

РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ ТРЕКОВЫХ И ИДЕНТИФИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СВОЙСТВ ЯДЕРНОГО ВЕЩЕСТВА В ЯДЕРНЫХ СТОЛКНОВЕНИЯХ

© 2021 г. В. М. Самсонов^{1)*}

Поступила в редакцию 28.04.2020 г.; после доработки 28.04.2020 г.; принята к публикации 28.04.2020 г.

Одним из основополагающих направлений в физике высоких энергий является исследование в лабораторных условиях свойств ядерного вещества при экстремально высоких температурах и/или барионных плотностях. В течение последних десятилетий такие исследования проводятся при столкновении ультрарелятивистских тяжелых ионов в нескольких экспериментах на современных ускорительных комплексах RHIC (БНЛ, США) и LHC (ЦЕРН, Швейцария). Также в ближайшем будущем планируется начать эти исследования на ускорителях FAIR (GSI, Германия) и NICA (ОИЯИ, Россия). Реализация таких исследований требует создания сложных детекторных систем, способных регистрировать события с высокой множественностью рождающихся частиц и надежно измерять их характеристики. В настоящей работе сделан краткий обзор всех детекторных систем, созданных и разрабатываемых в Лаборатории релятивистской ядерной физики НИЦ “Курчатовский институт” — ПИЯФ для экспериментов по изучению ядерного вещества в экстремальных условиях PHENIX (БНЛ, США), ALICE (ЦЕРН, Швейцария) и CBM (GSI, Германия).

DOI: 10.31857/S0044002721010177

1. ВВЕДЕНИЕ

В течение последних десятилетий в физике сильных взаимодействий при высоких энергиях реализуется амбициозная международная программа по изучению свойств ядерного вещества при экстремально высоких температурах, близких к температуре Вселенной в первые микросекунды после Большого Взрыва (порядка 10^{12} К) [1]. Эта программа, призванная обеспечить прорывной прогресс в понимании целого ряда фундаментальных явлений в физике элементарных частиц, ядерной физике, астрофизике и космологии, реализуется усилиями международных коллабораций в экспериментах на Коллайдере релятивистских ионов (RHIC) в США [1] и пучках ультрарелятивистских ядер на Большом адронном коллайдере (LHC) в ЦЕРН [2]. В ближайшем будущем спектр таких исследований будет расширен путем изучения фазовой диаграммы ядерного вещества в области высоких барионных плотностей, близких к плотности вещества в коре нейтронных звезд, в эксперименте CBM на пучках ионов в исследовательском центре FAIR (Германия) [3] и

эксперименте MPD на коллайдере NICA (Дубна) [4]. Для активного участия в столь амбициозной программе в начале 1990-х гг. в ПИЯФ РАН (с 2011 г. НИЦ “Курчатовский институт” — ПИЯФ) была создана Лаборатория релятивистской ядерной физики (ЛРЯФ), нацеленная на разработку и создание трековых и идентификационных систем для экспериментов PHENIX (БНЛ, США) [1], ALICE (ЦЕРН, Швейцария) [2], CBM (FAIR/GSI) [3], на участие в наборе данных и их анализе, на получение физических результатов и их интерпретацию.

2. ЛРЯФ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ PHENIX

В период 1993–2000 гг. в ПИЯФ были разработаны и изготовлены уникальные многопроволочные фокусирующие дрейфовые камеры, обладающие оригинальной структурой дрейфовых ячеек [1]. Дрейфовые камеры стали основным детектором центральной трековой системы эксперимента PHENIX на ускорителе RHIC (БНЛ, США), которые успешно проработали более 15 лет. Около 90% результатов эксперимента PHENIX, опубликованных более чем в 200 статьях, основаны на данных, полученных с использованием дрейфовых камер центральной трековой системы детектора.

¹⁾НИЦ “Курчатовский институт” — ПИЯФ, Гатчина, Россия.

*E-mail: samsonov_vm@npni.nrcki.ru

При разработке, проектировании и изготовлении этих дрейфовых камер использовались современные подходы и методы проектирования сложных многопроводных детекторных систем. За основу была взята ячеистая структура камер с управляемой зоной сбора заряда, работающих при использовании холодных газовых смесей. Спроектированная проводочная система состояла примерно из 20 000 проволок. При этом была разработана специальная модульная структура детектора, в которой к стенкам фермы камеры крепились алюминиевые прецизионно изготовленные поддержки, содержащие четыре анодные и четыре катодные сетки (в совокупности, образующие модуль). Каждая сетка состояла из проволок различного типа, прикрепленных к текстолитовым платам, распределяющим напряжение. Использование стандартных модулей небольших размеров для построения детектора значительно упростило процедуру его сборки, обслуживания и массового производства. Каждую камеру можно условно разделить на 20 идентичных модулей (секторов), охватывающих 4.50° по азимутальному углу, имеющих общий газовый объем и поддерживающую структуру. Конструкция, материал и размеры поддерживающей структуры дрейфовой камеры были оптимизированы с целью уменьшения фона, возникающего в результате электромагнитных и адронных ливней. Каркасом дрейфовой камеры стала титановая ферма с расположенным в центре углепластиковым поддерживающим стержнем для уменьшения прогиба фермы под действием суммарного натяжения проволок ~ 3 т. Полный вес дрейфовой камеры без электроники составил 1.5 т. Для уменьшения количества конструкционных материалов в аксептансе газовый объем камеры сверху и снизу был ограничен тонкими металлизированными окнами из полиэтилентерефталата толщиной ~ 100 мкм. В качестве рабочего газа использовалась смесь аргона и этана (50/50). Для повышения стабильности работы и уменьшения старения камер позже в газовую смесь стали добавлять пары изопропилового спирта 1.6%. Покрытие камер по азимутальному углу составило 90° , а по псевдобыстроте — в интервале от -0.35 до 0.35 . В итоге был создан детектор, позволяющий с высокой эффективностью (99%) восстанавливать треки заряженных частиц и прецизионно измерять их импульсы с разрешением $\Delta p_T/p_T \sim 1\%$ в области поперечных импульсов $p_T \sim 1$ ГэВ/с. Созданный детектор (рис. 1) обладал целым рядом уникальных характеристик. В частности, была обеспечена возможность разрешения треков, расположенных на малом расстоянии друг от друга (менее 2 мм), система сигнальных проволок имела пространственное разрешение ~ 150 мкм, а эффективность их срабатывания составляла 90%. Кроме того, было достигнуто про-

странственное разрешение камер вдоль оси пучка ~ 2 мм, максимальное время измерений < 1 мкс при максимальном времени дрейфа ~ 0.5 мкс в условиях с большой множественностью частиц (~ 1000).

Экспертное сопровождение функционирования дрейфовых камер позволило сотрудникам ЛРЯФ принять участие в обработке и анализе экспериментальных данных, накопленных экспериментом PHENIX. На основе выполненных анализов были защищены одна докторская и четыре кандидатских диссертаций.

Фактически именно уникальная конструкция дрейфовых камер, не имеющих аналогов в мире, позволила успешно реализовать физическую программу эксперимента PHENIX.

Основным фундаментальным результатом эксперимента PHENIX (наряду еще с тремя экспериментами на ускорителе RHIC) стало открытие нового состояния ядерного вещества при сверхвысоких температурах — кварк-глюонной материи, обладающей свойствами почти идеальной сильновзаимодействующей жидкости с исключительно низким отношением сдвиговой вязкости к энтропии [1].

Эксперимент PHENIX успешно закончил набор данных в 2016 г. и был закрыт на модернизацию. На базе эксперимента PHENIX создается новая экспериментальная установка sPHENIX [5]. Основой трековой системы нового эксперимента станет цилиндрическая времяпроекционная камера ТРС на основе газовых электронных умножителей (GEM), установленных на торцах камеры [5]. В настоящее время детектор находится на стадии проектирования и его производство планируется к 2022 г. Предварительно согласовано участие ЛРЯФ в проектировании ТРС, однако дальнейшая степень вовлеченности ЛРЯФ в обновление установки будет определяться доступным финансированием и политической обстановкой.

3. ЛРЯФ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ALICE

Продолжение изучения свойств ядерного вещества при экстремально высоких температурах осуществляется в эксперименте ALICE (БАК, ЦЕРН), для которого в ЛРЯФ в период 2005–2010 гг. была разработана, изготовлена и запущена в эксплуатацию уникальная трековая система форвардного мюонного спектрометра на основе предложенной в ПИЯФ концепции нового типа сверхтонких камер со съемом информации с сегментированных катодов [2]. Эта трековая система размером 5×5 м включала камеры, состоящие из перекрывающихся прямоугольных модулей, являющихся пропорциональными камерами с катодным съемом, катоды которых имеют падовую структуру. Отличительная особенность

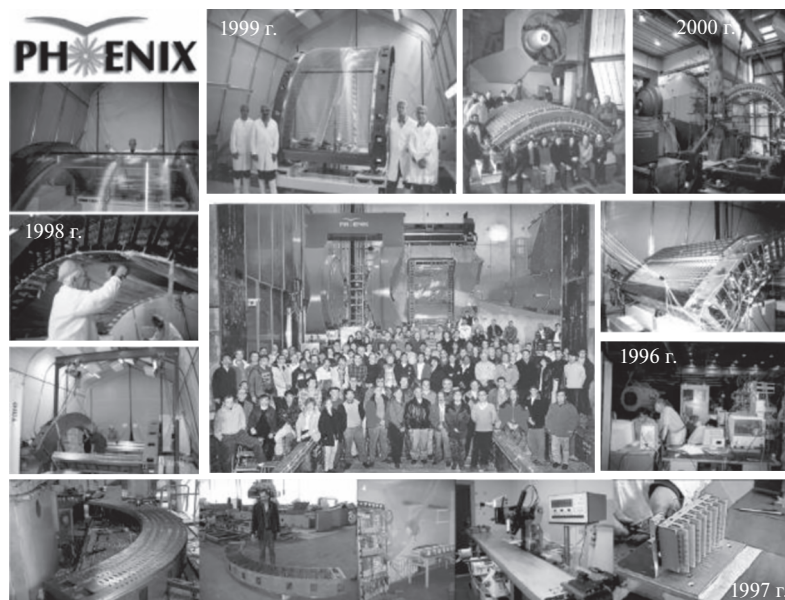


Рис. 1. Создание дрейфовых камер трековой системы эксперимента PHENIX.

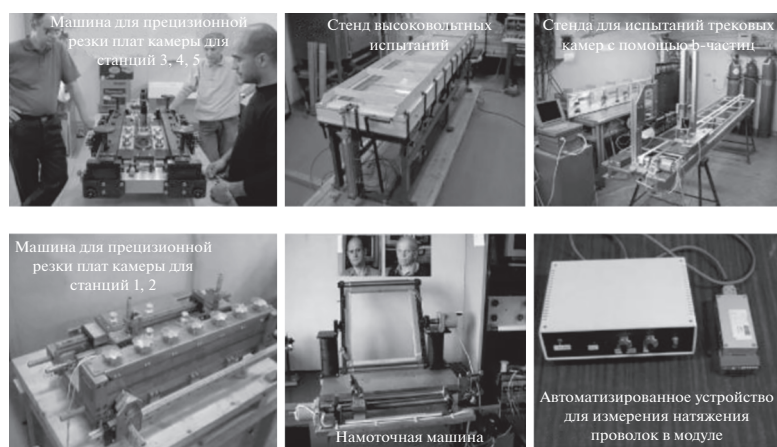


Рис. 2. Оснастка для производства модулей мюонных камер эксперимента ALICE.

изготовленных камер — высокое пространственное разрешение (100 мкм) и малое содержание конструкционных материалов (менее 0.2% ядерной длины) в акцептансе камер. В ЛРЯФ изготовлено 38 камер варьируемых габаритов — от 80 см до 24 м. Изготовленные камеры прошли высоковольтные испытания, проверку натяжения анодных проволок, а также испытания на герметичность. Для организации массового производства модулей камер в ЛРЯФ была разработана технология их сборки, тестирования и испытаний. Для этого был организован сборочный участок с классом чистоты ИСО 5 (100 000 частиц/м³) и контролируемой температурой и влажностью, предназначенный для сборки модулей трековых камер. Участок снабжен комплексом оборудования (гранитным столом с

плоскостью около 20 мкм/м, намоточной машиной, системой измерения натяжения проволок, высоковольтным испытательным стендом, бета-стендом для проверки однородности газового усиления и стендом для завершающей проверки работоспособности с помощью системы считывания камерной электроники и т. д.). Оснастка, изготовленная для производства камер, показана на рис. 2 и 3.

Спроектированная и изготовленная в ЛРЯФ система измерения натяжения проволок по их резонансной частоте была признана коллаборацией ALICE лучшей и принята к использованию в коллаборации на всех участках сборки такого типа камер. Особенностью стенда для проведения высоковольтных испытаний была пневматическая система, поднимающая тестируемую полуплоскость

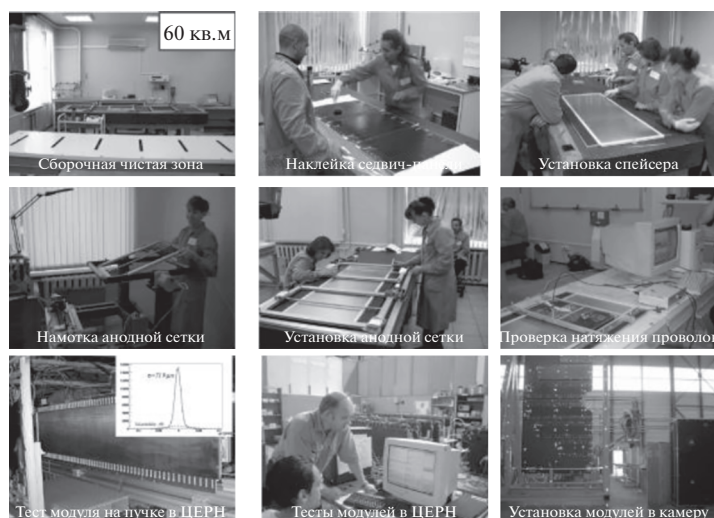


Рис. 3. Производство модулей мюонных камер эксперимента ALICE и их испытание.

и прижимающая ее к разделительным фиксаторам на прозрачной крышке стенда, на которой была смонтирована прозрачная катодная сетка. Тем самым воспроизводилась геометрия электрического поля, близкая к той, которая имеется в реальной камере. Стенд наполняется азотом — химически неактивным газом с хорошими высоковольтными свойствами. Поданное высокое напряжение вызвало коронный разряд вокруг анодных проволок модуля, визуально показывая дефекты. В стенде для проверки однородности газового усиления использовался подвижный по чувствительной зоне камеры бета-источник. При облучении камеры измерялся ток в камере, характеризующий величину газового усиления в данной точке. Помимо этого в ЛРЯФ были спроектированы мюонный фильтр (адронные поглотители) и металлическая несущая конструкция (суперструктура) закрепления камер мюонного спектрометра эксперимента ALICE.

Участие в эксперименте ALICE не ограничилось созданием детектора. Сотрудники ЛРЯФ активно участвуют в наборе данных, их анализе и физической интерпретации. Из наиболее важных результатов эксперимента ALICE, полученных со значительным, а зачастую и определяющим вкладом сотрудников ЛРЯФ, можно выделить измерение времени жизни адронной фазы в столкновениях ультрарелятивистских ядер и исследование глюонных плотностей в области малых x при ультрапериферическом протон-ионном и ион-ионном столкновениях. В ходе анализа данных, накопленных экспериментом ALICE, сотрудниками ЛРЯФ была защищена одна кандидатская диссертация.

В ходе текущей модернизации эксперимента ALICE ЛРЯФ принимает участие в разработке и изготовлении вершинного детектора MFT мюонного спектрометра [6]. Оснащение мюонного спек-

трометра вершинным детектором позволит обеспечить его работоспособность при увеличении максимальной светимости БАК и значительно расширит возможности эксперимента ALICE в изучении множества ярких явлений в процессах столкновения ультрарелятивистских ядер на ЛНС. ЛРЯФ разработала и создала испытательные стенды для подбора оптимального типа охлаждения электроники детектора MFT (имеющего 10^9 каналов), разработала проект холодильной машины и приняла участие в разработке и создании детектирующих станций. В ходе успешных совместных коллаборационных работ была изготовлена, собрана и испытана половина детектора MFT, показанная на рис. 4.

4. ЛРЯФ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ CBM

Одновременно, начиная с 2003 г., ЛРЯФ участвует в разработке и создании мюонного спектрометра MUCH и кольцевого черенковского детектора RICH для эксперимента CBM (Compressed Baryonic Matter) в исследовательском центре FAIR (GSI, Германия) на ускорителе SIS-100/300, а с 2018 г. присоединилась к коллаборации эксперимента MPD на коллайдере NICA в ОИЯИ. Цель экспериментов CBM и MPD — исследование перехода ядерного вещества в состояние кварковой плазмы при сверхвысоких барионных плотностях. Для реализации физической программы эксперимента CBM регистрация и идентификация лептонов в области малых поперечных импульсов является критичной. Поэтому к детекторам RICH предъявляются жесткие требования, а их проектирование и изготовление является сложной задачей, требующей привлечения квалифицированных специалистов и специализированных производств. На

рис. 5 представлена концепция конструкции разрабатываемого детектора RICH как классического фокусирующего детектора колец черенковского излучения. Акцептанс детектора RICH охватывает диапазон углов рассеяния до 609 мрад (35°) в горизонтальной плоскости ($x-z$) и до 425 мрад (25°) в вертикальной плоскости ($y-z$) по отношению к номинальному положению мишени, располагаясь непосредственно за дипольным магнитом. В качестве радиатора используется углекислый газ (CO_2). Фокусирующая оптическая система представляет собой сегментированную сферическую зеркальную поверхность радиусом 3 м, состоящую из стеклянных зеркал $40 \times 40 \text{ см}^2$ толщиной 6 мм с покрытием $\text{Al} + \text{MgF}_2$. Изображения колец проецируются на два фотонных детектора (ФЭУ), состоящие из многоанодных фотоэлектронных умножителей Hamamatsu H12700. Для уменьшения количества конструкционных материалов в акцептансе детектора была предложена и успешно испытана на полномасштабном прототипе конструкция фермы на основе несущих алюминиевых столбов, к которым крепятся рамки поддержки зеркал и сами зеркала. Специально разработанная конструкция рамок и оснастки позволяет легко произвести юстировку зеркал и облегчить массовое производство компонентов. Самой большой частью детектора RICH станет герметичный газовый корпус, наполненный газом в качестве радиатора. Корпус будет содержать внутри эту фокусирующую зеркальную ферму. На передней стороне корпуса будут установлены два фотонных детектора (ФЭУ) — сверху и снизу пучковой трубы. Фотонные детекторы, в свою очередь, будут окружены массивными коробами магнитной защиты фотоумножителей от остаточного магнитного поля дипольного магнита. Специальная система газового контроля будет регулировать давление газа радиатора в газовом корпусе (2 мбар выше атмосферного давления), а также осуществлять циркуляцию и очистку газа. Предполагается, что эксперимент CBM будет использовать детекторы RICH и мюонный детектор MUCH по очереди с периодичностью примерно год. Поэтому механическая конструкция детектора RICH будет разработана с учетом передвижения детектора целиком при помощи крана. В системе считывания и сбора данных будет использоваться модуль DiRICH [7], разработанный совместными усилиями сотрудничества HADES, CBM и PANDA. Для проверки предложенных конструкционных идей был изготовлен полномасштабный прототип в 1/3 фермы детектора RICH с установленными зеркалами. В настоящее время ведутся испытания конструкционных элементов и оптические измерения фокусирующих свойств зеркал на специальном стенде.

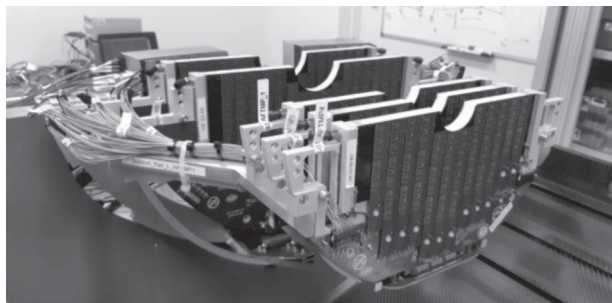


Рис. 4. Половина детектора MFT в сборе.

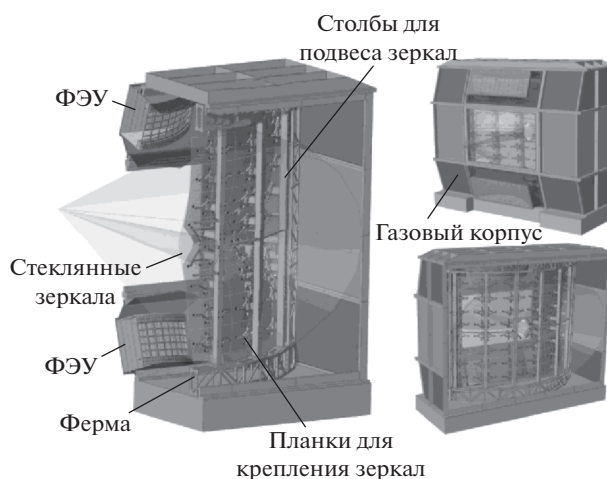


Рис. 5. Концепция конструкции детектора RICH.

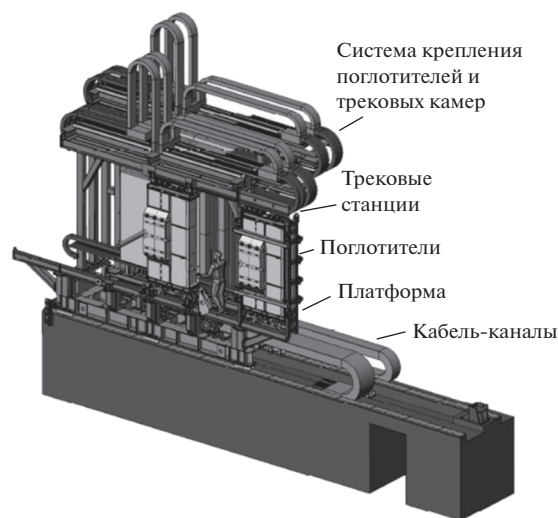


Рис. 6. Схематическое изображение эскизной модели детектора MUCH.

Проект детектора MUCH находится на стадии разработки эскизного проекта, см. рис. 6. Мюонный трековый детектор MUCH представляет собой последовательность чередующихся поглотителей и

трековых станций. Детектор должен функционировать в условиях с большой плотностью треков (в одном столкновении до 0.3 трек/см^2) и большой частотой столкновений ядер (10 МГц). Поэтому ближайшие к мишени трековые станции будут состоять из газовых электронных умножителей (GEM), а последние — из тонких дрейфовых трубок (straw). Из-за необходимости располагать на пучке детекторы RICH и MICH по очереди, поглотители и трековые станции, за исключением последнего самого тяжелого поглотителя (весом около 200 т), располагаются на подвижной платформе. Платформа позволит перемещать детектор из рабочего положения на пучке в положение ожидания. Перемещаемый вес составит около 100 т . Для облегчения подвода коммуникаций и повышения мобильности снизу по гибким кабель-каналам к верхней поверхности платформы подводятся необходимые коммуникации (оптические и электрические кабели, трубы для газа и воды). Кабель-каналы проходят по поверхности фундамента. Линейное перемещение платформы осуществляется вдоль роликовых направляющих посредством такелажной гидравлической системы горизонтального перемещения. Для удобства обслуживания трековые камеры и ближайший к мишени поглотитель (первый поглотитель) подвешены на направляющих и имеют возможность раздвигаться в стороны. Система крепления поглотителей и трековых камер представляет собой разборную рамную конструк-

цию, на которую подвешены направляющие трековых камер и направляющая первого поглотителя. Несмотря на существенную сложность поставленной задачи, накопленный в ЛРЯФ опыт проектирования и изготовления крупных детекторных систем позволит вовремя завершить проект к запуску эксперимента CBM, запланированного на 2025 г.

Автор благодарен сотрудникам ЛРЯФ А.В. Ханзадееву, М.Б. Жалову, В.Н. Никулину, Д.А. Иванцеву и Ю.Г. Рябову за помощь в подготовке доклада на сессии-конференции СЯФ ОФН РАН и настоящей статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. PHENIX Collab. (K. Adcox *et al.*), Nucl. Phys. A **757**, 184 (2005).
2. The ALICE Collab. (K. Aamodt *et al.*), JINST **3**, S08002 (2008)
3. CBM Collab. (T. Ablyazimov *et al.*), Eur. Phys. J. A **53** (3), 60 (2017).
4. D. Blaschke, J. Aichelin, E. Bratkovskaya, V. Friese, M. Gazdzicki, Y. Randrup, O. Rogachevsky, O. Teryaev, and V. Toneev, Eur. Phys. J. A **52**, 267 (2016).
5. Carlos E. Pérez Lara (for the sPHENIX Collab.), EPJ Web Conf. **171**, 10002 (2018).
6. Antonio Uras (for the ALICE MFT Working Group), J. Phys. Conf. Ser. **446**, 012054 (2013).
7. V. Patel and M. Traxler, JINST **13**, C03038 (2018).

DEVELOPMENT AND CONSTRUCTION OF TRACK AND IDENTIFICATION SYSTEMS FOR EXPERIMENTS FOR STUDYING THE EXTREME PROPERTIES OF NUCLEAR MATTER IN NUCLEAR COLLISIONS

V. M. Samsonov¹⁾

¹⁾NRC “Kurchatov Institute” — PNPI, Gatchina, Russia

Studies of the nuclear matter properties at extremely high temperatures and/or baryon densities in laboratory conditions is recognized as one of the most fundamental problems in high-energy nuclear physics. During last few decades such studies are carried out in ultra-relativistic heavy ion collisions in a number of experiments on Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) at BNL (USA) and at the Large Hadron Collider (LHC) at CERN. Also, these investigations are planned to start at the accelerator facilities FAIR (GSI, Germany) and NICA (JINR, Russia) in the nearest future. Their implementation requires the construction of complex detector systems capable of measuring events with a high particle multiplicity and reliably measuring their characteristics. This short note is devoted to review of the detector systems developed and constructed in the Laboratory of Relativistic Nuclear Physics of the NRC “Kurchatov Institute” — PNPI for experiments PHENIX at RHIC, ALICE at the LHC and CBM at FAIR aimed on studies of extreme states of nuclear matter created in relativistic nuclear collisions.