

УДК: 539.1.05, 004.942, 004.67

Моделирование и анализ основных характеристик внутренней трековой системы многофункционального детектора частиц MPD методом Монте-Карло

Д. А. Зинченко^{1,2,a}, Э. Г. Никонов^{1,2}, А. И. Зинченко¹

¹Объединенный институт ядерных исследований,
Россия, 141980, Московская область, г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, д. 6

²Государственный университет «Дубна»,
Россия, 141980, Московская область, г. Дубна, ул. Университетская, д. 19

E-mail: ^a zinchenk1994@gmail.com

Получено 24.04.2018, после доработки — 25.12.2018.

Принято к публикации 27.12.2018.

В настоящее время в ОИЯИ (Дубна) осуществляется строительство ускорительного комплекса NICA для проведения экспериментов по изучению взаимодействий релятивистских ядер и поляризованных частиц (протонов и дейтронов). Одна из создаваемых экспериментальных установок MPD (MultiPurpose Detector) рассчитана на изучение ядро-ядерных, протон-ядерных и протон-протонных взаимодействий. В связи с планами развития установки MPD рассматривается возможность создания внутреннего трекера с использованием кремниевых пиксельных детекторов нового поколения. Предполагается, что такой детектор позволит значительно повысить исследовательский потенциал эксперимента как для ядро-ядерных (за счет высокого пространственного разрешения вблизи области пересечения пучков), так и для протон-протонных (за счет высокого быстродействия) взаимодействий.

В представленной работе изучаются основные характеристики такого трекера с использованием данных по протон-протонным взаимодействиям, полученных с помощью моделирования методом Монте-Карло. В частности, оцениваются возможности детектора по восстановлению вершин распада короткоживущих частиц и по выделению редких событий таких распадов среди продуктов гораздо более вероятных «обычных» взаимодействий. Также затрагивается проблема разделения вершин взаимодействий для восстановления наложенных событий при высокой светимости ускорителя и способность детектора проводить быструю селекцию редких событий (триггер). Полученные результаты могут быть использованы для обоснования необходимости создания данного детектора и развития системы триггера высокого уровня, основанного в том числе на методах машинного обучения.

Ключевые слова: моделирование методом Монте-Карло, кремниевый пиксельный детектор, вторичная вершина, очарованные частицы

UDC: 539.1.05, 004.942, 004.67

A Monte-Carlo study of the inner tracking system main characteristics for multi purpose particle detector MPD

D. A. Zinchenko^{1,2,a}, E. G. Nikonov^{1,2}, A. I. Zinchenko¹

¹Joint Institute for Nuclear Research,
6 Joliot-Curie st., Dubna, Moscow region, 141980, Russia

²Dubna State University,
19 Universitetskaya st., Dubna, Moscow region, 141980, Russia

E-mail: ^a zinchenk1994@gmail.com

Received 24.04.2018, after completion — 25.12.2018.

Accepted for publication 27.12.2018.

At present, the accelerator complex NICA is being built at JINR (Dubna). It is intended for performing experiments to study interactions of relativistic nuclei and polarized particles (protons and deuterons). One of the experimental facilities MPD (MultiPurpose Detector) was designed to investigate nucleus-nucleus, proton-nucleus and proton-proton interactions. The existing plans of future MPD upgrade consider a possibility to install an inner tracker made of the new generation silicon pixel sensors. It is expected that such a detector will considerably enhance the research capability of the experiment both for nucleus-nucleus interactions (due to a high spatial resolution near the collision region) and proton-proton ones (due to a fast detector response).

This paper presents main characteristics of such a tracker, obtained using a Monte-Carlo simulation of the detector for proton-proton collisions. In particular, the detector ability to reconstruct decay vertices of short-lived particles and perform a selection of rare events of such decays from much more frequent “common” interactions are evaluated. Also, the problem of a separation of multiple collisions during the high luminosity accelerator running and the task of detector triggering on rare events are addressed. The results obtained can be used to justify the necessity to build such a detector and to develop a high-level trigger system, possibly based on machine learning techniques.

Keywords: Monte-Carlo simulation, silicon pixel detector, secondary vertex, charmed particles

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2019, vol. 11, no. 1, pp. 87–94 (Russian).

Введение

В настоящее время в Объединенном институте ядерных исследований (Дубна, Московская обл.) создается ускорительно-накопительный комплекс NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility) [Kekelidze, 2017]. В нем будут ускоряться частицы от протонов и дейтронов до ядер золота. При столкновениях встречных пучков будут достигаться энергии в системе центра масс 27 ГэВ при светимости $10^{32} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ (для протонов) и 11 ГэВ при светимости $10^{27} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ для ядер золота. Одной из создаваемых экспериментальных установок является MPD (MultiPurpose Detector) [Abraamyan et al., 2010]. Поскольку основной задачей установки является изучение свойств сверхплотной ядерной материи, то основным трековым детектором была выбрана время-проекционная камера TPC (Time Projection Chamber), позволяющая достаточно хорошо восстанавливать траектории заряженных частиц при высокой множественности.

Несмотря на то что установка MPD еще находится в стадии создания, уже сейчас рассматриваются возможные пути ее усовершенствования. В качестве одного из этапов модернизации предполагается изготовление внутренней трековой системы ITS (Inner Tracking System) на основе пиксельных кремниевых детекторов нового поколения [Abelev et al., 2014], обладающей улучшенной координатной точностью и гранулярностью считывающих элементов и высоким быстродействием.

Такой трекер позволит значительно улучшить точность восстановления вершин взаимодействий, в том числе вершин распада короткоживущих частиц, а следовательно, появляется возможность изучения редких распадов (например, частиц с открытым очарованием). Высокое быстродействие позволит улучшить возможности работы при большой светимости коллайдера, т. е. реконструировать события при большой частоте столкновений пучков. Обе улучшенные характеристики могут позволить разработать концепцию триггера для редких процессов.

В первую очередь модернизация установки будет нацелена на восстановление и отбор очарованных частиц во взаимодействиях тяжелых ионов, поскольку они могут дать информацию о начальной стадии эволюции сверхплотной ядерной материи. Однако задача поиска очень редких процессов в событиях с большой множественностью требует значительных усилий по настройке программ реконструкции. В этой работе была предпринята попытка проверить улучшение характеристик трековой системы на более простых (с гораздо меньшей множественностью) событиях протон-протонных взаимодействий для того, чтобы подтвердить правильность предложенной концепции нового трекера.

Конфигурация установки

На рис. 1 слева показано взаимное расположение пучковой трубы, ITS и TPC. Близкое расположение кремниевого трекера к точке взаимодействия значительно улучшает его возможности для восстановления вершин распада короткоживущих частиц. Предполагаемая конфигурация детектора приведена на рис. 1 справа. Он состоит из 5 слоев пиксельных сенсоров, расположенных с перекрытием для исключения мертвых зон. Такое число слоев позволит использовать трекер в качестве самостоятельного прибора (независимого от TPC), тем самым давая возможность быстрой предварительной реконструкции для триггера высокого уровня и увеличивая геометрическую эффективность установки для частиц с малым поперечным импульсом.

Генератор событий, программы моделирования и реконструкции событий

События протон-протонных взаимодействий при энергии в системе центра масс $\sqrt{s} = 25 \text{ ГэВ}$ генерировались с помощью пакета Pythia8 [Sjöstrand et al., 2015]. Рожденные частицы

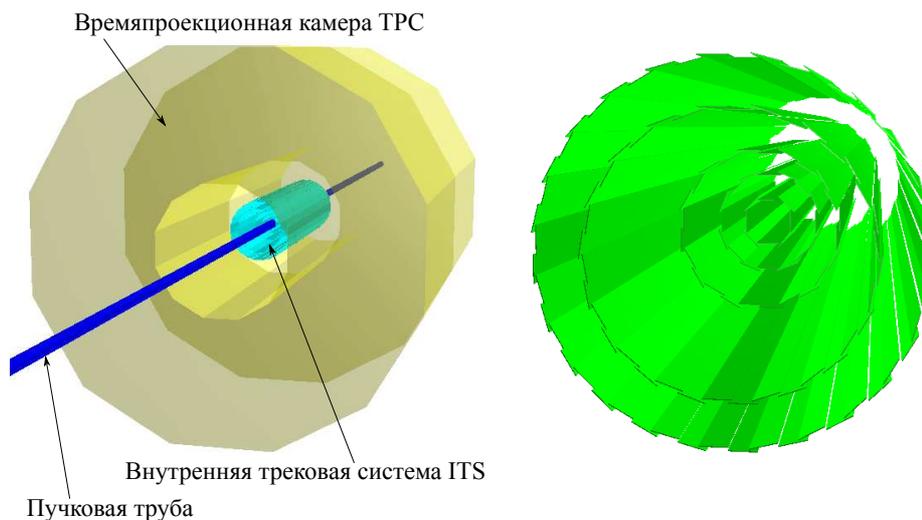


Рис. 1. Слева — модель взаимного расположения пучковой трубы, внутренней трековой системы ITS и время проекционной камеры ТРС; справа — 5-слойная модель внутренней трековой системы ITS. Цветная версия рисунка доступна в электронной версии статьи на сайте журнала

пропускались через установку с помощью пакета Geant3, интегрированного в программную оболочку MpdRoot [Gertsenberger et al., 2016]. Отклик детекторов ТРС и ITS на прохождение заряженных частиц через их чувствительные слои моделировался в виде «хитов», т. е. точек с гауссовским размыванием координат со стандартным отклонением в ТРС 500 мкм и 1 мм [Абраамян et al., 2010] поперек и вдоль направления пучка соответственно и 10 мкм в ITS в обоих направлениях [Abelev et al., 2014]. Восстановление треков заряженных частиц и вершин взаимодействия пучков (первичная вершина) и распада короткоживущих частиц (вторичная) осуществлялось с помощью программ реконструкции на основе фильтра Кальмана [Gertsenberger et al., 2016] в рамках той же программной оболочки. Для данной работы использовался подход к восстановлению событий, при котором реконструкция осуществлялась в ТРС, а затем треки экстраполировались в направлении пучковой трубы для добавления хитов из ITS. На рис. 2 можно видеть, что использование ITS заметно улучшает точность экстраполяции треков, а следовательно, точность восстановления вершин.

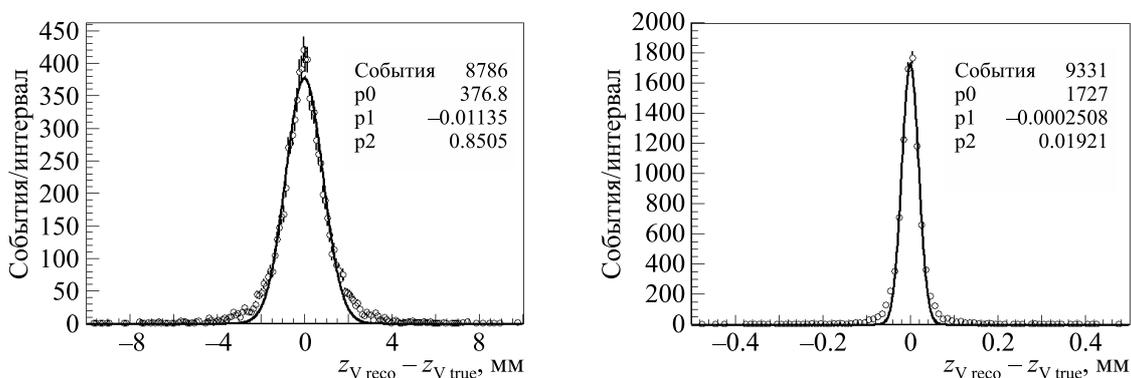


Рис. 2. Слева — распределение ошибок восстановления продольной координаты первичной вершины в установке без внутреннего трекера (только в ТРС); справа — то же самое с использованием ITS (различная шкала по горизонтали). Приведены параметры аппроксимации гауссовской функцией $f(x) = p_0 \exp\left(\frac{-(x-p_1)^2}{2p_2^2}\right)$

Отбор распадов D-мезонов

Чтобы проверить возможности, связанные с улучшением координатной точности, было проведено моделирование восстановления $D^{+(-)}$ -мезонов в протон-протонных взаимодействиях. Рассматривалась следующая мода распада: $D^{+(-)} \rightarrow K^{-(+)} + \pi^{+(-)} + \pi^{+(-)}$ с относительным парциальным сечением 9.2%. Было сгенерировано 2 тыс. событий с распадами D-мезонов по выбранному каналу. При сечении 259 нб, предсказываемом Pythia8, это соответствует набору данных в течение 20 часов при светимости $10^{29} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$. Для обеспечения высокого качества восстановления рассматривались только треки с достаточным количеством хитов в TPC (>30), что соответствует углам относительно оси пучков в интервале $25\text{--}155^\circ$, т. е. ± 1.5 по псевдобыстроте. В процессе реконструкции было восстановлено около 40% изучаемых распадов. Поскольку сечение «обычных» процессов, видимых в установке (так называемых недифракционных), составляет около 24 мб, то одно интересующее событие случается на 92 тыс. обычных. Учитывая тот факт, что продукты распада (каон и пионы) легко образуются в протон-протонных взаимодействиях, селекция нужного процесса является задачей достаточно сложной. Для подавления комбинаторного фона использовалась способность вершинного детектора определять вершины распадов с высокой точностью. На рис. 3 слева видно, что, применяя обрезание на расстоянии от первичной до вторичной вершины (длину пробега D-мезона до распада) > 1.5 мм, можно существенно подавить фон (рис. 3 справа). Дополнительные критерии отбора требовали высокого качества восстановления топологии распада (рис. 4): число треков, использованных для восстановления первичной вершины, > 3 (для хорошей точности), максимальное попарное расстояние между треками во вторичной вершине < 1 мм, угол между импульсом D-мезона и направлением от первичной ко вторичной вершине < 0.1 рад. В результате отбора были получены следующие значения величин, характеризующих качество восстановления изучаемого распада: отношение «сигнал/фон» (S/B) 5.7, значимость ($S/\sqrt{S+B}$) 12.9. Здесь за величину сигнала S взято число событий (интеграл) в пределах $\pm 2\sigma$ от гауссовской функции, описывающей пик распределения по инвариантной массе, а за величину фона взят интеграл от квадратичного полинома, описывающего подложку (рис. 3 справа). При этом эффективность, т. е. отношение сигнала S к начальному числу сгенерированных изучаемых распадов, составила 10%. Следует отметить, что приведенные численные значения критериев отбора не претендуют на оптимальность, так как понятие оптимальности, вообще говоря, зависит от деталей физического анализа изучаемого процесса [Шиева et al., 2015].

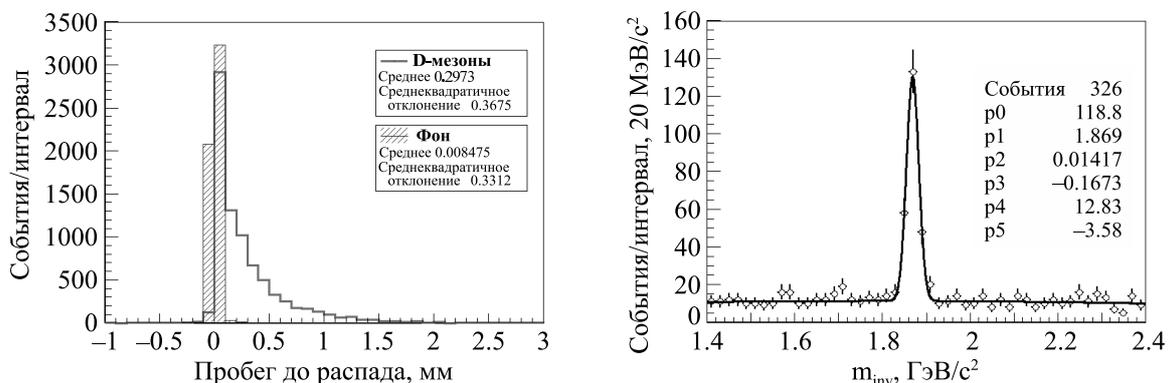


Рис. 3. Слева — восстановленная длина пробега до распада (расстояние от вторичной до первичной вершины) D-мезонов и фоновых комбинаций; справа — спектр восстановленных инвариантных масс комбинаций $K^-\pi^+\pi^+$ ($K^+\pi^-\pi^-$). Также приведены параметры аппроксимации суммой гауссовской функции и квадратичного полинома $f(x) = p_0 \exp\left(\frac{-(x-p_1)^2}{2p_2^2}\right) + p_3 + p_4x + p_5x^2$

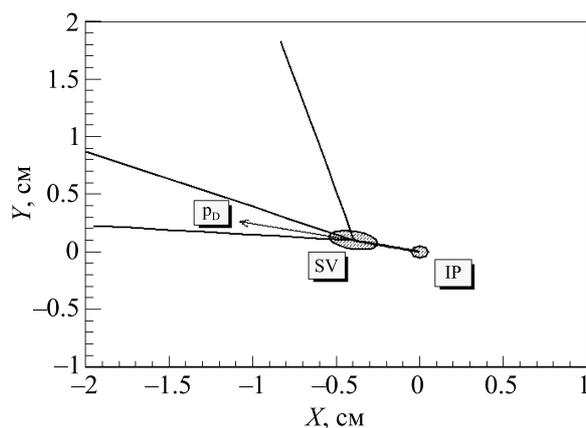


Рис. 4. Топология рассматриваемого распада (вид в плоскости, перпендикулярной оси пучка): IP (Interaction Point) — восстановленная точка взаимодействия протонных пучков (первичная вершина), SV (Secondary Vertex) — восстановленная точка распада D-мезона (вторичная вершина), p_D — восстановленный импульс D-мезона

Повышение быстродействия установки

Как уже было отмечено, ITS может существенно повысить быстродействие установки MPD. Связано это с тем, что максимальное время дрейфа электронов ионизации в TPC составляет около 30 нс [Abraamyan et al., 2010], что будет приводить к наложению информации от последовательных взаимодействий пучков при частоте столкновений больше 30 кГц. В случае ядро-ядерных взаимодействий это не является существенным ограничением, так как значение максимальной светимости $10^{27} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ соответствует частоте 7 кГц. Для протонных пучков частота 30 кГц соответствует светимости $10^{30} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$, что гораздо ниже верхнего предела. Быстродействие ITS определяется временем считывания сигнала с детектора и может достигать 400 кГц для протон-протонных взаимодействий [Abelev et al., 2014]. Это даст возможность увеличить быстродействие установки в целом, так как восстановленная в ITS с высокой точностью точка взаимодействия пучков протонов (первичная вершина) заметно облегчит «распутывание» информации от нескольких наложенных взаимодействий в TPC. Сказанное может быть проиллюстрировано с помощью рис. 5, где показаны траектории заряженных частиц вблизи ITS от трех протон-протонных взаимодействий и образованные ими хиты в ITS и TPC. Следует отметить, что при наложении событий в TPC реконструкция еще усложняется из-за того, что между взаимодействиями проходит некоторое (нефиксированное) время, которое надо учитывать при восстановлении продольной координаты хитов. Так что быстродействие ITS должно существенно облегчить задачу реконструкции. Более того, благодаря высокой точности восстановления вершины в детекторе ITS (19 мкм — рис. 2 справа) и тому факту, что зона столкновений пучков в продольном направлении может быть описана гауссовским распределением со стандартным отклонением 24 см, можно надеяться разрешить даже наложение нескольких событий в ITS (при еще большей светимости), так как с большой вероятностью последовательные взаимодействия будут достаточно разнесены вдоль пучка.

Для изучения редких процессов при больших светимостях потребуется развитие триггера, т. е. системы отбора потенциально интересных событий в режиме реального времени. Предлагаемый внутренний трекер может помочь в реализации такой системы. Например, на рис. 6 можно видеть, что уже распределение по числу хитов в ITS можно использовать в качестве критерия отбора событий с распадом D-мезона. Разработка более мощных критериев и их реализация в виде быстрых алгоритмов требуют дальнейшего изучения.

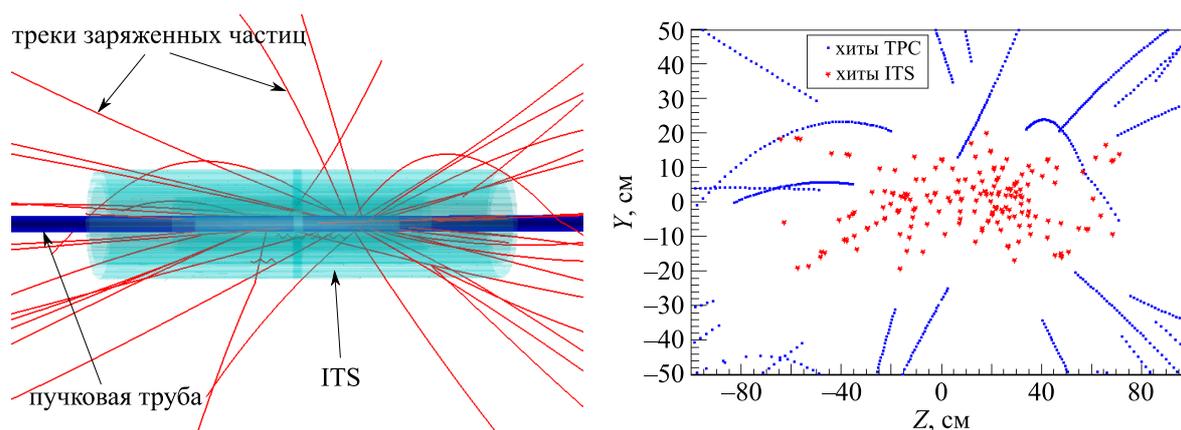


Рис. 5. Слева — фрагменты траекторий вблизи ITS заряженных частиц, образовавшихся в результате трех протон-протонных столкновений; справа — хиты в ITS и TPC от события слева. Цветная версия рисунка доступна в электронной версии статьи на сайте журнала

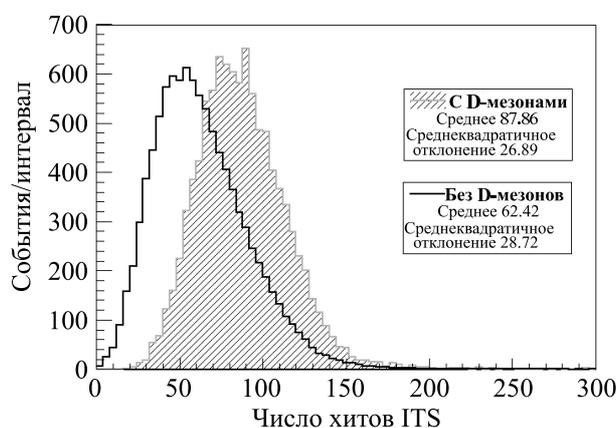


Рис. 6. Распределения числа хитов в ITS в событиях с D-мезоном и без него

Заключение

С помощью моделирования методом Монте-Карло изучены основные характеристики внутреннего кремниевого трекера, разрабатываемого для использования в установке MPD на комплексе NICA после ее модернизации. Показано, что основные параметры детектора (координатное разрешение) и рассмотренная конструкция дадут возможность изучать редкие распады короткоживущих частиц, тем самым повысив исследовательский потенциал эксперимента в этой области.

В дальнейшем планируется проверить возможность восстановления очарованных частиц в ядро-ядерных взаимодействиях с большой множественностью. Кроме того, предполагается более углубленное изучение реализуемости выработки триггера на редкие события в протон-протонных взаимодействиях, в частности с использованием методов машинного обучения.

Авторы выражают благодарность В. П. Кондратьеву (СПбГУ) и Ю. А. Мурину (ОИЯИ) за предоставленную информацию о возможной конфигурации внутреннего трекера ITS.

Список литературы (References)

- Abelev B. et al.* Technical Design Report for the Upgrade of the ALICE Inner Tracking System // Journal of Physics. — 2014. — Vol. G41, No. 8. — P. 087002.
- Abraamyan Kh. U. et al.* The MPD detector at the NICA heavy-ion collider at JINR // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. — 2010. — Vol. A628, Issue 1. — P. 99–102.
- Gertsenberger K., Merts S., Rogachevsky O., Zinchenko A.* Simulation and analysis software for the NICA experiments // The European Physical Journal. — 2016. — Vol. A52, No. 8. — P. 214.
- Ilieva M., Kolesnikov V., Murin Yu., Suvarieva D., Vasendina V., Zinchenko A., Litvinenko E., Gudima K.* Evaluation of the MPD detector capabilities for the study of the strangeness production at the NICA collider // Physics of Particles and Nuclei Letters. — 2015. — Vol. 12, No. 1. — P. 100–112.
- Kekelidze V.D.* NICA project at JINR: status and prospects // Journal of Instrumentation. — 2017. — Vol. 12, No. 6. — P. C06012.
- Sjöstrand T., Ask St., Christiansen J.R., Corke R., Desai N., Ilten Ph., Mrenna St., Prestel St., Rasmussen Ch. O., Skands P.Z.* An Introduction to PYTHIA 8.2 // Computer Physics Communications. — 2015. — Vol. 191. — P. 159–177.