

MPD — МНОГОЦЕЛЕВОЙ ДЕТЕКТОР КОЛЛАЙДЕРА NICA

С. В. Верещагин * от имени коллаборации MPD

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Многоцелевой детектор (Multi-Purpose Detector, MPD) разработан для исследования физических процессов, возникающих при столкновении тяжелых релятивистских ядер в области энергий коллайдера NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility) $\sqrt{s_{NN}} = 4\text{--}11$ ГэВ. MPD является первой физической установкой, которая начнет работать на коллайдере NICA. В настоящее время проект находится на завершающей стадии строительства. Детекторы частиц будут расположены внутри сверхпроводящего магнита, создающего магнитное поле напряженностью 0,5 Тл. Они включают системы трехмерной регистрации частиц, основанные на цилиндрической времяпроекционной камере (TPC) большого размера, и системы идентификации, состоящие из времяпролетного детектора (TOF) и электромагнитного калориметра (ECal). Для обеспечения однородного магнитного поля используется сложная криогенная система, которая охлаждает сверхпроводящий соленоид до температуры жидкого гелия. После ввода в эксплуатацию MPD станет мощным инструментом для изучения физики столкновений тяжелых ионов и углубления нашего понимания фундаментальных свойств материи.

The Multi-Purpose Detector (MPD) is a state-of-the-art particle detector designed to investigate the physical processes in the collisions of heavy relativistic nuclei in a center-of-mass energy range of the NICA collider (the Nuclotron-based Ion Collider fAcility) of $\sqrt{s_{NN}} = 4\text{--}11$ GeV. As part of the NICA collider, the experimental setup MPD is currently in its final stage of construction. The particle detectors will be positioned inside the superconducting magnet that generates a magnetic field of 0.5 T. They incorporate advanced detection systems, including the particle tracking system based on a large cylindrical Time-Projection Chamber (TPC) and the particle identification system consisting of a Time-Of-Flight (TOF) detector and an Electromagnetic Calorimeter (ECal). To provide the uniform magnetic field, a sophisticated cryogenic system will cool the superconducting solenoid to the liquid helium temperature. Once operational, the MPD will be a powerful tool for exploring the physics of heavy-ion collisions and improving our understanding of the fundamental properties of matter.

PACS: 95.55.Vj; 25.75.—q

ВВЕДЕНИЕ

Эксперимент MPD (Multi-Purpose Detector) на коллайдере NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility) предназначен для изучения

* E-mail: vereschagin@jinr.ru

столкновений тяжелых релятивистских ядер в области энергий $\sqrt{s_{NN}} = 4-11$ ГэВ. Теоретические модели предсказывают, что в столкновениях тяжелых ядер в данном диапазоне энергий образуется система, характеризующаяся умеренными температурами (~ 100 МэВ) и барионными плотностями, в 5–8 раз превышающими плотность в обычной ядерной материи. Эти условия могут способствовать фазовому переходу из адронной материи в состояние кварк-глюонной плазмы, сопровождающемуся восстановлением киральной симметрии. При этом ожидается, что это будет переход первого рода, заканчивающийся критической точкой. Данная область фазовой диаграммы состояния квантовой хромодинамики (КХД) материи до сих пор остается плохо изученной, что обусловило развитие обширной программы по изучению столкновений тяжелых ионов в области низких и промежуточных энергий ($\sqrt{s_{NN}} = 2-15$ ГэВ) в рамках программ сканирования по энергии BES-I, II на коллайдере RHIC, эксперимента NA61 на синхротроне SPS, а также создание специализированных ускорителей и детекторных установок в GSI (эксперимент CBM на FAIR) и ОИЯИ (эксперименты BM@N и MPD на NICA). Эксперимент MPD на коллайдере NICA находится на переднем крае этой амбициозной научной программы.

Детектор MPD спроектирован как 4π -спектрометр, способный регистрировать и измерять характеристики заряженных адронов, электронов и фотонов в столкновениях тяжелых ионов при высокой светимости. Он предназначен для восстановления и идентификации траекторий заряженных частиц в трехмерном пространстве с использованием большой времяпроекционной камеры (TPC) и времяпролетной системы (TOF). Электромагнитный калориметр (EMCal) обеспечит измерение координат и энергий, а также идентификацию фотонов и электронов. Две подсистемы — передние черенковские счетчики (Fast Forward Detector, FFD) и адронные калориметры (Forward Hadron Calorimeter, FHCAL), расположенные в области больших быстрот, предназначены для отбора событий, а также измерения центральности и геометрии ядерных столкновений. В данной работе рассматривается базовая конфигурация экспериментальной установки MPD и представлен обзор текущего состояния реализации этого проекта.

ВРЕМЯПРОЕКЦИОННАЯ КАМЕРА TPC

Времяпроекционная камера (Time-Projection Chamber, TPC) — это трековый детектор в составе MPD, который предназначен для трехмерного трекинга и идентификации частиц при высокой множественности событий [1, 2]. TPC должна обеспечивать эффективную регистрацию треков заряженных частиц в области псевдобыстрот $|\eta| < 1,2$, импульсное разрешение около 3% для частиц с энергией в диапазоне $0,1 < p_t < 1,5$ ГэВ/c, двухтрековое разрешение около 1 см и разрешение dE/dx не хуже 8%.

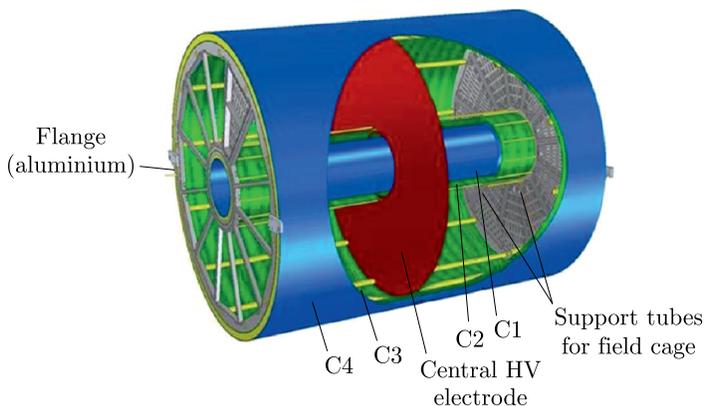


Рис. 1. Схема конструкции ТРС

Корпус ТРС представляет собой герметичный объем, образованный системой тонкостенных монолитных цилиндров С1–С4, изготовленных из композитного пластика, и торцевыми алюминиевыми фланцами (рис. 1). Ось цилиндров ориентирована вдоль пучка ускорителя NICA параллельно однородному магнитному полю соленоида. Внутренний диаметр цилиндра С1 составляет 54 см, внешний — 280 см, полная длина (вдоль пучка) — 340 см.

Однородное электрическое поле, необходимое для дрейфа электронов, создается в рабочем объеме ТРС с помощью комбинации центрального высоковольтного электрода и системы распределения потенциала (field cage). В качестве рабочего газа используется смесь из аргона (90%) и метана (10%). Оптимальная скорость дрейфа для аргон-метановой смеси составляет 5,45 см/мкс.

Система водяного охлаждения предназначена для термостабилизации внутреннего газового объема ТРС и охлаждения электроники считывания. Она спроектирована с учетом строгих требований к предотвращению утечек воды внутри установки МРД. Для достижения этой цели система будет работать при давлении ниже атмосферного.

Для повышения точности измерения координат траекторий частиц в ТРС предусмотрена система лазерной калибровки. Данная система позволит минимизировать погрешность измерения и повысить общую точность измерений в ТРС. Система лазерной калибровки генерирует восемь плоскостей с 28 вторичными лазерными лучами в каждой внутри объема ТРС, используя первичный луч ультрафиолетового лазера.

Регистрирующая сигналы от электронных кластеров система состоит из 24 камер ROC (ReadOut Chamber), разработанных на основе многопроволочной пропорциональной камеры с катодным считыванием инфор-

мации с площадок (пэдов) размерами 5×12 и 5×18 мм (в зависимости от радиуса). На каждом торце ТРС устанавливается по 12 камер.

К пэдовым плоскостям камер ROC подключена детекторная электроника FEE (Front-End Electronics) на базе микросхемы SAMPA [2]. Детектор ТРС содержит 95 232 канала регистрации, включает в себя 1488 карт детекторной электроники (Front-End Card, FEC) и другие модули, сгруппированные в 24 подсистемы сбора данных [3].

Низковольтная и высоковольтная системы питания для детектора ТРС построены на основе радиационно стойкого оборудования компании САЕН. Низковольтная система предназначена для питания электроники считывания, а высоковольтная система используется для питания пропорциональных камер.

Для установки ТРС в MPD предусмотрено специализированное грузочное устройство.

ВРЕМЯПРОЛЕТНАЯ СИСТЕМА TOF

Времяпролетная система TOF (Time-Of-Flight) является частью подсистемы идентификации заряженных адронов многоцелевого детектора MPD [4]. TOF представляет собой цилиндр длиной около 6 м и диаметром 3 м, собранный из 28 модулей (рис. 2), который перекрывает диапазон по псевдобыстроте $|\eta| < 1,3$. Каждый модуль TOF содержит 10 многозачерных резистивных плоскопараллельных камер (МРПК) оригинальной трехсекционной конструкции [5]. Дифференциальные сигналы с МРПК считываются с обоих концов 24-стриповых электродов. Такой подход позволяет определять координату пролета частицы вдоль стрипа и время пролета независимо от этой координаты. Таким образом, TOF

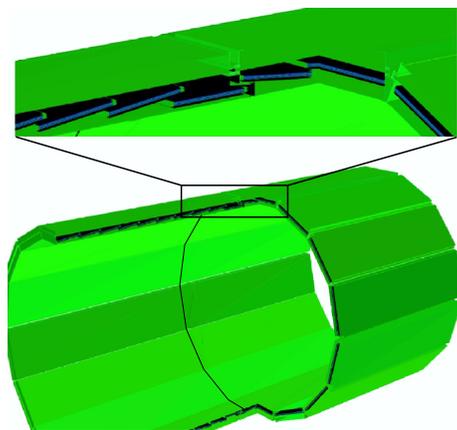


Рис. 2. Модель барреля системы TOF MPD

содержит 280 МРПК с 48 каналами считывания на каждой. В общей сложности система включает 13 440 каналов регистрации.

Считывание аналоговых дифференциальных сигналов с МРПК осуществляется с помощью детекторной электроники, основанной на микросхеме NINO [6]. Цифровой сигнал с выхода NINO направляется на время-цифровые преобразователи (ВЦП) TDC72VHL [7], реализованные на микросхеме НРТДС. Такая комбинация считывающей электроники имеет собственное временное разрешение около 25 пс. При испытаниях МРПК с данной электроникой на пучке дейтронов было получено временное разрешение около 42 пс (рис. 3) при эффективности регистрации частиц 99%.

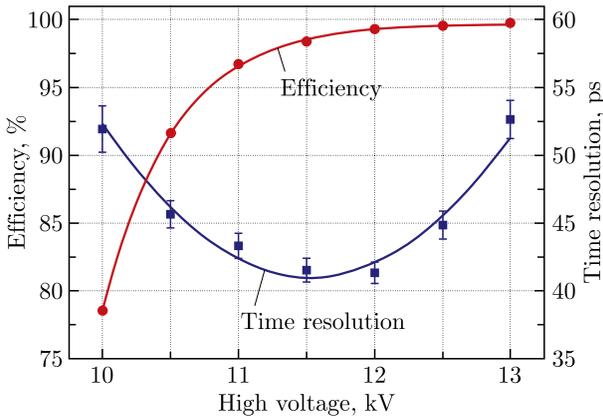


Рис. 3. Временное разрешение и эффективность МРПК в зависимости от напряжения

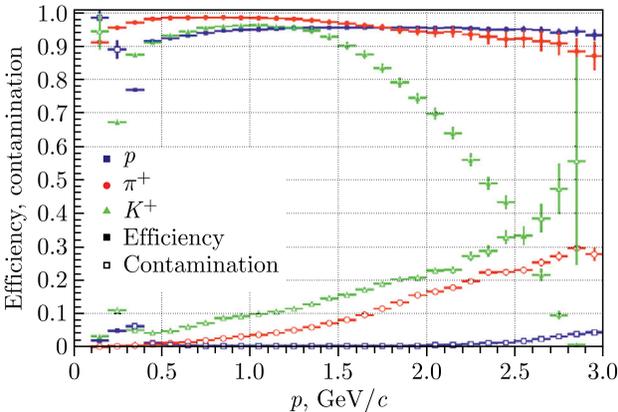


Рис. 4. Эффективность разделения адронов с помощью TOF в зависимости от импульса

Эффективность идентификации адронов оценивалась с помощью моделирования методом Монте-Карло. Поскольку общее временное разрешение времяпролетной системы определяется разрешением не только МРПК, но и детектора Т0 (FFD), систем синхронизации и прочей считывающей электроники, в моделировании было задано временное разрешение системы TOF 80 пс. Для идентификации частиц применялся статистический байесовский метод, позволивший более эффективно и чисто разделить адроны с большими импульсами. Результаты моделирования представлены на рис. 4 и находятся в согласии с требованиями эксперимента. K -мезоны идентифицируются с эффективностью выше 90 % вплоть до импульсов 1,5 ГэВ/с. Идентификация протонов и π -мезонов осуществляется эффективно до 3 ГэВ/с.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ КАЛОРИМЕТР ECal

Электромагнитный калориметр ECal (Electromagnetic Calorimeter) [8–10] предназначен для измерения параметров фотонов и электронов, что позволит изучать такие электромагнитные сигналы в столкновениях тяжелых ионов, как прямые фотоны и лептонные пары, распады нейтральных мезонов, а также значительно улучшить разделение π -мезонов и электронов в эксперименте. Цилиндрический калориметр (рис. 5) диаметром 4,5 м и длиной 6 м имеет необходимую в условиях высоких нагрузок проектную геометрию, при которой каждая ячейка калориметра в виде башни ориентирована на область пересечения пучков коллайдера.

Калориметр состоит из 50 полусекторов, каждый из которых содержит 768 башен, сформированных путем чередования слоев сцинтилляционных и свинцовых пластин (общей толщиной 11 радиационных длин X_0). Для сбора света используются пронизывающие слои башен

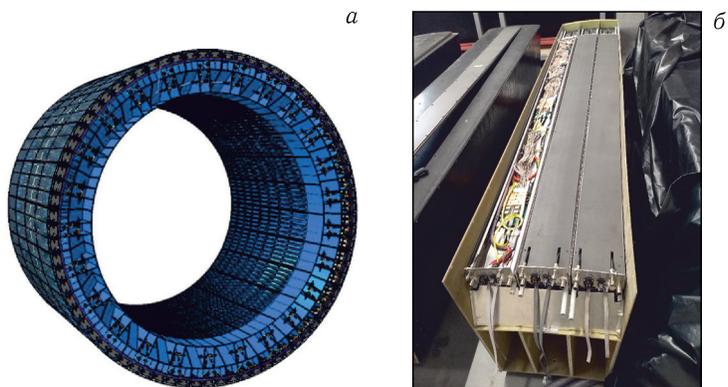


Рис. 5. а) Структура калориметра, заполненная секторами с детекторами; б) полусектор с установленной электроникой

спектрсмещающие волокна Kuraray Y11 (200) диаметром 1,2 мм и схожие по характеристикам волокна OSL 8, производимые Технологическим центром полимерного оптического волокна (Тверь). Выбранное соотношение сцинтиллятора и свинца в ячейках обеспечивает 34–39 % сэмплинг-фракции (доли измеряемой энергии) калориметра, что позволяет достигать оптимального разрешения в рабочем интервале измеряемой энергии 1–1,5 ГэВ.

Для работы в сильном магнитном поле в качестве фотодетекторов используются кремниевые фотоумножители Hamamatsu S13360-6025. Они имеют активную площадь 6×6 мм и размер пикселя 25 мкм. Для удобства использования фотоумножители устанавливаются по 16 шт. на специальных платах, которые обеспечивают питание, контроль и температурную коррекцию рабочего напряжения. Сигналы с фотодетекторов оцифровываются 14-разрядными 64-канальными аналого-цифровыми преобразователями ADC64ECAL с частотой выборки 62,5 МГц. Выделяемое электроникой тепло (около 7,5 кВт для всего калориметра) отводится с помощью воздушной и водяной систем охлаждения. Стабильность работы элементов калориметра контролируется с помощью светодиодов LED L7113PBC-A, подающих импульсы света к фотодетекторам через волокна бокового свечения SOF-2. Испытания полусекторов в течение нескольких недель непрерывной работы показали стабильность работы каналов калориметра на уровне около 1%. В ходе эксперимента контроль за стабильностью и характеристиками систем калориметра будет осуществляться с помощью системы медленного контроля.

Испытания, проведенные на пучках электронов в Троицке (синхротрон С-25Р («Пахра»)), Физический институт им. П. Н. Лебедева, электроны с энергиями до 300 МэВ) [11] и в Гамбурге (DESY, энергии до 2 ГэВ), подтвердили ожидаемое энергетическое разрешение калори-

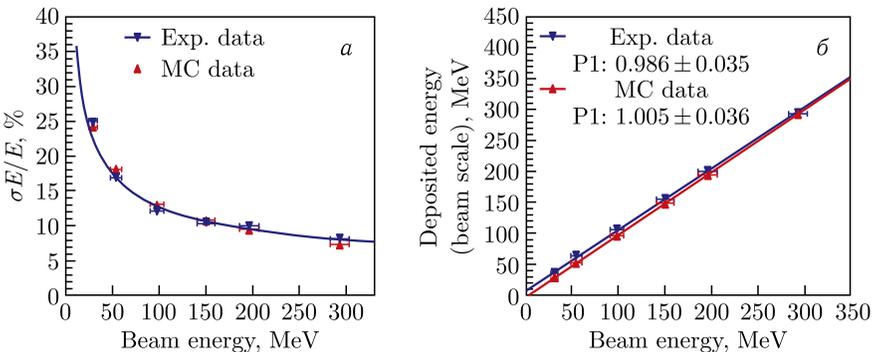


Рис. 6. Результаты тестов калориметра на пучке электронов (Троицк) в сравнении с моделированными методом Монте-Карло данными [11]: а) энергетическое разрешение; б) линейность отклика

метра $\sigma_E/E \approx (3\%/\sqrt{E}(\text{ГэВ})) + 2,4\%$ и линейность отклика калориметра от энергии электронов (рис. 6).

В настоящее время разрабатываются процедуры первичной калибровки ячеек калориметра с помощью космических мюонов [12].

ПЕРЕДНИЙ АДРОННЫЙ КАЛОРИМЕТР FHCAL

Передний адронный калориметр фрагментов FHCAL состоит из двух идентичных плеч, расположенных на расстоянии 320 см от центра установки MPD. Он предназначен для измерения геометрических параметров столкновений тяжелых ионов. Регистрация энергетических и пространственных распределений невзаимодействующих нуклонов налетающих ядер (спектаторов) в калориметре позволяет определять центральности ядро-ядерных столкновений, плоскости реакции и импульсы отдачи спектаторов, которые чувствительны к свойствам образующейся горячей области [13, 14]. FHCAL обладает максимальной эффективностью регистрации периферийных ядро-ядерных столкновений и будет использоваться в общем триггере установки MPD для отбора событий со всеми возможными значениями центральности.

Плечи калориметра состоят из 44 модулей каждое и расположены симметрично относительно центра MPD. Одно плечо FHCAL и схема одного модуля показаны на рис. 7.

Модуль калориметра представляет собой многослойную структуру с чередующимися слоями пассивного абсорбера адронного ливня (сурьмяно-свинцовый сплав) и пластин органического сцинтиллятора, измеряющих энергию частиц в ливне. В модуле установлены 42 сцинтилляционные пластины размером $15 \times 15 \times 0,4$ см с оптоволоконном, вклеен-

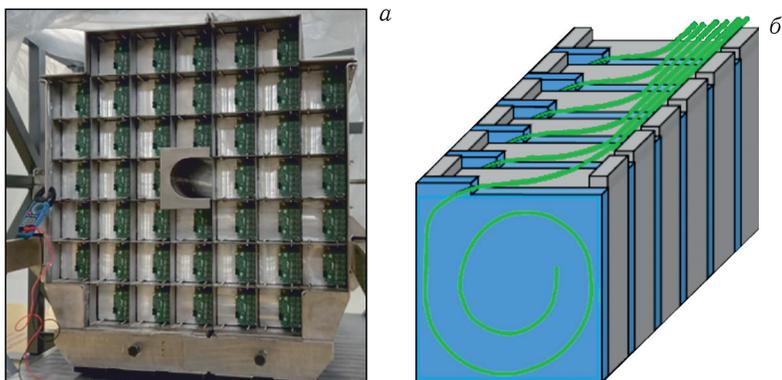


Рис. 7. а) Передний адронный калориметр в процессе сборки в экспериментальном зале. В каждом модуле установлены кремниевые фотоумножители и аналоговая электроника. б) Схематическое представление модуля калориметра

ным в спиральную канавку. Свет с каждой из шести последовательных скинтилляционных пластин считывается одним фотодетектором. Таким образом, модуль калориметра имеет сегментированную структуру, состоящую из семи продольных секций с индивидуальным считыванием сигнала. Для транспортировки света со скинтилляционных пластин используются переизлучающие оптоволоконна фирмы Kugaгау (Япония) типа Y11(200) S-type диаметром 1 мм. Чтобы повысить величину светосбора, один конец оптоволоконна внутри скинтиллятора покрыт слоем специальной светоотражающей краски на основе серебра.

В заднем торце каждого модуля установлены семь кремниевых фотоумножителей MPPC S14160-010C/P активной площадью 3×3 мм, размером пикселей 10×10 мкм и временем восстановления около 10 нс. Такие параметры фотодетекторов обеспечивают большой динамический диапазон регистрируемых в калориметре энергий.

Исследования модулей калориметра на пучках протонов с энергией от 1 до 10 ГэВ подтвердили ожидаемое энергетическое разрешение калориметра $\sigma_E/E \approx 55\%/\sqrt{E}$ (ГэВ).

БЫСТРЫЙ ПЕРЕДНИЙ ДЕТЕКТОР FFD

Быстрый передний детектор FFD [15–17] обеспечивает быстрый и эффективный триггер столкновений ядер в MPD и формирование стартового сигнала с пикосекундным временным разрешением для детектора TOF. FFD состоит из двух идентичных модульных черенковских поддетекторов FFD_E и FFD_W. Каждый из них включает в себя 20 модулей с 80 независимыми ячейками регистрации релятивистских заряженных частиц и высокоэнергетических гамма-квантов. Поддетекторы расположены вокруг вакуумной трубы пучка на расстоянии 140 см от центра установки MPD и охватывают диапазон псевдобыстроты $2,7 < |\eta| < 4,1$.

Каждый модуль FFD содержит 10-мм свинцовую пластину, в которой фотоны высокой энергии с вероятностью около 70% преобразуются в электроны. За ней расположена сборка из 2×2 кварцевых радиаторов размером $28 \times 28 \times 15$ мм, состыкованных с многоканальным фотоумножителем (МКП ФЭУ) XP85012/A1-Q(S). Аноды МКП ФЭУ объединены по схеме 2×2 , образуя четыре независимых канала регистрации. Импульсы с этих каналов усиливаются и преобразуются на плате детекторной электроники в цифровые сигналы в стандарте LVDS и аналоговые сигналы, передаваемые далее по кабелям на электронику детектора FFD. Модуль FFD показан на рис. 8.

Помимо самих поддетекторов FFD включает в себя несколько различных подсистем, обеспечивающих его работу: источники высоковольтного и низковольтного питания, систему калибровки на основе пикосекундного лазера, электронику распределения и обработки импульсов, поступающих с модулей детектора, систему охлаждения модулей потоком сжатого воздуха. Работой всех подсистем управляет система контроля

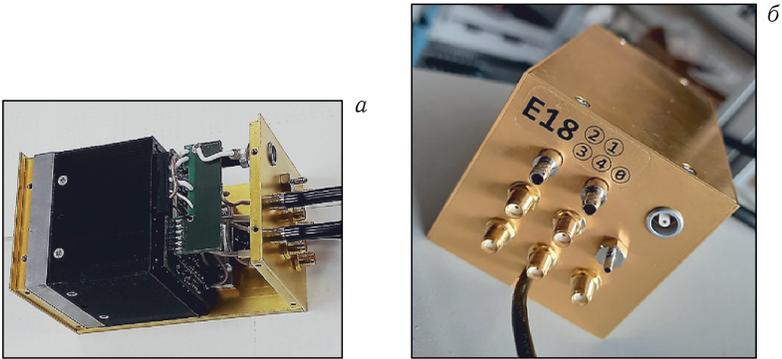


Рис. 8. Внутренний (а) и внешний (б) вид модуля детектора FFD

детектора с соответствующим интерфейсом, которая также осуществляет взаимодействие с системой контроля установки MPD.

Информация, поступающая с каналов детектора FFD, передается на входы модулей TDC72VHL [7] системы сбора данных (DAQ) установки MPD.

Проведенные испытания на пучке высокоэнергетических дейтронов с космическими мюонами показали, что временное разрешение детектора FFD составляет $\sigma_t \approx 40$ пс.

ДЕТЕКТОР СВЕТИМОСТИ

Детектор светимости предназначен для задач по настройке сведения пучков и по контролю распределения вершин взаимодействия.

Детектор состоит из двух плеч (рис. 9), симметрично расположенных на расстоянии 3 м от центра MPD. Каждое плечо составляют четыре

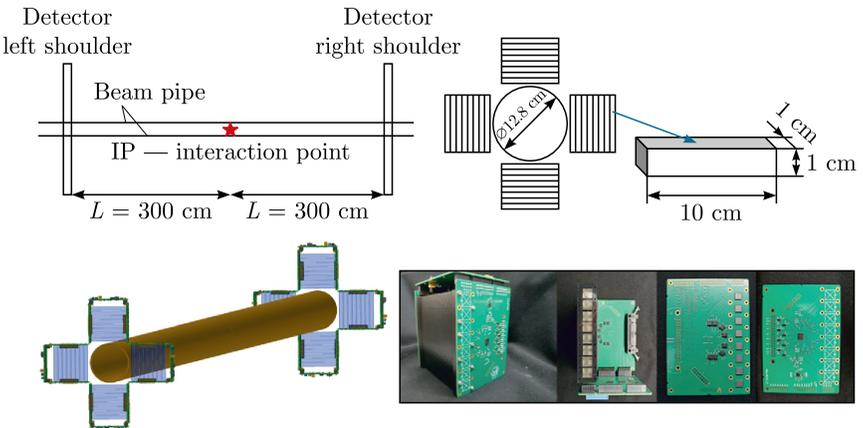


Рис. 9. Схема конструкции детектора светимости

модуля. Модуль включает в себя восемь сцинтилляционных полос (полистирол (PS) с добавлением 1,5% *p*-терфенила и 0,05% POPOP) размерами $100 \times 10 \times 10$ мм. Полосы просматриваются с двух сторон кремниевыми фотоумножителями Hamamatsu S14160–6050HS (Silicon Photomultipliers, SiPM). Также в состав модуля входят три печатные платы: две зеркально расположенные платы с SiPM и считывающей электроникой и одна объединяющая плата распределения напряжения и управления. Испытания детектора показали временное разрешение не хуже 200 пс.

МАГНИТ MPD

Соленоидальный магнит MPD является ключевым конструктивным элементом MPD, внутри которого размещены все внутренние детекторы. Сверхпроводящий соленоид состоит из тонкой обмотки NbTi и магнитопровода, обеспечивающего возврат магнитного потока.

Расстояние между полюсами магнита составляет 7,39 м. Вес конструкции с внутренними детекторами — около 800 т. Соленоид предназначен для создания однородного магнитного поля напряженностью 0,2–0,5 Тл в объеме трекового детектора TPC.

Для обеспечения регистрации частиц и корректной работы TPC качество поля в его апертуре должно быть не хуже $|B_r/B_z| = 5,2 \cdot 10^{-4}$.

Для выравнивания поля на торцах магнита, компенсации возмущений, возникающих из-за окон в балках магнитопровода и отклонений при сборке, предусмотрены торцевые крышки (полюса). В них установлены корректирующие катушки из полого алюминиевого проводника, по которому циркулирует охлаждающая деминерализованная вода. Таким образом, конструкция магнита MPD состоит из трех основных элементов: 1) магнитопровода из 28 балок стали марки Ст10; 2) соленоида со сверхпроводящим кабелем, системой подвесов, охлаждения и защиты; 3) торцевых корректирующих катушек.

Для достижения проектной однородности магнитного поля все эти элементы собраны с соосностью не хуже 2 мм. Общий вид магнита с ложементом и системой перемещения представлен на рис. 10.

Для получения магнитного поля напряженностью 0,5 Тл в полости магнита подается ток порядка 1790 А (максимальный ток 2400 А) при напряжении 10 В. Сверхпроводящий кабель, представляющий собой сплав Nb/Ti + Cu, выбран с учетом подводимых токов и размеров детектора. Свои сверхпроводящие свойства кабель приобретает при температуре 4,5 К. Конструктивно соленоидальный магнит представляет собой полый кожух цилиндрической формы. Внутри него располагается опорный цилиндр, на который намотан сверхпроводящий кабель с трубками охлаждения. Опорный цилиндр крепится к кожуху с помощью специальной системы подвесов. Для снижения теплопритоков опорный цилиндр окружен тепловыми экранами, охлаждаемыми жидким азотом до температуры 80 К. Пространство кожухового цилиндра откачано

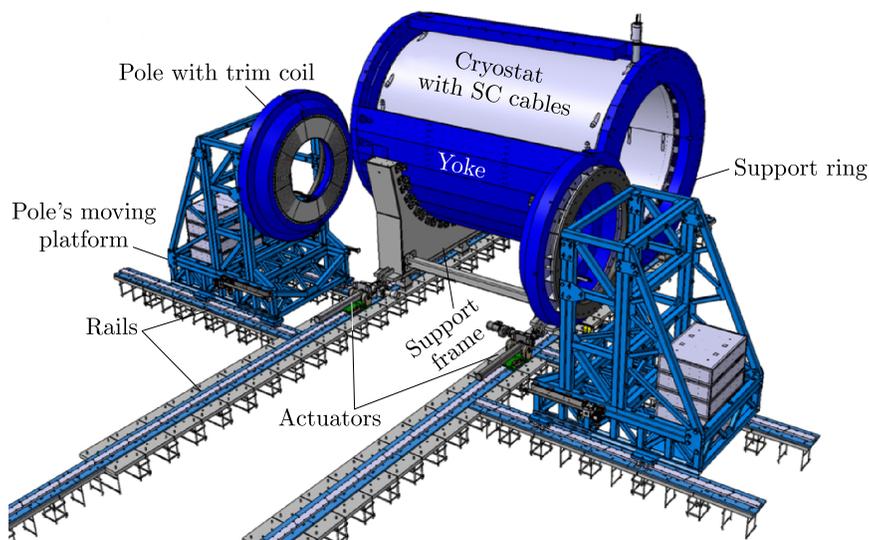


Рис. 10. Общий вид магнита детектора MPD

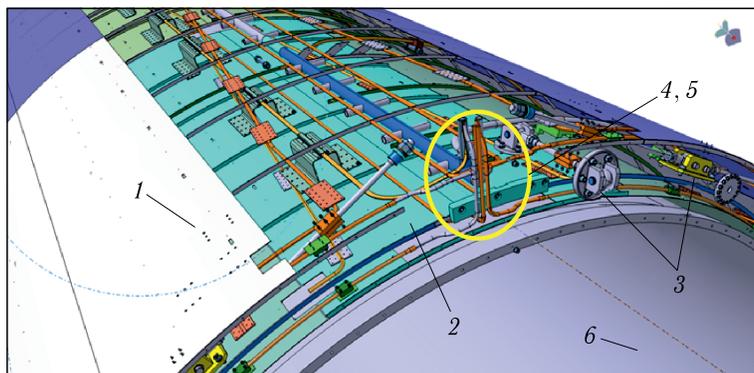


Рис. 11. Модель соленоида магнита MPD без внешней части кожуха: 1 — тепловые экраны; 2 — опорный цилиндр; 3 — радиальные и осевые подвесы; 4, 5 — трубопроводы подачи хладагентов (азота и гелия); 6 — внутренняя часть вакуумного кожуха соленоида

до давления 10^{-5} торр, что практически исключает передачу тепла за счет диффузии остаточных газов (рис. 11).

При номинальной работе магнита с током 1790 А запасенная энергия в объеме магнита составляет 24,5 МДж. Для отвода такой энергии в случае потери сверхпроводимости предусмотрены системы детектирования и безопасного сброса энергии на внешнее сопротивление. Во время

эксплуатации магнита в режиме онлайн считываются и анализируются около 1000 сигналов (температура на поверхности соленоида и натяжные системы подвесов соленоида), что обеспечивает безопасную работу оборудования и систем.

Основные инженерные системы магнита включают в себя: криогенную систему охлаждения соленоида, вакуумную систему, систему электропитания, систему безопасности и сброса энергии, водяную систему охлаждения, систему контроля и управления.

СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Система измерения магнитного поля предназначена для измерения магнитного поля во всем внутреннем объеме соленоида. Результаты трехмерных магнитных расчетов показывают, что поле магнита является практически аксиально-симметричным, т. е. не содержит гармоник выше нулевой. Магнитное поле хорошо описывается аналитически формулой для B_r и аналогично для B_z вплоть до больших радиусов ~ 2 м:

$$B_r(r, \phi) = B_0 + a_1 r^1 \sin \phi + b_2 r^2 \cos(2\phi). \quad (1)$$

Для уменьшения относительной погрешности от точки к точке измерения проводятся с использованием одного трехмерного датчика Холла. Точное положение датчика определяется с помощью лазерного трекера. Внешний вид измерительной установки показан на рис. 12.

Движение каретки по направляющей обеспечивает перемещение вдоль оси соленоида Z . На площадке, которая радиально передвигается

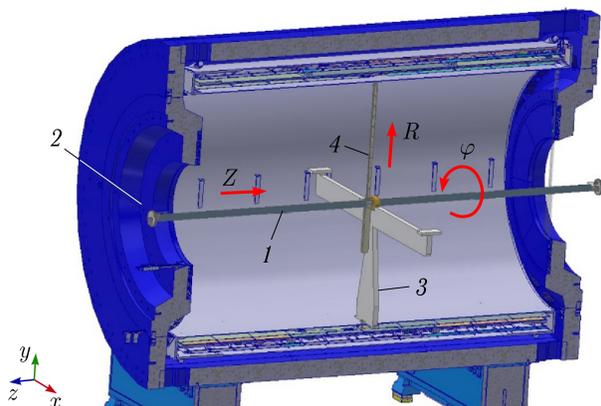


Рис. 12. Внешний вид измерителя. Измеритель состоит из алюминиевой направляющей (1), закрепленной на краях к фланцам детектора через подшипники (2), посередине опирается на стеклотекстолитовую опору (3). По направляющей передвигается углепластиковая каретка (4), состоящая из штанги, средней части и противовеса

по штанге, установлен трехмерный датчик Холла и угловой отражатель. По краям балки установлена система для ее вращения, отвечающая за движение по азимуту ϕ . Все перемещения по Z , R , ϕ осуществляются шаговыми двигателями, расположенными на торце балки вне магнитного поля соленоида. Передача движения происходит с помощью зубчатых ремней. Для уменьшения прогиба балка разделена на две части, между которыми находится центральная опора. Таким образом, объем измерения разделен на две части.

МАГНИТОПРОВОД MPD

Магнитопровод MPD состоит из 28 плит длиной 8470 мм и весом 16 т каждая, двух опорных плит диаметром 6,67 м и весом по 44 т и двух полюсов диаметром 4589 мм и весом по 48 т с теплыми катушками. Общий вес магнитопровода составляет около 630 т.

Габаритные размеры магнитопровода соблюдены с точностью до 1 мм, несоосность полюса относительно опорного кольца составляет 0,21 мм при допуске 0,25 мм.

Криостат установлен в магнитопровод с точностью 0,5 мм по высоте и смещен на 1,2–2,47 мм в горизонтальной плоскости.

MPD снабжен системой перемещения, позволяющей установить детектор в нужном положении в плане и по высоте. При испытании системы перемещения центральная ось детектора была выставлена с точностью лучше чем 0,6 мм при допустимых отклонениях ± 2 мм.

Для размещения криогенного оборудования, водяного охлаждения и контрольно-регистрирующей аппаратуры MPD снабжен четырехуровневой подвижной платформой, верхней горизонтальной платформой и южной подвижной платформой.

ИНТЕГРАЦИЯ ДЕТЕКТОРОВ MPD

Установка детекторных систем внутрь соленоида начнется после завершения магнитных измерений. Первым элементом конструкции является опорная рама, на которой будут закреплены все элементы внутри соленоида. Сама рама крепится на опорных кольцах магнитопровода так, что не касается поверхности соленоида.

Далее, с помощью специальных заталкивающих устройств, установленных на подъемных платформах с каждой стороны магнита, последовательно будут устанавливаемы ECal, полусекторы TOF и TPC. Установка полусекторов ECal и TOF будет производиться параллельно с каждой стороны магнита.

Подъемные платформы способны перемещаться в двух направлениях в горизонтальной плоскости и по высоте до 5 м.

Для установки модуля в MPD достаточно закрепить заталкивающее устройство на подъемной платформе перед выбранным сектором и соединить рельсы вместе так, чтобы образовалась единая линия скольжения,

позволяющая задвинуть модуль в нужное положение. Подготовленная и испытанная вакуумная труба прямолинейного участка длиной 9 м устанавливается в специальном контейнере. Контейнер выполняет функции механической поддержки и защиты, а также используется для транспортировки и установки в MPD. В этом же контейнере предусмотрено место для установки ITS (Inner Tracking System) системы.

На первом этапе сборки выполняется следующая последовательность работ: 1) установка и закрепление нижних половин субдетекторов в нижней части контейнера; 2) установка и закрепление вакуумной трубы пучка; 3) размещение верхних половин субдетекторов поверх пучковой трубы; 4) монтаж верхней части контейнера.

Второй этап — это размещение контейнера внутри отверстия детектора TPC.

Третий этап — удаление внешней части контейнера и подключение кабелей субдетекторов к кабелям, идущим к внешним подсистемам FFD.

Центральная часть ионопровода изготовлена из бериллия, а две внешние части — из специального сплава алюминия. Толщина стенки ионопровода составляет 1,0 мм как для бериллиевых, так и для алюминиевых деталей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эксперимент MPD на коллайдере NICA предоставит уникальные возможности для изучения столкновений тяжелых релятивистских ядер в области промежуточных энергий $\sqrt{s_{NN}} = 4\text{--}11$ ГэВ. Проведение программ сканирования с высокой светимостью по энергии и размеру сталкивающихся ядер позволит измерить большое разнообразие сигналов и сигнатур, которые, как ожидается, будут иметь немонотонное поведение в области фазового перехода. Сканирование будет выполняться с использованием одной и той же экспериментальной установки, при этом реализуются все преимущества коллайдерного эксперимента, такие как большой и однородный акцептанс и отсутствие паразитных эффектов от фиксированной мишени. Ожидается, что эксперимент MPD на коллайдере NICA начнет набор данных в 2025–2026 гг. Первой системой для изучения станут столкновения $Bi + Bi$ или $Xe + Xe$ при энергии $\sqrt{s_{NN}} \sim 7$ ГэВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Averyanov A. et al.* MPD TPC Status // J. Instrum. 2020. V. 15, No. 07. P. C07017.
2. *Vereschagin S., Bazhazhin A., Fateev O., Lukstins J., Movchan S., Razin S., Zaporozhets S., Zruev V.* Time-Projection Chamber for Multi-Purpose Detector of NICA Project at JINR // Nucl. Instr. Meth. A. 2020. V. 958. P. 162793.
3. *Vereschagin S. V., Zaporozhets S. A., Movchan S. A., Potapov D. S.* Data Acquisition System of the TPC/MPD Detector for the NICA Project // Phys. At. Nucl. 2023. V. 86, No. 5. P. 805–809.

4. Babkin V. et al. Time-of-Flight Particles Identification in the Multi-Purpose Detector at NICA // PoSE. 2020. V. PS-HEP2019. P. 209.
5. Babkin V. et al. Triple-Stack Multigap Resistive Plate Chamber with Strip Readout // Nucl. Instr. Meth. A. 2016. V. 824. P. 490–492.
6. Buryakov M. G., Babkin V. A., Golovatyuk V. M., Volgin S. V., Rumyantsev M. M. Status of the Front-End-Electronics for the Time-of-Flight Measurements at the MPD Experiment // Phys. Part. Nucl. Lett. 2016. V. 13, No. 5. P. 532–534.
7. Slepnev I. AFI Electronics. 2013. <https://afi.jinr.ru/TDC72VHL> (accessed: 2024).
8. Tyapkin I. Electromagnetic Calorimeter. Technical Design Report. 2018. https://mpd.jinr.ru/wp-content/uploads/2023/11/TDR_ECAL_v3.6_2019.pdf (accessed: 2024).
9. Tyapkin I., Marinova B., Anfimov N., Chalyshev V., Chirikov-Zorin I., Krumshtein Z., Olshevskiy A., Rezinko T., Rybnikov A., Selyunin A. NICA/MPD Electromagnetic Calorimeter Based on Multipixel Avalanche Photodetector // PoSP. 2016. V. hotoDet2015. P. 053.
10. Semenov A. Y. et al. Electromagnetic Calorimeter for MPD Spectrometer at NICA Collider // J. Instrum. 2020. V. 15, No. 05. P. C05017; arXiv:2002.07709.
11. Baskov V. A., Bulychjov S. A., Krechetov Y. F., Kulikov V. V., Martemianov M. A., Mamonov I. A., Semenov A. Y., Semenova I. A., Tyapkin I. A. Electron Beam Test of the MPD Electromagnetic Calorimeter on the Pakhra Synchrotron // Phys. Part. Nucl. 2021. V. 52, No. 4. P. 663–668.
12. Bulychjov S. A., Kulikov V. V., Martemianov M. A., Matsyuk M. A., Skoblyakov A. V., Tyapkin I. A. Status of Simulation of MPD Electromagnetic Calorimeter // Phys. Part. Nucl. 2021. V. 52, No. 4. P. 675–680.
13. Ivashkin A., Golubeva M., Guber F., Karpushkin N., Morozov S., Musin S., Strizhak A., Volkov V. Measurements of Spectators with Forward Hadron Calorimeter in MPD/NICA Experiment // Ibid. P. 578–583.
14. Volkov V., Golubeva M., Guber F., Ivashkin A., Karpushkin N., Morozov S., Musin S., Strizhak A. Application of FHCAL for Heavy-Ion Collision Centrality Determination in MPD/NICA Experiment // Particles. 2021. V. 4, No. 2. P. 236–240.
15. Yurevich V. I., Batenkov O. I. Picosecond Cherenkov Detectors for High-Energy Heavy Ion Experiments at LHEP/JINR // Nucl. Instr. Meth. A. 2016. V. 824. P. 162–164.
16. Yurevich V. I., Agakichiev G. N., Sergeev S. V., Bogoslovski D. N., Rogov V. Y., Lobastov S. P., Averichev G. S., Tikhomirov V. V., Timoshenko A. A. Cherenkov and Scintillation Detectors with MCP-PMT and SiPM Readout for MPD and BM@N Experiments at JINR // Nucl. Instr. Meth. A. 2018. V. 912. P. 294–297.
17. Yurevich V. I., Agakichiev G. N., Sergeev S. V., Bogoslovski D. N., Lobastov S. P., Rogov V. Y., Averichev G. S., Tikhomirov V. V., Timoshenko A. A., Batenkov O. I. Development of Trigger and Start Detectors for Experiments with High-Energy Heavy Ions at the Joint Institute for Nuclear Research // Intern. J. Mod. Phys. Conf. Ser. 2018. V. 48. P. 1860122.