

О МАСШТАБИРОВАНИИ НАПРАВЛЕННОГО ПОТОКА ПРОТОНОВ В СТОЛКНОВЕНИЯХ Au + Au И Ag + Ag ПРИ ЭНЕРГИЯХ ПУЧКА 1,23А И 1,58А ГэВ

*М. В. Мамаев **

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

В столкновениях релятивистских тяжелых ионов при энергии пучка в несколько гигаэлектронвольт возникает сильно взаимодействующая материя при высоких барионных плотностях и относительно низких температурах. Азимутальная анизотропия образующихся частиц дает ценную информацию о свойствах этой формы материи. Обсуждается масштабирование направленного потока протонов в зависимости от размера системы, а также энергии столкновения.

In the relativistic heavy-ion collisions at the beam energy of a few GeV, the strongly interacting matter is created at high baryon densities and relatively low temperatures. Azimuthal anisotropy of the produced particles provides a valuable insight into the properties of this form of matter. We discuss the scaling properties of directed flow of protons with system size as well as the collision energy.

PACS: 44.25.+f; 44.90.+c

ВВЕДЕНИЕ

В релятивистских столкновениях тяжелых ионов при энергиях на пару сталкивающихся нуклонов $\sqrt{s_{NN}} = 2-5$ ГэВ образуется сильно взаимодействующая КХД-материя с барионной плотностью в 2–5 раз большей, чем плотность ядерного насыщения [1, 2]. Вещество при таких условиях изучается в нескольких экспериментах: программа FXT BES-II эксперимента STAR на RHIC ($\sqrt{s_{NN}} = 3-5,2$ ГэВ) [3], эксперимент BM@N на нуклотроне ($\sqrt{s_{NN}} = 2,4-3,5$ ГэВ) [4] и эксперимент NADES на SIS-18 ($\sqrt{s_{NN}} = 2,4-2,55$ ГэВ) [5]. В ближайшем будущем эксперименты по столкновению тяжелых ионов на новых ускорительных комплексах NICA в ОИЯИ ($\sqrt{s_{NN}} = 4-11$ ГэВ) [6], FAIR на GSI ($\sqrt{s_{NN}} = 2,7-4,9$ ГэВ SIS100) [7], NA61/SHINE на SPS ($\sqrt{s_{NN}} = 5,1-17,3$ ГэВ) [8] и HIAF на IMP ($\sqrt{s_{NN}} = 2-4$ ГэВ) продолжат изучение фазовой диаграммы в области высокой барионной плотности на большой статистике данных. Основная цель исследования —

* E-mail: mam.mih.val@gmail.com

получить более точную информацию об уравнении состояния высокой плотности (УС) и поиск возможного фазового перехода в плотной барионной материи. Сравнивая наблюдаемые, полученные в результате экспериментов по столкновению тяжелых ионов, с теоретическими предсказаниями, можно наложить ограничения на возможное УС плотной барионной материи. Экспериментальные исследования материи при таких условиях очень важны для понимания свойств нейтронных звезд и процессов, происходящих при слиянии нейтронных звезд [9]. Наиболее строгие ограничения, доступные в настоящее время для симметричного уравнения состояния EOS ядерной материи, исходят из современных измерений анизотропного потока протонов в столкновениях Au + Au. Анизотропный поток можно количественно оценить с помощью коэффициентов Фурье v_n [10] в разложении азимутального распределения частиц относительно плоскости реакции, заданной углом Ψ_R :

$$\frac{dN}{d\phi} \propto 1 + \sum_{n=1} 2v_n \cos(n(\varphi - \Psi_R)), \quad (1)$$

где n — порядок гармоники, а φ — азимутальный угол частицы данного типа. Коэффициенты потока v_n можно рассчитать как $v_n = \langle \cos[n(\varphi - \Psi_R)] \rangle$, где скобки обозначают среднее значение по частицам и событиям. Направленный (v_1) и эллиптический (v_2) потоки являются доминирующими и наиболее изученными сигналами в диапазоне энергий $2 < \sqrt{s_{NN}} < 5$ ГэВ [10–16]. Недавно эксперимент HADES на SIS18 сообщил о первых измерениях коэффициентов потока протонов высшего порядка (v_3, v_4, v_5, v_6) в столкновениях Au + Au при $\sqrt{s_{NN}} = 2,4$ ГэВ [16]. В этом энергетическом режиме время прохождения и время расширения сравнимы, а на анизотропные потоки сильно влияет наличие холодной спектаторной материи. Время прохождения t_{pass} , при котором ускоренные ядра пересекаются, можно оценить как

$$t_{\text{pass}} = \frac{2R}{\sinh y_{\text{beam}}}, \quad (2)$$

где R — радиус сталкивающихся ядер, а y_{beam} — быстрота пучка. Для столкновений Au + Au при $2 < \sqrt{s_{NN}} < 5$ ГэВ t_{pass} уменьшается с 30 до 5 Фм/с. Время прохождения зависит от энергии столкновения и размера сталкивающейся системы. Таким образом, изучение зависимости анизотропного потока от размера системы может помочь оценить вклад спектаторов и улучшить наши знания об УС симметричной ядерной материи. Если время прохождения велико по сравнению со временем расширения, то нуклоны-спектаторы блокируют путь образующихся адронов, испускаемых в плоскости реакции. Эффекты среднего ядерного поля внесут значительный вклад в наблюдаемую азимутальную анизотропию в этом диапазоне энергий [12–14, 17]. В данной работе представлены исследования свойств масштабирования v_1 протонов в столкновениях

Au + Au и Ag + Ag при $\sqrt{s_{NN}} = 2,4$ ГэВ (1,23А ГэВ) и 2,55 ГэВ (1,58А ГэВ). Предварительные результаты основаны на анализе данных HADES, собранных в ходе эксперимента в 2019 г. Значения v_1 , измеренные автором в 2021 г., первоначально были представлены на семинаре FAIR-NICA-2021 и с тех пор не менялись.

ЗАВИСИМОСТЬ v_1 ОТ РАЗМЕРА И ЭНЕРГИИ СТАЛКИВАЮЩИХСЯ ЯДЕР

На рис. 1 показан направленный поток v_1 протонов в столкновениях Au + Au при энергии пучка 1,23А ГэВ (треугольники) и столкновениях Ag + Ag при энергии пучка 1,23А (кружки) и 1,58А ГэВ (квадраты) в зависимости от быстроты центра масс y_{cm} (а) и поперечного импульса p_T (б). Значения v_1 протонов очень близки друг к другу для столкновений Au + Au и Ag + Ag при энергии пучка 1,23А ГэВ. Величина направленного потока протонов, возникающего в столкновениях Ag + Ag при более высокой энергии пучка, 1,58А ГэВ, заметно ниже. Линии на рис. 1 обозначают v_1 протонов, полученные в результате анализа событий модели JET AA Microscope Transport Model (JAM) [18–20]. Мы использовали версию JAM 1.9 с жестким импульсно-зависимым УС (MD2, $K_0 = 380$ МэВ), см. табл. I из работы [20]. Сравнение предварительных данных HADES с данными модели JAM показывает, что модель может грубо описать общую величину и тенденцию измеренного сигнала v_1

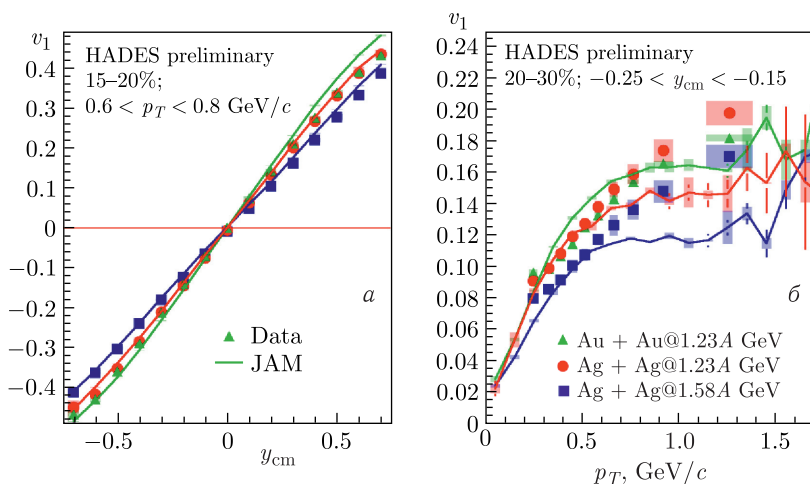


Рис. 1. Направленный поток v_1 протонов в столкновениях Au + Au при энергии пучка 1,23А ГэВ (треугольники) и столкновениях Ag + Ag при энергиях пучка 1,23А (кружки) и 1,58А ГэВ (квадраты) как функция быстроты центра масс, y_{cm} (а), поперечного импульса p_T (б). Линии обозначают результаты для модели JAM с жестко зависящим от импульса средним полем EOS MD2 ($K_0 = 380$ МэВ)

в зависимости от быстроты центра масс y_{cm} для обеих сталкивающихся систем. Однако модель не описывает форму зависимости v_1 протона от поперечного импульса p_T .

Направленный (v_1) поток в нуле быстроты можно определить количественно по его наклону $dv_1/dy|_{y=0}$. Наклон определяется как линейный член $dv_1/dy|_{y=0} = a_1$ кубического анзаца $v_1(y) = a_0 + a_1y + a_3y^3$, который

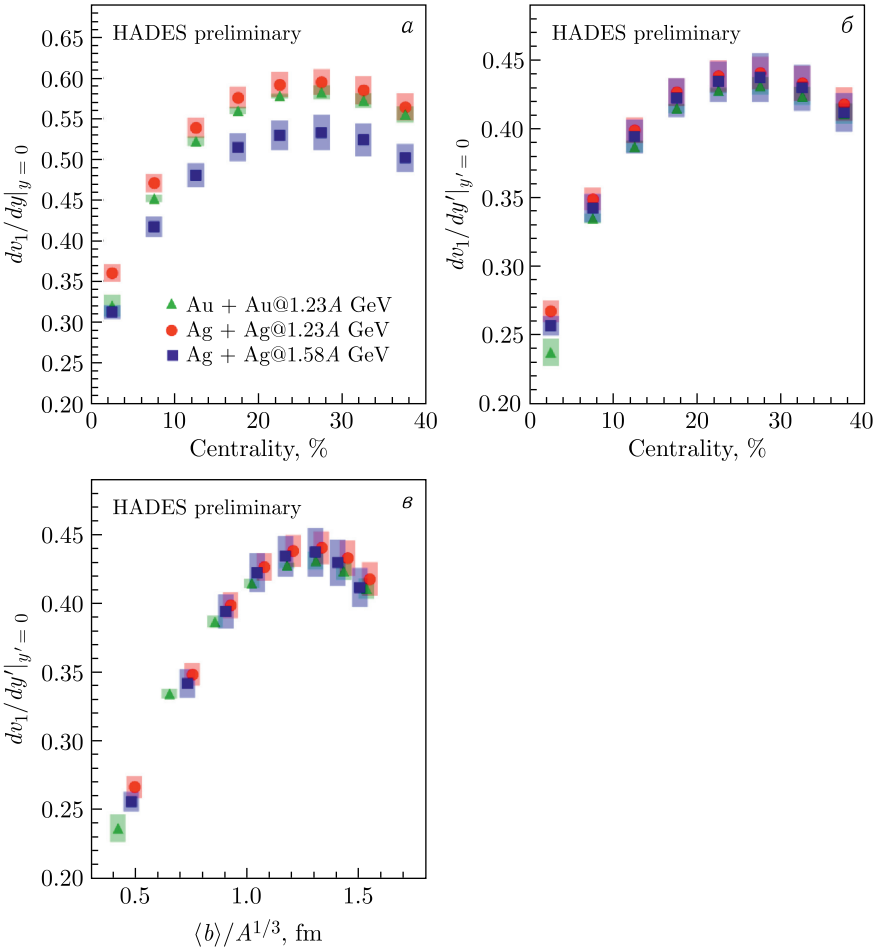


Рис. 2. Зависимость от центральности наклона v_1 протонов в нуле быстроты $dv_1/dy|_{y=0}$: быстрота центра масс y_{cm} (а), для масштабированной быстроты $y' = y_{cm}/y_{beam}$ (б) и для масштабированной быстроты $dv_1/dy|_{y'=0}$ (в) как функция среднего прицельного параметра в соответствующем классе центральности, нормированного на кубический корень из массового числа сталкивающихся ионов

соответствует измеренным точкам v_1 при данных y . На рис. 2, *а* показана зависимость от центральности наклона v_1 протонов в нуле быстрой в системе центра масс $dv_1/dy_{cm}|_{y_{cm}=0}$. Наклон $dv_1/dy_{cm}|_{y_{cm}=0}$ уменьшается с увеличением энергии столкновения. В этом диапазоне энергий, из-за значительного времени прохождения, на анизотропный поток сильно влияет присутствие холодных спектаторов (см. уравнение (2)). Наблюдаемое изменение наклона $dv_1/dy_{cm}|_{y_{cm}=0}$ можно объяснить уменьшением эффекта экранирования спектаторной материей за счет уменьшения t_{pass} . Зависимость v_1 от быстрой протонов становится менее сложной, если использовать масштабированную быструю $y' = y_{cm}/y_{beam}$, см. рис. 2, *б*. Масштабированная быстрая пучка в системе центра масс всегда равна $y' = \pm 1$. Зависимость v_1 от масштабированной быстрой ($y' = y_{cm}/y_{beam}$) может отражать частичное масштабирование v_1 с t_{pass} в этом диапазоне энергий. Для сравнения результатов направленного потока различных сталкивающихся систем было предложено использовать масштабированный прицельный параметр b_0 , определяемый как $b_0 = b/b_{max}$, принимая $b_{max} = 1,15 (A_P^{1/3} + A_T^{1/3})$ [21]. Поскольку мы изучаем симметричные сталкивающиеся системы ($A_T = A_P = A$), мы используем средний прицельный параметр $\langle b \rangle$ в соответствующем классе центральности, нормированный на кубический корень из массового числа сталкивающихся ионов $\langle b \rangle / A^{1/3}$. На рис. 2, *в* показан наклон $dv_1/dy'|_{y'=0}$ как функция $\langle b \rangle / A^{1/3}$. Рис. 2 показывает, что использование масштабированных переменных может упростить сравнение результатов v_n для различных сталкивающихся систем и энергий столкновения.

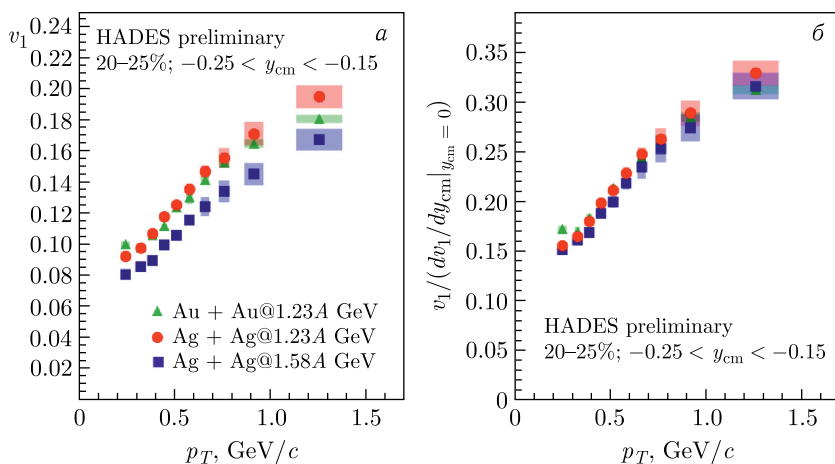


Рис. 3. *а*) p_T -зависимость v_1 протонов ($-0,25 < y_{cm} < -0,15$) для столкновений $Ag + Ag$ и $Au + Au$ с центральностью 20–25%; *б*) p_T -зависимость v_1 протонов, деленная на величину наклона $dv_1/dy|_{y=0}$

На рис. 3, а показана p_T -зависимость v_1 протонов (при $-0,25 < y_{cm} < -0,15$) для столкновений Ag + Ag и Au + Au при центральности 20–25 %. p_T -зависимость v_1 протонов, деленная на величину наклона $dv_1/dy|_{y=0}$, представлена на рис. 3, б. Мы видим, что форма $v_1(p_T)$ очень похожа для столкновений Ag + Ag и Au + Au.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты исследования скейлинговых свойств направленного потока протонов v_1 в столкновениях Au + Au при энергии пучка 1,23А ГэВ и Ag + Ag при энергиях пучка 1,23А и 1,58А ГэВ. Мы наблюдаем, что при использовании масштабированных переменных, таких как быстрота, масштабированная на быстроту пучка $y' = y_{cm}/y_{beam}$, и относительный прицельный параметр в каждом классе центральности $\langle b \rangle/A^{1/3}$, может уменьшить зависимость v_1 от размера сталкивающейся системы и энергии пучка. Это говорит о том, что при данных энергиях на направленный поток протонов сильно влияет наличие холодной spectatorной материи из-за того, что время прохождения сравнимо со временем расширения системы. Мы также наблюдаем сходство в форме зависимости v_1 протонов от поперечного импульса p_T во всех трех случаях.

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ, проект «Фундаментальные и прикладные исследования на экспериментальном комплексе класса мегасайенс NICA» (№ FSWU-2024-0024).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bzdak A., Esumi S., Koch V., Liao J., Stephanov M., Xu N. Mapping the Phases of Quantum Chromodynamics with Beam Energy Scan // Phys. Rep. 2020. V. 853. P. 1–87; arXiv:1906.00936.
2. Xu N. et al. Nuclear Matter at High Density and Equation of State Inspire. 2022; doi: 10.1007/978-981-19-4441-34.
3. Esumi S. et al. (STAR, ShinIchi Esumi Collab.). Results from Beam Energy Scan Program at RHIC-STAR // PoSC. 2022. V. POD2021. P. 001.
4. Senger P. et al. (BM@N Collab.). The Heavy-Ion Program at the Upgraded Baryonic Matter@Nuclotron Experiment at NICA // Ibid. P. 033.
5. Adamczewski-Musch J. et al. (HADES Collab.). HADES and the QCD Phase Diagram // Ibid. P. 003.
6. 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.
7. Ablaazimov T. et al. (CBM Collab.). Challenges in QCD Matter Physics – The Scientific Programme of the Compressed Baryonic Matter Experiment at FAIR // Eur. Phys. J. A. 2017. V. 53, No. 3. P. 60; arXiv:1607.01487.
8. Abgrall N. et al. (NA61 Collab.). NA61/SHINE Facility at the CERN SPS: Beams and Detector System // J. Instrum. 2014. V. 9. P. P06005; arXiv:1401.4699 [physics.ins-det].

9. *Senger P. for the CBM Collab.* Astrophysics with Heavy-Ion Beams // Phys. Scripta. 2021. V. 96, No. 5. P. 054002; <https://dx.doi.org/10.1088/1402-4896/abebfe>.
10. *Voloshin S. A., Poskanzer A. M., Snellings R.* Collective Phenomena in Non-Central Nuclear Collisions // Landolt-Bornstein. 2010. V. 23. P. 293–333; arXiv: 0809.2949 [nucl-ex].
11. *Liu H. et al. (E895 Collab.)*. Sideward Flow in Au + Au Collisions between 2A and 8A GeV // Phys. Rev. Lett. 2000. V. 84. P. 5488–5492; arXiv: nucl-ex/0005005.
12. *Pinkenburg C. et al. (E895 Collab.)*. Elliptic Flow: Transition from Out-of-Plane to In-Plane Emission in Au + Au Collisions // Phys. Rev. Lett. 1999. V. 83. P. 1295–1298; arXiv:nucl-ex/9903010.
13. *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.
14. *Abdallah M. S. et al. (STAR Collab.)*. Disappearance of Partonic Collectivity in $\sqrt{s_{NN}} = 3$ GeV Au + Au Collisions at RHIC // Phys. Lett. B. 2022. V. 827. P. 137003; arXiv:2108.00908.
15. *Adam J. et al. (STAR Collab.)*. Flow and Interferometry Results from Au + Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 4.5$ GeV // Phys. Rev. C. 2021. V. 103, No. 3. P. 034908; arXiv:2007.14005.
16. *Adamczewski-Musch J. et al. (HADES Collab.)*. Directed, Elliptic, and Higher Order Flow Harmonics of Protons, Deuterons, and Tritons in Au + Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.4$ GeV // Phys. Rev. Lett. 2020. V. 125. P. 262301; arXiv: 2005.12217.
17. *Danielewicz P., Lacey R., Lynch W. G.* Determination of the Equation of State of Dense Matter // Science. 2002. V. 298. P. 1592–1596; arXiv:nucl-th/0208016.
18. *Nara Y.* JAM: An Event Generator for High Energy Nuclear Collisions // Eur. Phys. J. Web Conf. EDP Sci. V. 208. 2019. P. 11004.
19. *Nara Y., Stoecker H.* Sensitivity of the Excitation Functions of Collective Flow to Relativistic Scalar and Vector Meson Interactions in the Relativistic Quantum Molecular Dynamics Model RQMD.RMF // Phys. Rev. C. 2019. V. 100, No. 5. P. 054902; arXiv:1906.03537.
20. *Nara Y., Maruyama T., Stoecker H.* Momentum-Dependent Potential and Collective Flows within the Relativistic Quantum Molecular Dynamics Approach Based on Relativistic Mean-Field Theory // Phys. Rev. C. 2020. V. 102, No. 2. P. 024913; arXiv:2004.05550.
21. *Reisdorf W. et al. (FOPI Collab.)*. Systematics of Azimuthal Asymmetries in Heavy Ion Collisions in the 1A GeV Regime // Nucl. Phys. A. 2012. V. 876. P. 1–60; arXiv:1112.3180 [nucl-ex].