

ПЕРСПЕКТИВЫ ИЗМЕРЕНИЙ ФОТОНОВ МЕТОДОМ КОНВЕРСИИ В БУДУЩЕМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ MPD НА КОЛЛАЙДЕРЕ NICA

Е. Л. Крышень^{1,}, Н. А. Бурмасов¹, Д. А. Иванищев¹,
Д. О. Котов^{1,2}, М. В. Малаев¹, В. Г. Рябов^{1,3}, Ю. Г. Рябов¹*

¹ Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»,
Гатчина, Россия

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

³ Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва

Будущий эксперимент MPD на коллайдере NICA нацелен на измерение горячей и плотной ядерной материи, образующейся в столкновениях тяжелых ионов при энергии от 4 до 11 ГэВ. Изучение спектров фотонов через реконструкцию конверсионных электрон-позитронных пар предоставляет уникальную возможность измерить температуру образующейся среды и исследовать спектры π^0 - и η -мезонов вплоть до малых поперечных импульсов. Рассматриваются возможности измерений фотонов методом конверсии в эксперименте MPD. Также рассмотрено предложение по увеличению вероятности конверсии фотонов путем установки специализированного конверсионного слоя и исследованы перспективы измерений распределения материала в детекторе с использованием конверсионных фотонов.

The future MPD experiment at the NICA collider is aimed at studying hot and dense matter created in heavy-ion collisions at center-of-mass energies from 4 to 11 GeV. Measurements of photon spectra via reconstruction of electron-positron pairs from photon conversions provide a unique opportunity to probe the temperature of the produced medium and study π^0 and η meson yields down to low transverse momenta. In this contribution, feasibility of photon conversion measurements with the MPD experiment is discussed. A proposal to increase the photon conversion probability with a dedicated retractable converter is presented and the prospects to probe the material budget of the experiment with converted photons are evaluated.

PACS: 29.20.db; 25.75.-q

* E-mail: kryshen_el@pnpi.nrcki.ru

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных целей современной физики высоких энергий является исследование фазовой диаграммы ядерной материи в зависимости от температуры среды и ее барионной плотности. При достаточно больших плотностях и/или температурах ядерная материя должна испытывать фазовый переход в состояние деконфайнмента, в котором партоны перестают быть связанными внутри адронов. Согласно предсказаниям в рамках решеточных КХД-расчетов фазовый переход в состояние деконфайнмента должен происходить при критической температуре около 170 МэВ. Последние результаты, полученные в экспериментах на коллайдерах RHIC и LHC, свидетельствуют о том, что такой переход действительно имеет место при больших энергиях столкновений ядер [1, 2], которые соответствуют малым значениям чистой барионной плотности. Эксперимент MPD (Multi-Purpose Detector) на новом ускорительном комплексе NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility) в Объединенном институте ядерных исследований позволит изучать столкновения различных ядер в диапазоне энергий в системе центра масс $\sqrt{s_{NN}}$ от 4 до 11 ГэВ и исследовать природу фазового перехода в состояние деконфайнмента при более высоких барионных плотностях [3].

Измерения фотонов служат уникальным инструментом для изучения горячей и плотной ядерной материи, образующейся в столкновениях ядер, и для определения ее температуры [4]. Фотоны испускаются на всех стадиях эволюции системы — в начальном состоянии, в процессе расширения и в конечном состоянии. При этом фотоны практически не взаимодействуют с ядерной средой и несут ценную информацию о состоянии среды в момент их рождения.

Фотоны, рождающиеся в столкновениях тяжелых ионов, можно разделить на две основные категории: прямые фотоны и фотоны из распада адронов. Фотоны второго типа рождаются в результате электромагнитных распадов адронов, таких как нейтральные мезоны. Прямые фотоны могут быть рождены в любой момент столкновения. Их можно разделить на быстрые (prompt) и тепловые (thermal). Быстрые фотоны с поперечными импульсами больше 3 ГэВ рождаются в основном в процессе жесткого партон-партонного рассеяния в начальном состоянии. Тепловые фотоны характеризуются небольшими поперечными импульсами и рождаются в основном из кварк-глюонной плазмы или адронного газа. Их спектры похожи на спектр излучения черного тела, поэтому их можно использовать для извлечения эффективной температуры, которая соответствует среднему значению температуры, проинтегрированному по всем стадиям эволюции системы.

Спектры тепловых фотонов были измерены в экспериментах ALICE при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 2,76$ ТэВ [5] и PHENIX при энергиях от 39 до 200 ГэВ [6]. Эффективная температура полученных спектров оказалась намного выше критической, необходимой для перехода в состояние

деконфайнмента. Точные измерения эффективной температуры при более низких энергиях в эксперименте MPD позволят отследить переход от партонных степеней свободы к адронным в столкновениях тяжелых ионов.

Кроме измерений эффективной температуры важную информацию также несут измерения азимутальной асимметрии потока фотонов в нецентральных столкновениях ядер. Эту асимметрию можно охарактеризовать путем определения фурье-коэффициентов азимутального распределения импульсов частиц. Согласно последним результатам экспериментов ALICE и PHENIX эллиптический поток, соответствующий фурье-коэффициенту второго порядка, оказался сравнимым с эллиптическим потоком заряженных π -мезонов. Большой измеренный эллиптический поток фотонов представляет собой загадку (direct photon puzzle) [4], так как в современных моделях тепловые фотоны рождаются в основном на ранней стадии столкновений, которая характеризуется маленькой азимутальной асимметрией в импульсном пространстве. Данные, полученные при измерении прямых фотонов в эксперименте MPD, помогут пролить свет на этот вопрос.

Измерения прямых фотонов представляют собой нетривиальную задачу, так как в спектре фотонов, который измеряется в эксперименте, доминируют фотоны из распада π^0 - и η -мезонов. Для выделения спектра прямых фотонов обычно находят отношение $R_\gamma = \gamma_{\text{inc}}/\gamma_{\text{decay}}$, где γ_{inc} — инклюзивный спектр фотонов, а γ_{decay} — спектр фотонов распада, рассчитанный на основе измеренных спектров нейтральных мезонов. При малых поперечных импульсах отношение R_γ обычно оказывается очень близко к единице, поэтому для извлечения доли прямых фотонов необходимы точные измерения спектров π^0 - и η -мезонов.

Для измерения фотонов обычно используют два взаимодополняющих метода. Первый метод основан на прямой регистрации фотонов в электромагнитных калориметрах, а при втором методе производится измерение электрон-позитронных пар, которые возникают в результате конверсии фотонов в материале детектора. Калориметры позволяют с хорошей точностью измерять фотоны при достаточно высоких поперечных импульсах $p_T \gtrsim 1$ ГэВ/с. Измерения конверсионных фотонов позволяют улучшить разрешение при малых импульсах, но вероятность конверсии в современных экспериментах, а следовательно, и эффективность реконструкции фотонов обычно не превышают нескольких процентов.

Эксперимент MPD хорошо подходит для измерений фотонов обоими методами. На первой стадии эксперимента измерения треков заряженных частиц будут проводиться с использованием времяпроекционной камеры TPC в центральной области псевдобыстрот $|\eta| < 1,2$, а идентификация типа частиц будет основана на измерениях потерь энергии в TPC и времени пролета в детекторе TOF. Электромагнитный калориметр ECal будет использоваться для идентификации электронов, фотонов и нейтральных адронов. На второй стадии эксперимента между пучковой трубой и

детектором ТРС будет установлена внутренняя трековая система (ITS), которая позволит эффективно отделять вторичные вершины распада очарованных адронов. Таким образом, на первой стадии эффективными центрами конверсии фотонов будут служить элементы пучковой трубы и внутренние стенки ТРС, а на второй стадии вероятность конверсии будет увеличена за счет дополнительных конструктивных элементов ITS.

В предыдущих работах, посвященных реконструкции фотонов методом конверсии в эксперименте MPD, была проведена оптимизация критериев отбора электрон-позитронных пар и получены оценки эффективности реконструкции и ожидаемых выходов фотонов и нейтральных мезонов на первой стадии эксперимента [7, 8]. Было показано, что разработанные критерии отбора позволят провести измерения спектров нейтральных π -мезонов уже в первый год работы ускорителя. Также были получены оценки ожидаемого отношения R_γ для различных центральных столкновений ядер и установлено, что эффективная температура может быть измерена с точностью порядка 10–15 % при измерениях R_γ с точностью около 2 %.

В этой работе рассматривается возможность установки дополнительного конверсионного слоя для увеличения эффективности реконструкции фотонов, а также изучается улучшение эффективности после установки ITS на втором этапе эксперимента. Наконец, будет рассмотрена возможность использования конверсионных фотонов для изучения распределения материала в детекторе.

1. УСТАНОВКА ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО КОНВЕРСИОННОГО СЛОЯ

На первом этапе эксперимента MPD вероятность конверсии будет определяться эффективной радиационной длиной поддерживающих структур и внутренних стенок ТРС, которая составляет около 3% X_0 . Маленькая радиационная длина приводит к относительно низкой эффективности реконструкции фотонов конверсионным методом. Проведенное реалистичное моделирование эксперимента показало, что эффективность реконструкции фотонов не превышает 2 % [8].

Для увеличения вероятности конверсии, а следовательно, и эффективности реконструкции фотонов между пучковой трубой и внутренними стенками ТРС можно установить дополнительный конверсионный слой. Установка дополнительного конверсионного слоя является стандартной практикой в экспериментах по физике высоких энергий. Например, в эксперименте PHENIX вокруг пучковой трубы была установлена дополнительная латунная труба эффективной радиационной длины около 1,7% X_0 , конверсии на которой использовались в качестве нормировки для получения точных оценок фоновых электронов в измерениях полуплептонных распадов очарованных мезонов [9, 10]. Установка допол-

нительного конверсионного слоя для увеличения эффективности реконструкции фотонов также планируется в эксперименте ALICE 3 [11].

В качестве недорогого дополнительного конвертера в эксперименте MPD можно использовать, например, медную или латунную трубу радиусом около 15 см. Очевидно, что установка дополнительного слоя может привести к ухудшению эффективности реконструкции треков и их разрешения, поэтому толщину конвертера необходимо оптимизировать, чтобы соблюсти баланс между эффективностью реконструкции фотонов и разрешением по импульсу и прицельному параметру треков. В этой работе мы рассматриваем возможность установки цилиндрической медной трубы с двумя вариантами ее эффективной радиационной длины: 5 и 10 %.

Эффективность реконструкции фотонов в различных вариантах детектора была изучена с использованием стандартного пакета моделирования эксперимента MpdRoot [12], в который также включены алгоритмы моделирования отклика детекторов и реконструкции треков частиц. Для отбора треков использовались критерии и алгоритмы, разработанные в предыдущих работах по этой тематике [7, 8]. Электроны и позитроны отбирались в диапазоне $|\eta| < 1$, $p_T > 50$ МэВ по псевдобыстроте и поперечному импульсу, после чего накладывались дополнительные требования на электрон-позитронную пару, такие как маленькая инвариантная масса и маленький угол между направлением импульса пары и направлением на первичную вершину. Критерии отбора были оптимизированы с использованием метода многомерного анализа с целью максимизации значимости сигнала прямых фотонов.

Полученные распределения эффективности в зависимости от поперечного импульса фотонов представлены на рис. 1. Можно отметить, что установка дополнительного конверсионного слоя приведет к значи-

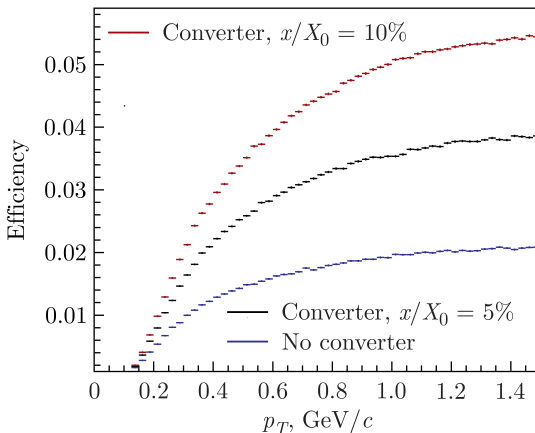


Рис. 1. Эффективность реконструкции фотонов для разных вариантов конверсионного слоя в детекторе MPD

тельному улучшению эффективности реконструкции фотонов: примерно в 3 раза при использовании конвертера 10% X_0 эффективной радиационной длины. Кроме того, реконструкция фотонов на конверсионном слое позволяет минимизировать систематические ошибки, связанные с описанием детектора при моделировании методом Монте-Карло и плохим знанием распределения материала в детекторе.

Установка дополнительного материала перед трековой системой ТРС неизбежно приведет к ухудшению разрешения параметров треков из-за дополнительных потерь энергии и многократного рассеяния в материале конвертера. Влияние этого эффекта было изучено для двух вариантов конвертера (5 и 10% X_0) на примере реконструкции заряженных π -мезонов в Au–Au-столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 11$ ГэВ. На рис. 2

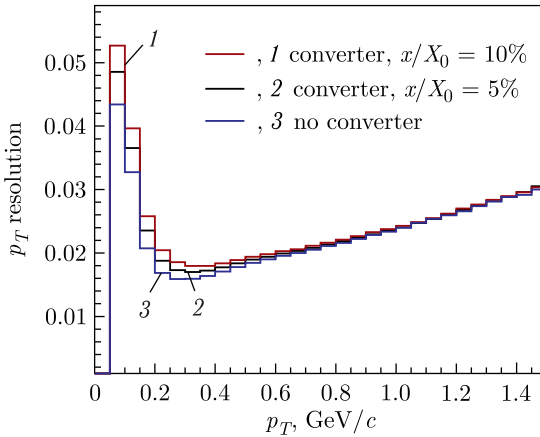


Рис. 2. Разрешение по поперечному импульсу для заряженных π -мезонов

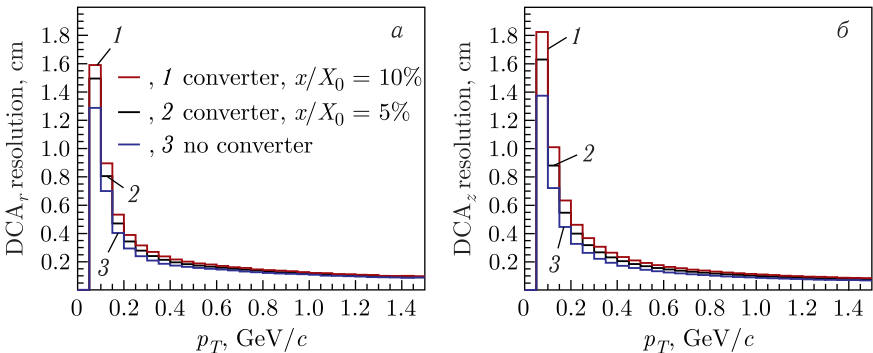


Рис. 3. Распределения разрешения по прицельному параметру (а — по радиусу, б — по координате z) в зависимости от поперечного импульса для заряженных π -мезонов

представлена зависимость разрешения по поперечному импульсу от поперечного импульса. Установка дополнительного конвертера приводит к значительному ухудшению разрешения для малых поперечных импульсов — примерно на 20% при установке конвертера эффективной радиационной длины 10% X_0 . Аналогичный эффект можно заметить в распределениях разрешения по прицельному параметру в зависимости от поперечного импульса, представленных на рис. 3.

Для измерений прямых фотонов более предпочтительным является вариант конвертера 10%-й радиационной длины, так как он позволит значительно увеличить эффективность реконструкции фотонов. В то же время ухудшение качества реконструкции треков может повлиять на другие физические измерения, в которых разрешение в области малых поперечных импульсов играет важную роль, поэтому вариант конвертера 5%-й радиационной длины может оказаться более предпочтительным.

2. ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕКОНСТРУКЦИИ ФОТОНОВ НА ВТОРОЙ СТАДИИ ЭКСПЕРИМЕНТА MRD

Как уже упоминалось во введении, на второй стадии эксперимента будет установлена внутренняя трековая система ITS. Она будет состоять из трех внутренних и двух внешних детекторных слоев, основанных на технологии монолитных активных пиксельных сенсоров, которая в настоящее время разрабатывается коллаборацией ALICE. Сенсоры будут представлять собой гибкие кремниевые пластины, которым можно будет придать цилиндрическую форму. С учетом того, что поддерживающие и охлаждающие структуры будут очень легкими, возможно будет достичь очень маленьких значений эффективной радиационной длины — порядка 0,05% X_0 на каждый детекторный слой [13]. Поэтому можно ожидать, что эффективность реконструкции фотонов не должна значительно улучшиться по сравнению с первой стадией.

Для определения эффективности реконструкции фотонов в этом случае было проведено реалистичное моделирование с использованием варианта детектора, включающего модель детектора ITS. На рис. 4, а показано распределение центров конверсии в этом варианте, где можно различить пучковую трубу, пять слоев ITS и внутренние стенки TRC. Установка ITS приведет к незначительному росту эффективности реконструкции фотонов с $\sim 2\%$ на первой стадии эксперимента до $\sim 2,5\%$ на второй стадии (см. рис. 4, б).

3. ИЗУЧЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАТЕРИАЛА В ДЕТЕКТОРЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНВЕРСИОННЫХ ФОТОНОВ

Для проведения реалистичного моделирования эксперимента необходимо с хорошей точностью знать информацию о распределении материала в детекторе. Особенно это актуально для измерений прямых

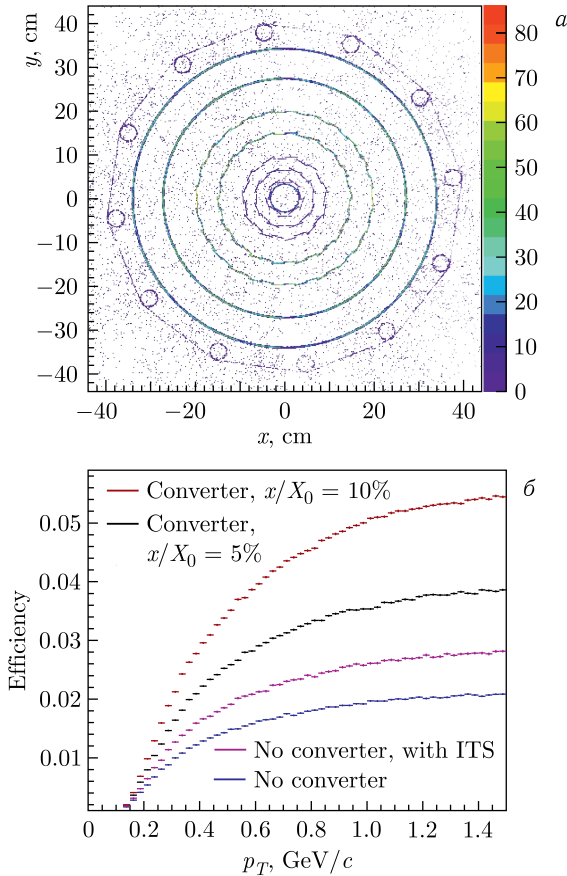


Рис. 4. *а)* Распределение центров конверсии на второй стадии эксперимента MPD. *б)* Эффективность реконструкции фотонов на второй стадии в сравнении с эффективностью на первой стадии для разных вариантов дополнительного конверсионного слоя

фотонов конверсионным методом, где также необходимо реконструировать центры конверсий с хорошим разрешением и с хорошей точностью знать вероятность конверсии. Эту задачу можно обратить: использовать конверсионные фотоны для изучения распределения материала в детекторе и более точного позиционирования различных детекторных частей. Такой метод применяется во многих экспериментах [14–17]. Еще лучшего разрешения по координатам (порядка $\sim 0,2$ мм) можно достичь с использованием ядерных взаимодействий адронов с материалом детектора, которые характеризуются гораздо большей множественностью вторичных вершин [18, 19].

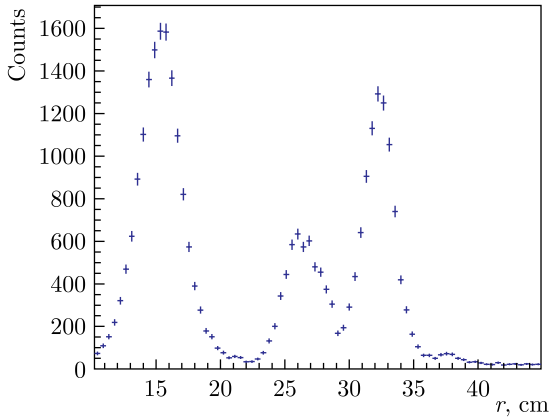


Рис. 5. Распределение реконструированных вершин конверсионных фотонов по радиусу

Возможность измерения распределения материала в детекторе MPD методом конверсии была исследована в варианте эксперимента с установленным конверсионным слоем 5%-й радиационной длины. Для этого использовался простой генератор Монте-Карло фотонов с равномерным распределением фотонов по поперечному импульсу и скорости в диапазоне $p_T < 0,5 \text{ ГэВ}$ и $|\eta| < 1$ соответственно. Распределение реконструированных координат конверсионных центров по радиусу показано на рис. 5, где можно заметить пики, соответствующие конверсионному слою (на радиусе 15 см) и внутренним стенкам и поддерживающим структурам ТРС (на ~ 27 и ~ 33 см). Хорошо известную радиационную длину конверсионного слоя можно использовать в качестве калибровки. Радиационная длина других детекторных частей может быть получена из распределения конверсионных центров с использованием отношения числа фотонов, конвертировавших на калибровочном конверсионном слое и исследуемой части детектора.

К сожалению, разрешение реконструированных координат вершины составляет порядка 1 см, что ограничивает возможности использования метода конверсии для «томографии» детектора и не позволяет разрешать мелкие детали конструкции. На втором этапе эксперимента установка точной трековой системы позволит значительно улучшить разрешение координат вторичных вершин [20, 21].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод конверсии позволяет проводить точные измерения прямых фотонов, которые являются важным источником информации о горячей и плотной ядерной материи, рождающейся в столкновениях тяжелых ионов. В современных экспериментах на коллайдерах RHIC и LHC ис-

пользуются детекторы небольшой радиационной длины, что ограничивает возможности применения этого метода. В данной работе показано, что установка недорогого конверсионного слоя на первом этапе эксперимента MPD позволяет в 3 раза увеличить эффективность реконструкции фотонов методом конверсии при сохранении приемлемого разрешения по прицельному параметру и поперечному импульсу, а также уменьшить систематические ошибки, связанные с описанием распределения материала в детекторе. Установка ITS на втором этапе эксперимента лишь незначительно улучшит эффективность реконструкции фотонов.

Продемонстрированы возможности метода конверсионных фотонов для «томографии» детекторных конструкций. Показано, что разрешение реконструированных координат вершины составляет около 1 см, что не позволяет разрешать мелкие детали детекторных частей, но дает возможность проводить грубые оценки распределения материала в детекторе.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-02-40045) и частично поддержано НИЯУ МИФИ (проект 5-100, договор № 02.а03.21.0005, 27.08.2013). Представленные результаты были получены с использованием ресурсов ЦОД РК ПИК НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Laermann E., Philipsen O.* The Status of Lattice QCD at Finite Temperature // *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* 2003. V. 53. P. 163–198.
2. *Fukushima K., Hatsuda T.* The Phase Diagram of Dense QCD // *Rep. Prog. Phys.* 2011. V. 74. P. 014001.
3. *Golovatyuk V., Kekelidze V., Kolesnikov V., Rogachevsky O., Sorin A.* The Multi-Purpose Detector (MPD) of the Collider Experiment // *Eur. Phys. J. A.* 2016. V. 52. P. 212.
4. *David G.* Direct Real Photons in Relativistic Heavy Ion Collisions // *Rep. Prog. Phys.* 2020. V. 83. P. 046301.
5. *Adam J. et al. (ALICE Collab.).* Direct Photon Production in Pb–Pb Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV // *Phys. Lett. B.* 2016. V. 754. P. 235–248.
6. *Adare A. et al. (PHENIX Collab.).* Beam Energy and Centrality Dependence of Direct-Photon Emission from Ultrarelativistic Heavy-Ion Collisions // *Phys. Rev. Lett.* 2019. V. 123. P. 022301.
7. *Kryshen E. et al. (MPD Collab.).* Reconstruction of Photon Conversions in the MPD Experiment // *Particles.* 2021. V. 4. P. 55–62.
8. *Kryshen E. et al. (MPD Collab.).* Thermal Photon and Neutral Meson Measurements Using the Photon Conversion Method in the MPD Experiment at the NICA Collider // *Phys. Part. Nucl.* 2021. V. 52. P. 669–674.
9. *Adler S.S. et al. (PHENIX Collab.).* Centrality Dependence of Charm Production from Single Electrons Measurement in Au + Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV // *Phys. Rev. Lett.* 2005. V. 94. P. 082301.

10. *Adare A. et al. (PHENIX Collab.)*. Measurement of High- p_T Single Electrons from Heavy-Flavor Decays in $p + p$ Collisions at $\sqrt{s} = 200$ GeV // *Phys. Rev. Lett.* 2006. V. 97. P. 252002.
11. *Adamová D. et al.* A Next-Generation LHC Heavy-Ion Experiment. arXiv:1902.01211. 2019.
12. *Allison J. et al.* Recent Developments in Geant4 // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2016. V. 835. P. 186–225.
13. *Murin Y. A. et al. (MPD-ITS Collab.)*. The Inner Tracking System for the MPD Setup of the NICA Collider // *Phys. Part. Nucl.* 2021. V. 52. P. 742–751.
14. *Koch K. et al. (ALICE Collab.)*. π^0 and η Measurement with Photon Conversions in ALICE in Proton–Proton Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV // *Nucl. Phys. A.* 2011. V. 855. P. 281–284.
15. *Aaboud M. et al. (ATLAS Collab.)*. Study of the Material of the ATLAS Inner Detector for Run 2 of the LHC // *J. Instrum.* 2017. V. 12. P12009.
16. *Abelev B. et al. (ALICE Collab.)*. Measurement of Electrons from Semileptonic Heavy-Flavour Hadron Decays in pp Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV // *Phys. Rev. D.* 2012. V. 86. P. 742–751.
17. *Migliore E.* CMS Tracker Alignment and Material Budget Measurements // *PoS SR.* 2011. V. D11. P. 008.
18. *Sirunyan A. et al. (CMS Collab.)*. Precision Measurement of the Structure of the CMS Inner Tracking System Using Nuclear Interactions // *J. Instrum.* 2018. V. 13. P10034.
19. *Aaboud M. et al. (ATLAS Collab.)*. A Measurement of Material in the ATLAS Tracker Using Secondary Hadronic Interactions in 7 TeV pp Collisions // *J. Instrum.* 2016. V. 11. P11020.
20. *Zinchenko D., Zinchenko A., Nikonov E.* Development of a Vector Finder Toolkit for Track Reconstruction in MPD ITS // *Phys. Part. Nucl.* 2021. V. 52. P. 788–792.
21. *Zinchenko D., Nikonov E., Vasendina V., Zinchenko A.* A Vector Finder Toolkit for Track Reconstruction in MPD ITS // *Particles.* 2021. V. 4. P. 186–193.