

Перспективы исследования рождения гиперонов и гиперядер в эксперименте MPD на ускорительном комплексе NICA.

В.И. Колесников^{a,1}, В.А. Васендина^{a,2}, А.И. Зинченко^{a,3}

^a Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Столкновения релятивистских ядер предоставляет уникальную возможность изучения фазовой диаграммы сильно взаимодействующей материи. Новые данные о выходах, спектрах и временах жизни гиперонов и гиперядер позволит раскрыть многие аспекты динамики ядро-ядерных столкновений вследствие их зависимости от характера фазовых превращений и уравнения состояния в среде, а также от вида гиперон-нуклонных потенциалов при больших плотностях. Исследование рождения странных частиц будет играть важную роль в физической программе эксперимента MPD на ускорительном комплексе NICA, поэтому изучение характеристик детектора по реконструкции гиперонов и гиперядер является важной задачей на текущем этапе реализации проекта.

PACS: 25.75.-q 25.75.Nq 14.20.Jn 13.75.Ev

Введение

Основной целью программы с тяжелыми ионами на ускорительном комплексе NICA является исследование свойств сильно взаимодействующей материи при высокой температуре и барионной плотности [1]. В реакциях столкновения тяжелых ядер с энергиями несколько ГэВ на нуклон плотность энергии в центре области взаимодействия превышает пороговое значение для фазового перехода в состояние свободных кварков и глюонов – кварк-глюонную плазму (КГП) [2]. При значениях температуры в среде 150-200 МэВ рождение странных кварков становится энергетически выгодным, а с учетом динамики глюон-глюонных взаимодействий химическое равновесие по ароматам кварков может быть достигнуто в фазе КГП за промежуток времени, сравнимый со временем жизни фэйрбола [3]. Высокая плотность рожденных странных кварков в КГП должна приводить к повышенному выходу гиперонов, поэтому рождение странных частиц, включая гипероны, считается одним их наиболее перспективным индикатором фазового перехода деконфайнмент. Повышенный выход странных адронов в столкновениях тяжелых ионов по отношению к элементарным реакциям действительно был обнаружен экспериментально в широкой области энергий столкновения [4]. Однако, несмотря на значительный объем данных о рождении гиперонов в столкновениях ядер, общепринятой интерпретации эффекту повышенного выхода

¹E-mail: kolesnik@jinr.ru

²E-mail: veron@jinr.ru

³E-mail: Alexander.Znchenko@jinr.ru

странности на данный момент нет. Альтернативные объяснения данному эффекту без привлечения фазы КГП были даны в расчетах в рамках статистической термальной модели [5] или в рамках т.н. *core-corona* подхода [6], где интенсивные термодинамические параметры источника частиц (температура и бариохимический потенциал) определяются энергией и центральностью столкновения. Несмотря на значительное количество альтернативных объяснений эффекту повышенного выхода странности, считается, что если фазовый переход деконфайнмент и образование смешанной фазы адронного газа и КГП происходит в некотором диапазоне энергии и/или центральности столкновения, то это должно приводить к заметному изменению в динамике эволюции файерболла. Изменение в динамике реакции должно, в свою очередь, отражаться в значениях термодинамических параметров источника частиц, которые определяются в анализе выходов адронов и распределений частиц по поперечному импульсу. Изучение рождения странных частиц занимает одно из важных мест в физической программе эксперимента MPD на ускорительном комплексе NICA, а новые данные по выходам гиперонов при различных энергиях столкновения и размерах сталкивающихся систем позволят значительно расширить наши представления о динамике ядроядерных столкновений и свойствах плотной барионной материи.

Так как гиперядра это ядерные системы, состоящие из нуклонов и гиперонов, то процесс их образования в реакциях столкновения ядер определяется гиперон-нуклонными корреляциями в фазовом пространстве реакции и величиной нуклон-гиперонных потенциалов в плотной барионной материи [7]. Последнее обстоятельство имеет фундаментальное значение для современной астрофизики, так как появление гиперонных степеней свободы ожидается в нейтронных звездах [8], а их вклад в результирующее уравнение состояние плотной ядерной материи (и, следовательно, основных характеристик звезд) определяется величиной ΛN потенциалов. Новые экспериментальные данные по выходам, энергиям связи и временам жизни гиперядер могут дать важную информацию о характере взаимодействий между нуклонами и гиперонами в плотной барионной материи. Область энергии ускорителя NICA является очень перспективной для таких исследований, так как в столкновениях ядер при энергиях NICA образуется материя с максимальной плотностью барионного заряда. Кроме этого, статистические термальные модели предсказывают максимум для выходов (гипер)ядер в этом диапазоне энергий [9].

Основная цель данной работы заключается в изучении характеристик детектора MPD по реконструкции гиперонов (Λ , Ξ) и гипертритона (${}^3_{\Lambda}\text{H}$) в столкновениях $\text{V}_i + \text{V}_i$ в различных интервалах по центральности столкновения.

Многофункциональный детектор MPD

Многофункциональный детектор MPD (MultiPurpose Detector) предназначен для реконструкции реакций столкновения тяжелых ионов на

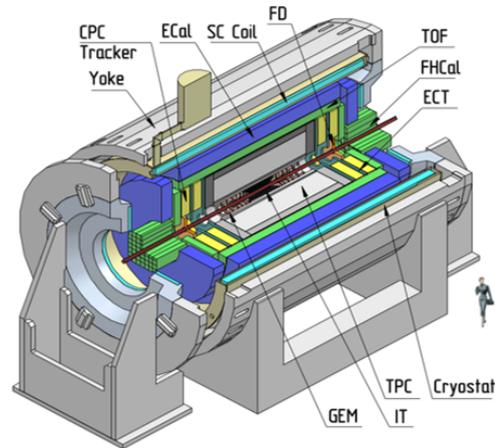


Fig. 1. Схема детектора MPD на ускорительном комплексе NICA.

ускорительном комплексе NICA. Все подсистемы детектора (см. рис. 1) располагаются внутри сверхпроводящего соленоида, генерирующего аксиальное магнитное поле величиной до 0.6 Т. Цилиндрическая время-проекционная камера TPC (Time-Projection Chamber) с системой регистрации на основе многопроводочных пропорциональных камер с падовыми считывающими элементами предназначена для измерения траекторий заряженных частиц. Импульс частицы p определяется по кривизне траектории в магнитном поле с точностью $\Delta p/p < 3\%$ в интервалах по псевдобыстроте $|\eta| < 1.5$ и поперечному импульсу $0.1 < p_T < 3$ ГэВ/с. TPC позволяет идентифицировать частицы с помощью информации о величине ионизационных потерь dE/dx в газе, для разрешения по dE/dx порядка 8% значение импульса для 3σ π/K и K/p разделения составляет 0.6 ГэВ/с и 1.0 ГэВ/с, соответственно. Время-пролетная система TOF состоит из детекторных элементов типа MRPC (Multi-gap Resistive Plate Chamber), обладающих временным разрешением 60 пс. Полное временное разрешение TOF с учетом разрешения стартового детектора FD составляет 80 пс. Это позволяет провести π/K и K/p дискриминацию на уровне 3σ для частиц с импульсами до 1.2 ГэВ/с и 2.5 ГэВ/с, соответственно. Сразу после TOF расположен электромагнитный калориметр ECal для регистрации электронов и гамма-квантов. Он состоит из 38000 отдельных модулей, собранный из слоев свинца и сцинтиллятора со светосмещающими волокнами для съема сигнала. Энергетическое разрешение ECal для электронов с энергией 1 ГэВ равно 5%. Передний адронный калориметр FHCAL предназначен для измерения энергии нуклонов-спектаторов, а величина энергосвечения и его азимутальное распределение позволяет определять центральность столкновения и ориентацию плоскости реакции. Более подробное описание компонентов детектора MPD можно найти в работе [10].

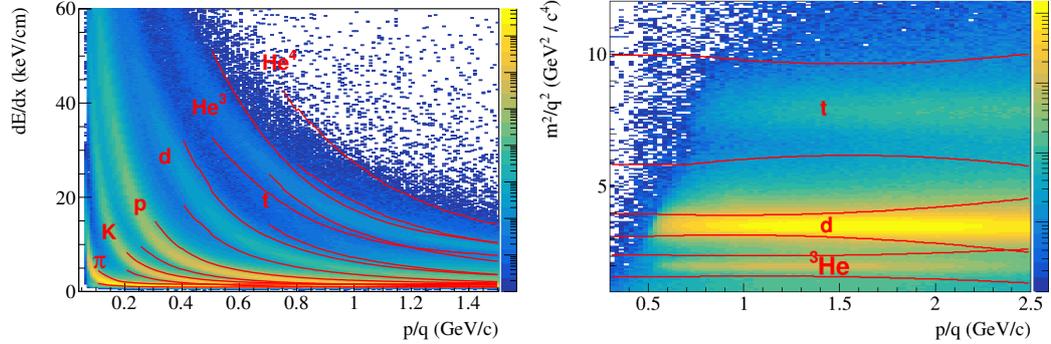


Fig. 2. Зависимость ионизационных потерь dE/dx и m^2 от величины p/q . Красными линиями показаны области выделения частиц различных сортов.

Для исследования характеристик детектора MPD по реконструкции гиперонов и гиперядер использовалась программная оболочка MPDRoot [11], которая предоставляет интерфейсы для широкого набора генераторов событий, обеспечивает методы детального геометрического описания всех элементов детектора, а также реализует процесс моделирования прохождения частиц через вещество детектора на основе программного пакета GEANT4. Кроме этого, MPDRoot содержит библиотеки для описания откликов детектирующих элементов установки и для реконструкции событий. В качестве генераторов событий использовались модель UrQMD для анализа выходов гиперонов и модель RHQMD для гиперядер. В анализе моделировалось $5 \cdot 10^7$ и $4 \cdot 10^7$ событий $Bi+Bi$ при энергии столкновения $\sqrt{s_{NN}} = 9.2$ ГэВ для моделей UrQMD и RHQMD, соответственно. Центральность столкновения определялась по множественности восстановленных в TPC треков в рамках приближений Монте-Карло версии модели Глаубера [12]. События группировались в несколько интервалов по центральности в зависимости от множественности реконструированных в TPC частиц. В каждом событии восстановление траекторий заряженных частиц в TPC, определение значения импульса, а также нахождение первичной вершины столкновения выполнялось с помощью метода фильтра Кальмана, подробное описание используемых при реконструкции процедур можно найти в работе [11]. При экстраполяции треков на плоскости TOF и ECAL детекторов, и в случае если экстраполяция совпадает с координатами хита в данных системах, к информации о компонентах импульса и ионизационных потерях для трека добавляются данные о времени пролета из TOF и о величине энергосвечения в ECAL. Комбинируя информацию о полном импульсе частицы, времени пролета и длине трека от вершины до точки регистрации в TOF определялся квадрат массы частицы. Идентификация частиц выполнялась по величине ионизационных потерь в газе TPC и по квадрату массы с TOF; сорт частицы считается определенным, если значения dE/dx и m^2 лежат в интервалах $\pm 3\sigma$ от номинальных значений, которыми являются квадрат массы покоя частицы и значение ионизационных потерь согласно распределению Бетте-Блоха. На рис. 2

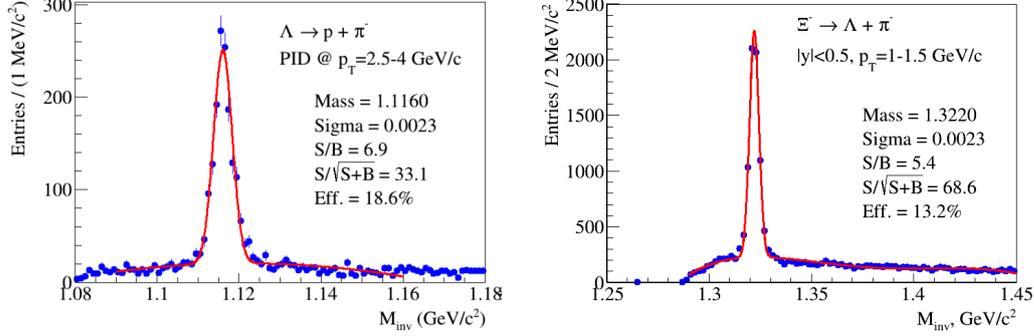


Fig. 3. Левая панель: распределение по инвариантной массе для пар (p, π^-). Данные показаны символами, линией показан результат фитирования суммой распределения Гаусса и полиномом. Правая панель: распределение по инвариантной массе для пар (Λ, π^-).

представлены распределения dE/dx и m^2 в зависимости от величины p/q (*rigidity*), красными линиями показаны идентификационные области для адронов и легких ядер.

Реконструкция Λ -гиперонов проводилась по моде распада $\Lambda \rightarrow p + \pi^-$. Для всех пар идентифицированных в событии пионов и протонов определялось (путем экстраполяции в вершину) положение максимального сближения траекторий, т.е. потенциальная вершина распада. Для уменьшения доли случайных комбинаций (комбинаторного фона), для всех пар применялись специально подобранные критерии отбора, называемые топологическими катами. В число этих критериев входят: а) условие по минимальному расстоянию между траекториями дочерних частиц в вершине распада - Distance of Closest Approach (DCA); б) условие по величине DCA при экстраполяции дочерних треков в основную вершину взаимодействия; в) условие по величине угла между направлением импульса гиперона и вектором соединяющим первичную и вторичную вершины; г) ограничение по минимальному расстоянию между первичной и вторичной вершинами. Для всех отобранных пар дочерних (распадных) частиц рассчитывается инвариантная масса материнской частицы, в качестве примера на рис. 3 (левая панель) представлены результаты анализа для интервала $2.5 < p_T < 4$ ГэВ/с. После реконструкции и селекции Лямбда-гиперонов в каждом событии проводился анализ для каскадного гиперона Ξ^- по моде распада $\Xi^- \rightarrow \Lambda + \pi^-$. Кандидаты Лямбда-гиперона для смешивания с пионами определялись по значению инвариантной массы, лежащей в интервале $\pm 5\sigma$ относительно номинального значения, а топологические критерии отбора аналогичны описанным выше критериям а)-г). На рис. 3 (правая панель) показано распределение по инвариантной массе для пар (Λ, π^-) в интервале $1.0 < p_T < 1.5$ ГэВ/с. Реконструкция гипертрионов выполнялась по моде распада ${}^3_\Lambda\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + \pi^-$ для пар идентифицированных ядер гелия и отрицательно заряженных пионов и с условиями отбора, аналогичным а)-г). Распределение по инвариантной массе для каждого сорта гиперона и гиперядра в каждом p_T -интервале

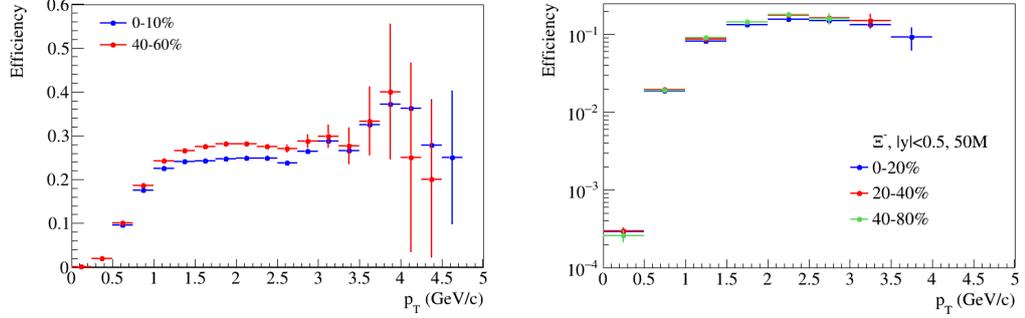


Fig. 4. Левая панель: эффективность реконструкции Лямбда-гиперонов как функция поперечного импульса для двух интервалов по центральности столкновения. Правая панель: эффективность реконструкции Кси-минус гиперонов как функция поперечного импульса в интервалах по центральности.

представляет собой комбинацию истинных пар из распадов ("сигнал") и случайные комбинации - ("фон"), поэтому распределение фитировалось суммой распределения Гаусса для сигнала и полиномом для фона. Величина сигнала определялась суммированием числа отсчетов гистограммы в интервале $\pm 5\sigma$ относительно пика распределения Гаусса и вычитанием из результата интеграла функции для фона в том же интервале. Результирующее число отсчетов в каждом бине по поперечному импульсу корректировалось на полную эффективность, которая включает в себя акцептанс установки, вероятность распада по данному каналу (branching), а также учет потерь при идентификации частиц и при отборе пар частиц по топологическим катам. На рис. 4 представлены эффективности реконструкции Лямбда-гиперонов (левая панель) и Кси-минус гиперонов (правая панель) как функция поперечного импульса для нескольких интервалов по центральности столкновения.

На рис. 5 (левая панель) показаны инвариантные p_T -распределения Лямбда-гиперонов для V_i+V_i столкновений при $\sqrt{s_{NN}} = 9.2$ ГэВ. Спектры получены для интервала быстроты (в системе центра масс) $|y| < 0.5$ и всех интервалов по центральности столкновения. Реконструированные распределения показаны сплошными символами, пустыми символами показаны исходные распределения из модели. Как видно из рисунка, совпадение между реконструированными и модельными спектрами достаточно хорошее во всех бинах по центральности. На правой панели рис. 5 представлены результаты реконструкции p_T -спектров для Кси-минус гиперонов. Согласие между реконструированными данными и моделью также весьма хорошее.

Согласно стандартному способу определения времени жизни, выходы нестабильных частиц в интервалах по величине собственного времени τ спадают экспоненциально согласно уравнению (1) с параметром наклона τ_0 равным времени жизни

$$N(\tau) = N(0) \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_0}\right) = N(0) \exp\left(-\frac{ML}{cp\tau_0}\right), \quad (1)$$

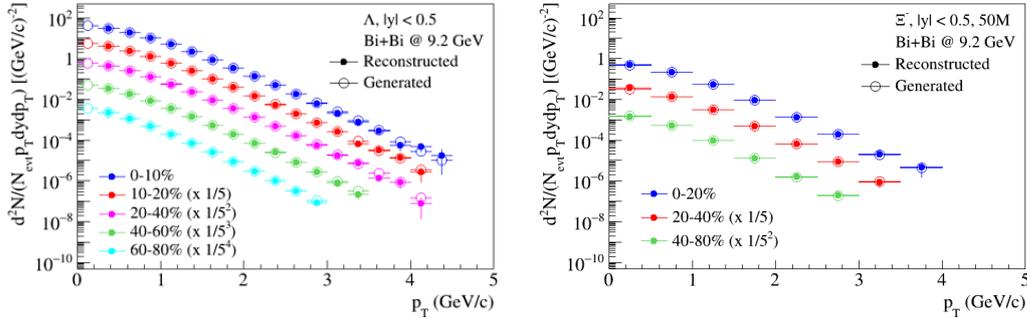


Fig. 5. Левая панель: p_T -спектры Лямбда-гиперонов для Bi+Bi столкновений при $\sqrt{s_{NN}} = 9.2$ ГэВ для различных интервалов по центральности. Реконструированные распределения показаны сплошными символами, пустыми символами показаны исходные распределения из модели. Правая панель: p_T -спектры Кси-минус гиперонов для различных интервалов по центральности.

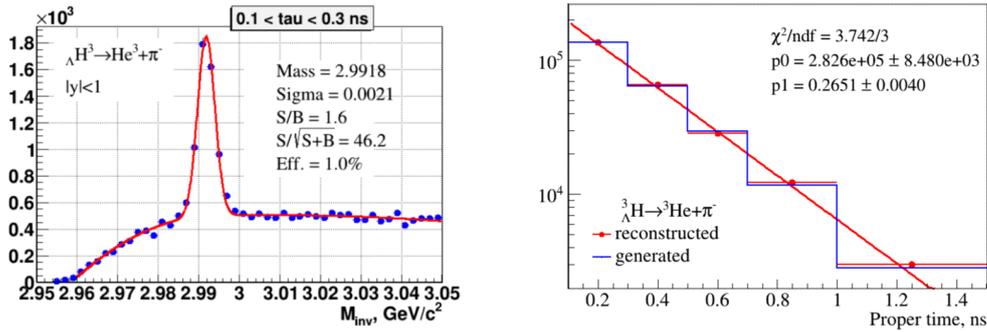


Fig. 6. Левая панель: распределение по инвариантной массе для пар (${}^3\text{He}, \pi^-$) в интервале $\tau = [0.1, 0.3]$ нс. Правая панель: Распределение по числу зарегистрированных гипертрионов в бинах по собственному времени τ . Синяя и красная гистограммы представляют исходное и реконструированное распределения, соответственно, линией показан фит согласно уравнению (1).

где $\tau = t/\gamma$ это собственное время, $\gamma = 1/\sqrt{1 - (v/c)^2}$, v - скорость, L - распадная длина, p - полный импульс, $M = 2.991 \text{ GeV}/c^2$ - масса покоя гипертриона. Анализ выходов гипертрионов проводился в нескольких бинах по τ в интервале $[0.1-1.5]$ наносекунд. В качестве примера на рис. 6 (левая панель) показано распределение по инвариантной массе для пар (${}^3\text{He}, \pi^-$) в интервале $\tau = [0.1, 0.3]$ нс. Скорретированное на эффективность реконструкции гипертрионов распределение для полного интервала представлено на рис. 6 (правая панель) в виде гистограммы. Фит полученного распределения согласно уравнению (1) показан на рисунке линией. Параметр наклона 'p1' (время жизни) 265 ± 4 пикосекунд хорошо согласуется с теоретическим значением из модели равным 263 пс. В заключение, согласно полученным на основе моделирования оценкам эффективности детектора МРД для гипертрионов и предсказаниям модели по выходам гиперядер ожидается регистрация порядка 10^3 гипертрионов за одну неделю набора данных в реакциях столкновения Bi+Bi при энергии

$\sqrt{s_{NN}} = 9$ ГэВ и светимости $L \approx 10^{25}$ см⁻²с⁻¹.

Заклучение

Физическая программа эксперимента MPD на создаваемом ускорительном комплексе NICA направлена на изучение фазовой диаграммы сильно взаимодействующей материи в области максимального значения барионной плотности. Многофункциональный детектор MPD ориентирован на выполнение широкой программы исследований, включая измерение выходов гиперонов и гиперядер в ядро-ядерных столкновениях. Полученные на основе реалистичного моделирования детектора результаты по реконструкции гиперонов и гиперядер демонстрируют хорошие перспективы MPD по измерению выходов странных частиц в столкновениях ядер.

REFERENCES

1. *Kekelidze V.D. et al.* Three stages of the NICA accelerator complex. *Eur. Phys. J. A* 2016. V. 52. P. 211.
2. *Ivanov Yu.B, Russkikh V.N and Toneev V.D.* Relativistic heavy-ion collisions within three-fluid hydrodynamics: Hadronic scenario. *Phys. Rev. C* 2006. V. 73. P. 044904.
3. *Koch P., Muller B. and Rafelski J.* Strangeness in Relativistic Heavy Ion Collisions. *Phys. Rep.* 1986. V. 142. P. 167.
4. *Koch P., Muller B. and Rafelski J.* From strangeness enhancement to quark–gluon plasma discovery. *International Journal of Modern Physics A* 2017. V. 32. P. 1730024–272.
5. *Redlich K. and Tounsi A.* Strangeness enhancement and energy dependence in heavy ion collisions. *Eur. Phys. J. C* 2002. V. 24. P. 589.
6. *Aichelin J. and Werner K.* Centrality dependence of strangeness enhancement in ultrarelativistic heavy ion collisions: a core-corona effect. *Phys. Rev. C* 2009. V. 79. P. 064907.
7. *Zhang S. et al* Searching for onset deconfinement via hypernuclei baryon-strangeness correlations. *Phys. Lett. B* 2010. V. 684. P. 224.
8. *Lattimer J.M. and Prakash, M.* The physics of neutron stars. *Science* 2004. V. 304. P. 536.
9. *Steinheimer, J. et al* Hypernuclei, dibaryon and antinuclei production in high energy heavy ion collisions: Thermal production vs. coalescence. *Phys. Lett. B* 2012. V. 714. P. 85.

10. *Abgaryan, V.; et al.* Status and initial physics performance studies of the MPD experiment at NICA. *Eur. Phys. J. A* 2022. V. 58 P. 140.
11. *Gertsenberger K., Merts S., Rogachevsky O., and Zinchenko A.* Simulation and analysis software for the NICA experiments. *Eur. Phys. J. A* 2016. V. 52 P. 214.
12. *Petr Parfenov et al.* Relating Charged Particle Multiplicity to Impact Parameter in Heavy-Ion Collisions at NICA Energies. *Particles* 2021. V. 4 P. 275–287