

ПОЛЯРИЗАЦИЯ Λ -ГИПЕРОНОВ В СТОЛКНОВЕНИЯХ ЯДЕР ЗОЛОТА ПРИ ЭНЕРГИЯХ УСКОРИТЕЛЯ NICA

М. Базнат^{а, б, 1}, *О. В. Теряев*^{б, 2}, *А. В. Зинченко*^{в, 3}

^а Институт прикладной физики, Молдавский государственный университет, Кишинев

^б Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^в Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова, Ярославль, Россия

Моделирование нецентральных столкновений ядер золота при энергиях NICA проводится в транспортной модели PHSD. Исследованы свойства полей скорости и завихренности, а также гидродинамическая спиральность в зависимости от прицельного параметра и энергии. Обнаружена область поля скоростей, обладающая существенной изотропией, в которой можно определить «закон Хаббла». Получены квадрупольные структуры поля завихренности во всех плоскостях. Обнаружен эффект разделения спиральности в модели PHSD. Расчет поляризации Λ -гиперонов выполнен в термодинамическом и аномальном подходе при энергиях проекта NICA.

Simulations of peripheral Au + Au collisions at NICA energies are performed in the PHSD transport model. The properties of velocity and vorticity fields as well as hydrodynamic helicity are studied in dependence on the impact parameter and energy. There is a region of the velocity field that follows the “Little Bang” pattern which may be quantified by the “Hubble law”. Quadrupole structures of the vorticity field in all planes are obtained. The effect of helicity separation is found in the PHSD model. Calculation of Λ -hyperons polarization is performed in the thermodynamic and anomalous models at NICA energies.

PACS: 25.70.-z; 25.70.Gh; 25.10.+s; 14.20.Jn; 12.38.Mh

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время изучение свойств среды, состоящей из кварков и глюонов, привлекает все больший и больший экспериментальный и теоретический интерес исследователей. Эксперименты с кварк-глюонной плазмой проводятся на ускорителях LHC и RHIC, где энергия, приходящаяся на нуклон, составляет 100 ГэВ и выше. Такие энергии не позволяют изучать фазовый переход из кварк-глюонной фазы в адронную. Для изучения этого фазового перехода строятся ускорители FAIR и NICA, на которых энергии на нуклон на порядок меньше, чем на LHC и RHIC. Отметим, что

¹E-mail: baznat@theor.jinr.ru

²E-mail: teryaev@theor.jinr.ru

³E-mail: fallenpillar@mail.ru

и RHIC перешел на меньшие рабочие энергии, чтобы принять участие в изучении перехода. В дополнение к фазовому переходу, большой интерес представляют квантовые эффекты, возникающие при локальном нарушении дискретных симметрий квантовой теории поля, таких как четность P и комбинированная четность CP . Есть основания полагать, что одним из проявлений нарушения этих четностей является поляризация барионов, наблюдаемая коллаборацией STAR на RHIC [1]. В частности, аксиальная аномалия [2] приводит к появлению тока, который различает левые и правые кварки и, таким образом, поляризует Λ -гипероны. В вакууме такой ток возникает при наличии сильного магнитного поля и соответствующее разделение зарядов, названное киральным магнитным эффектом [3], возникает вдоль вектора напряженности магнитного поля. Появление аксиального тока в среде возможно при наличии в ней вихрей, поэтому он получил название кирального вихревого эффекта. Показано [4], что такой ток разделяет левые и правые состояния кварков и направлен по ротору скорости среды, являясь при этом функцией от ее химического потенциала и температуры. Таким образом, наличие вихрей при столкновении тяжелых ионов приводит к экспериментально наблюдаемому эффекту поляризации Λ -гиперонов.

В данной работе изучается завихренность среды при столкновении ионов золота с энергиями, характерными для ускорителя NICA, и индуцированная ей за счет аксиального тока поляризация Λ -гиперонов. Численные расчеты столкновений проводились в рамках кинетической транспортной модели PHSD (Parton Hadron String Dynamics) [5]. Посредством усреднения делается переход к гидродинамическому описанию среды, и в этом подходе производятся вычисления завихренности и спиральности.

СТРУКТУРА ЗАВИХРЕННОСТИ

Столкновения ядер вычисляются в рамках PHSD транспортной модели [5]. Методика проведения вычислений описана в [6, 7]. В дальнейшем будем пользоваться релятивистским кинематическим определением завихренности:

$$\omega_{\mu\nu} = \frac{1}{2} (\partial_\nu u_\mu - \partial_\mu u_\nu), \quad (1)$$

где u_ν — релятивистский четырехмерный вектор поля скоростей:

$$u^\nu(t, \mathbf{x}) = \gamma(t, \mathbf{x}) (1, \mathbf{v}(t, \mathbf{x})), \quad \gamma(t, \mathbf{x}) = \frac{1}{\sqrt{1 - \mathbf{v}^2(t, \mathbf{x})}}. \quad (2)$$

Определимся теперь с системой координат. Ядра сталкиваются вдоль оси z , плоскость xz — плоскость реакции. Расчеты показывают [6, 7] возрастание x -й проекции завихренности при приближении к границе файерболла, причем максимумы наблюдаются там, где находятся зрители. Расчеты также указывают на наличие зеркальной квадрупольной структуры между внешней и внутренней частями расширяющейся среды.

Для продольной составляющей ω_z также проявляется квадрупольная структура в плоскости реакции, как показано на рис. 1. В этой же плоскости векторная составляющая $\omega_\perp = (\omega_x, \omega_y)$ симметрична относительно оси y при $z = 0$, но при удалении от центра файерболла возникает вращение внешней и внутренней частей в разные стороны (рис. 2).

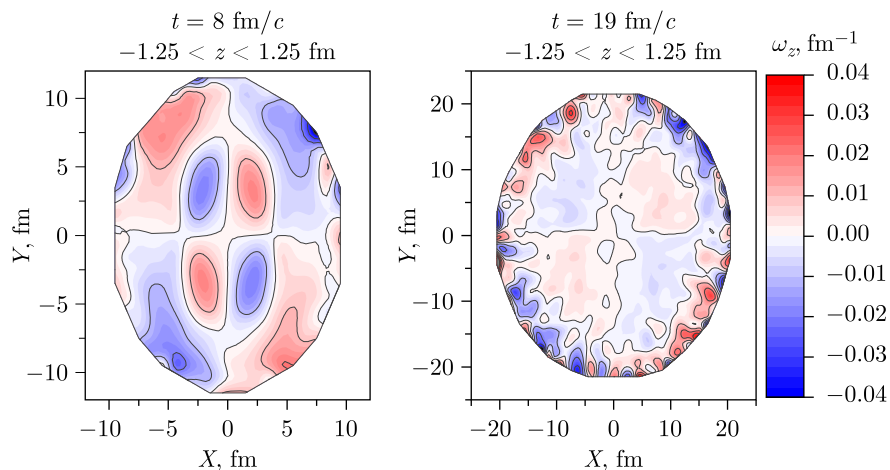


Рис. 1. Квадрупольная структура продольной составляющей релятивистской завихренности ω_z в столкновении ядер золота при $\sqrt{s} = 7,7$ ГэВ в центре фэйрбола в моменты времени $t = 8$ фм/с и $t = 19$ фм/с

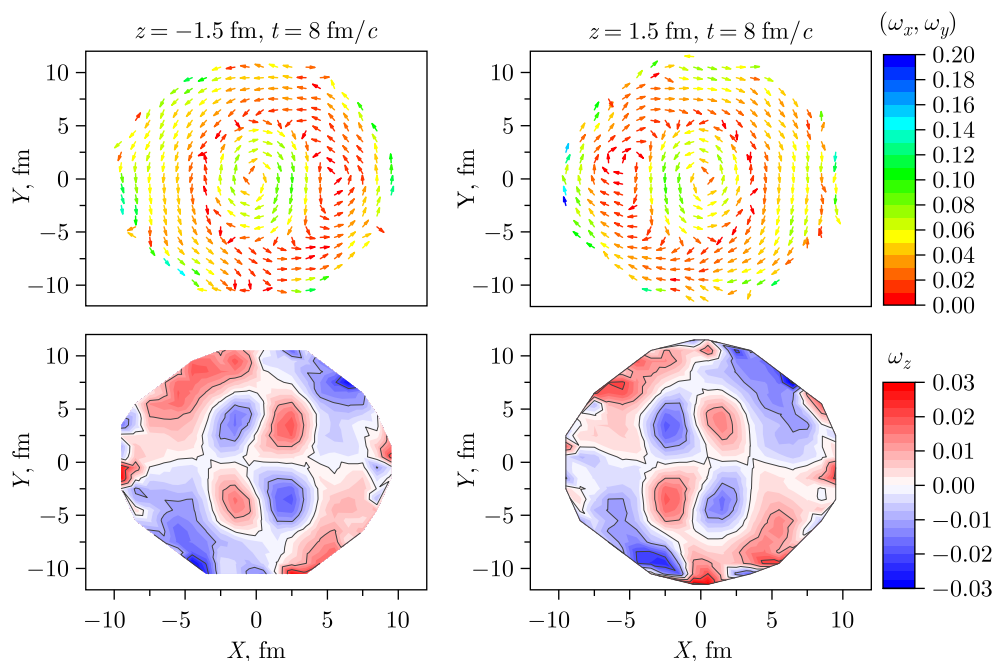


Рис. 2. Квадрупольная структура поперечной $\omega_{\perp} = (\omega_x, \omega_y)$ (два верхних рисунка) и продольной ω_z (два нижних рисунка) составляющих релятивистской завихренности в столкновении ядер золота при $\sqrt{s} = 7,7$ ГэВ в центре фэйрбола в момент времени $t = 8$ фм/с

В плоскости реакции вклад от полной завихренности отличен от нуля, поскольку знак у ω_y одинаков на границе фэйрбола и спектаторов, и он превосходит по величине значения завихренности в других частях фэйрбола [6, 7].

ПОЛЯРИЗАЦИЯ Λ -ГИПЕРОНОВ

Поляризация Λ -гиперонов $\langle \Pi_0^\Lambda \rangle$ напрямую связана со спиральностью в подходе, основанном на аксиальном вихревом эффекте [4, 8]:

$$\langle \Pi_0^\Lambda \rangle = \left\langle \frac{m_\Lambda}{N_\Lambda p_y} \right\rangle \frac{N_c}{2\pi^2} \int d^3x \mu_s^2(x) \gamma^2 \epsilon^{ijk} v_i \partial_j v_k. \quad (3)$$

Видно, как и спиральность, и завихренность, входящие в интеграл, напрямую влияют на поляризацию. Эффект разделения спиральности, обнаруженный как в модели QGSM [9], так и в PHSD [6, 7], в основном определяется продольными компонентами скорости и завихренности за счет слагаемого $\sim v_z \omega_z$. Отметим, что этот эффект происходит не только из-за различий в y составляющей импульса, но также есть добавка и от пространственной нелокальности.

Поляризация Λ -гиперонов, вычисленная с использованием аксиальной аномалии, равна $\Pi_0^\Lambda = 8\%$ для прицельного параметра $b = 7$ фм, энергии $\sqrt{s} = 7,7$ ГэВ и быстроты $|y| < 1$, где $y = (1/2) \log[(E + p_z)/(E - p_z)]$, и немного больше $\sim 6\%$ для центральности 20–50%. Поляризация, вычисленная в подходе локального термодинамического равновесия [10], составляет примерно 2% для такой же центральности. В термодинамическом подходе вектор спина \mathbf{S}^* , усредненный по направлению \mathbf{n}_p импульса \mathbf{p}_Λ Λ -гиперона, определяется как

$$\langle \mathbf{S}_\Lambda^* \rangle_{\mathbf{n}_p} = \frac{(1 - n_\Lambda)}{4M_\Lambda} \left(E_\Lambda + \frac{1}{3} \frac{\mathbf{p}_\Lambda^2}{E_\Lambda + m_\Lambda} \right) \text{rot } \beta, \quad (4)$$

где β — термодинамическая скорость (\mathbf{v}/T), который связан с поляризацией соотношением $\langle \Pi_0^\Lambda \rangle \sim 2\langle \mathbf{S}_\Lambda^* \rangle_{\mathbf{n}_p}$. Наблюдается различие в значениях, которое связано, во-первых, с выбором определения скорости, во-вторых, с большей чувствительностью поляризации от термодинамических величин при использовании аксиальной аномалии, в частности квадратично от странного химического потенциала, и, наконец, с возможным вкладом от гравитационной аномалии [9], который подавлен коллективными эффектами решеточных вычислений.

ЗАКОН ХАББЛА В МОДЕЛИ PHSD

Линейная зависимость скорости частиц от их расстояния до оси столкновения $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$ в плоскости $z = 0$ не наблюдается в окрестности центра фэйрбола, поскольку реакции распадов и рассеяния происходят при малых скоростях изотропно. На больших расстояниях частицы имеют скорость, близкую к максимально возможной, равной начальной скорости сталкивающихся ядер, что не позволяет получить линейный рост. Нами наблюдается линейный рост в промежуточной области фэйрбола во времена, превосходящие 15 фм/с, которые соответствуют химическому вымораживанию. В этой области, которую можно назвать «мини-взрыв», можно определить постоянную Хаббла H :

$$v = v_0 + H\rho. \quad (5)$$

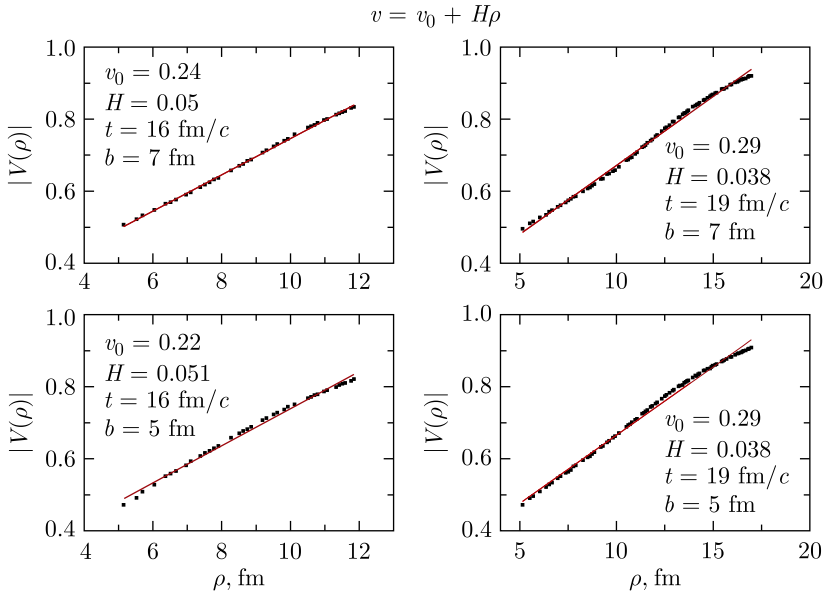


Рис. 3. Зависимость скорости частиц от поперечного радиуса $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$ при $z = 0$ и энергии $\sqrt{s} = 7,7$ ГэВ с прицельным параметром $b = 5$ фм и $b = 7$ фм

Поскольку наблюдается линейная зависимость скорости от расстояния частиц до центра перекрывания ядер, ее дивергенция позволяет найти постоянную Хаббла и проверить изотропию среды в этой области файерболла. Как видно из рис. 3, только для небольшой части расстояний дивергенция постоянна, $\text{div}(\mathbf{v}) = \text{const}$. Это подтверждает тот факт, что практически во всем объеме взрыв анизотропен. Только в небольшой области, где разлетаются не взаимодействующие частицы, можно определить однородное разлетание, а именно, $6 < \rho < 9$ фм при $t = 16$ фм/с и $6,5 < \rho < 11,5$ фм при $t = 19$ фм/с. Это только половина области, где скорость возрастает линейно. Численные расчеты дают следующие значения дивергенции: $\text{div}(\mathbf{v}) = 0,14$ фм $^{-1}$ при $t = 16$ фм/с и $\text{div}(\mathbf{v}) = 0,11$ фм $^{-1}$ при $t = 19$ фм/с, что позволяет определить постоянную Хаббла из условия: $\text{div}(\mathbf{v}) \simeq 3H$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследована структура поля завихренности среды, и обнаружены схожие структуры в разных проекциях. Основная структура в плоскостях, перпендикулярных плоскости реакции, является квадрупольной. Подтвержден эффект разделения спиральности в модели PHSD как в импульсном, так и в координатном пространстве.

Обнаружена область внутри файерболла, где распространение частиц вещества постстолкновительной среды подчиняется закону Хаббла.

Вычислена поляризация Λ -гиперонов в аномальном и термодинамическом подходе, которая оказалась близкой к найденной в эксперименте STAR при энергии

$\sqrt{s} = 7,7$ ГэВ. В рамках термодинамического подхода поляризация составила примерно 2%, а аномальный подход дал $\sim 6\%$ при центральности 20–50%. Основной причиной различия результатов можно считать большую чувствительность аномального подхода к термодинамическим величинам.

Благодарности. Мы благодарны Е. Братковской, Ю. Иванову, Е. Коломейцеву, В. Тонееву, В. Воронюку и А. Пархоменко за обсуждения полученных результатов. Работа частично поддержана РФФИ (грант № 20-32-90205).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Sorin A., Teryaev O. Axial Anomaly and Energy Dependence of Hyperon Polarization in Heavy-Ion Collisions // Phys. Rev. C. 2017. V. 95, No. 1. P. 011902; arXiv:1606.08398.
3. Fukushima K., Kharzeev D. E., Warringa H. J. The Chiral Magnetic Effect // Phys. Rev. D. 2008. V. 78. P. 074033; arXiv:0808.3382 [hep-ph].
4. Gao J. H., Liang Z. T., Pu S., Wang Q., Wang X. N. Chiral Anomaly and Local Polarization Effect from Quantum Kinetic Approach // Phys. Rev. Lett. 2012. V. 109. P. 232301; arXiv:1203.0725 [hep-ph].
5. Cassing W., Bratkovskaya E. L. Parton–Hadron-String Dynamics: An Off-Shell Transport Approach for Relativistic Energies // Nucl. Phys. A. 2009. V. 831. P. 215–242; arXiv:0907.5331 [nucl-th].
6. Zinchenko A., Sorin A., Teryaev O., Baznat M. Vorticity Structure and Polarization of Λ Hyperons in Heavy-Ion Collisions // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1435, No. 1. P. 012030.
7. Zinchenko A., Teryaev O., Baznat M., Sorin A. Polarization of Λ Hyperons, Vorticity and Helicity Structure in Heavy-Ion Collisions // PoS. 2022. V. PS-HEP2021. P. 308.
8. Rogachevsky O., Sorin A., Teryaev O. Chiral Vortical Effect and Neutron Asymmetries in Heavy-Ion Collisions // Phys. Rev. C. 2010. V. 82. P. 054910; arXiv:1006.1331 [hep-ph].
9. Baznat M., Gudima K., Sorin A., Teryaev O. Helicity Separation in Heavy-Ion Collisions // Phys. Rev. C. 2013. V. 88, No. 6. P. 061901; arXiv:1301.7003 [nucl-th].
10. Becattini F., Bucciattini L., Grossi E., Tinti L. Local Thermodynamical Equilibrium and the Beta Frame for a Quantum Relativistic Fluid // Eur. Phys. J. C. 2015. V. 75, No. 5. P. 191; arXiv:1403.6265 [hep-th].

Получено 27 октября 2022 г.