

ГЛОБАЛЬНАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ И КОЛЛЕКТИВНЫЕ ПОТОКИ Λ -ГИПЕРОНОВ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ MPD

*В. В. Трошин**

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва

Глобальная поляризация гиперонов и анизотропные коллективные потоки являются важными наблюдаемыми, несущими информацию о процессах ранней эволюции сильно взаимодействующей материи, образующейся в столкновениях релятивистских тяжелых ионов. Первая дает информацию о завихренности при нецентральных столкновениях, а вторые содержат информацию о ранней эволюции области перекрытия и уравнении состояния. Исследование обоих эффектов при энергиях коллайдера NICA является важной целью эксперимента MPD. В данной работе исследуются глобальная поляризация и коллективные потоки Λ -гиперонов методом фитирования инвариантной массы в столкновениях ядер $\text{Bi} + \text{Bi}$ при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 9,2$ ГэВ, создаваемых генератором событий PHSD.

Global hyperon polarization and anisotropic collective flow are important observables that carry information about the early evolution of strongly interacting matter formed in relativistic heavy-ion collisions. The first provides information about vorticity in non-central collisions, and the second contains information about the early evolution of the overlap region and the equation of state. Investigating both phenomena at NICA energies is an important goal of the MPD experiment. In this paper, global polarization and collective flow of Λ hyperons are studied using the invariant mass fit method for $\text{Bi} + \text{Bi}$ collisions at an energy of $\sqrt{s_{NN}} = 9.2$ GeV produced by the PHSD event generator.

PACS: 25.75.-q; 25.75.Ld

ВВЕДЕНИЕ

Исследование сильно взаимодействующей материи при высоких относительных барионных плотностях и средних температурах является основной целью нескольких экспериментов, таких как STAR на RHIC, NA61/SHINE на SPS, HADES на SIS18 и в будущем MPD на NICA [1, 2]. Измерения анизотропного потока дают возможность изучить транспортные свойства и получить информацию об уравнении состояния (EoS) такого плотного вещества, образующегося в результате столкновений релятивистских тяжелых ионов. Величина коллек-

* E-mail: valerytrosh@gmail.com

тивных потоков численно выражается в виде коэффициентов Фурье $v_n = \langle \cos [n(\varphi - \Psi_n)] \rangle$ при разложении азимутального распределения частиц в ряд:

$$\frac{dN}{d\varphi} \equiv 1 + 2 \sum_{n=1} v_n \cos [n(\varphi - \Psi_n)], \quad (1)$$

где n — порядок гармоники; φ — азимутальный угол импульса частицы; Ψ_n — азимутальный угол плоскости симметрии n -го порядка. Скобки обозначают усреднение по событиям и частицам. Направленный (v_1) и эллиптический (v_2) потоки подробно изучались в экспериментах FOPI, E877, E895 и STAR для различных ядерных систем и энергий столкновения [3–6].

С другой стороны, наличие сильного начального углового момента системы и завихренности сильновзаимодействующего вещества при нецентральных столкновениях приводит к образованию глобальной поляризации рожденных гиперонов [7]. Механизм поляризации P_H гиперонов происходит как из-за спин-орбитального взаимодействия [8], так и из-за спин-вихревого взаимодействия [9]. Глобальная поляризация Λ -гиперонов P_Λ определяется как

$$\overline{P}_\Lambda = \frac{8}{\pi\alpha} \langle \sin(\Psi_{RP} - \phi^*) \rangle, \quad (2)$$

где ϕ^* — азимутальный угол дочернего протона в системе покоя Λ -гиперона; α — асимметрия распада Λ -гиперона, нарушающего четность. В условиях эксперимента, где плоскость реакции оценивается плоскостью события, выражение претерпевает следующие изменения:

$$\overline{P}_\Lambda = \frac{8}{\pi\alpha} \frac{\langle \sin(\Psi_{EP} - \phi^*) \rangle}{R_{EP}^1}, \quad (3)$$

где Ψ_{EP} и R_{EP}^1 — угол плоскости события и разрешение угла соответственно.

Глобальная поляризация Λ -гиперонов измерялась в широком диапазоне энергий: от энергий в несколько ГэВ до нескольких ТэВ в экспериментах ALICE (LHC), STAR (RHIC) и NA62 (SIS18) [10–16]. Теоретические предсказания и имеющиеся экспериментальные результаты говорят о сильной энергетической зависимости глобальной поляризации и направленного и эллиптического потоков в диапазоне энергий комплекса нуклотрон–NICA, и проводимый на нем эксперимент MPD позволит изучить ее и предоставить дифференциальный анализ в терминах центральности, псевдобыстроты и поперечного импульса.

В предыдущей работе была продемонстрирована возможность измерения глобальной поляризации Λ -гиперонов с применением $\Delta\phi$ -метода [17]. Полученные результаты реконструированной глобальной поляризации хорошо согласуются с поляризацией ассоциированных с Мон-

те-Карло Λ -гиперонов. Такой выбор объясняется уменьшением эффектов акцептанса при сравнении результатов реконструкции и модели.

В данной работе представлено использование обобщенного метода фитирования инвариантной массы, предложенного коллаборацией STAR для измерения глобальной поляризации с учетом эффектов акцептанса и влияния направленного потока [13]. Это позволило провести сравнение результатов с Монте-Карло без выбора только ассоциированных Λ . Также в работе проведено измерение направленного и эллиптического потоков Λ -гиперонов.

В процессе также были исключены вторичные Λ , материнские частицы которых не имеют канала распада с их участием, в связи с чем имеющие нулевую поляризацию (потеряна передача поляризации от материнской частицы).

Это исследование было выполнено для столкновений $W_i + W_i$ при энергии пучка 9,2 ГэВ с использованием генератора событий PHSD для эксперимента MPD.

МЕТОД ФИТИРОВАНИЯ ИНВАРИАНТНОЙ МАССЫ

Одним из распространенных методов для измерения коллективных параметров короткоживущих частиц является метод фитирования инвариантной массы. Он основывается на факте отсутствия значимой зависимости исследуемого параметра от инвариантной массы, поэтому возможно получить его величину через фитирование соответствующих распределений. Во-первых, проводится фитирование распределения Λ -гиперонов как функции инвариантной массы и извлекаются соотношения сигнала и фона к общему распределению. Этот процесс продемонстрирован на рис. 1, слева.

Вторым шагом является фитирование интересующего параметра как функции инвариантной массы. Фитирование проводится следующей функцией:

$$P^{SB}(m_{inv}) = P^S \frac{N^S(m_{inv})}{N^{SB}(m_{inv})} + P^B \frac{N^B(m_{inv})}{N^{SB}(m_{inv})}, \quad (4)$$

где N^S/N^{SB} и N^B/N^{SB} — полученные ранее соотношения из первого фитирования, а P^{SB} , P^S и P^B — соответствующие параметры из второго распределения. Искомая величина исследуемого параметра не что иное как P^S , который можно получить как параметр фитирования. Процесс фитирования представлен на рис. 1, справа.

У данного метода имеется обобщенная версия для применения в измерении глобальной поляризации, предложенная коллаборацией STAR [13]. Ее создание было мотивировано наличием больших эффектов неоднородного акцептанса и влияния направленного потока на измерение глобальной поляризации Λ -гиперонов: в магнитном поле протоны и пионы,

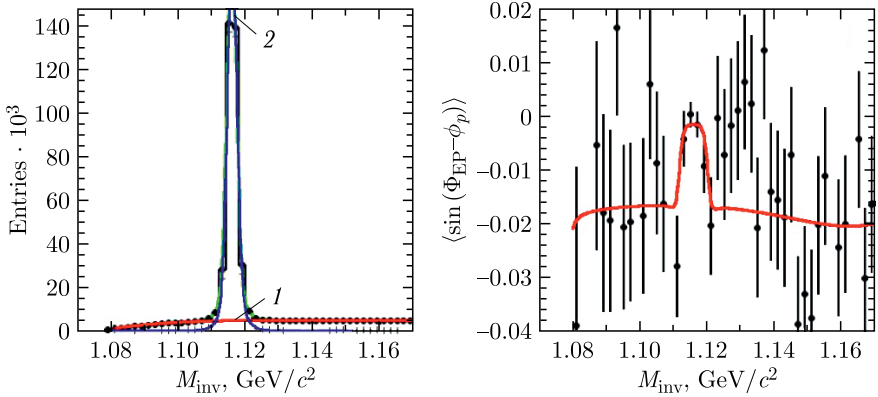


Рис. 1 (цветной в электронной версии). Слева: применение метода фитирования инвариантной массы к измерению глобальной поляризации: получение соотношения сигнала к фону распределения Λ -гиперонов, красной линией (1) обозначен фон, а синей (2) — сигнал. Справа: фитирование глобальной поляризации как функции инвариантной массы

образующиеся из распада Λ , могут отклоняться двумя способами по отношению друг к другу: пересекая треки друг друга или двигаясь друг от друга. В условиях идеального акцептанса это выражается только в форме пика распределения инвариантной массы, что можно учесть, используя в качестве функции фита двойное распределение Гаусса, однако при наличии неоднородного акцептанса на измерение глобальной поляризации начинает влиять направленный поток.

Для учета этого эффекта была разработана методика фитирования инвариантной массы в бинах по разности азимутальных углов Λ и дочернего протона $\phi_\Lambda - \phi_p^*$ для положительных и отрицательных псевдобыстрот, с последующим фитированием полученных сигналов как функции разности углов следующей функцией:

$$P^S = \overline{P}^{\text{true}} + cv_1 \sin(\phi_\Lambda - \phi_p^*), \quad (5)$$

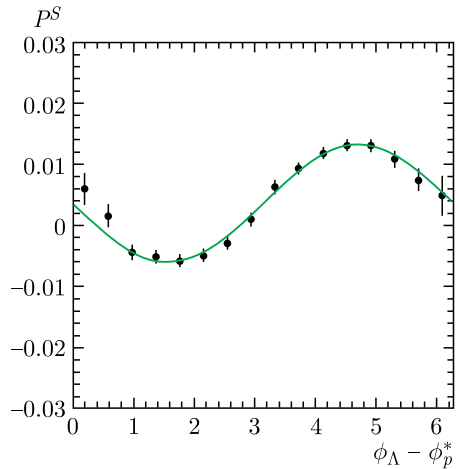


Рис. 2. Фитирование глобальной поляризации в бинах разности азимутальных углов Λ и дочернего протона (в системе отсчета Λ)

где $\overline{P}^{\text{true}}$ — истинная величина глобальной поляризации, а слагаемое с синусом корректирует эффект направленного потока. Пример фитирования изображен на рис. 2.

ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И АНАЛИЗА

В этой работе используется модель партон-адронно-струнной динамики (PHSD) с добавленной глобальной поляризацией посредством подхода Бекаттини для описания локального термодинамического равновесия [18, 19] для моделирования 15 млн столкновений $\text{Bi} + \text{Bi}$ при $\sqrt{s_{NN}} = 9,2$ ГэВ. На этом наборе были измерены направленный и эллиптический потоки и глобальная поляризация Λ -гиперонов в зависимости от центральности столкновения, псевдобыстроты частиц и поперечного импульса с использованием метода фитирования инвариантной массы. Для отбора кандидатов Λ -гиперонов проводился поиск интервала па-

раметра $\omega_2 = \ln \frac{\sqrt{\chi_p^2 \chi_\pi^2}}{\chi_\Lambda^2 + \chi_{\bar{\Lambda}}^2}$, при котором соотношение сигнала к фону распределения кандидатов по инвариантной массе было максимальным. Центральность была выбрана с использованием множественности заряженных частиц и подхода MC-Glauber [20].

Для определения угла плоскости события и его разрешения использовался адронный калориметр FHCAL, по распределению энергии в котором методом плоскости события было рассчитано разрешение [21]. Зависимость разрешения угла плоскости события как функции центральности представлена на рис. 3.

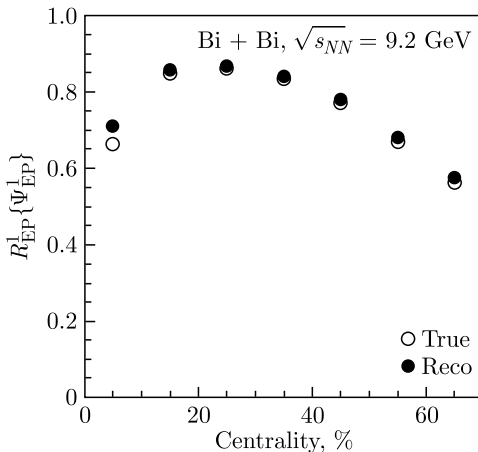


Рис. 3. Разрешение угла плоскости события как функции центральности. Сравнение с истинным разрешением, полученным из модели

РЕЗУЛЬТАТЫ

Глобальная поляризация Λ в зависимости от центральности, быстроты и поперечного импульса для столкновений $W + W$ при энергии 9,2 ГэВ представлены на рис. 4.

Результат сравнения с величиной поляризации из модели показывает хорошее согласие, однако по зависимостям от поперечного импульса и псевдобыстроты для среднецентральных столкновений заметна нехватка статистики для более точного функционального анализа зависимостей. На данный момент не наблюдается выраженной зависимости глобальной поляризации от псевдобыстроты и поперечного импульса, а зависимость от центральности показывает рост, предсказываемый мо-

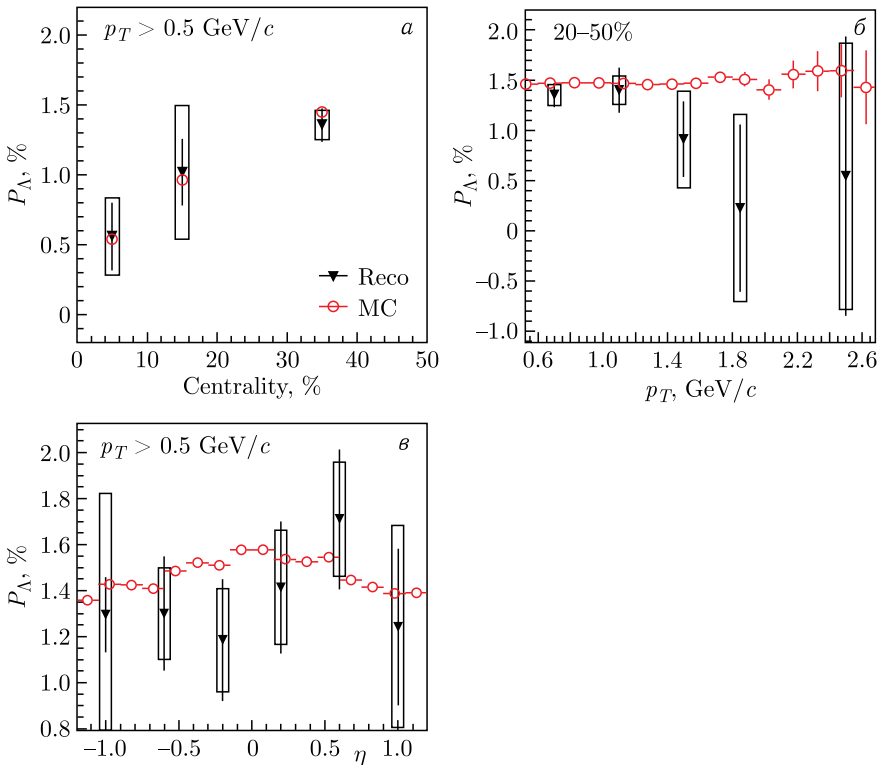


Рис. 4 (цветной в электронной версии). Сравнение реконструированной и Монте-Карло глобальной поляризации Λ -гиперонов в зависимости от центральности (а), поперечного импульса (б) и псевдобыстроты (в). Черные маркеры обозначают реконструированные данные, а красные — величину из модели. Прямоугольниками обозначены систематические погрешности

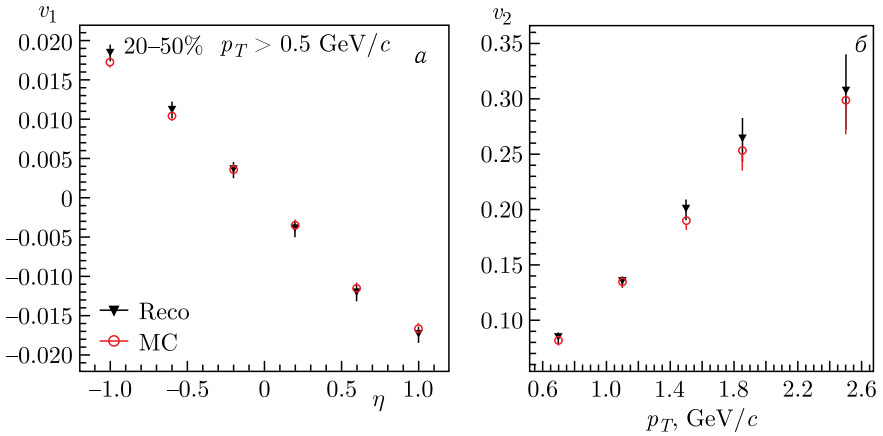


Рис. 5 (цветной в электронной версии). Направленный поток как функция псевдобыстроты (а) и эллиптический поток как функция поперечного импульса (б) Λ -гиперонов для среднецентральных столкновений. Черные маркеры — реконструированные результаты, а красные — величина из модели

дью. Выбор ограничения на поперечный импульс мотивирован низкой эффективностью реконструкции Λ при низких значениях.

На рис. 5 показаны направленный и эллиптический потоки Λ как функции псевдобыстроты и поперечного импульса. Соответствующие им примеры фитирования распределений по инвариантной массе представлены на рис. 6. Получено согласие с сигналом из модели в пределах статистической погрешности. Эти многообещающие результаты позволяют сделать вывод о возможности надежного измерения коллективных потоков короткоживущих частиц в эксперименте MPD.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлено применение метода фитирования инвариантной массы для измерения глобальной поляризации и коллективных потоков Λ -гиперонов, а также его обобщенной версии в контексте измерения глобальной поляризации. Модель PHSD, модифицированная для измерения глобальной поляризации, использовалась для генерации 15 млн столкновений $\text{Vi} + \text{Vi}$ при $\sqrt{s_{NN}} = 9,2$ ГэВ. Получены зависимости глобальной поляризации от центральности, псевдобыстроты и поперечного импульса, показано хорошее согласие с сигналом из модели. Измерения направленного и эллиптического потоков показывают согласие с моделью, подтверждая возможность измерения коллективных потоков V_0 -частиц в условиях эксперимента MPD. Необходимо проведение анализа на большей статистике для более точного установления функцио-

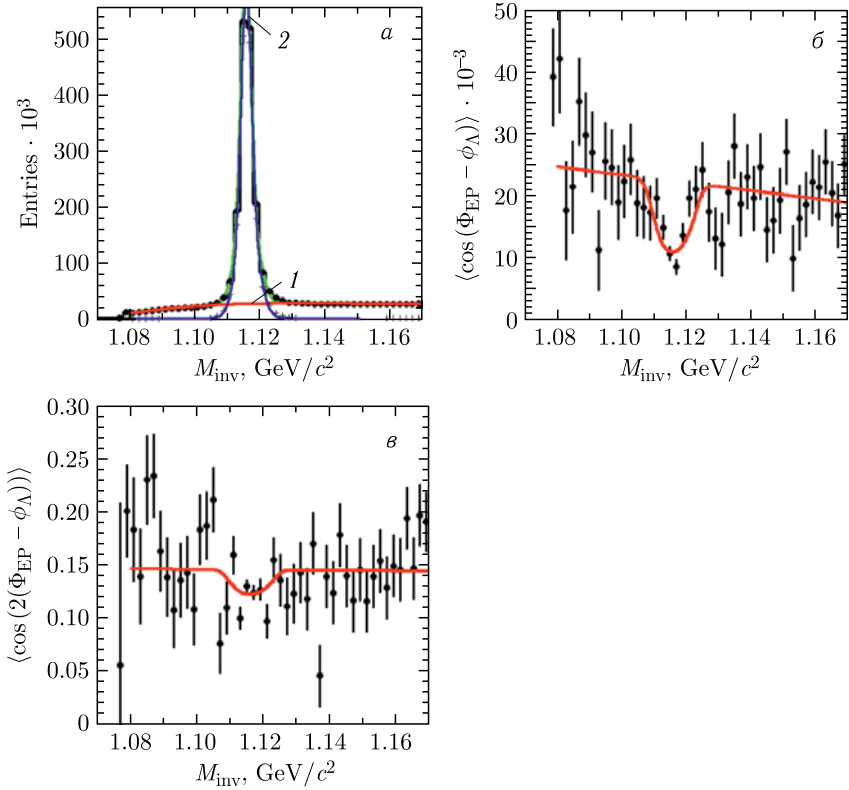


Рис. 6 (цветной в электронной версии). Применение метода фитирования инвариантной массы к измерению коллективных потоков: получение соотношения сигнала к фону распределения Λ -гиперонов, красной линией (1) обозначен фон, а синей (2) — сигнал (а); фитирование сигнала направленного потока (б) и эллиптического потока (в)

нальной зависимости реконструированной глобальной поляризации от псевдобыстроты и поперечного импульса.

Финансирование. Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ, проект «Фундаментальные и прикладные исследования на экспериментальном комплексе класса мегасайенс NICA (ОИЯИ)» № FSWU-2025-0014.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Adams J. et al. (STAR Collab.). Experimental and Theoretical Challenges in the Search for the Quark Gluon Plasma: The STAR Collaboration's Critical Assessment of the Evidence from RHIC Collisions // Nucl. Phys. A. 2005. V. 757. P. 102–183.

2. *Adcox K. et al. (PHENIX Collab.)*. Formation of Dense Partonic Matter in Relativistic Nucleus–Nucleus Collisions at RHIC: Experimental Evaluation by the PHENIX Collaboration // *Ibid.* P. 184–283.
3. *Andronic A. et al. (FOPI Collab.)*. Directed Flow in Au + Au, Xe + CsI and Ni + Ni Collisions and the Nuclear Equation of State // *Phys. Rev. C*. 2003. V. 67. P. 034907.
4. *Chung P. et al. (E895 Collab.)*. Differential Elliptic Flow in 2-A-GeV–6-A-GeV Au + Au Collisions: A New Constraint for the Nuclear Equation of State // *Phys. Rev. C*. 2002. V. 66. P. 021901.
5. *Barrette J. et al. (E877 Collab.)*. Energy and Charged Particle Flow in a 10.8-A/GeV/c Au + Au Collisions // *Phys. Rev. C*. 1997. V. 55. P. 1420–1430; Erratum // *Ibid.* V. 56. P. 2336.
6. *Lan S. et al. (STAR Collab.)*. Anisotropic Flow Measurements of Identified Particles in the STAR Experiment // *PoS.C.* 2022. V. POD2021. P. 005.
7. *Becattini F., Piccinini F., Rizzo J.* Angular Momentum Conservation in Heavy Ion Collisions at Very High Energy // *Phys. Rev. C*. 2008. V. 77. P. 024906.
8. *Liang Z. T., Wang X. N.* Spin Alignment of Vector Mesons in Non-Central A + A Collisions // *Phys. Lett. B*. 2005. V. 629. P. 20–26.
9. *Becattini F., Karpenko I., Lisa M., Upsal I., Voloshin S.* Global Hyperon Polarization at Local Thermodynamic Equilibrium with Vorticity, Magnetic Field and Feed-Down // *Phys. Rev. C*. 2017. V. 95, No. 5. P. 054902.
10. *Acharya S. et al. (ALICE Collab.)*. Global Polarization of $\Lambda\bar{\Lambda}$ Hyperons in Pb–Pb Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ and 5.02 TeV // *Phys. Rev. C*. 2020. V. 101, No. 4. P. 044611; Erratum // *Phys. Rev. C*. 2022. V. 105. P. 029902.
11. *Adamczyk L. et al. (STAR Collab.)*. Global Λ Hyperon Polarization in Nuclear Collisions: Evidence for the Most Vortical Fluid // *Nature*. 2017. V. 548. P. 62–65.
12. *Adam J. et al. (STAR Collab.)*. Polarization of $\Lambda(\bar{\Lambda})$ Hyperons along the Beam Direction in Au + Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV // *Phys. Rev. Lett.* 2019. V. 123, No. 13. P. 132301.
13. *Abdallah M. S. et al. (STAR Collab.)*. Global Λ -Hyperon Polarization in Au + Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 3$ GeV // *Phys. Rev. C*. 2021. V. 104, No. 6. P. L061901.
14. *Abdulhamid M. I. et al. (STAR Collab.)*. Global Polarization of Λ and Λ^- Hyperons in Au + Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 19.6$ and 27 GeV // *Phys. Rev. C*. 2023. V. 108, No. 1. P. 014910.
15. *Okubo K. et al. (STAR Collab.)*. Measurement of Global Polarization of Λ Hyperons in Au + Au $\sqrt{s_{NN}} = 7.2$ GeV Fixed Target Collisions at RHIC–STAR Experiment // *Eur. Phys. J. Web Conf.* 2022. V. 259. P. 06003.
16. *Abou Yassine R. et al. (HADES Collab.)*. Measurement of Global Polarization of Λ Hyperons in Few-GeV Heavy-Ion Collisions // *Phys. Lett. B*. 2022. V. 835. P. 137506.
17. *Nazarova E., Kolesnikov V., Parfenov P., Taranenko A., Teryaev O., Troshin V., Voronyuk V., Zinchenko A.* Performance Study of the Hyperon Global Polarization Measurements with MPD at NICA // *Eur. Phys. J. A*. 2024. V. 60, No. 4. P. 85.
18. *Tsegelnik N. S., Kolomeitsev E. E., Voronyuk V.* Helicity and Vorticity in Heavy-Ion Collisions at Energies Available at the JINR Nuclotron-Based Ion Collider Facility // *Phys. Rev. C*. 2023. V. 107, No. 3. P. 034906.

19. *Becattini F., Chandra V., Del Zanna L., Grossi E.* Relativistic Distribution Function for Particles with Spin at Local Thermodynamical Equilibrium // *Ann. Phys.* 2013. V. 338. P. 32–49.
20. *Parfenov P., Idrisov D., Luong V.B., Taranenko A.* Relating Charged Particle Multiplicity to Impact Parameter in Heavy-Ion Collisions at NICA Energies // *Particles*. 2021. V. 4, No. 2. P. 275–287.
21. *Poskanzer A.M., Voloshin S.A.* Methods for Analyzing Anisotropic Flow in Relativistic Nuclear Collisions // *Phys. Rev. C*. 1998. V. 58. P. 1671–1678.