

On the scaling properties of the directed flow of
protons in Au+Au and Ag+Ag collisions at the beam
energies of 1.23A and 1.58A GeV

О масштабировании направленного потока
протонов в столкновениях Au+Au и Ag+Ag при
энергиях пучка 1.23A и 1.58A ГэВ

M. Mamaev^{a,b,1}

M.V. Mamaev^{a,b,1},

^a National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics
Institute) 1

^a Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

^b Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Science

^b Институт Ядерных Исследований Российской Академии Наук

В столкновениях релятивистских тяжелых ионов при энергии пучка в несколько ГэВ возникает сильно взаимодействующая материя при высоких барионных плотностях и относительно низких температурах. Азимутальная анизотропия образующихся частиц дает ценную информацию о свойствах этой формы материи. В этой работе мы обсуждаем 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. In this work, 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 HADES на SIS-18 ($\sqrt{s_{NN}}$

¹E-mail: mam.mih.val@gmail.com

¹E-mail: mam.mih.val@gmail.com(русский вариант)

= 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 — 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 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 :

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

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

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

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 Фм/с 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, 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 (1,23 А ГэВ) и 2,55 ГэВ (1,58 А ГэВ). Предварительные результаты основаны на анализе данных HADES, собранных в ходе эксперимента в 2019 году. Значения v_1 были измерены автором в 2021 году, первоначально были представлены на семинаре FAIR-NICA-2021 и с тех пор не менялись.

1. Зависимость v_1 от размера и энергии сталкивающихся ядер

На рисунке 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 (прямоугольники) в зависимости от быстроты центра масс y_{cm} (слева) и поперечного импульса p_T (справа). 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 рисунке 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. Таблицу 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 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 $v_1(y) = a_0 + a_1 y + a_3 y^3$, который соответствует измеренным точкам v_1 при данных (y). В левой части рисунка 2 показана зависимость от центральности наклона v_1 протонов в нуле быстроты 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 быстроты протонов становится менее сложной, если использовать масштабированную быстроту $y' = y_{cm}/y_{beam}$, см. среднюю часть рисунка 2. Масштабированная быстрота пучка в системе центра масс всегда равна $y' = \pm 1$. Зависимость v_1 от

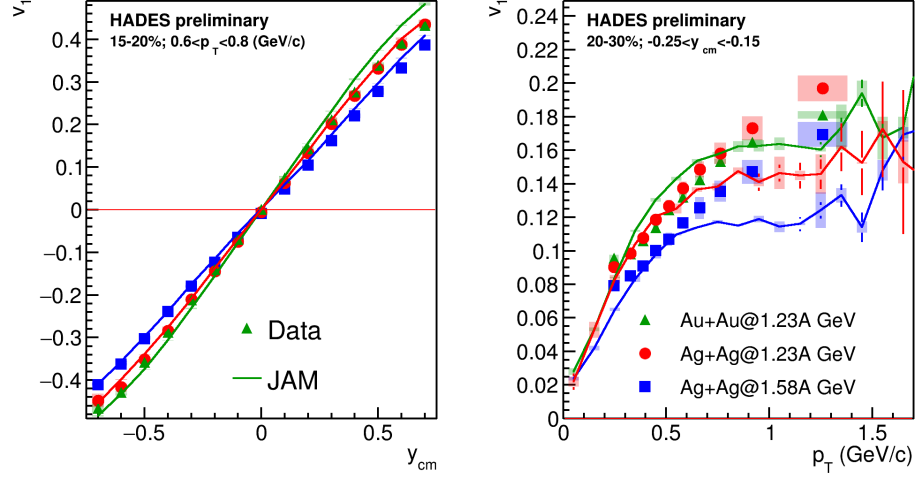


Рис. 1. Направленный поток v_1 протонов в столкновениях Au+Au при энергии пучка 1.23A ГэВ (треугольники) и столкновениях Ag+Ag при энергиях пучка 1.23A (кружки) и 1.58A ГэВ (прямоугольники) как функция (слева) быстроты центра масс, y_{cm} ; (справа) поперечного импульса p_T . Линии обозначают результаты для модели JAM с жестко зависящим от импульса средним полем EOS MD2 ($K_0 = 380$ МэВ).

масштабированной быстроты ($y' = y_{cm}/y_{beam}$) 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 правой панели рисунка 2 показан наклон $dv_1/dy'|_{y'=0}$ как функция $\langle b \rangle / A^{1/3}$. Рисунок 2 показывает, что использование масштабированных переменных может упростить сравнение результатов v_n для различных сталкивающихся систем и энергий столкновения.

В левой части рисунка 3 показана p_T -зависимость v_1 протонов (при $-0.25 < y_{cm} < -0.15$) для Ag+Ag и Au+Au столкновений при центральности 20-25%. p_T -зависимость v_1 протонов, деленная на величину наклона $dv_1/dy|_{y=0}$, представлена на правой панели рисунка 3. Мы видим, что форма $v_1(p_T)$ очень похожа для столкновений Ag+Ag и Au+Au.

2. Заключение

Представлены результаты исследования скейлинговых свойств направленного потока протонов v_1 в Au+Au при энергии пучка 1.23A ГэВ и Ag+Ag при энергиях пучка 1.23A и 1.58A ГэВ. Мы наблюдаем, что

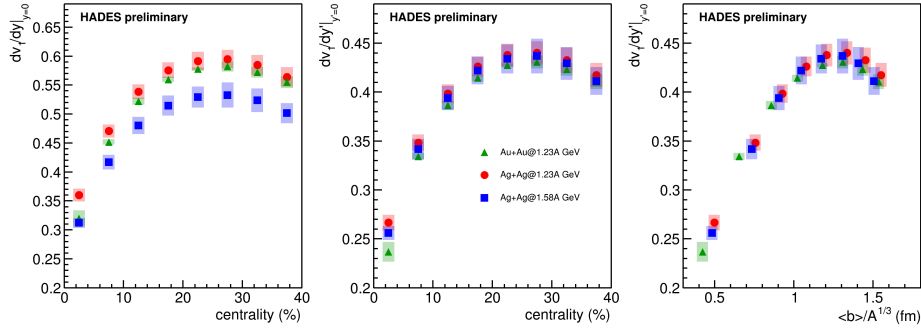


Рис. 2. Зависимость от центральности наклона v_1 протонов в нуле быстроты $dv_1/dy|_{y=0}$: (слева) быстрота центра масс y_{cm} , (в центре) для масштабированного быстроты $y' = y_{cm}/y_{beam}$ и (справа) для масштабированной быстроты $dv_1/dy'|_{y'=0}$ как функция среднего прицельного параметра в соответствующем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

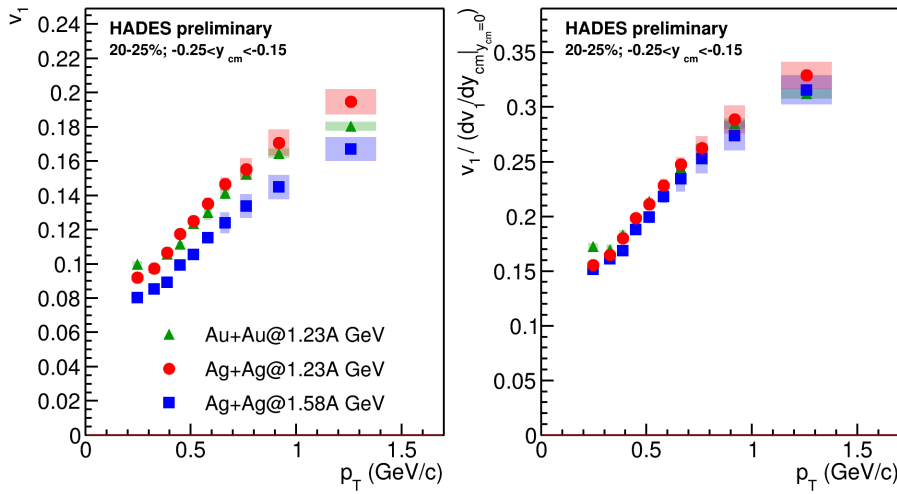


Рис. 3. (слева) p_T зависимость v_1 протонов (с $-0.25 < y_{cm} < -0.15$) для столкновений Ag+Ag и Au+Au с центральностью 20-25%; (справа) p_T зависимость v_1 протонов, деленная на величину наклона $dv_1/dy|_{y=0}$.

при использовании масштабированных переменных, таких как быстрота, масштабированная на быстроту пучка $y' = y/y_{beam}$ 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 спектаторной 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 трёх случаях.

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. Rept.* 2020. V. 853. P. 1–87. arXiv:1906.00936.
2. *Xu N., others.* Nuclear Matter at High Density and Equation of State. 2022.
3. *Esumi S. et al.* [STAR, ShinIchi Esumi Collaboration] Results from beam energy scan program at RHIC-STAR // *PoS*. 2022. V. POD2021. P. 001.
4. *Senger P. et al.* [BM@N Collaboration] The heavy-ion program at the upgraded Baryonic Matter@Nuclotron Experiment at NICA // *PoS*. 2022. V. POD2021. P. 033.
5. *Adamczewski-Musch J. et al.* [HADES Collaboration] HADES and the QCD phase diagram // *PoS*. 2022. V. POD2021. P. 003.
6. *Abgaryan V. et al.* [MPD Collaboration] 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. *Ablyazimov T. et al.* [CBM Collaboration] 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 Collaboration] NA61/SHINE facility at the CERN SPS: beams and detector system // *JINST.* 2014. V. 9. P. P06005. arXiv:1401.4699 [physics.ins-det].
9. *Senger P., for the CBM Collaboration.* Astrophysics with heavy-ion beams // *Physica Scripta.* 2021. mar. V. 96, no. 5. P. 054002. URL: <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 Collaboration] Sideward flow in Au + Au collisions between 2-A-GeV and 8-A-GeV // *Phys. Rev. Lett.* 2000. V. 84. P. 5488–5492. arXiv:nucl-ex/0005005.
12. *Pinkenburg C. et al.* [E895 Collaboration] 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 Collaboration] 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. arXiv:nucl-ex/0112002.
14. *Abdallah M.S. et al.* [STAR Collaboration] Disappearance of partonic collectivity in sNN=3GeV Au+Au collisions at RHIC // *Phys. Lett. B.* 2022. V. 827. P. 137003. arXiv:2108.00908.
15. *Adam J. et al.* [STAR Collaboration] 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 Collaboration] 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 // *EPJ Web of Conferences / EDP Sciences.* 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 Collaboration] Systematics of azimuthal asymmetries in heavy ion collisions in the 1 A GeV regime // *Nucl. Phys. A.* 2012. V. 876. P. 1–60. arXiv:1112.3180 [nucl-ex].