

ГЛОБАЛЬНАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ Λ -ГИПЕРОНОВ И ЕЕ КОРРЕЛЯЦИЯ С НАПРАВЛЕННЫМ ПОТОКОМ ПРИ ЭНЕРГИЯХ КОЛЛАЙДЕРА NICA

В. В. Трошин *

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

Глобальная поляризация гиперонов и анизотропный поперечный поток являются важными наблюдаемыми для изучения свойств сильно взаимодействующей материи, образующейся в столкновениях релятивистских тяжелых ионов. Первая дает информацию о начальном угловом моменте при нецентральных столкновениях, а второй содержит информацию о ранней эволюции области перекрытия и уравнении состояния. Исследование обоих эффектов при энергиях NICA является важной целью эксперимента MPD. Исследуется глобальная поляризация Λ -гиперонов и ее корреляция с направленным потоком v_1 в столкновениях ядер Bi+Bi при энергии 9,2 ГэВ, создаваемых с помощью модели PHSD.

Global hyperon polarization and anisotropic transverse flow are important observables for studying the properties of the strongly interacting matter produced in relativistic heavy ion collisions. The former provides information about the initial angular momentum in the non-central collisions and the latter contains information about the early evolution of the overlap region and the equation of state. Investigating of both effects at NICA energies is an important goal of the MPD experiment. We study the global polarization of Λ hyperons and its correlation with the directed flow of the strongly interacting matter produced in the Bi+Bi collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 9.2$ GeV generated with the PHSD model.

PACS: 25.75.-q; 25.75.Ld

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных целей физических программ по сканированию энергии тяжелых ионов в экспериментах (таких как STAR на RHIC, NA61/SHINE на SPS, HADES на SIS18 и будущем MPD на NICA) является исследование свойств сильно взаимодействующей материи при высоких относительных барионных плотностях и средних температурах [1, 2]. Измерения анизотропного потока рожденных частиц дают возможность изучить транспортные свойства и получить информацию об уравнении состояния (EoS) такого плотного вещества, образующегося в результате столкновений релятивистских тяжелых ионов. Его можно выразить

* E-mail: valerytrosh@gmail.com

количественно через коэффициенты Фурье $v_n = \langle \cos [n (\varphi - \Psi_n)] \rangle$ при разложении азимутального распределения частиц:

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

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. Анизотропные потоки первого (v_1) и второго (v_2) порядка называются направленным и эллиптическим потоками. Они широко изучались для различных систем в области энергий, доступных на ускорительном комплексе NICA, $\sqrt{s_{NN}} = 3,4\text{--}11$ ГэВ [3–6].

В то же время сильновзаимодействующая материя, образующаяся в результате ядро-ядерных столкновений при таких энергиях, имеет ненулевую завихренность из-за наличия высокого начального углового момента [7]. Это приводит к ненулевой глобальной поляризации гиперонов P_H за счет спин-орбитального взаимодействия [8] и спин-вихревого взаимодействия [9]. Глобальную поляризацию Λ -гиперонов P_Λ можно определить следующим образом:

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

где ϕ^* — азимутальный угол дочернего протона в системе покоя Λ -гиперона; α — асимметрия распада Λ -гиперона, нарушающего четность. Глобальная поляризация Λ -гиперонов исследована в широком диапазоне энергий: от нескольких гигаэлектронвольт до нескольких тераэлектронвольт, измеренных в экспериментах ALICE (LHC), STAR (RHIC) и HADES (SIS18) [10–16]. Программы измерения в зависимости от энергии как для анизотропного потока, так и для глобальной поляризации показывают сильную энергетическую зависимость в энергетическом диапазоне NICA, что согласуется с теоретическими предсказаниями.

Преыдущие исследования корреляции между глобальной поляризацией \overline{P}_Λ и направленным потоком v_1 Λ -гиперонов для диапазона энергий 6–40 ГэВ [17] были основаны на параллельном исследовании энергетических зависимостей глобальной поляризации, углового момента, накопленного в центральной области, эллиптического потока и наклона направленного потока для средних быстрот. В заключение этой работы не было показано никакой корреляции между этими двумя наблюдаемыми. Однако такая корреляция должна существовать, поскольку и v_1 , и P_Λ происходят из начальной геометрии столкновения. Проведено дифференциальное исследование корреляции между глобальной поляризацией и направленным потоком в столкновениях Au + Au при энергии 27 ГэВ, и действительно обнаружена сильная корреляция [18]: когда исходная геометрия зафиксирована, глобальная поляризация линейно коррелирует с наклоном направленного потока $dv_1/dy|_{y=0}$, но при фиксированной

начальной скорости продольного потока наблюдается линейная антикорреляция. Это может привести к нулевой корреляции, наблюдаемой в работе [17], поскольку она была сделана со значениями, усредненными по центральности столкновений, скорости частиц и поперечному импульсу.

В данной работе представлен удобный способ многомерного исследования корреляции между глобальной поляризацией P_H и направленным потоком v_1 через коэффициент корреляции Пирсона $\rho(v_1, P_H)$. Таким образом, корреляцию можно измерить как функцию центральности столкновения, скорости частиц и поперечного импульса. Это исследование проведено для столкновений $W + W$ при энергии пучка 9,2 ГэВ с использованием генератора событий PHSD для эксперимента MPD.

КОРРЕЛЯЦИЯ ГЛОБАЛЬНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ И НАПРАВЛЕННОГО ПОТОКА Λ -ГИПЕРОНОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОЭФФИЦИЕНТА КОРРЕЛЯЦИИ ПИРСОНА

Почти линейный характер корреляции между глобальной поляризацией и направленным потоком, о котором сообщается в работе [18], предполагает использование соответствующей переменной, характеризующей линейную корреляцию между двумя наблюдаемыми. Одной из таких переменных является коэффициент корреляции Пирсона $\rho(X, Y)$:

$$\rho(X, Y) = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\sqrt{\text{Var}(X)\text{Var}(Y)}}, \quad (3)$$

где X и Y — изучаемые наблюдаемые; $\text{cov}(X, Y)$ — ковариация между X и Y , а $\text{Var}(X)$, $\text{Var}(Y)$ — дисперсии наблюдаемых X и Y соответственно. Однако $\rho(X, Y)$ может быть подвержена флуктуациям какой-то другой наблюдаемой Z . Чтобы подавить это смещение, можно использовать частичный коэффициент Пирсона:

$$\rho(X, Y * Z) = \frac{\rho(X, Y) - \rho(X, Z)\rho(Y, Z)}{(\sqrt{1 - \rho(X, Z)^2})(\sqrt{1 - \rho(Y, Z)^2})}. \quad (4)$$

Здесь будем использовать $\rho(v_1, P_H)$ вместе с $\rho(v_1, P_H * N_\Lambda)$ для проверки влияния флуктуации множественности Λ -гиперонов N_Λ в событии.

ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И АНАЛИЗА

Используем модель партон-адронно-струнной динамики (PHSD) с добавленной глобальной поляризацией посредством подхода Бекаттини для описания локального термодинамического равновесия [19, 20] для моделирования 20 млн столкновений $W + W$ при $\sqrt{s_{NN}} = 9,2$ ГэВ. Для этого набора измерены направленный поток и глобальная поляризация Λ -гиперонов и их корреляция в зависимости от центральности столкновения, скорости частиц и поперечного импульса. Для отбора протонов и пионов, образовавшихся из первичных Λ -гиперонов, использовалась

информация из моделирования методом Монте-Карло. Центральность была выбрана с использованием множественности заряженных частиц и подхода Monte-Carlo–Glauber [21].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Глобальная поляризация и направленный поток Λ в зависимости от быстроты и поперечного импульса для среднецентральных столкновений $\text{Bi} + \text{Bi}$ при энергии 9,2 ГэВ представлены на рис. 1.

Видно, что зависимость P_Λ от быстроты является четной функцией, тогда как v_1 ведет себя как нечетная функция, проходящая через нуль в средних быстротах. По этой причине мы выбираем область быстроты $0,5 < y < 1$ для зависимостей от центральности и p_T для P_Λ и v_1 . Также следует иметь в виду, что $v_1(p_T)$ пересекает нуль в области 1–1,5 ГэВ/с,

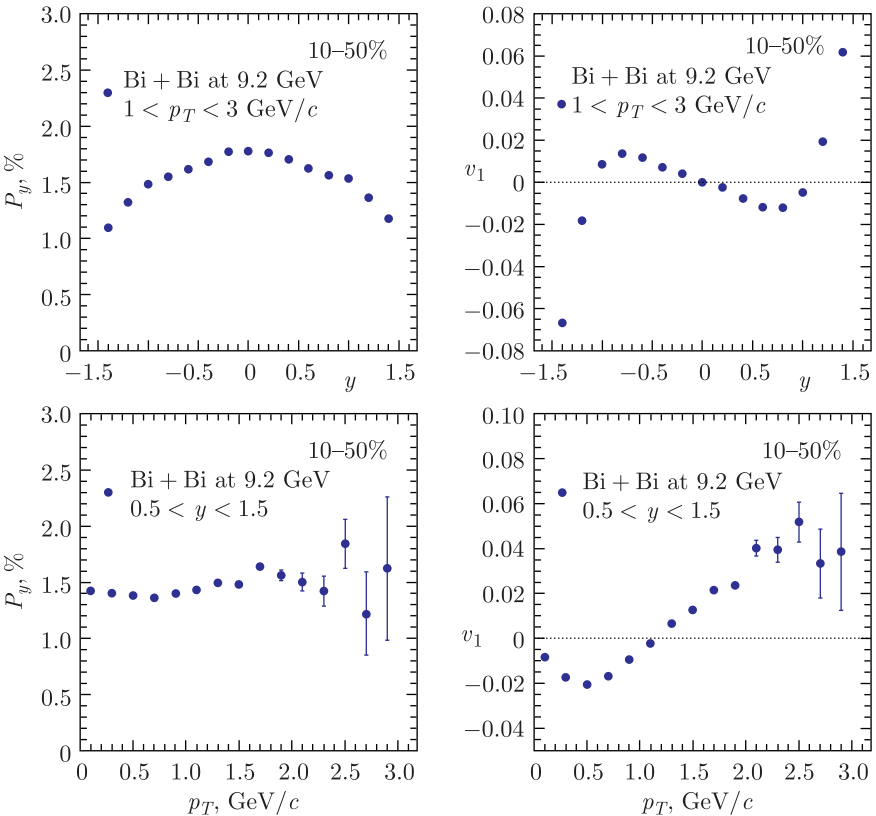


Рис. 1. Глобальная поляризация (левый столбец) и направленный поток (правый столбец) Λ -гиперонов в зависимости от быстроты (верхний ряд) и поперечного импульса (нижний ряд)

поэтому будем использовать $1 < p_T < 3$ ГэВ/с для зависимостей от центральности и быстроты. Выбор диапазона p_T обусловлен плохой эффективностью восстановления Λ -гиперонов при низких значениях p_T [22].

На рис. 2 показана корреляция между глобальной поляризацией и направленным потоком Λ -гиперонов для нескольких классов центральности, а также для заднего (отмечено как $p_z < 0$) и переднего (отмечено как $p_z > 0$) диапазона быстрот. Показаны зависимости от центральности коэффициента корреляции Пирсона $\rho(v_1, P_\Lambda)$ и частичного коэффициента корреляции Пирсона $\rho(v_1, P_\Lambda * N_\Lambda)$ на рис. 3, а. Оба коэффициента — $\rho(v_1, P_\Lambda)$ и $\rho(v_1, P_\Lambda * N_\Lambda)$ хорошо согласуются в пределах статистических погрешностей, поэтому мы можем сделать вывод, что множественность первичных Λ -гиперонов N_Λ не влияет на корреляцию. Зависимости $\rho(v_1, P_\Lambda)$ от быстроты и p_T показаны на рис. 3, б и в соответственно. Как и ожидалось, можно увидеть слабую зависимость $\rho(v_1, P_\Lambda)$ от центральности и заметные зависимости от p_T и y . Учитывая абсолютные значения $\rho(v_1, P_\Lambda)$, можно заключить, что корреляция между глобальной поляризацией P_Λ и направленным потоком v_1 Λ -гиперонов имеет умеренно линейный характер.

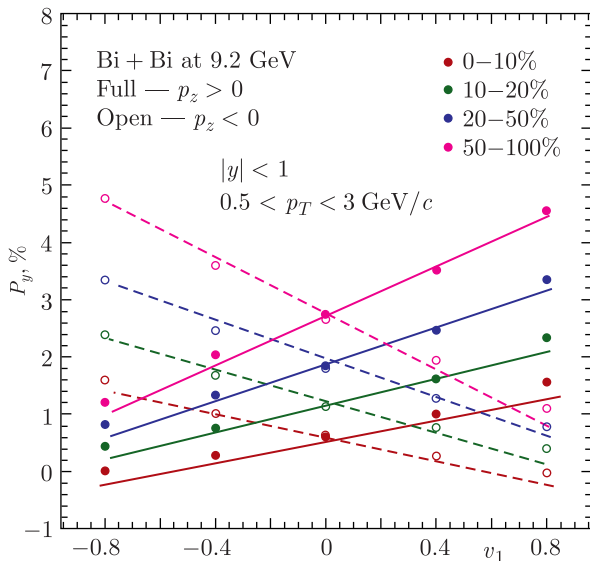


Рис. 2. Глобальная поляризация Λ -гиперонов как функция направленного потока для разных классов центральности. Темные точки представляют результаты для частиц в области передних быстрот $y > 0$ (отмечены как $p_z > 0$), а светлые точки — результаты для частиц в области задних быстрот $y < 0$ (отмечены как $p_z < 0$)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлен коэффициент корреляции Пирсона $\rho(v_1, P_\Lambda)$ как инструмент для ясного мультидифференциального анализа корреляции между глобальной поляризацией P_Λ и направленным потоком v_1 Λ -гиперонов. Модифицированная версия модели PHSD использовалась для генерации 20 млн столкновений Bi + Bi при $\sqrt{s_{NN}} = 9,2$ ГэВ. Коэффициент корреляции Пирсона $\rho(v_1, P_\Lambda)$ измерялся как функция центральности столкновения, быстроты и поперечного импульса (рис. 3). Показано, что $\rho(v_1, P_\Lambda)$ имеет слабую зависимость от центральности, но

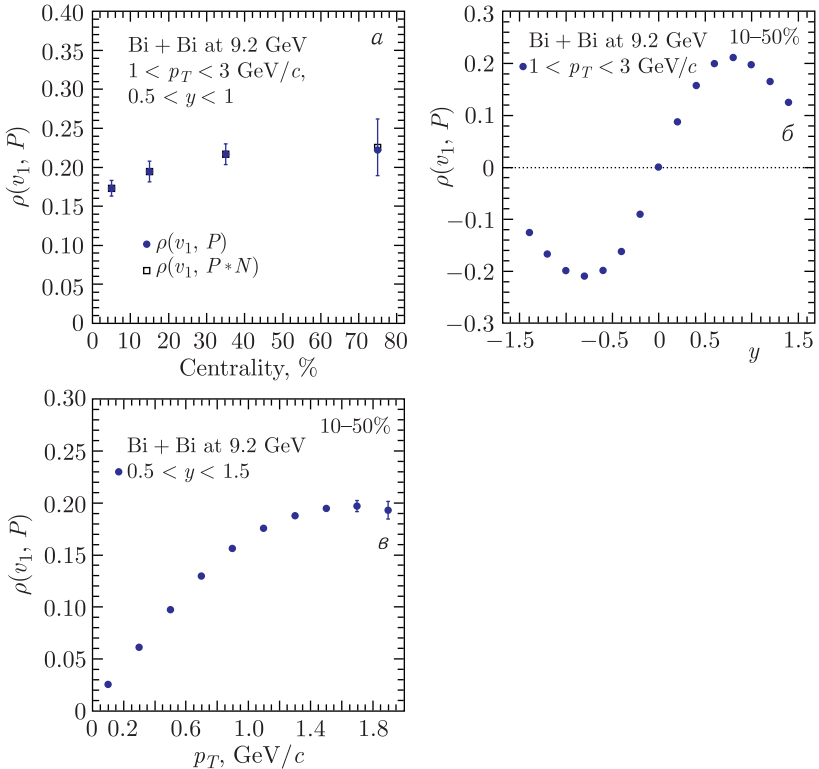


Рис. 3. а) Зависимость коэффициента Пирсона $\rho(v_1, P_\Lambda)$ и частичного коэффициента Пирсона $\rho(v_1, P_\Lambda * N_\Lambda)$ от центральности между глобальной поляризацией и направленным потоком. Частичная корреляция также включает в себя множественность первичных Λ -гиперонов N_Λ . б) Зависимость коэффициента Пирсона $\rho(v_1, P_\Lambda)$ от быстроты для 10–50% центральности столкновений. в) Коэффициент Пирсона $\rho(v_1, P_\Lambda)$ как функция поперечного импульса. Все результаты показаны для столкновений Bi + Bi при $\sqrt{s_{NN}} = 9,2$ ГэВ в модели PHSD с добавленной глобальной поляризацией с использованием подхода Бекаттини [19, 20]

заметные зависимости от p_T и y . Текущие измерения $\rho(v_1, P_\Lambda)$ подтверждают предыдущие выводы о корреляции между P_Λ и v_1 Λ -гиперонов и предлагают понятную наблюдаемую величину для будущих исследований.

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; arXiv:nucl-ex/0501009.
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 // Nucl. Phys. A. 2005. V. 757. P. 184–283; arXiv:nucl-ex/0410003.
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; arXiv:nucl-ex/0301009.
4. *Chung P. et al. (E895 Collab.)*. Differential Elliptic Flow in 2A GeV – 6A GeV Au+Au Collisions: A New Constraint for the Nuclear Equation of State // Phys. Rev. C. 2002. V. 66. P. 021901; arXiv:nucl-ex/0112002.
5. *Barrette J. et al. (E877 Collab.)*. Energy and Charged Particle Flow in a 10.8A GeV/c Au + Au Collisions // Phys. Rev. C. 1997. V. 55. P. 1420–1430; Erratum // Ibid. V. 56. P. 2336; arXiv:nucl-ex/9610006.
6. *Lan S. et al. (STAR Collab.)*. Anisotropic Flow Measurements of Identified Particles in the STAR Experiment // PoSC. 2022. V. POD2021. P. 005; arXiv:2109.10983.
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; arXiv:0711.1253 [nucl-th].
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; arXiv:nucl-th/0411101.
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; arXiv:1610.02506.
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; arXiv:1909.01281.
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; arXiv:1701.06657.
12. *Adam J. et al. (STAR Collab.)*. Polarization of Λ ($\bar{\Lambda}$) 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; arXiv:1905.11917.

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; arXiv:2108.00044.
14. *Abdulhamid M. I. et al. (STAR Collab.)*. Global Polarization of Λ and $\bar{\Lambda}$ Hyperons in Au+Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 19.6$ and 27 GeV // Phys. Rev. C. 2023. V. 108, No. 1. P. 014910; arXiv:2305.08705.
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; arXiv:2108.10012.
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; arXiv:2207.05160.
17. *Ivanov Yu. B., Soldatov A. A.* Correlation between Global Polarization, Angular Momentum, and Flow in Heavy-Ion Collisions // Phys. Rev. C. 2020. V. 102, No. 2. P. 024916; arXiv:2004.05166.
18. *Jiang Z. F., Wu X. Y., Cao S., Zhang B. W.* Hyperon Polarization and Its Correlation with Directed Flow in High-Energy Nuclear Collisions. arXiv:2307.04257. 2023.
19. *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; arXiv:2211.09219.
20. *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; arXiv:1303.3431 [nucl-th].
21. *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.
22. *Abgaryan V. et al. (MPD Collab.)*. Status and Initial Physics Performance Studies of the MPD Experiment at NICA // Eur. Phys. J. A. 2022. V. 58, No. 7. P. 140; arXiv:2202.08970.