модуля будет использоваться модуль UT24VE (Рис. 3.9.6). В этот модуль будут приходить 3 триггерных сигнала от детектора FFD, 1 сигнал от детектора TOF, 1 сигнал от детектора светимости и 10 сигналов от детектора FHCAL.

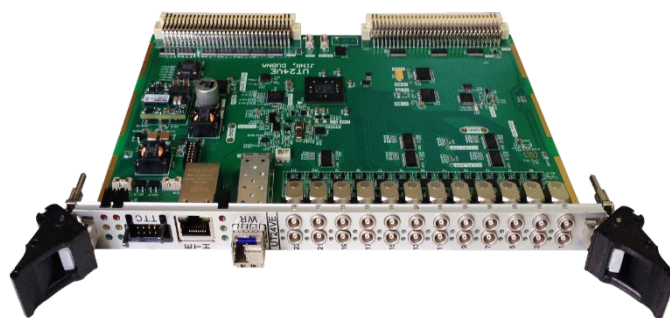


Рис. 3.9.6. UT24VE – центральный триггерный модуль.

3.9.3 Сетевая инфраструктура системы сбора данных MPD

Сетевые устройства и электроника системы сбора данных будут размещены на поверхности и внутри детектора MPD, на платформе MPD и в модульном центре обработки данных (Modular Data Center — MDC). Путь передачи данных: от электроники сбора данных к сетевым коммутаторам на платформе, далее – в модульный центр обработки данных.

Основные характеристики модульного центра обработки данных:

- постоянное хранилище данных объёмом 5 Пиб;
- 2000 вычислительных ядер.

К концу 2024 года комната управления (диспетчерская) полностью оснащена оборудованием и введена в эксплуатацию (Рис. 3.9.7).

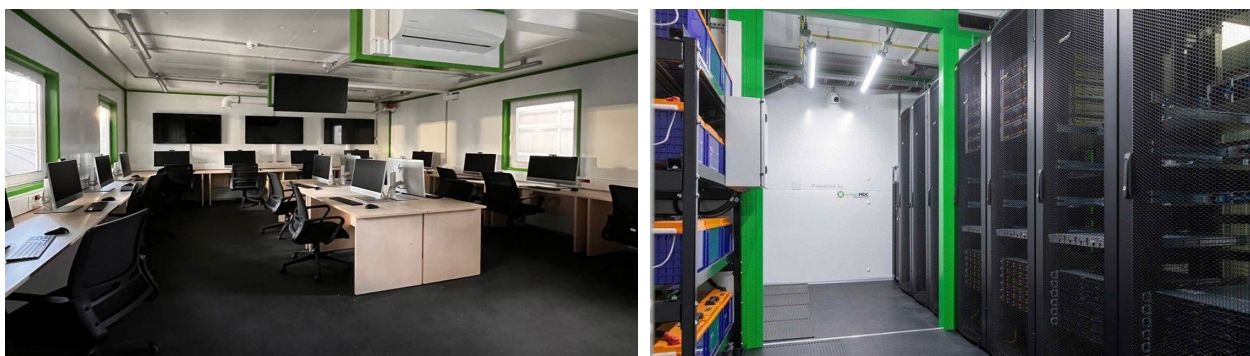


Рис. 3.9.7. Комната управления (слева), модульный центр обработки данных (справа).

Сеть и протокол White Rabbit обеспечивает временную синхронизацию с точностью до нескольких пикосекунд для больших распределенных систем, что обеспечивает детерминированную и надежную передачу данных. Модули системы сбора данных оцифровывают сигналы детекторов, используя общие представления о времени и частоте, предоставляемые сетью White Rabbit. Временная привязка обеспечивается приемником GPS/ГЛОНАСС и резервной точной привязкой частоты (цезиевые или рубидиевые часы). Структура сети синхронизации и стенд для тестирования коммутаторов сети White Rabbit показаны на Рис. 3.9.8.

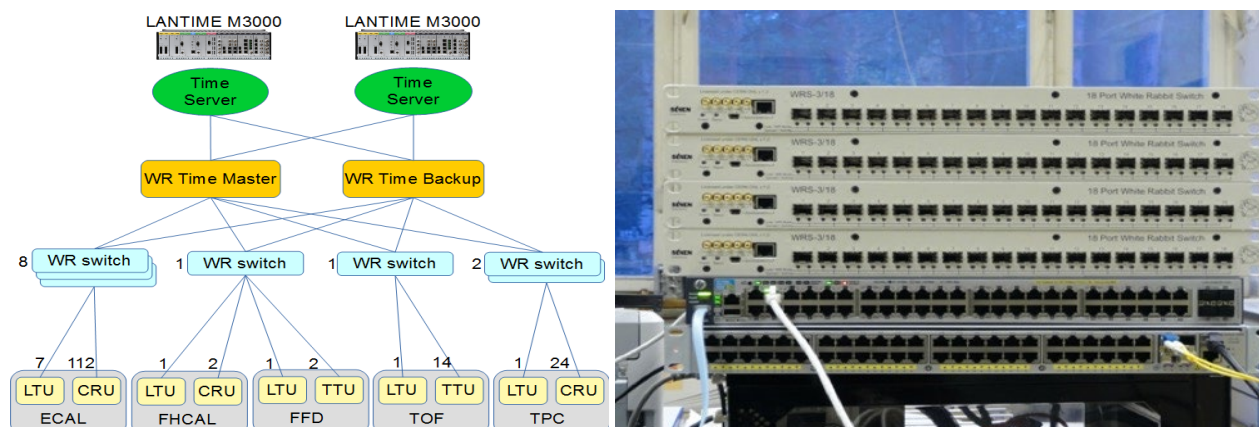


Рис. 3.9.8. Структура сети синхронизации MPD (слева) и стенд тестирования коммутаторов сети White Rabbit (справа).

3.9.5 Программное обеспечение системы сбора данных MPD

Программное обеспечение системы сбора данных настраивает все электронные модули сбора данных, описанные в предыдущих главах. Полученные данные с устройств упаковываются в MpdRawData формат данных и сохраняются в файлы. Параметры настроек всех программ, которые включают в себя и настройки всех модулей, сохраняются в базе данных, в виде нередатируемой записи. Планируется добавить возможность менять конфигурацию программ в соответствии с типом набора данных.

3.10. Инженерная поддержка

NICA-MPD-Platform (далее-NMP) спроектирована и смонтирована для работы всех подсистем (какие системы) многоцелевого детектора MPD (Рис. 3.10.1). Она является неотъемлемой частью инфраструктуры проекта NICA и механически связана с MPD.

NMP предназначена для обеспечения непрерывной работы DAQ-электроники, электропитания субдетекторов, элементов контроля и управления субдетекторами.



Рис. 3.10.1 NICA-MPD-Platform

Для создания NMP выполнены следующие работы:

- установлено 25 стоек для оборудования с вентиляционными панелями и 13 фанкойлами, для охлаждения оборудования на каждом этаже платформы (Рис. 3.10.2).

- в каждой стойке установлен 3х фазный блок розеток стандарта С14, с мониторингом нагрузки по фазам для организации балансировки и возможностью дистанционного отключения.

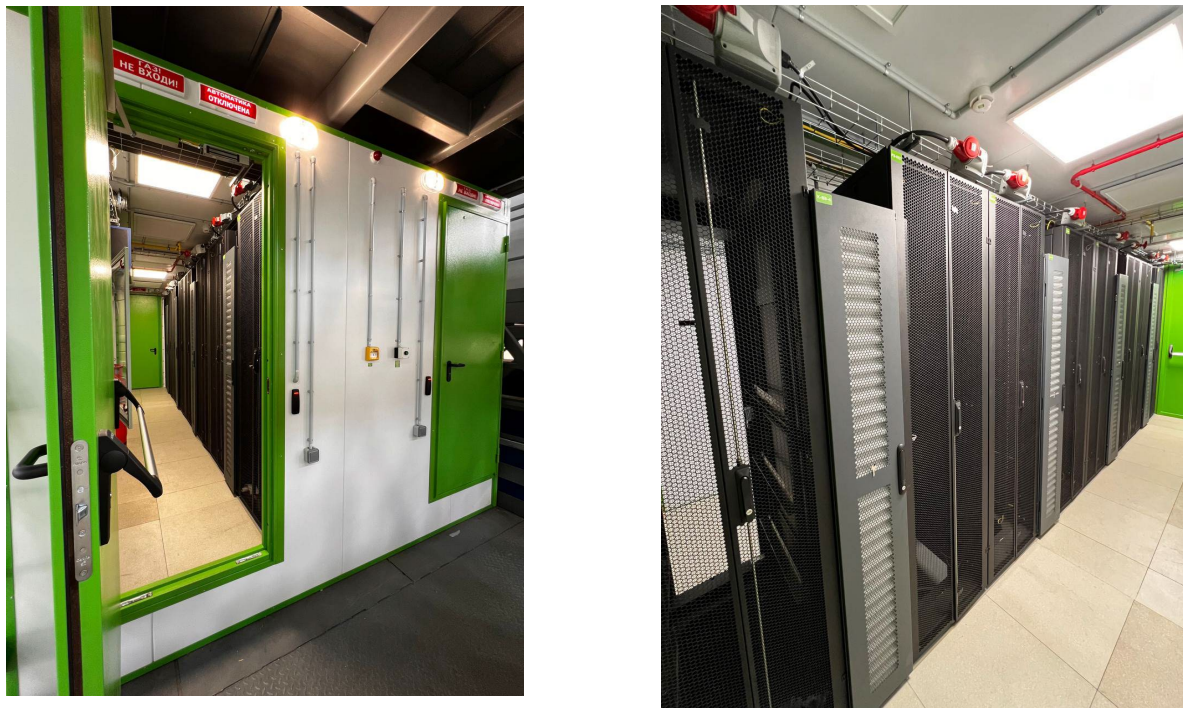


Рис. 3.10.2. Стойки с фан-койлами

- проект электропитания полностью реализован на всех 4-х этажах. Электропитание платформы изолировано и установлены распределительные щиты на каждом этаже, что позволяет проводить профилактическое обслуживание каждого этажа без отключения всей NMP.

- установлена система контроля и управления доступом. Данная система интегрирована с существующей системой DAQ-DATA CENTER. Для доступа во все помещения сотрудники могут использовать существующий пропуск, выданный сотрудникам ОИЯИ.

- установлена система видеонаблюдения на каждом этаже NMP.

- установлена автономная система пожаротушения на каждом этаже, основанная на снижении концентрации кислорода путем ввода негорючего газа. В качестве огнетушащего вещества используется хладон 125. Также установлены и подключены извещатели, световые табло, расположенные над каждым входом охраняемого объекта согласно проекту. Система автономного пожаротушения и пожарной сигнализации введены в эксплуатацию и подключена для передачи сигнала о пожаре и неисправностях (Рис. 3.10.3).



- Рис. 3.10.3. Система автономного пожаротушения и пожарной сигнализации
- установлена система вентиляции на каждом этаже.
 - реализована и протестирована оптическая кабельная межэтажная система.
 - реализована водяная система охлаждения платформы.
 - разработана и утверждена конструкция системы кабельных лотков от детектора MPD к NMP.
 - разработан, протестирован и утвержден крепеж и стойки для крейтов, расположенных на магните с западной и восточной стороны магнита.
 - реализована система хранения и визуализации маркировки кабелей и трассировки детекторных групп, проделана большая работа по сбору данных всех кабелей каждой детекторной группы, и данная информация будет интегрирована в созданную систему базы данных, это будет необходимо при подключении (а в дальнейшем и для обслуживания кабельных систем) субдетекторов к оборудованию, расположенного на магните и на NMP.

Все инженерные системы NMP полностью смонтированы, в конце 2024 года запланирован запуск водяного охлаждения, и тестирование всех систем под проектной нагрузкой в 330 киловатт. Тестирование каждого этажа будет проходить под нагрузкой в 100 киловатт.

В 2025 года запланирован монтаж модуля для размещения электроники субдетектора ITS (Рис. 3.10.4). Размещен модуль будет на втором этаже Южной платформы над системой водоподготовки TPC и ECal. Создаваемый модуль для размещения электроники будет полностью интегрирован в существующую Nica MPD Platform по системам: электропитания, пожарной сигнализации, водяному охлаждению и диспетчеризации.

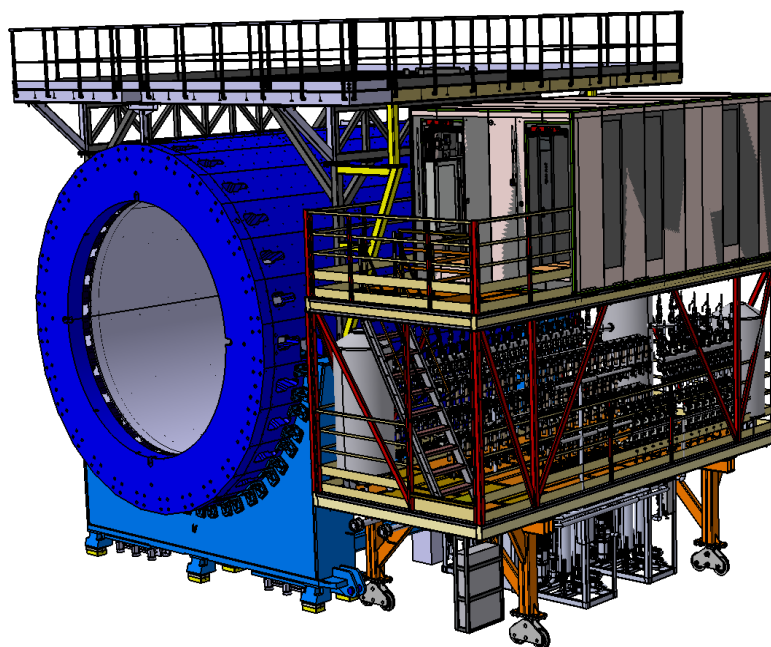


Рис. 3.10.4. Южная платформа.

Выступления на международных конференциях в 2022-2024 г.:

- 1) XI Collaboration Meeting of the MPD Experiment at the NICA Facility, VBLHEP, [Joint Institute for Nuclear Research](#), on April 18-20, 2023.
- 2) NICA Days 2023 and XII MPD Collaboration Meeting, Belgrade, Serbia, on November 02-06, 2023.
- 3) XIII Collaboration Meeting of the MPD Experiment at the NICA Facility, VBLHEP, [Joint Institute for Nuclear Research](#), on April 23-25, 2024

4. Детекторы второго этапа эксперимента MPD

4.1 Система внутреннего вершинного (ITS) трекера MPD.

4.1.1 Отчет о работах по созданию ITS в период 2021-2025 г.г.

Проект MPD-ITS функционирует как международный проект с участием ОИЯИ и СПбГУ в России, а также CCNU, USTC, ИЕР и IMP в Китае. Ниже приведены основные достижения каждой из сторон сотрудничества за период с 2021 по 2025 год.

4.1.1.1 В России:

1) Технический Проект построения внутреннего вершинного трекера из Монолитных Активных Сенсоров (МАПС), включающего шесть цилиндрических слоев МАПС вокруг области взаимодействия накопленных в коллайдере NICA ядер, сгруппированных в 3-слойный внутренний баррель (IB), окруженный 3-слойным внешним баррелем (OB) (Рис.4.1.1) был завершен с описанием всех технических деталей по электронике, механике, «бестечевой» системе охлаждения и т.д., а также результатами компьютерного моделирования, выполненного в ходе оптимизации конструкции устройства и демонстрации его способности идентифицировать продукты распадов короткопробежных D^0 - и D^+ мезонов (Рис.4.1.2). Был разработан двухэтапный сценарий строительства ITS в полном соответствии с планами ускорительного отделения ЛФВЭ по вводу в эксплуатацию коллайдера NICA, при этом строительство трекера в варианте только внешнего барреля OB должно быть завершено в первую очередь к 2028 году, а полная конфигурация ITS-OB+IB, построенная по технологии использованной ранее сотрудничеством ALICE при создании внутренней вершинной трековой системы второго поколения ALICE-ITS2, будет введена в эксплуатацию в 2030 году после замены исходного ионопровода MPD с диаметром 64 мм на ионопровод меньшего диаметра - 38 мм. В настоящее время документ проходит процедуру окончательного редактирования и будет представлен к опубликованию в первой половине 2025 года.

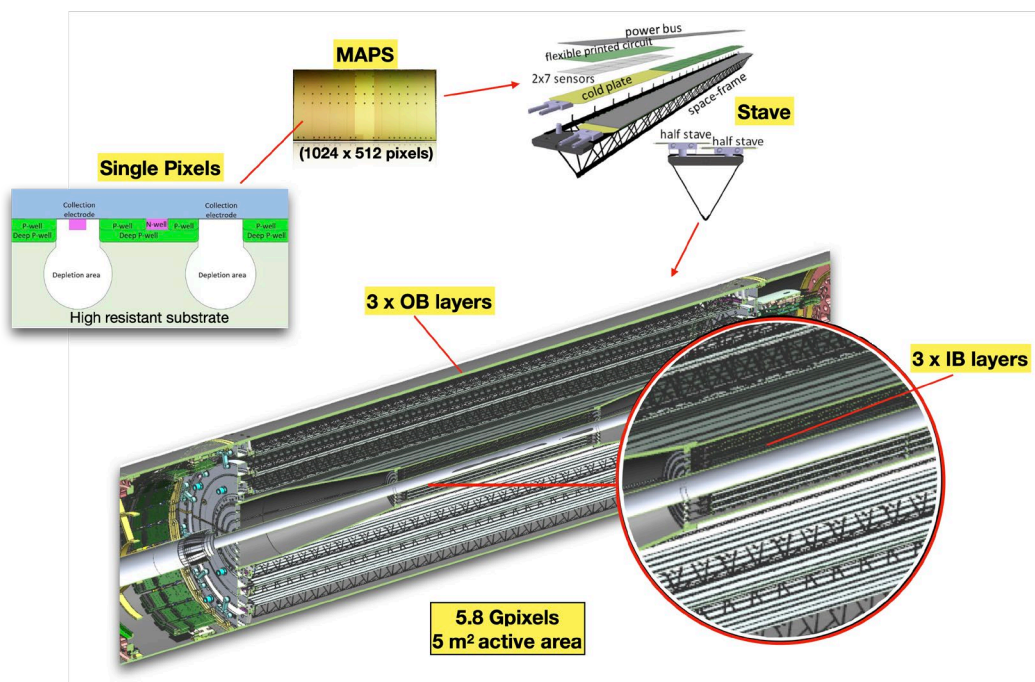
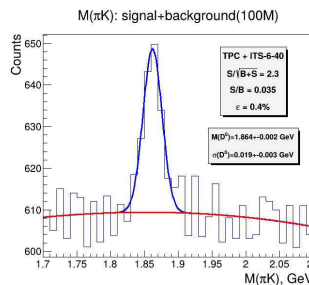
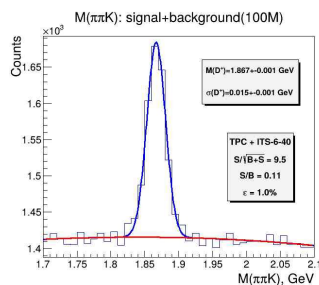
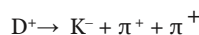


Рис.4.1.1. Полная структура 6-слойного детектора MPD-ITS - от одного пикселя до внутреннего и внешнего цилиндрических слоев.

D⁺ and D⁰ reconstruction using KF with TPC-TOF PID



$N_D = 19\ 000$ mesons/month for D⁺
 $N_D = 3\ 200$ mesons/month for D⁰

Using the optimal BDT cut allows to reconstruct D⁺ and D⁰ with an efficiency of **1.0%** and **0.4%** respectively.

Particle	D ⁺	D ⁰
Efficiency, %	1.0	0.4
Significance	9.5	2.3
S/B(2σ) ratio	0.11	0.035

Courtesy of Prof. V.Kondratiev (SPbSU)

12

Рис.4.1.2. Реконструкция D⁰ и D⁺ с использованием информации из ITS+TPC+TOF.

2) Рабочий план по созданию системы был пересмотрен и уточнен после введения полного эмбарго на импорт микроэлектронных компонентов западного производства в Россию в феврале 2022 года, которые первоначально предполагалось получить от ЦЕРН в соответствии с Протоколом №136, подписанным ЦЕРН и ОИЯИ в 2018 году. С китайскими партнерами была достигнута договоренность о совместных исследованиях, разработках и налаживании производства в Китае недостающих компонентов, необходимых для постройки трекера и системы считывания данных с него.

3) Был предложен оригинальный сценарий интеграции ITS, ионопровода MPD и двух FFD по схеме контейнерной интеграции, для которой 95% деталей, вспомогательной оснастки в настоящее время произведены собственными силами (Рис.4.1.3), партнерами из СПбГУ и отечественной компанией GRAFIT Pro. Наземные испытания интеграции с TPC с помощью построенного инсталляционного контейнера и всех сопутствующих приспособлений планируется провести в 1–2 кварталах 2025 года.

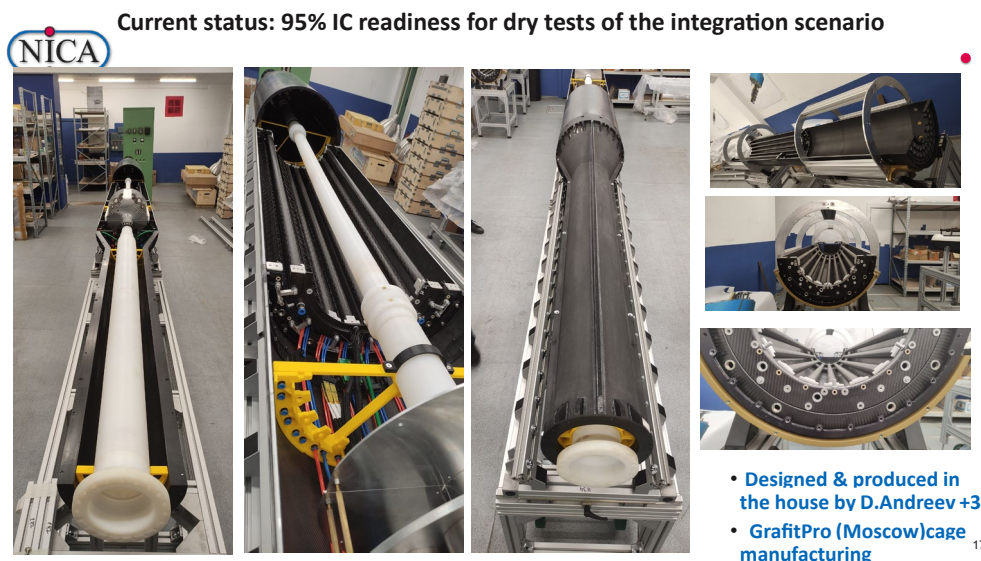


Fig.3 Реальные компоненты монтажного контейнера с макетами пучковой трубы и детектора FFD.

4) Холодильная установка (Рис.4.1.4) для организации «бестечевого» водяного охлаждения сенсоров ITS была спроектирована и в настоящее время изготавливается компанией DSSE со сроком поставки в ОИЯИ не позднее апреля 2025 года. В настоящее время ведется подготовка соответствующей инфраструктуры для пусконаладки и быстрого ввода системы в эксплуатацию, а также начала работ запланированной разработки АСУ для контроля и управления всем холодильным хозяйством трекера.

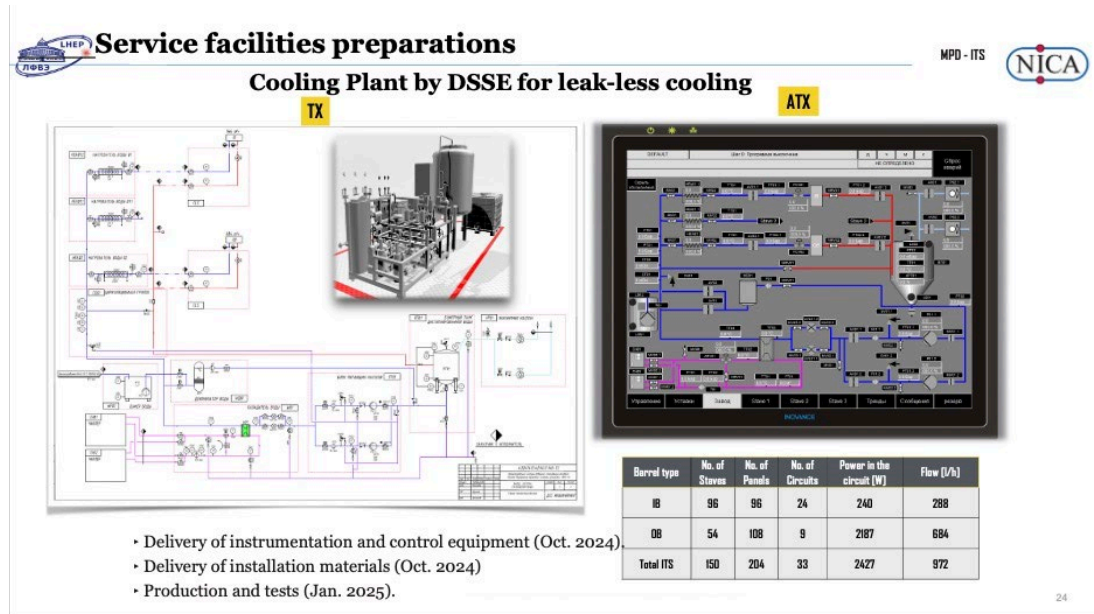


Рис.4.1.4 Эскиз специальной «бестечевой» холодильной установки для ITS (слева) и образец панели автоматического управления (справа).

5) Собственными силами была разработана система считывания данных для лабораторных испытаний монокристаллических активных пиксельных сенсоров подобных ALPIDE. Система была успешно протестирована в эксперименте, проведенном в протонном пучке с энергией 1 ГэВ в ПИЯФ, Гатчина (Рис.4.1.5).

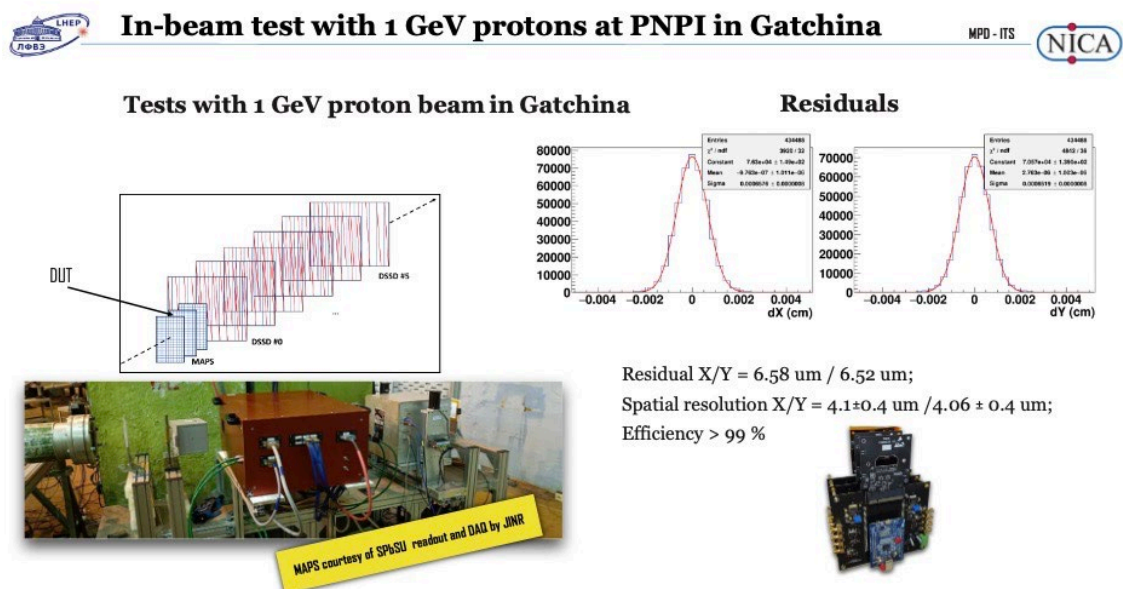


Рис.4.1.5 Краткое описание установки и результатов пучковых испытаний, проведенных на ускорителе протонов с энергией 1 ГэВ в ПИЯФ (Гатчина).

6) В ЛФВЭ была создана полностью оборудованная инфраструктура участка сборки модулей ITS, включающая в себя также двух квалифицированных инженеров и трех обученных техников, способных осуществлять сборку модулей под наблюдением автоматизированной системы управления сборочными операциями на географически удаленных участках, внедрённая в ОИЯИ нами совместно с сотрудниками ЛИТ Оборудование для сборки супермодулей было доставлено из ЦЕРНа, но еще не введено в эксплуатацию из-за отсутствия необходимых для его установки чистых помещений, которые в настоящее время заняты командой MPD TRC.

4.1.1.2 В Kumaе:

1) Первый прототип китайского МАПС, получившего условное имя «MICA», был разработан в CNNU и изготовлен на китайском государственном предприятии (Рис.4.1.6) на подложке Р-типа с высоким сопротивлением. Лабораторные испытания изготовленных чипов (Рис.4.1.7) проводятся в настоящее время одновременно в CNNU и ЛФВЭ с ожидаемым окончанием этих работ к концу 2024 года. В 2025 году запланированы испытания в пучке на протонах с энергией 1 ГэВ второй версии чипа. Для этого уже готовится проектная информация на второй прототип чипа MICA, которая должна быть передана на завод-изготовитель не позднее 3-го квартала 2025 года.

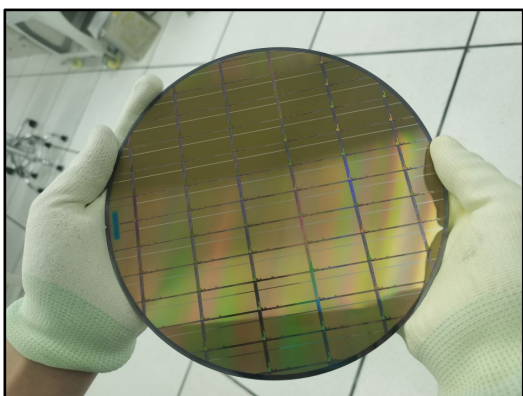


Рис.4.1.6. Первые прототипы чипа MICA.

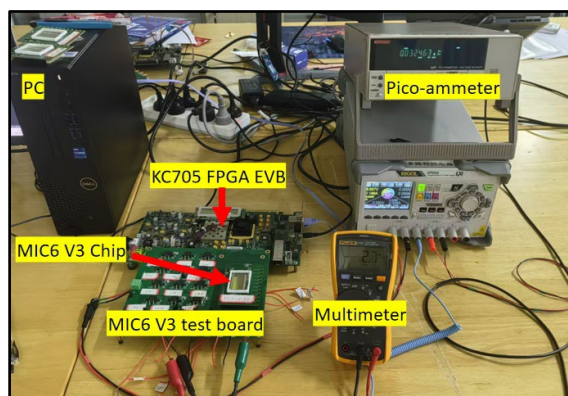


Рис.4.1.7. Тестовая установка для определения характеристик первого прототипа чипа MICA в лабораторных условиях.

2) Специальная система считывания на основе ПЛИС вместе с блоком питания была разработана в USTC для считывания данных с супермодулей (также известных как “стейвы”), из которых строятся баррели IB и OB. Модули уже доставлены в ОИЯИ для дальнейших лабораторных испытаний на ЛФВЭ, запланированных на начало 2025 года

3) Первые прототипы СИМС семейства GBTx для быстрой агрегации данных и их передачи по оптическим линиям от зоны детекторов с повышенным уровнем радиации к узлам онлайн-сервера MPD были разработаны, изготовлены и испытаны в рамках лабораторных стендовых испытаний, которые продолжаются и в настоящее время в CCNU.

Опубликованные статьи:

1. NICA-MPD Vertex Tracking Detector Identification Capability for Reconstructing Strange and Charmed Particle Decays. A.I.Zinchenko, S.N.Igolkin, V.P.Kondratiev, Y.A.Murin, Physics of Elementary Particles and Atomic Nuclei, Letters, 17, 6, 856-870, 2020.

2. Detection of D⁺-meson decays in the tracking system of NICA-MPD. V. Kondratiev, C. Ceballos, S. Igolkin, A. Kolozhvari, Y. Murin, A. Sheremetiev, *Acta Physica Polonica B*, 14, 3, 497-501, 2021.
3. The Inner Tracking System for the MPD Setup of the NICA Collider", *Physics of Particles and Nuclei*, 2021, Vol. 52, No. 4, pp. 742–751. Yu. A. Murin, and C. Ceballos for the MPD-ITS Collaboration.
4. Status and initial physics performance studies of the MPD experiment at NICA. MPD Collaboration, *Eur.Phys.J. A*, 58, 140-189, 2022.
5. LDALA14:a 14 Gbps optical transceiver ASIC in 55 nm for NICA multipurpose detector project. Chen Q., Guo D., Zhao C., Artech R., Ceballos C., Fang N., Gan Y., Guo Z., Murin Y., Sun X., Yi L., *Journal of instrumentation*, 17, August, C01027, 2022.
6. A low noise 5.12 GHz PLL ASIC in 55 nm for NICA multi purpose detector project. Zhao C., Guo D., Chen Q., Guo Z., Artech R., Ceballos C., Fang N., Gan Y., Murin Y., L.Yi, *Journal of instrumentation*, 17, August, C09003, 2022.
7. A 13 Gbps 1:16 deserializer ASIC for NICA multi purpose detector project. Chen Q., Guo D., Zhao C., Guo Z., Artech R., Ceballos C., Fang N., Gan Y., Murin Y., L.Yi, *Journal of instrumentation*, 17, August, C08027, 2022.
8. A 14 Gbps VCSEL driving ASIC in 55 nm for NICA multi purpose detector project. Zhao C., Chen Q., Guo Z., Artech R., Ceballos C., Fung N., Gan Y., Murin Y., L.Yi, Guo D., *Journal of instrumentation*, 17, August, C08027, 2022.
9. Construction Management Information System at JINR. C. Ceballos, A. A. Kolozhvari, A. G. Dolbilov, R. N. Semenov, E. A. Tsapulina, A. Rodriguez, A. D. Sheremetiev, Yu. A. Murin, *Physics of Particles and Nuclei Letters*, 2023, Vol. 20, No. 5, pp. 981–987.
10. MPD-ITS Current Status. A. D. Sheremetev, C. Ceballos and Yu. A. Murin for the MPD-ITS Collaboration, *Physics of Particles and Nuclei*, 2023, Vol. 54, No. 4, pp. 720–724.
11. Modern Microelectronics for MPD-ITS. Monolithic Active Pixel Sensors and Readout System. Yu. A. Murin and C. Ceballos Sanchez for the MPD-ITS Collaboration, *Physics of Particles and Nuclei*, 2024, Vol. 55, No. 4, pp. 1061–1065.
12. Determination of the natural frequencies of ultralight carbon fiber trusses for silicon tracking systems. M. Herrera, T. Ligdenova, C. Ceballos, D. Dementev, S. Igolkin, V. Zhrebchevsky, accepted for publication at *Revista Mexicana de Física*.

Доклады на конференциях:

1. Towards MAPS based Inner Tracking System of NICA MPD. César Ceballos Sánchez for the MPD-ITS Collaboration. LXXI International conference "NUCLEUS – 2021. Nuclear physics and elementary particle physics. Nuclear physics technologies", St. Petersburg, September 20-25, 2021.
2. Construction Management Information System at JINR. César Ceballos Sánchez for the MPD-ITS Collaboration. LXXII International conference "Nucleus-2022: Fundamental problems and applications" Moscow, July 11-16, 2022.
3. Modern Microelectronics at NICA. To be or not to be? Yuri Murin and Cesar Ceballos Sanchez or the MPD-ITS Collaboration. XXV International Baldin Seminar On High Energy Physics, Dubna, September 18-23, 2023.
4. MPD-ITS Current Status. César Ceballos Sánchez (JINR) for the MPD-ITS Collaboration. LXXIV International conference "Nucleus-2024: Fundamental problems and applications". Dubna, July 1-5, 2024.

5. Status and Perspective of the NICA MPD Project. Yu.Muri. Invited talk at the CEPC Workshop, Hangzhou October 22-27, 2024.

Кадровые ресурсы:

Всего: 19 полных FTE + 2x0.5 FTE=20 FTE

Научные работники: 4

Инженеры: 10

Техники: 2

Специалисты: 3

Лаборанты: 1

Предполагаемое потребление ITS (OB+IB)	
Электрическая мощность системы охлаждения	< 33 кВт
Электрическая мощность источников CAEN	< 3.3 кВт
Расход охлаждающей воды в чиллере	< 20 л/мин
Поток охлаждающей воды в крейтах	< 10 л/мин
Сжатый воздух (6 – 8 бар)	< 1500 л/мин
Чистый азот для охлаждения детекторов (6 – 8 бар)	< 140 л/мин

4.1.2 Планы по созданию системы ITS в 2026 – 2030 г.г.

Внутренняя трековая система (ITS) [1] многоцелевого детектора (MPD) [2] будет представлять собой вершинный кремниевый детектор, предназначенный для эффективной регистрации короткоживущих продуктов ядро-ядерных взаимодействий, который планируется создать с использованием новой технологии монолитных активных пиксельных сенсоров (МАПС) после передачи ЦЕРН в ОИЯИ ноу-хау на технологию, разработанную сотрудничеством ALICE для модернизации своего вершинного детектора ALICE-ITS2. Проект реализуется в сотрудничестве нескольких групп из российских и китайских институтов, возглавляемым в России ОИЯИ, в Китае Ключевой лабораторией кварков и лептонов Нормального (Педагогического) университета центрального Китая (CCNU). На Рис.4.1.1 показана схема трекера, состоящего из шести слоев позиционно-чувствительных цилиндров вокруг области взаимодействия пучков ядер в коллайдере, сгруппированных в трехслойный внутренний баррель (IB), окруженный трехслойным внешним баррелем (OB). Основные количественные параметры MPD-ITS приведены в таблице 1.

Таблица 1. Основные параметры MPD ITS

Баррель	Число слоев	Число стейвов	Число сенсоров	Число пикселей, млрд. шт.	Площадь (м ²)
ОВ	3	54	10584 ^(*)	5.55	4.76
ІВ	3	48	864 ^(**)	0.45	0.39
Итого	6	102	11448	6.00	5.15

(*) Толщина = 100 μm .

(**) Толщина = 50 μm

Благодаря замечательному пространственному разрешению (~ 5 мкм) и высокой скорости считывания данных с МАПС ожидается, что ITS в сочетании с ТРС позволит обнаруживать короткоживущие продукты ядро-ядерных взаимодействий с максимальной эффективностью. На Рис.4.1.8 показаны результаты моделирования, выполненного в рамках пакета MpdROOT, реконструкции треков от продуктов распада короткопробежных D-мезонов в спектре их инвариантных масс $D^0 \rightarrow K^- + \pi^+$ ($\lambda = 123$ мкм) и $D^+ \rightarrow K^- + \pi^+ + \pi^+$ ($\lambda = 312$ мкм): а) для 6-слойного варианта ITS в сочетании с ТРС и ионопровода MPD с диаметром 40 мм для столкновений Ві+Ві при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 11$ ГэВ.

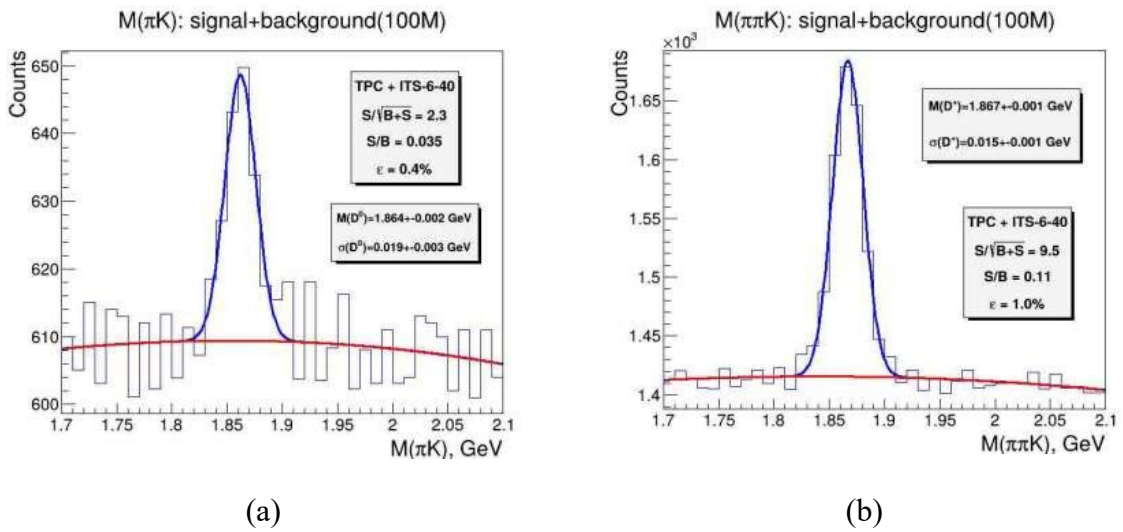


Рис.4.1.8. Извлечение сигналов D^0 (а) и D^+ (б) мезонов в спектре инвариантных масс из комбинаторного фона для центральных столкновений Ві+Ві при $\sqrt{s_{NN}} = 11$ ГэВ.

Для этого моделирования на основе теплового генератора и DCMSM было сгенерировано 10^8 сигнальных событий (распадов) и $5 \cdot 10^5$ фоновых событий без отбора по прицельному параметру. Результаты показывают, что при указанных выше конфигурации ITS и диаметре ионопровода можно достичь пространственного разрешения вершин в 120 мкм, что позволяет идентифицировать распады D-мезонов с поперечным импульсом $p_t > 500$ МэВ/с. В таблице 2 приведены результаты реконструкции обоих очарованных мезонов с точки зрения эффективности, значимости и отношения сигнала к фону.

Таблица 2. Основные параметры идентификационной способности трекера в случае D^+ и D^0 -мезонов в предложенной конфигурации трекера и ионопровода.

Величина	D^+	D^0
Эффективность (%)	1.0	0.4
Значимость	9.5	2.3
Отношение $S/B(2\sigma)$	0.11	0.035

Согласно проделанным расчетам, предсказывается идентификация 3200 и 19000 распадов D^0 и D^+ в месяц работы коллайдера при его максимальной светимости.

4.1.2.1 Сенсоры MICA MAPS

Сенсоры МАПС MPD-ITS, в настоящее время разрабатываются в CCNU (Ухань) под названием MICA в рамках концепции сенсора ALPIDE, разработанного в ЦЕРНе [3], который в настоящее время запрещен к ввозу в Россию. В конструкции MICA в полной мере используется технологическая особенность ALPIDE — глубокая р-образная ячейка, которая позволяет использовать полную CMOS-схему в пиксельной матрице, сохраняя при этом максимально полную эффективность сбора заряда. Это, наряду с небольшим размером элемента и наличием шести слоев металлизации, позволяет разместить в каждом пикселе постоянно работающий интерфейс с предельно низким энергопотреблением. Цель состоит в том, чтобы создать чип с характеристиками, указанными в таблице 3.

Таблица 3. Номинальные характеристики разрабатываемого чипа MICA

Параметр	Значение
Размер чипа	15 × 30 мм
Число пикселей	512 × 1024
Размер пикселя	28 × 28 мкм
Разрешающее время	<2 мкс
Энергопотребление	39 мВт/см ²

На рисунке 4.1.9 показано поперечное сечение чипа MICA, на котором видно, что в данном случае высокоомный эпитаксиальный слой ALPIDE в чипе MICA был полностью заменен подложкой с высоким удельным сопротивлением, что упрощает процесс производства.

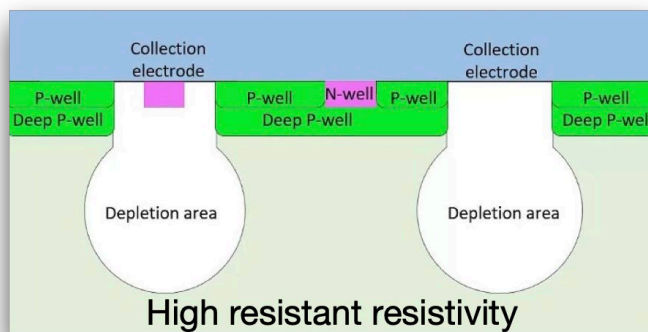


Рис.4.1.9. Внутреннее устройство чипа MICA.

Производство прототипов чипа MISA, использующее КМОП технологии 130 нм, началось с отладки отдельных узлов чипа, изготовленных на пластинах для одновременного изготовления тестовых узлов нескольких проектов (MPW), что позволило объединять различные конструкции чипов на одной пластине и удешевить и ускорить начальный этап создания прототипов. Например, в первой партии уже были протестированы 3 различных структуры пикселей, каждая из которых содержит матрицу 4x4. В настоящее время изготовлена ограниченная серия первого полноразмерного прототипа сенсора MISA, который проходит лабораторные испытания в CCNU и ОИЯИ для определения характеристик матрицы пикселей и выявления ошибок проектирования для их исправления в последующем втором прототипе чипа. Ожидается, что вторая версия чипа вскоре будет отправлена на завод-изготовитель в Китае. Образцы чипов первой версии MISA уже поступили в ОИЯИ для лабораторных исследований и определения характеристик параллельно с CCNU.

4.1.2.2. Система считывания.

В качестве первого варианта в USTC, Хефей (Китай) была изготовлена специально разработанная система считывания на основе ПЛИС, а также блок питания для считывания супермодулей (также известных как “стейвы”), состоящих из МАПС. Модули уже доставлены в ОИЯИ для дальнейших лабораторных испытаний в ЛФВЭ, запланированных на 2025 год. С другой стороны, планируется, что в финальных блоках считывания данных с модулей ITS используемые сейчас ПЛИС будут заменены на СИМС, в частности семейства GBTx:

- NICA_ROC: Концентрирует выходные данные интерфейсных чипов МАПС и передает упакованные данные в следующий ASIC-модуль NICA_GBTx. Также получает команды управления, тактовые сигналы и триггерные сигналы от серверной части и передает их чипам МАПС.
- NICA_GBTx: Высокоскоростной двунаправленный интерфейс передачи данных на оптические линии связи. Он получает многоканальные данные от внешнего интерфейса (NICA_ROC), выполняющего скремблирование, кодирование, построение фреймов и сериализацию в качестве основной функции для направления восходящего канала. Он получает высокоскоростные последовательные данные от серверной части, выполняет CDR (синхронизацию и восстановление данных), десериализацию, декодирование и передачу на серверную часть в качестве основной функции для нисходящего канала связи.
- NICA_LD (лазерный драйвер) и NICA_TIA (трансимпедансный усилитель): две аналоговые микросхемы СИМС, которые будут интегрированы вместе с лазером и PD (Pin-диодом) в специальный модуль оптического приемо-передатчика. NICA_LD получает высокоскоростные последовательные данные по восходящей линии связи от NICA_GBTx и усиливает сигнал для управления лазером. NICA_TIA принимает последовательный сигнал нисходящего канала связи от pin-диода и усиливает сигнал до NICA_GBTx, чтобы данные могли быть дополнительно обработаны в NICA_GBTx.

Все эти СИМС-устройства в настоящее время запрещены к экспорту либо в Россию, либо в Китай. По этой причине разработка и производство этих чипов в Китае были включены в проект MPD-ITS, чтобы иметь бесплатный доступ к полному семейству СИМС-устройств GBT (гигабитный трансивер) как в России, так и в Китае. Дополнительную информацию можно найти в соответствующих опубликованных статьях [4-7]. В настоящее время готова вторая версия прототипов СИМС-устройств семейства NICA_GBT. Это чипы NICA_LD, NICA_TIA и NICA_GBTx. Дизайн NICA_LD_v2 и NICA_TIA_v2 были

объединены в один чип для дальнейшего тестирования и верификации, а дизайн NICA_GBTx_v2 включает в себя все аналоговые подмодули. Процесс исследований и разработок все еще продолжается, и ожидается, что к середине 2027 года будет завершен окончательный вариант модуля считывания данных MPD, основанного на СИМС собственной разработки. График основных этапов реализации проекта на период 2026-2030 годов можно резюмировать следующим образом:

2026:

В ЛФВЭ (Дубна), CCNU(Ухань) и ПИЯФ (Гатчина) завершены лабораторные и пучковые испытания второй версии микросхемы MICA.

Разработана механика ITS IB и приспособления для ее изготовления и интеграции с ОВ.

Завершена подготовка инфраструктуры для участка сборки супермодулей на ЛНЕР.

2027:

Лабораторные испытания третьей (окончательной) версии микросхемы MICA (опционально) в ЛФВЭ (Дубна), CCNU(Ухань) и ПИЯФ (Гатчина).

Начало предсерийного производства микросхем MICA в Китае.

Лабораторные испытания модулей RU и PU (используется ROC ASIC), доставленных из USTC(Хефэй).

Ввод в эксплуатацию участка сборки супермодулей на ЛФВЭ.

2028:

Производство RU и PU (окончательная версия с ASIC) в Китае в количествах, достаточных для выполнения ОБЯЗАТЕЛЬСТВ.

Начало сборки модулей и супермодулей в Китае.

2029:

Начало сборки модулей и супермодулей в ЛФВЭ.

Продолжение сборки модулей и супермодулей в CCNU.

Сборка ITS-ОВ

Ввод в эксплуатацию ITS-ОВ

2030:

Сборка ITS-ИБ.

Сборка ITS в полной конфигурации (ITS=ОВ+ИБ) с диаметром ионопровода 38 мм.

Ввод в эксплуатацию ITS.

Цитируемые источники.

1. MPD-ITS technical design report. <https://disk.jinr.ru/index.php/s/SgscL93JwxKpoDp>.
2. The MPD experiment. <https://nica.jinr.ru/projects/mpd.php>.
3. M. Mager et al. (ALICE Collab.), "ALPIDE, the monolithic active pixel sensor for the ALICE ITS upgrade," Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A 824, 434–438 (2016).

4. Q. Chen, D. Guo, C. Zhao, R. Arteché, C. Ceballos, N. Fang, Y. Gan, Z. Guo, Yu. Murin, X. Sun, and L. Yi (MPD ITS Collab.), “LDLA14: A 14 Gbps optical transceiver ASIC in 55 nm for NICA multipurpose detector project,” *J. Instrum.* 17, C01027 (2022).
5. C. Zhao, D. Guo, Q. Chen, Z. Guo, R. Arteché, C. Ceballos, N. Fang, Y. Gan, Yu. Murin, and L. Yi, “A low noise 5.12 GHz PLL ASIC in 55 nm for NICA multipurpose detector project,” *J. Instrum.* 17, C09003 (2022).
6. Q. Chen, D. Guo, C. Zhao, Z. Guo, R. Arteché, C. Ceballos, N. Fang, Y. Gan, Yu. Murin, and L. Yi, “A 13 Gbps 1:16 deserializer ASIC for NICA multipurpose detector project,” *J. Instrum.* 17, C08027 (2022).
7. C. Zhao, Q. Chen, Z. Guo, R. Arteché, C. Ceballos, N. Fang, Y. Gan, Yu. Murin, L. Yi, and D. Guo, “A 14 Gbps VCSEL driving ASIC in 55 nm for NICA multipurpose detector project,” *J. Instrum.* 17, C08027 (2022).

4.2. Проект переднего трекового детектора для эксперимента MPD

Многоцелевой детектор (MPD) на коллайдере NICA предназначен для исследований фазовой диаграммы ядерной материи при высоких плотностях барионов и поиск перехода ядерной материи в состояние деконфайнмента кварков и глюонов, известное как кварк-глюонная плазма (КГП). Детектор MPD будет построен в два этапа. Установка этапа 1 включает в себя времяпроекционную камеру (TPC), времяпролетный (TOF) детектор и электромагнитный калориметр (ECAL), охватывающие диапазон псевдобыстрот $|\eta| < 1$, а также быстрые передние счетчики FFD и передние адронные калориметры FHCAL. На втором этапе эксперимента предусмотрена установка внутреннего кремниевого трекера, а также переднего трекового детектора. Ниже представлен проект переднего трекового детектора, который позволит расширить покрытие эксперимента MPD по псевдобыстроте до $|\eta| < 2.5$.

4.2.1 Физическая программа

Термодинамическими переменными, количественно определяющими состояние ядерной материи, являются температура (T) и барионный химический потенциал (μ_B) [1]. При конечном химическом потенциале модели на основе КХД предсказывают фазовый переход первого рода в состояние деконфайнмента, а также существование критической точки. При этом уменьшение энергии ядерных столкновений позволяет достичь более высоких значений химического потенциала из-за уменьшения количества антикварков по сравнению с количеством кварков. При энергиях NICA значительная часть эволюции столкновений происходит до того, как ядра полностью проходят друг через друга, поэтому для описания динамики образовавшейся материи необходима полная трехмерная картина, а также детальное моделирование предравновесной стадии. В связи с этим для изучения динамики столкновений при энергиях NICA становится критически важно изучить зависимость различных наблюдаемых от быстроты.

4.2.1.1 Идентифицированные спектры частиц

Расширенное покрытие по псевдобыстроте позволило бы извлечь полные выходы мезонов и барионов. Изучение полных выходов мезонов и их отношений особенно важно ввиду обнаруженного в центральных столкновениях тяжелых ядер немонотонного поведения отношения выхода положительных каонов (K^+) к положительным пионам (π^+). Это поведение качественно согласуется с предсказаниями Стандартной модели ранней стадии (SMES) [2, 3], в которой кварки и глюоны выступают в качестве степеней свободы на ранней стадии столкновения при высоких энергиях. В рамках SMES этот пик в отношении выходов K^+ к π^+ (эффект “hot”), наблюдаемый при $\sqrt{s_{NN}}=8$ ГэВ, интерпретируется как указание на проявление перехода в состояние деконфайнмента, т.е. образования кварк-глюонной плазмы на ранней стадии столкновения. Однако в случае систем промежуточного размера такая структура не наблюдается (см. последние результаты по Ar-Sc столкновениям в эксперименте NA61/SHINE [4] на Рис. 4.2.1, слева).

Измерения спектров рождения легких мезонов в области больших быстрот также позволило бы извлечь обратный наклон T спектров по поперечной массе, который отражает температуру кинетической заморозки частиц в конечном состоянии. Уплотнение зависимости параметра T от энергии столкновения (эффект “step” или “ступенька”), измеренное в области центральных быстрот при энергиях в области $\sqrt{s_{NN}}=8$ ГэВ, было интерпретировано как признак образования смешанной адронно-кварковой фазы на ранних стадиях столкновения. Примечательно, что ступенька не наблюдается для систем промежуточного размера (см. Рис. 4.2.1, справа), что подчеркивает важность экспериментального сканирования по энергии и центральности столкновений для различных сталкивающихся ядер. Исследования обратного наклона T в зависимости от

быстроты открывают еще одно измерение в этих исследованиях, обеспечивая дополнительную чувствительность к уравнению состояния образующейся материи.

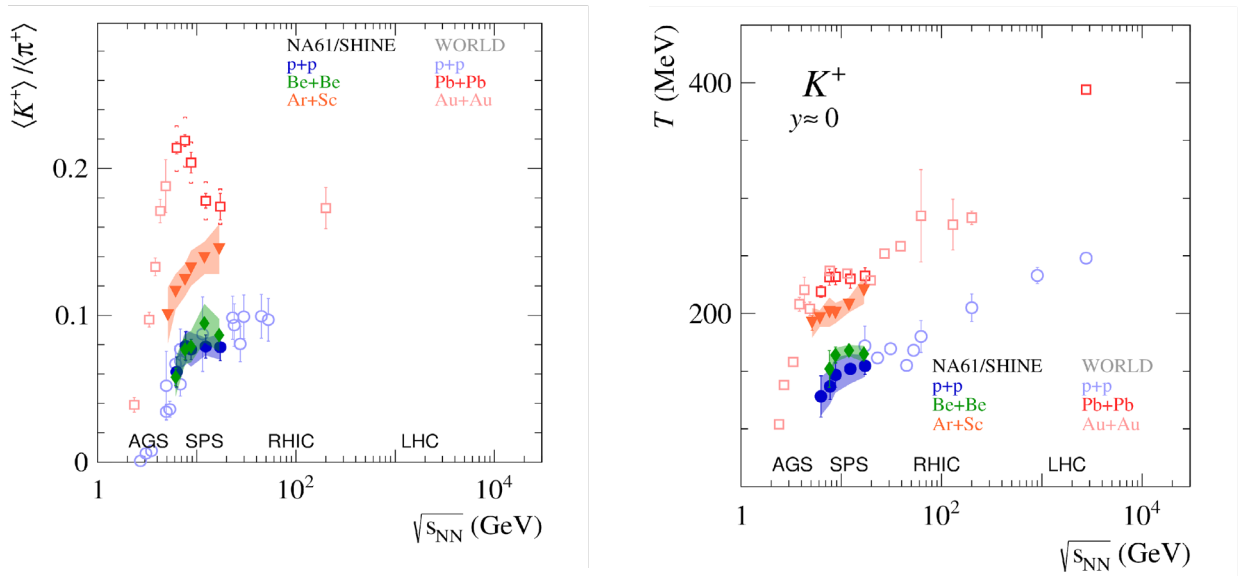


Рис 4.2.1. Отношение выхода K^+ к выходу π^+ (слева) и обратный наклон спектров K^+ (справа) в зависимости от энергии столкновения [4].

Помимо исследования выходов мезонов в зависимости от быстроты, особый интерес представляет измерение выходов протонов и легких ядер при больших быстротах, поскольку в этом случае ключевую роль играет эффект барионной остановки (baryon stopping), который определяет потери быстроты нуклонов-участников, вызванные взаимодействием с другим сталкивающимся ядром. В области центральных быстрот форма распределения dN/du для протонов имеет характерный минимум, который существенно усиливается при более низких $\sqrt{s_{NN}}$ (см. Рис 4.2.2.). Эта нетривиальная зависимость выходов от быстроты подчеркивает важность эффекта остановки барионов и различия механизмов рождения барионов и мезонов при энергиях NICA. Различия в поведении выходов барионов и мезонов указывают на различные термодинамические условия при разных энергиях, центральных и быстротах.

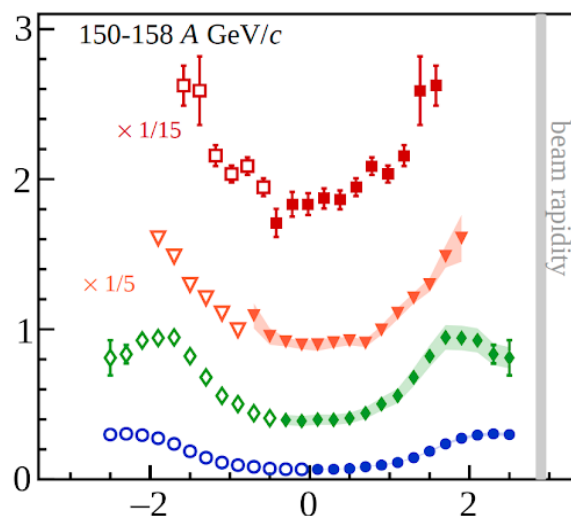


Рис. 4.2.2. Выходы протонов в зависимости от быстроты в различных системах столкновений: p+p (синий), центральные Be+Be (зеленый), центральные Ar+Sc (розовый) и центральные Pb+Pb (красный) [4].

Широкое покрытие по быстроте также позволит исследовать явление скейлинга распределений по псевдобыстроте в зависимости от $\eta' = \eta - y_{\text{beam}}$, где y_{beam} - быстрота пучка, обнаруженное в экспериментах BRAHMS и PHOBOS на коллайдере RHIC [5, 6, 7]. Для объяснения скейлинга была выдвинута гипотеза предельной фрагментации, основанная на предположении, что в высокоэнергетических столкновениях две налетающие частицы распадаются на фрагменты [8]. Согласно этой гипотезе при достаточно высоких энергиях дифференциальные выходы частиц достигают предельного значения и становятся независимыми от энергии в области быстрот около $y - y_{\text{beam}} \sim 0$, что также подразумевает предельное значение для распределений по псевдобыстроте в зависимости от η' [9].

Наконец, измеряя спектры легких адронов в широкой области быстрот, можно также исследовать температуру и барионный химический потенциал в зависимости от энергии, центральности столкновений и быстроты. Так, недавние результаты эксперимента STAR [10], дополненные ранее опубликованными результатами в области центральных быстрот [11], позволили исследовать зависимость термодинамических переменных в момент химической заморозки от быстроты. Аналогичные измерения в эксперименте MPD в широкой области быстрот позволят расширить наши знания о фазовой диаграмме КХД.

4.2.1.2 Измерения анизотропных потоков

Поведение ядерной материи, образующейся в ядро-ядерных столкновениях, хорошо описывается в рамках гидродинамических моделей, что дает доступ к уравнению состояния КХД в экстремальных условиях. Измерения анизотропных потоков [12] оказались особенно полезными для извлечения как свойств ядерной материи, так и нетривиальных начальных условий [13]. Анизотропное начальное состояние, образующееся в нецентральных ядро-ядерных столкновениях, приводит к анизотропным градиентам давления и, как следствие, к анизотропным азимутальным распределениям частиц в конечном состоянии относительно плоскости реакции. Измерение Фурье-коэффициентов v_n этих распределений позволяет исследовать свойства образовавшейся среды. В настоящее время большинство исследований сосредоточено на области центральных быстрот из-за отсутствия экспериментальных данных в передней области и недостаточного понимания механизмов рождения частиц в области фрагментации. Таким образом, измерения поведения направленного потока (v_1) и эллиптического потока (v_2) в широком диапазоне псевдобыстрот позволят получить ценные ограничения на трехмерное начальное состояние и эволюцию столкновений тяжелых ядер.

Измерения направленного потока. Первый коэффициент Фурье-разложения азимутальных распределений частиц (v_1), так называемый направленный поток, определяет боковое движение образующихся частиц и ядерных фрагментов в плоскости реакции. Он особенно интересен при энергиях NICA, так как связывает продольную и поперечную динамику, раскрывая трехмерный характер эволюции системы. Направленный поток также чувствителен к ранней стадии столкновений, особенно в области фрагментации, где он, как полагают, генерируется на стадии начального перекрытия ядер (~ 1 фм/с) [14, 15]. Таким образом, измерения направленного потока позволяют исследовать поведение коллективной динамики на стадии термализации, что дает ценные экспериментальные указания для моделей предравновесной стадии [16]. С другой стороны, модельные исследования показали, что направленный поток чувствителен к значению вязкости горячей КХД-материи [17] (см. Рис. 4.2.3.). Наконец, зависимость направленного потока от псевдобыстроты оказалась чувствительна к механизму барионной остановки, что может дать новую информацию для исследования уравнения состояния в столкновениях тяжелых ионов [18, 19, 20, 21].

Проведенные ранее измерения показали, что сигнал направленного потока наиболее ярко выражен при больших быстротах [22, 23, 24, 25]. Поэтому чувствительность v_1 к свойствам начального состояния и коэффициентам переноса может быть сильнее в области больших быстрот. Одно из примечательных наблюдений на коллайдере RHIC заключалось в том, что зависимость направленного потока от псевдобыстроты проявляет свойства скейлинга, аналогичного скейлингу плотности заряженных частиц $dN/d\eta'$, которое обычно объясняется в рамках модели предельной фрагментации [22, 23, 25, 26, 27, 28] (см. Рис. 4.2.4.). Если скейлинг плотности заряженных частиц вблизи $\eta' \sim 0$ можно объяснить наличием невзаимодействующих нуклонов, на которых столкновения оказывают минимальное влияние, скейлинг величины направленного потока интуитивно непонятен, поскольку значение v_1 обычно тесно связано с динамикой столкновений. Большие значения v_1 в передней области быстрот обычно связывают с отклонением ядерных фрагментов, однако в таком представлении трудно объяснить наблюдаемую независимость направленного потока от энергии в окрестности $\eta' \sim 0$.

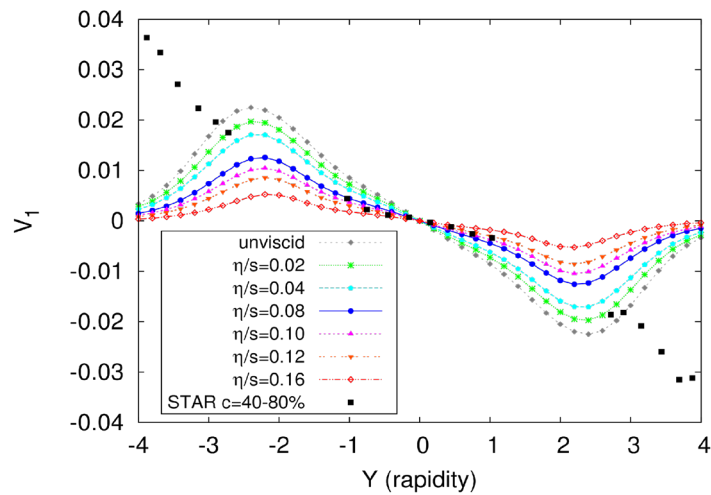


Рис. 4.2.3. Направленный поток пионов для различных значений η/s в сравнении с данными STAR [25].

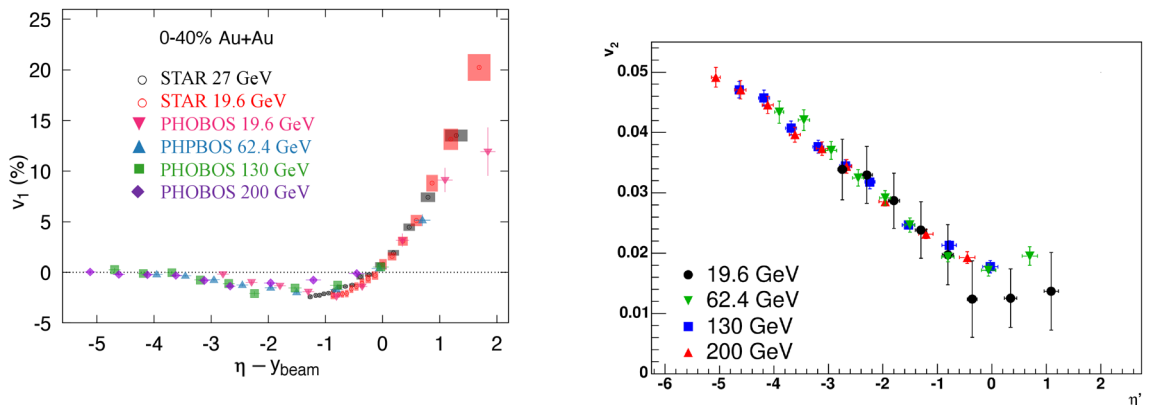


Рис. 4.2.4. Измерения направленного потока (слева) и эллиптического потока (справа) в зависимости от $\eta' = \eta - y_{\text{beam}}$ в Au-Au столкновениях при центральности 0-40% для различных энергий столкновений [29, 28, 30].

Измерения эллиптического потока. До настоящего времени измерения эллиптического потока (v_2) проводились в основном в области центральных быстрот, что ограничивало спектр наблюдаемых параметров, используемых для исследования динамики столкновений. При этом измерения v_2 , проведенные коллаборацией PHOBOS при различных энергиях столкновений [28], выявили замечательные особенности поведения v_2 в зависимости от псевдобыстроты. Подобно картине предельной фрагментации плотности заряженных частиц, поведение v_2 повторяет зависимость $dN_{ch}/d\eta$ с максимумом в области центральных быстрот и спадом в области фрагментации. Было бы важно проследить поведение этой зависимости для различных систем столкновений при энергиях NICA.

Кроме того, было показано, что измерение эллиптического потока на больших быстротах оказывается чувствительно к температурной зависимости вязкости ядерной материи [31], см. сравнение измерений PHOBOS с различными предположениями о температурной зависимости на Рис. 4.2.5. Измеренная зависимость служит убедительным доказательством того, что вязкость должна расти с понижением температуры. Это наблюдение подчеркивает важность измерения зависимости эллиптического потока от быстроты при энергиях NICA.

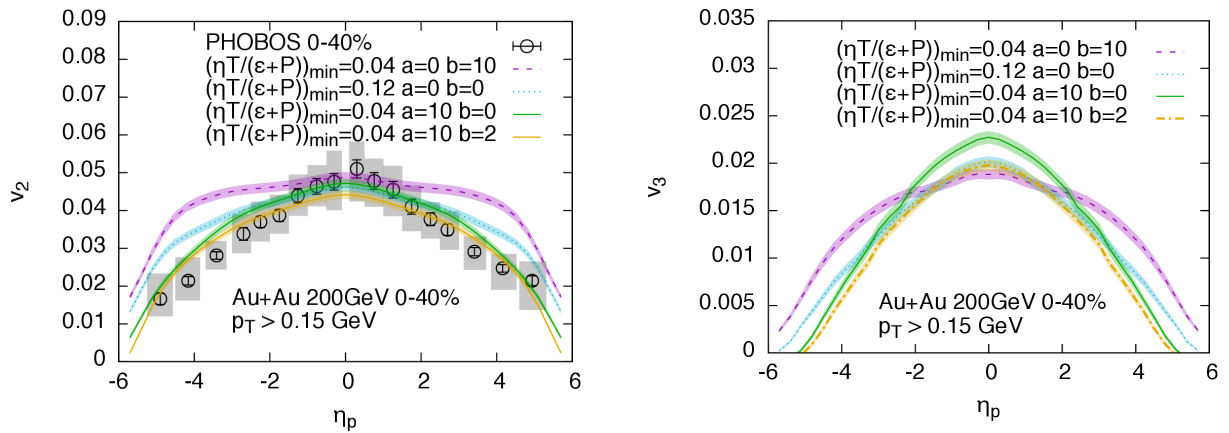


Рис. 4.2.5. Коэффициенты v_2 (слева) и v_3 (справа) в зависимости от псевдобыстроты для различных предположений о температурной зависимости вязкости [31].

4.2.1.3 Измерения глобальной поляризации

Из-за наличия большого начального углового момента в столкновениях тяжелых ядер образованная ядерная материя приобретает вихревые свойства. Это, в свою очередь, отражается на поляризации образующихся частиц, которую обычно называют глобальной поляризацией [32, 33]. С момента первых измерений ненулевой глобальной поляризации Λ -гиперонов в столкновениях тяжелых ионов она была детально изучена в широком диапазоне энергий столкновений [34, 35, 36, 37, 38]. В частности, было показано, что глобальная поляризация растет с уменьшением энергии столкновений, достигая $\approx 5\text{-}7\%$ при $\sqrt{s_{NN}} = 2.4\text{-}3$ ГэВ [36, 38].

Тенденция роста глобальной поляризации с уменьшением энергии столкновений качественно согласуется с теоретическими предсказаниями. Однако детали эволюции поляризации при более низких энергиях остаются неясными. Недавние исследования указали на существование пика с максимальным значением поляризации при энергиях NICA [39, 40, 41, 42, 43]. Расширение измерений глобальной поляризации область больших быстрот может дать дополнительные сведения о механизме её образования.

4.2.1.4. Другие возможности

Ниже представлен список других возможностей, открывающихся в случае установки переднего трекера:

- Повышение точности определения центральности и плоскости реакции, а также эффективности триггера, что особенно важно для столкновений легких ядер.
- Торцевые элементы детектора ТРС, расположенные перед передним трекером, могут служить для конвертации фотонов в электрон-позитронные пары, что даст возможность изучить спектры и эффективную температуру тепловых фотонов в области больших быстрот и пролить свет на эволюцию горячей и плотной материи, образующейся в столкновениях тяжелых ионов на NICA [44].
- Исследования двухчастичных корреляций и многочастичных кумулятивных распределений также выиграют от расширенного аксептанса, что даст дополнительные инструменты для измерения анизотропного потока.
- Установка переднего трекера и перевод ТРС в режим непрерывного считывания может позволить получить доступ к различным наблюдаемым программы детектора SPD на коллайдере NICA [45].
- Расширенный аксептанса может оказаться полезным для исследований дифракционных процессов в протон-протонных столкновениях, таких как поиск инстантонов [46].

4.2.2. Конструкция переднего трекера

Предлагаемая конструкция переднего трекера показана на Рис. 4.2.6. Детектор состоит из 5 трековых станций с каждой стороны от точки взаимодействия. Установка детектора в существующем соленоидальном магнитном поле создает серьезную проблему для реконструкции трека: разрешение по импульсу в соленоидальном поле определяется радиальным расстоянием, доступным для измерения кривизны трека, которое сильно уменьшается при больших η . Чтобы улучшить разрешение по импульсу при существующих ограничениях, есть два варианта: минимизировать эффективную радиационную длину детектора для уменьшения эффектов многократного рассеяния и/или улучшить разрешение детектора. Эти требования сильно сужают выбор технологий детекторов. Далее в качестве базового варианта для переднего трекера рассматриваются тонкоззорные камеры (sTGC).

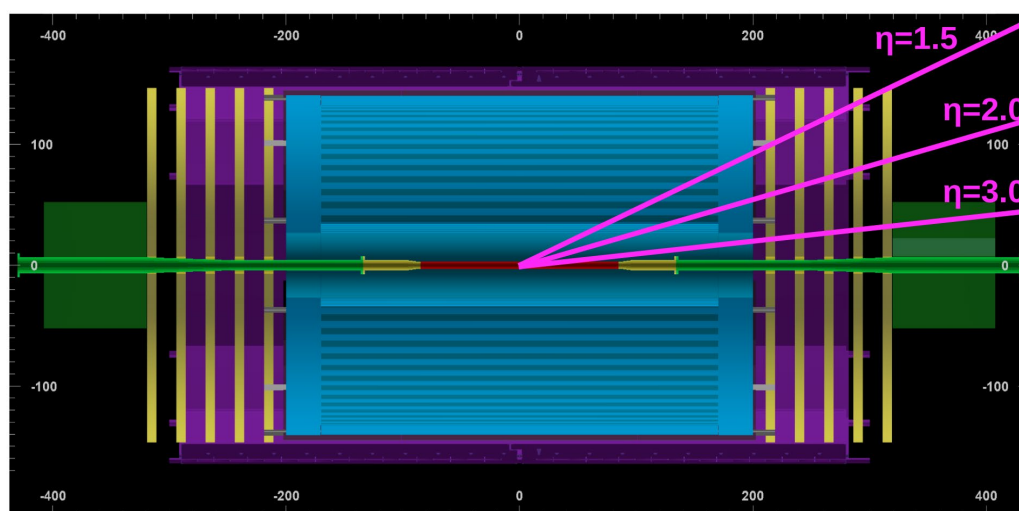


Рис. 4.2.6. Предлагаемая схема переднего трекера.

4.2.3. Интеграция переднего трекера в установку MPD

Станции переднего трекера могут быть размещены в зазорах между детекторами ТРС и FHCa1 по обе стороны от точки взаимодействия на радиальном расстоянии от $r_{\min}=35,7$ см до $r_{\max}=130$ см от оси пучка. Согласно последним инженерным чертежам (см. Рис. 4.2.7.), на расстоянии $|z|=250$ см от номинальной точки взаимодействия предусмотрена опора пучковой трубы, поэтому для установки трекера остаются два объема: на расстоянии по оси z от 210 до 245 см и от 255 до 295 см от точки взаимодействия. При необходимости поддержка пучковой трубы может быть закреплена на опорных конструкциях будущего трекера. Эти радиальные и продольные границы накладывают следующие ограничения на аксептанс переднего трекера по псевдобыстроте: $1,55 < \eta < 2,47$.

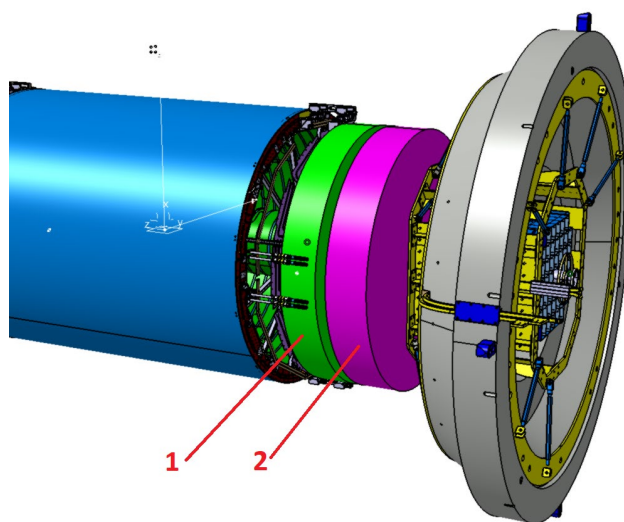


Рис. 4.2.7. Инженерный чертеж, на котором показаны два объема (зеленый и пурпурный), доступные для установки станций переднего трекера.

4.2.4. Разрешение по импульсу треков

Разрешение по импульсу для прототипа переднего трекера было исследовано с помощью пакета ACTS [47]. Пакет ACTS предоставляет набор инструментов для высокоуровневой реконструкции треков, включая фильтр Калмана для определения параметров треков, инструменты для поиска первичных трековых сегментов, комбинаторный фильтр Калмана для поиска треков, а также алгоритмы реконструкции вершин. Кроме того, пакет ACTS содержит простой и быстрый транспортный алгоритм FATRAS, который позволяет моделировать траектории частиц в магнитном поле с учетом потерь энергии и отклонения траектории заряженных частиц в веществе в результате многократного рассеяния.

Для исследования разрешения треков в ACTS была разработана упрощенная модель переднего детектора, состоящая из 5 слоев, расположенных по z в диапазоне от 210 до 300 см от точки взаимодействия, с эффективной радиационной длиной $1\% X_0$. Исследование было проведено отдельно для пионов и протонов с поперечными импульсами от 0.1 до 1 ГэВ, в трех промежутках по псевдобыстроте: 1.6, 1.9 и 2.2. Монте-Карло хиты, полученные в результате моделирования в FATRAS, были размыты по Гауссу по осям x и y со стандартным отклонением 80 мкм. Встроенный в ACTS алгоритм поиска первичных трековых сегментов был адаптирован для построения сегментов треков в передней геометрии на основе хитов на первых трех слоях переднего детектора, а комбинаторный фильтр Калмана использовался для поиска хитов на следующих слоях. Полученное разрешение по поперечному импульсу пионов и протонов в различных диапазонах по псевдобыстроте показано на Рис. 4.2.8. Разрешение по импульсу варьируется от 3% до 10%

в зависимости от поперечного импульса и диапазона по псевдобыстроте. Линейный рост при больших поперечных импульсах обусловлен пространственным разрешением, а ухудшение разрешения при малых импульсах вызвано эффектами многократного рассеяния, которые оказываются более значительными для протонов.

Полученное разрешение по импульсу оказалось в полном соответствии с аналитическими оценками размытия разрешения из-за многократного рассеяния и пространственного разрешения хитов, приведенными в работе [48]. С одной стороны, это согласие аналитических оценок с результатами моделирования в ACTS подтверждает корректность реализации алгоритмов реконструкции треков в ACTS. С другой стороны, это позволяет исследовать влияние возможных изменений разрешения хитов и эффективной радиационной длины на разрешение по импульсу частиц без проведения детального моделирования.

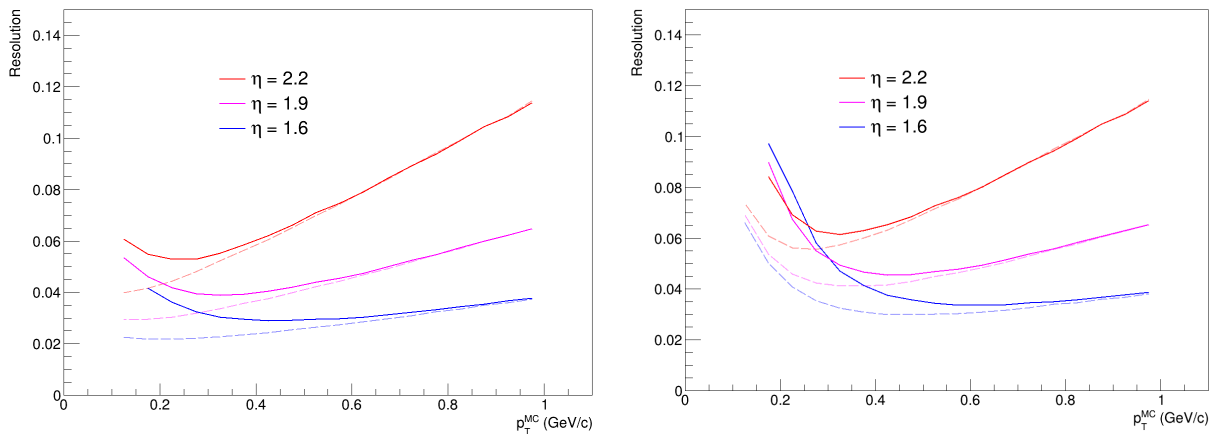


Рис. 4.2.8. Разрешение по поперечному импульсу для пионов (слева) и протонов (справа) в различных диапазонах по η . Пунктирные линии соответствуют автономному трекеру, а сплошные линии соответствуют разрешению трекера, дополненного торцевыми элементами ТРС.

Однако влияние торцевых элементов ТРС, стоящих перед будущим трекером, на разрешение по импульсу вряд ли можно оценить аналитически. Чтобы оценить влияние торцов ТРС, геометрия трекера FATRAS была дополнена простой моделью торцевых элементов ТРС, включающей область считывающих камер с радиационной длиной $25\% X_0$ и область каркаса с радиационной длиной $110\% X_0$. Полученное разрешение по импульсу для треков, проходящих через область считывающих камер, показано на Рис. 4.2.8. в сравнении со разрешением для автономного трекера. Экстраполяция реконструированных треков через торцевые элементы ТРС в область взаимодействия приводит к значительному ухудшению разрешения по импульсу, наиболее заметному в области малых p_T . Стоит отметить, что влияние торцевых элементов ТРС может быть уменьшено в случае замены считывающих камер MWPC на детекторы на основе GEM.

Следует также отметить, что разрешение по импульсу для рассматриваемого прототипа трекера остается в пределах 3-10% в диапазоне η от 1.6 до 2.2 и $p_T < 1$ ГэВ, что достаточно для измерений, обсуждавшихся ранее. Разрешение трекера по импульсу может быть улучшено, если треки, реконструированные в перднем детекторе, будут привязаны к трековым сегментам в ТРС. С другой стороны, треки в ТРС могут служить в качестве затравочных трековых сегментов для пердного трекинга. Исследование обоих вариантов требует разработки специализированных алгоритмов и может быть выполнено на следующих этапах проекта.

4.2.5. Эффективность реконструкции треков

Исследование эффективности поиска треков, представленное в предыдущем разделе, было выполнено для одиночных частиц и не учитывало высокую множественность, которая ожидается в столкновениях тяжелых ядер в NICA. Кроме того, упрощенное моделирование в FATRAS не позволяет оценить влияние адронных взаимодействий частиц с материалом ТРС и образование вторичных частиц. Для того чтобы оценить влияние этих эффектов на эффективность поиска треков и долю фейковых треков, в `trdroot` был реализован более реалистичный прототип переднего трекера, а для Монте-Карло моделирования первичных треков использовался генератор UrQMD (центральные Au-Au столкновения при $\sqrt{s_{NN}}=11$ ГэВ). Информация о хитах в переднем трекере затем использовались в качестве входных данных для реконструкции треков в ACTS. На Рис. 4.2.9. представлены характерные распределения хитов и реконструированных треков в одном из Au-Au столкновений при высокой множественности. Как видно из рисунка, большинство треков были правильно реконструированы, несмотря на высокую плотность хитов.

Соответствующая эффективность реконструкции треков для первичных пионов и протонов показана на Рис. 4.2.10. в различных областях по псевдобыстроте. Эффективность реконструкции достигает 90-95% в зависимости от диапазона по псевдобыстроте. Потери эффективности реконструкции связаны с распадами пионов на пути к переднему детектору, а также с неупругими адронными взаимодействиями пионов и протонов с веществом на торцах ТРС.

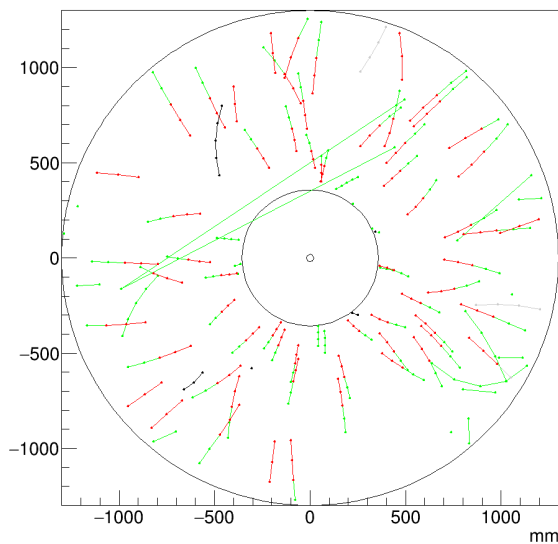


Рис. 4.2.9. Проекция треков, восстановленных в переднем детекторе в столкновении Au-Au с высокой множественностью при $\sqrt{s_{NN}}=11$ ГэВ. Затравочные трековые сегменты и реконструированные треки показаны красными и зелеными линиями соответственно.

В заключение можно отметить, что алгоритмы ACTS были успешно адаптированы для реконструкции треков в переднем детекторе. Инструменты ACTS также могут быть использованы для привязки треков к трековым сегментам в ТРС и реконструкции вторичных вершин.

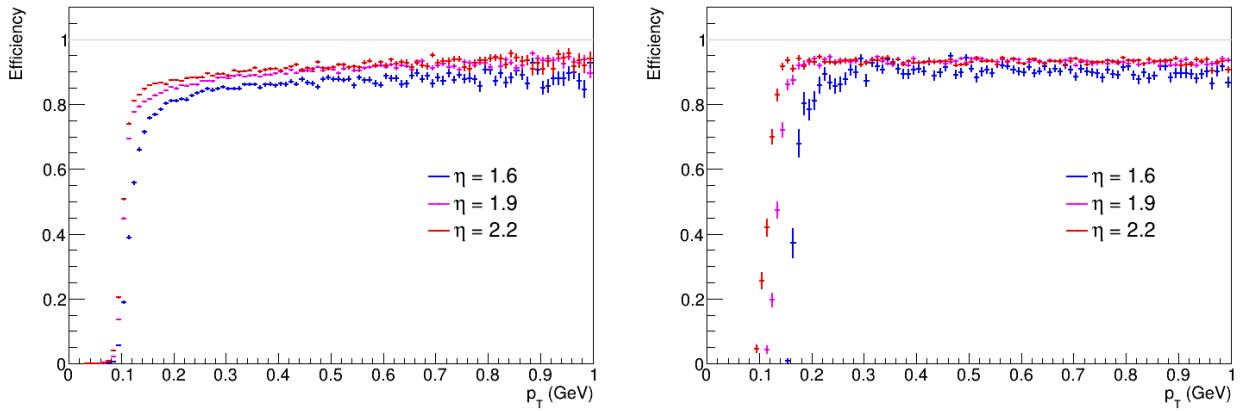


Рис. 4.2.10. Эффективность поиска треков в переднем детекторе для пионов (слева) и протонов (справа) в зависимости от p_T в различных областях η .

4.2.6. Идентификация частиц в области больших быстрот

Большинство физических наблюдаемых, описанных ранее, требуют идентификации частиц в передней области. Естественным выбором является установка за передним трекером времяпролетного детектора [49] на основе многозачорных резистивных плоских камер (MRPC) на расстоянии ~ 3 м от точки взаимодействия. Большая длина траекторий частиц в этом случае является важным преимуществом, однако ограниченное разрешение по импульсу может значительно сократить кинематический диапазон, доступный для идентификации частиц. Для того чтобы оценить возможность разделения пионов, каонов и протонов в различных диапазонах импульсов и быстрот, была разработана простая модель, основанная на разрешении времени пролета со стандартным отклонением 50 пс, которое является типичным для современных детекторов на основе RPC, и разрешением по импульсу в соответствии с оценками, представленными ранее. Распределения квадратов инвариантных масс в зависимости от импульса частиц для протонов, пионов и каонов представлены на Рис. 4.2.11. для двух диапазонов по псевдобыстроте. Детектор TOF с разрешением 50 пс позволит эффективно разделять протоны и каоны вплоть до импульсов порядка 3-4 ГэВ, а разделение каонов и пионов будет возможно до импульсов порядка 2-3 ГэВ в зависимости от диапазона псевдобыстроты.

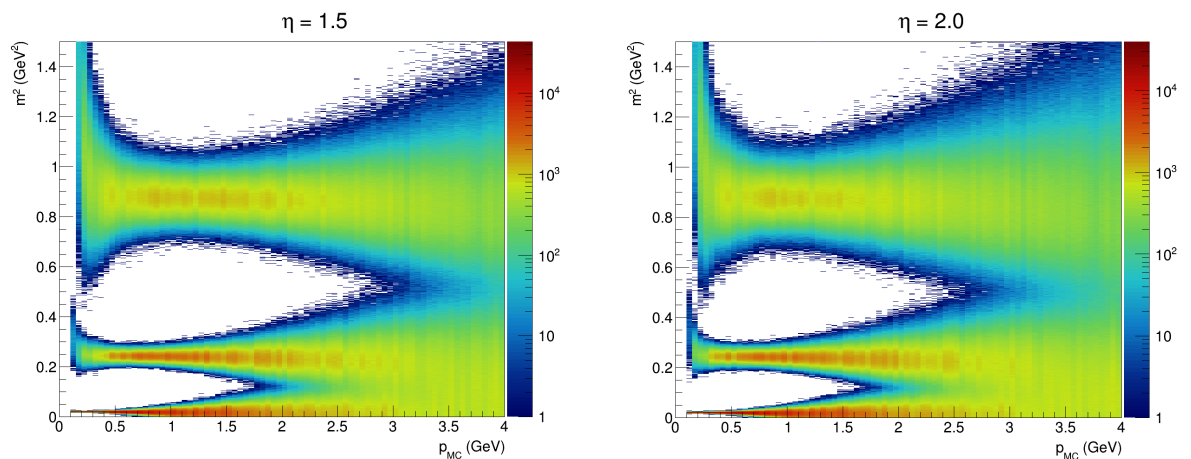


Рис. 4.2.11. Распределения квадрата инвариантной массы в зависимости от импульса частицы при $\eta=1.5$ (слева) и $\eta=2.0$ (справа).

Ссылки

- [1] A. Sorensen *et al.*, “Dense nuclear matter equation of state from heavy-ion collisions,” *Prog. Part. Nucl. Phys.* **134** (2024) 104080, arXiv:2301.13253 [nucl-th].
- [2] M. Gazdzicki and M. I. Gorenstein, “On the early stage of nucleus-nucleus collisions,” *Acta Phys. Polon. B* **30** (1999) 2705, arXiv:hep-ph/9803462.
- [3] M. Gazdzicki, M. Gorenstein, and P. Seyboth, “Onset of deconfinement in nucleus-nucleus collisions: Review for pedestrians and experts,” *Acta Phys. Polon. B* **42** (2011) 307–351, arXiv:1006.1765 [hep-ph].
- [4] NA61/SHINE Collaboration, H. Adhikary *et al.*, “Measurements of π^\pm , K^\pm , p and \bar{p} spectra in 40Ar+45Sc collisions at 13A to 150A GeV/c,” *Eur. Phys. J. C* **84** no. 4, (2024) 416, arXiv:2308.16683 [nucl-ex]. [5] BRAHMS Collaboration, I. G. Bearden *et al.*, “Charged particle densities from Au+Au collisions at $s(NN)^{1/2} = 130$ -GeV,” *Phys. Lett. B* **523** (2001) 227–233, arXiv:nucl-ex/0108016.
- [6] BRAHMS Collaboration, I. G. Bearden *et al.*, “Forward and midrapidity like-particle ratios from p + p collisions at $s^{1/2} = 200$ -GeV,” *Phys. Lett. B* **607** (2005) 42–50, arXiv:nucl-ex/0409002.
- [7] PHOBOS Collaboration, B. Alver *et al.*, “Phobos results on charged particle multiplicity and pseudorapidity distributions in Au+Au, Cu+Cu, d+Au, and p+p collisions at ultra-relativistic energies,” *Phys. Rev. C* **83** (2011) 024913, arXiv:1011.1940 [nucl-ex].
- [8] J. Benecke, T. T. Chou, C.-N. Yang, and E. Yen, “Hypothesis of Limiting Fragmentation in High-Energy Collisions,” *Phys. Rev.* **188** (1969) 2159–2169.
- [9] B. B. Back *et al.*, “The Significance of the fragmentation region in ultrarelativistic heavy ion collisions,” *Phys. Rev. Lett.* **91** (2003) 052303, arXiv:nucl-ex/0210015.
- [10] STAR Collaboration, M. Harasty, “Particle production in Au+Au collisions at beam energy scan II energies at STAR,” *EPJ Web Conf.* **296** (2024) 14009.
- [11] STAR Collaboration, L. Adamczyk *et al.*, “Bulk Properties of the Medium Produced in Relativistic Heavy-Ion Collisions from the Beam Energy Scan Program,” *Phys. Rev. C* **96** no. 4, (2017) 044904, arXiv:1701.07065 [nucl-ex].
- [12] S. A. Voloshin, A. M. Poskanzer, and R. Snellings, “Collective phenomena in non-central nuclear collisions,” *Landolt-Bornstein* **23** (2010) 293–333, arXiv:0809.2949 [nucl-ex].
- [13] B. H. Alver, C. Gombeaud, M. Luzum, and J.-Y. Ollitrault, “Triangular flow in hydrodynamics and transport theory,” *Phys. Rev. C* **82** (2010) 034913, arXiv:1007.5469 [nucl-th].
- [14] H. Sorge, “Elliptical flow: A Signature for early pressure in ultrarelativistic nucleus-nucleus collisions,” *Phys. Rev. Lett.* **78** (1997) 2309–2312, arXiv:nucl-th/9610026.
- [15] N. Herrmann, J. P. Wessels, and T. Wienold, “Collective flow in heavy ion collisions,” *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* **49** (1999) 581–632.
- [16] STAR Collaboration, M. M. Aggarwal *et al.*, “An Experimental Exploration of the QCD Phase Diagram: The Search for the Critical Point and the Onset of De-confinement,” arXiv:1007.2613 [nucl-ex].
- [17] F. Becattini, G. Inghirami, V. Rolando, A. Beraudo, L. Del Zanna, A. De Pace, M. Nardi, G. Pagliara, and V. Chandra, “A study of vorticity formation in high energy nuclear collisions,” *Eur. Phys. J. C* **75** no. 9, (2015) 406, arXiv:1501.04468 [nucl-th]. [Erratum: *Eur.Phys.J.C* **78**, 354 (2018)].

- [18] Y. B. Ivanov, “Directed flow in heavy-ion collisions and its implications for astrophysics,” *Universe* **3** no. 4, (2017) 79, arXiv:1711.03461 [nucl-th].
- [19] L. Du, C. Shen, S. Jeon, and C. Gale, “Probing initial baryon stopping and equation of state with rapidity-dependent directed flow of identified particles,” *Phys. Rev. C* **108** no. 4, (2023) L041901, arXiv:2211.16408 [nucl-th].
- [20] Z.-F. Jiang, C. B. Yang, and Q. Peng, “Directed flow of charged particles within idealized viscous hydrodynamics at energies available at the BNL Relativistic Heavy Ion Collider and at the CERN Large Hadron Collider,” *Phys. Rev. C* **104** no. 6, (2021) 064903, arXiv:2111.01994 [hep-ph].
- [21] Y. Nara, H. Niemi, J. Steinheimer, and H. Stöcker, “Equation of state dependence of directed flow in a microscopic transport model,” *Phys. Lett. B* **769** (2017) 543–548, arXiv:1611.08023 [nucl-th].
- [22] STAR Collaboration, J. Adams *et al.*, “Directed flow in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=62$ GeV,” *Phys. Rev. C* **73** (2006) 034903, arXiv:nucl-ex/0510053.
- [23] STAR Collaboration, J. Adams *et al.*, “Azimuthal anisotropy at RHIC: The First and fourth harmonics,” *Phys. Rev. Lett.* **92** (2004) 062301, arXiv:nucl-ex/0310029. [Erratum: *Phys.Rev.Lett.* 127, 069901 (2021)].
- [24] STAR Collaboration, J. Adams *et al.*, “Azimuthal anisotropy in Au+Au collisions at $s_{NN}^{1/2} = 200$ -GeV,” *Phys. Rev. C* **72** (2005) 014904, arXiv:nucl-ex/0409033.
- [25] STAR Collaboration, B. I. Abelev *et al.*, “System-size independence of directed flow at the Relativistic Heavy-Ion Collider,” *Phys. Rev. Lett.* **101** (2008) 252301, arXiv:0807.1518 [nucl-ex].
- [26] PHOBOS Collaboration, B. B. Back *et al.*, “Energy dependence of directed flow over a wide range of pseudorapidity in Au + Au collisions at RHIC,” *Phys. Rev. Lett.* **97** (2006) 012301, arXiv:nucl-ex/0511045.
- [27] STAR Collaboration, G. Agakishiev *et al.*, “Directed and elliptic flow of charged particles in Cu+Cu collisions at $\sqrt{s_{NN}}= 22.4$ GeV,” *Phys. Rev. C* **85** (2012) 014901, arXiv:1109.5446 [nucl-ex].
- [28] PHOBOS Collaboration, B. B. Back *et al.*, “Energy dependence of elliptic flow over a large pseudorapidity range in Au+Au collisions at RHIC,” *Phys. Rev. Lett.* **94** (2005) 122303, arXiv:nucl-ex/0406021.
- [29] STAR Collaboration, “”, “Measurement of directed flow in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}= 19.6$ and 27 GeV with the STAR Event Plane Detector,” arXiv:2406.18213 [nucl-ex].
- [30] STAR Collaboration, X. Liu, “First order event plane correlated directed and triangular flow in Au+Au collisions from BES-II at STAR,” *EPJ Web Conf.* **296** (2024) 05013.
- [31] G. Denicol, A. Monnai, and B. Schenke, “Moving forward to constrain the shear viscosity of QCD matter,” *Phys. Rev. Lett.* **116** no. 21, (2016) 212301, arXiv:1512.01538 [nucl-th].
- [32] S. A. Voloshin, “Polarized secondary particles in unpolarized high energy hadron-hadron collisions?,” arXiv:nucl-th/0410089.
- [33] Z.-T. Liang and X.-N. Wang, “Spin alignment of vector mesons in non-central A+A collisions,” *Phys. Lett. B* **629** (2005) 20–26, arXiv:nucl-th/0411101.

- [34] STAR Collaboration, L. Adamczyk *et al.*, “Global Λ hyperon polarization in nuclear collisions: evidence for the most vortical fluid,” *Nature* **548** (2017) 62–65, arXiv:1701.06657 [nucl-ex].
- [35] STAR Collaboration, J. Adam *et al.*, “Global polarization of Λ hyperons in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV,” *Phys. Rev. C* **98** (2018) 014910, arXiv:1805.04400 [nucl-ex].
- [36] STAR Collaboration, M. S. Abdallah *et al.*, “Global Λ -hyperon polarization in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=3$ GeV,” *Phys. Rev. C* **104** no. 6, (2021) L061901, arXiv:2108.00044 [nucl-ex].
- [37] STAR Collaboration, M. I. Abdulhamid *et al.*, “Global polarization of Λ and Λ hyperons in Au+Au collisions at $s_{NN}=19.6$ and 27 GeV,” *Phys. Rev. C* **108** no. 1, (2023) 014910, arXiv:2305.08705 [nucl-ex].
- [38] HADES Collaboration, R. Abou Yassine *et al.*, “Measurement of global polarization of Λ hyperons in few-GeV heavy-ion collisions,” *Phys. Lett. B* **835** (2022) 137506, arXiv:2207.05160 [nucl-ex].
- [39] Y. B. Ivanov, “Global Λ polarization in moderately relativistic nuclear collisions,” *Phys. Rev. C* **103** no. 3, (2021) L031903, arXiv:2012.07597 [nucl-th].
- [40] V. Voronyuk, E. E. Kolomeitsev, and N. S. Tsegelnik, “Hyperon global polarization in heavy-ion collisions at NICA energies. Feed-down effects and the role of Σ^0 hyperons,” arXiv:2305.10792 [nucl-th].
- [41] Y. Guo, J. Liao, E. Wang, H. Xing, and H. Zhang, “Hyperon polarization from the vortical fluid in low-energy nuclear collisions,” *Phys. Rev. C* **104** no. 4, (2021) L041902, arXiv:2105.13481 [nucl-th].
- [42] F. Becattini and L. Tinti, “The Ideal relativistic rotating gas as a perfect fluid with spin,” *Annals Phys.* **325** (2010) 1566–1594, arXiv:0911.0864 [gr-qc].
- [43] A. Ayala, I. Dominguez, I. Maldonado, and M. E. Tejeda-Yeomans, “An Improved Core-Corona Model for Λ and Λ Polarization in Relativistic Heavy-Ion Collisions,” *Particles* **6** no. 1, (2023) 405–415.
- [44] E. Kryshen, N. Burmasov, D. Ivanishchev, D. Kotov, M. Malaev, V. Riabov, and Y. Ryabov, “Prospects for Photon Conversion Measurements in the Future MPD Experiment at NICA,” *Phys. Part. Nucl.* **54** no. 4, (2023) 613–618.
- [45] SPD Collaboration, V. Abazov *et al.*, “Technical Design Report of the Spin Physics Detector at NICA,” arXiv:2404.08317 [hep-ex].
- [46] V. A. Khoze, V. V. Khoze, D. L. Milne, and M. G. Ryskin, “Central instanton production,” *Phys. Rev. D* **105** no. 3, (2022) 036008, arXiv:2111.02159 [hep-ph].
- [47] X. Ai *et al.*, “A Common Tracking Software Project,” *Comput. Softw. Big Sci.* **6** no. 1, (2022) 8, arXiv:2106.13593 [physics.ins-det].
- [48] R. L. Gluckstern, “Uncertainties in track momentum and direction, due to multiple scattering and measurement errors,” *Nucl. Instrum. Meth.* **24** (1963) 381–389.
- [49] V. Baryshnikov *et al.*, “Status of the Time-of-Flight System of the MPD Experiment at the NICA Collider,” *Phys. Atom. Nucl.* **86** no. 5, (2023) 788–795.

4.3. Торцевой времяпролетный детектор ЕТОФ.

4.3.1. Конструкция торцевых ЕТОФ детекторов.

На втором этапе развития многоцелевого детектора МРД планируется расширить область регистрации заряженных частиц до псевдобыстрот $|\eta| < 2.5$. Для идентификации частиц в данном диапазоне предлагается дополнить времяпролетную систему TOF двумя торцевыми детекторами ЕТОФ (end-cup TOF) в виде колец (Рис. 4.3.1.).

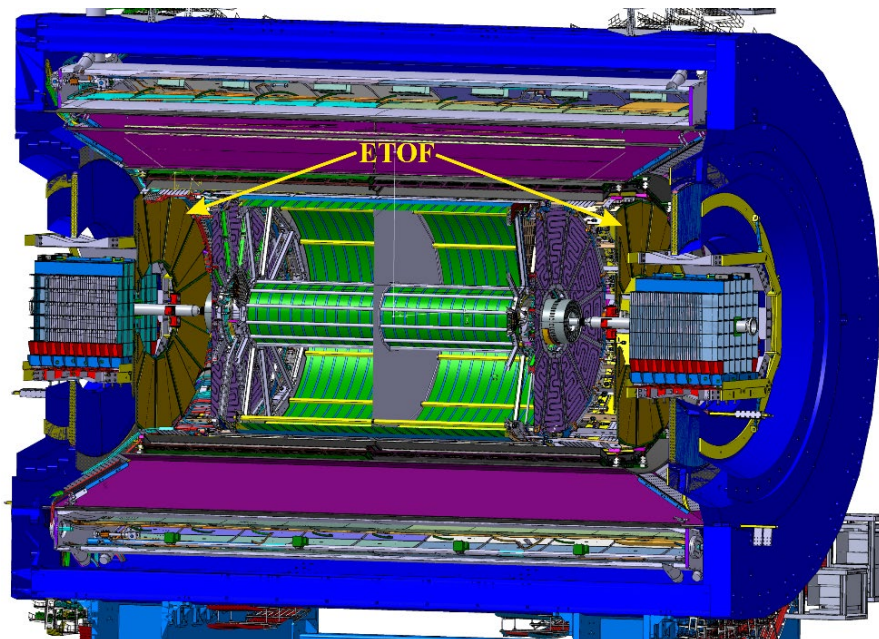


Рис. 4.3.1. Предполагаемое расположение колец ЕТОФ в МРД.

Кольца ЕТОФ будут, как и цилиндрическая часть TOF, собраны из многозачорных резистивных плоскопараллельных камер (МРПК). Данный тип детектора зарекомендовал себя как надежный и точный инструмент измерения времени пролета частиц. Для изготовления колец ЕТОФ предлагается конструкция МРПК в виде трапеции (Рис. 4.3.2.).

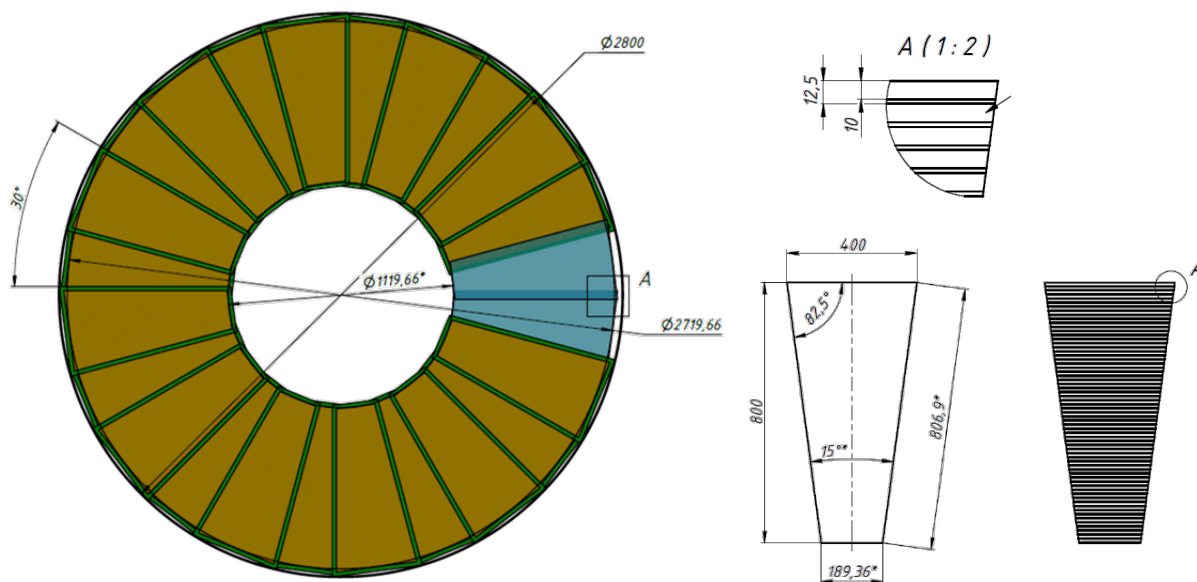


Рис. 4.3.2. Конструкция кольца ЕТОФ на базе трапецидальной МРПК.

Считывающие электроды такой МРПК предлагается сделать в виде стрипов той же ширины, что и в детекторах барреля TOF. Это позволит использовать стандартный принцип считывания дифференциальных сигналов с электродов. В предлагаемой выше конструкции детектор содержит 64 стрипа, которые, традиционно, будут считываться с обеих сторон для восстановления координаты частицы вдоль стрипа. Таким образом, одно кольцо ЕТОФ содержит 24 МРПК по 64 стрипа, считываемых с двух сторон. Итого, для считывания сигналов с одного кольца ЕТОФ необходимо 3072 канала электроники. На весь детектор – 6144 канала. Такое количество каналов позволяет использовать такую же комбинацию электроники на базе микросхем NINO и НРТДС, что и в базовой конфигурации TOF MPD. Но, необходимо будет разрабатывать новые платы предусилителей-дискриминаторов, так как красность каналов 24, как в предусилителе TOF, не подходит детекторам ЕТОФ, в которых 64 канала. Наиболее вероятен вариант 16-канальной платы усилителя. В связи с этим придется модернизировать также и вход ВЦП, так как разъем СХР предназначен для 24 дифференциальных пар.

Предварительное моделирование характеристик предлагаемой конструкции ЕТОФ в MPDRoot показало, что средняя заполняемость каналов составляет около 8% (Рис. 4.3.3.). При этом по радиальному распределению множественности видно, что вероятность множественных попаданий растет при приближении к оси пучка и может превысить 10%. Это связано, в основном с большим потоком вторичных электронов из вещества считывающих плоскостей время-проекционной камеры ТРС.

Предварительная оценка возможностей идентификации при помощи ЕТОФ, даже с учетом низкого импульсного разрешения трековых детекторов в области псевдобыстрот в области $1.5 < |\eta| < 2.5$, показала высокую эффективность разделения заряженных частиц с импульсами до 2 ГэВ/с (Рис. 4.3.4.).

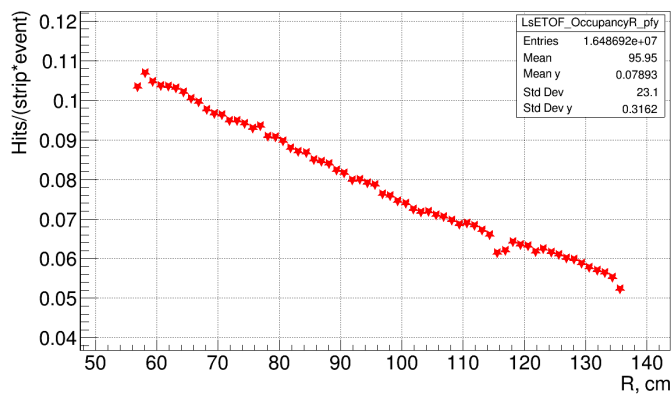


Рис. 4.3.3. Распределение по R заполняемости каналов ЕТОФ при энергии столкновений 11 ГэВ.

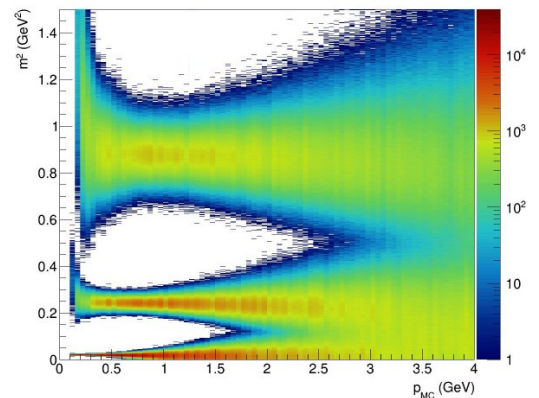


Рис. 4.3.4. Идентификация частиц по квадрату массы при помощи ЕТОФ.

4.3.2. Сервисные системы

Для ввода в эксплуатацию дополнительных детекторов TOF необходимо будет произвести модернизацию и дополнение сервисных подсистем.

1. *Газовая система.* В базовом варианте детекторы ЕТОФ должны находиться внутри газовых объемов, подобных модулям ТОФ. В таком случае общий объем газа времяпролетных систем увеличится на 1 м^3 и составит около 4 м^3 . Газовая система ТОФ должна будет модернизирована, чтобы обеспечить продувку такого дополнительного объема.

2. *Высоковольтное питание.* Если, по аналогии с модулями ТОФ, питать высоким напряжением от одного канала источника сразу 6 детекторов через распределитель, то на оба плеча ЕТОФ необходимо будет 16 пар положительных и отрицательных каналов высоковольтного питания или по 4 модуля iSeg EHS4080p(n) каждой полярности и 4 распределителя питания.

3. *Низковольтное питание.* Для питания усилителей будут также использоваться модули WIENER MPV8016I. Если питать от одного разъема модуля (4 канала по 50 Вт) низковольтного питания электронику 6 детекторов (96 NINO), то на весь ЕТОФ необходимо 4 модуля низковольтного питания. Для установки всех HV и LV модулей нужно будет два крейта MPod.

4.3.3. Интеграция

Модули ЕТОФ должны крепиться к корректирующим катушкам (Рис. 4.3.5.) и задвигаться внутрь MPOD вместе с ними. Для этого необходимо разработать конструкцию крепления модулей к катушкам. В сервисном положении к корректирующим катушкам существует постоянный доступ, поэтому устанавливать детекторы ЕТОФ можно будет без дополнительных приспособлений, а только с помощью мостового крана.

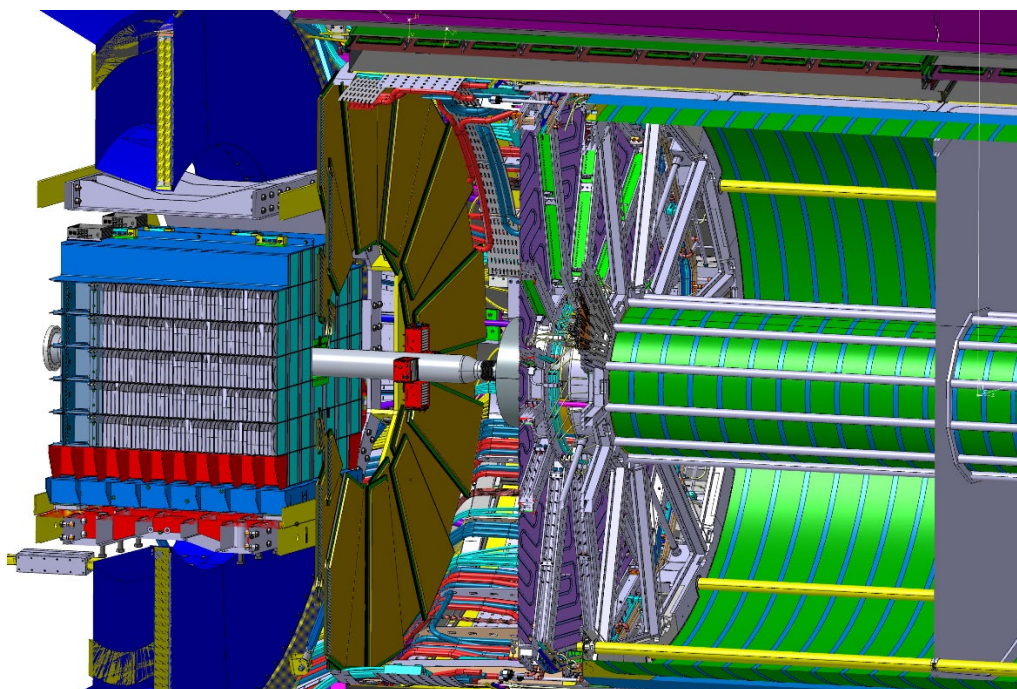


Рис. 4.3.5. Крепление ЕТОФ на корпусе корректирующего магнита.

5. Основные этапы монтажа MPD в 2024-2025 г.г.

Этап сборки	Срок
Подготовка к включению соленоидального магнита (криогеника, электропитание и др.)	Декабрь 2024 г. - Январь 2025
Измерения магнитного поля	Февраль -Апрель 2025 г.
Подготовка к монтажу детекторных подсистем	Май 2025 г.
Монтаж TOF, ECal, TRC, платформы с электроникой, кабелей	Май-Октябрь 2025 г.
Монтаж пучковой трубы, FHCaI	Ноябрь -Декабрь 2025 г.
Сдача в эксплуатацию	Декабрь 2025 г.
Работа на пучке	Декабрь 2025 г.

6. План-график и необходимые ресурсы.

Наименования затрат, ресурсов, источников финансирования		Стоимость (тыс. долл.) потребности в ресурсах	Стоимость, распределение по годам					
			1 год 2026	2 год 2027	3 год 2028	4 год 2029	5 год 2030	
	Международное сотрудничество (МНТС)	1000	200	200	200	200	200	
	Материалы	23350	3700	5250	6500	5350	2550	
	Оборудование и услуги сторонних организаций (пуско-наладочные работы)	6450	1100	1150	1850	1550	800	
	Пуско-наладочные работы	300	0	50	100	100	50	
	Услуги научно-исследовательских организаций	450	100	100	100	100	50	
	Приобретение программного обеспечения							
	Проектирование/строительство							
	Сервисные расходы (планируются в случае прямой принадлежности к проекту)	1000	200	200	200	200	200	
Необходимые ресурсы	Нормо-час	Ресурсы						
		– сумма FTE,	630	126	126	126	126	
		– ускорителя/установки, (час)	13720	2200	2880	2880	2880	
		– реактора,.....						
Источники финансирования	Бюджет-внебюджет	Бюджет ОИЯИ (статьи бюджета)	33000	5400	7050	9050	7600	3900
		Вклады соисполнителей Средства по договорам с заказчиками Другие источники финансирования	500	100	100	100	100	100

Руководитель проекта

 В.М.Головатюк

Экономист Лаборатории

 В.В.Морозов