

ИЗМЕРЕНИЯ АДРОННЫХ ЭЛЛИПТИЧЕСКИХ ПОТОКОВ НА PHENIX

Е. В. Банников, А. Я. Бердников, Я. А. Бердников,
Д. О. Котов, Ю. М. Митранков, М. М. Митранкова,
Д. М. Ларионова, А. Д. Селезнев*

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

Одна из ключевых задач эксперимента PHENIX — изучение свойств кварк-глюонной плазмы (КГП). Эффективным способом изучения свойств КГП является измерение азимутальной анизотропии рождения частиц в ультррелятивистских столкновениях тяжелых ионов. Азимутальная анизотропия характеризуется коэффициентами Фурье-разложения функции распределения частиц по азимутальному углу. Измерение второго коэффициента разложения Фурье (v_2), называемого эллиптическим потоком, позволяет исследовать коллективное поведение ядерной материи и, следовательно, изучать свойства КГП. Представлен обзор последних результатов измерения эллиптических потоков адронов как функции поперечного импульса и центральности столкновения ядер в эксперименте PHENIX. Приведены данные измерений значений v_2 для нейтральных и заряженных адронов в столкновениях Cu + Au и Au + Au при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ.

One of the main goals of PHENIX experiment is to investigate the properties of quark-gluon plasma (QGP). Azimuthal anisotropy of hadrons produced in ultrarelativistic heavy-ion collisions is considered as a good tool to study QGP's properties. It can be characterized using Fourier coefficients of particle azimuthal distribution, where the second coefficient is the elliptic flow (v_2). Hadron elliptic flow measurements allow one to study the collective behavior of nuclear matter and gain insights into the QGP's properties. The recent measurements of the second-order hadron azimuthal anisotropy as a function of transverse momentum and centrality at PHENIX are presented. The results on the measurements of elliptic flow for neutral and charged hadrons are provided in Cu + Au and Au + Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV.

PACS: 25.75.-q

ВВЕДЕНИЕ

В конце XX в. в рамках КХД было предсказано существование особой формы сильновзаимодействующей материи, которая состоит из асимптотически свободных кварков и глюонов и носит название кварк-

* E-mail: bannikov.e@edu.spbstu.ru

глюонной плазмы. КГП может образовываться при значениях плотности энергии, превышающих ~ 1 ГэВ/см³ [1, 2]. В лабораторных условиях плотности энергии, достаточные для образования КГП, достигаются в ультрарелятивистских столкновениях тяжелых ионов [3]. Из-за малого времени жизни КГП (~ 10 фм/с) [4] ее свойства в эксперименте измеряют с помощью различных наблюдаемых [5]. Одним из ключевых свидетельств существования КГП является азимутальная анизотропия рождения частиц [6].

Область перекрытия ядер в ультрарелятивистских столкновениях представляет собой эллипсоид [6], поэтому начальное распределение частиц, рожденных в результате столкновения ядер, анизотропно. Величина начальной пространственной анизотропии зависит от размера и формы области перекрытия ядер, мерой которых является центральность. Согласно гидродинамическому описанию КГП, образованная сильновзаимодействующая материя в области перекрытия ядер обладает свойствами почти идеальной жидкости с партонными степенями свободы [7]. В процессе эволюции такой сильновзаимодействующей материи в области перекрытия ядер будет действовать градиент давления, максимальное значение которого будет направлено вдоль малой оси эллипса [8], что приводит к вылету адронов преимущественно в этом направлении [6]. Таким образом, распределение рожденных адронов в импульсном пространстве будет анизотропно [6].

Для количественной оценки возникающей азимутальной анизотропии используются коэффициенты Фурье-разложения функции распределения частиц по азимутальному углу [9]. Распространение рожденных частиц в поперечном пучке направлении характеризует второй коэффициент Фурье (v_2), называемый эллиптическим потоком. Поскольку импульсная анизотропия частиц возникает в результате начальной пространственной анизотропии, значения коэффициентов Фурье характеризуют самые ранние стадии эволюции системы, в которых фаза КГП может доминировать. Следовательно, эллиптический поток согласно гидродинамической модели КГП является прямым свидетельством возникновения коллективного движения частиц в ультрарелятивистских столкновениях ядер [8]. Измерение значений v_2 для различных адронов позволяет определить доминирующие процессы в механизме развития эллиптического потока, а исследование v_2 в различных системах столкновения и центральностях может привести к пониманию зависимости величины эллиптического потока от начальной геометрии системы.

В данной работе представлены последние результаты измерений эллиптических потоков нейтральных и заряженных адронов во взаимодействиях $\text{Cu} + \text{Au}$ и $\text{Au} + \text{Au}$ при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Значения эллиптических потоков π^0 -мезонов как функция их поперечной кинетической энергии (kE_T) в двух классах событий по центральности (0–20 и 20–60%), измеренные в асимметричных столкновениях Cu + Au при энергии 200 ГэВ, приведены на рис. 1, а, б. Для по-

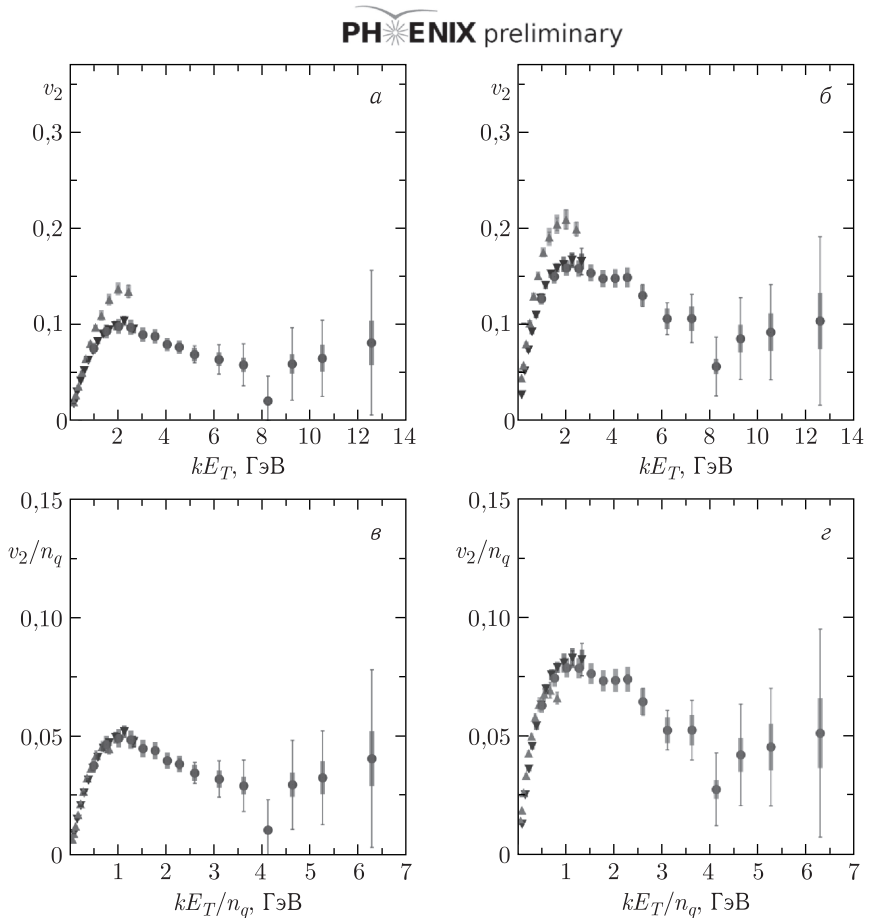


Рис. 1. Значения v_2 для π^\pm -мезонов (треугольники вниз), $(p + \bar{p})/2$ (треугольники вверх), π^0 -мезонов (кружки) как функция kE_T в центральностях 0–20 (а), 20–60% (б) и масштабированные значения эллиптического потока на число валентных кварков v_2/n_q как функция поперечной кинетической энергии на кварк (kE_T/n_q) в классах событий по центральности 0–20% (в), 20–60% (г) в столкновениях Cu + Au при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ

строения зависимости функции $v_2(kE_T)$ от сорта частиц на этом же рисунке приведены значения v_2 для заряженных пионов и (анти)протонов, полученные также в столкновениях Cu + Au [10]. Из рисунка видно, что значения v_2 для барионов превосходят аналогичные значения для мезонов при значениях kE_T , соответствующих промежуточным значениям поперечного импульса ($2 < p_T < 4$ ГэВ/с). Доминирование значений эллиптических потоков барионов над значениями v_2 для мезонов при промежуточных p_T может быть объяснено механизмом коалесценции кварков [11], поэтому целесообразно масштабировать значения v_2 на количество валентных кварков (n_q). Учет n_q можно производить для зависимости эллиптического потока от кинетической энергии $v_2(kE_T)$, что может привести к компенсации эффектов, возникающих из-за радиального потока [12]. При масштабировании зависимости $v_2(kE_T)$ на число валентных кварков значения $v_2/n_q(kE_T/n_q)$ совпадают с учетом неопределенностей для всех частиц, что видно из рис. 1, в, г. Это наблюдение указывает на возможное преобладание коллективного поведения партонов в КПП, что приводит к возникновению эллиптического потока уже на кварковом уровне. Масштабирование значений v_2 на число валентных кварков было обнаружено ранее в симметричной системе столкновений Au + Au при $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ на коллайдере RHIC [13]. Совпадение значений $v_2/n_q(kE_T/n_q)$ в столкновениях Cu + Au может указывать на независимость возникновения коллективного движения партонов от симметрии системы столкновения тяжелых ядер при энергии 200 ГэВ.

На рис. 2, а приведены измеренные значения эллиптических потоков π^0 -мезонов в столкновениях Cu + Au в шести классах событий по цен-

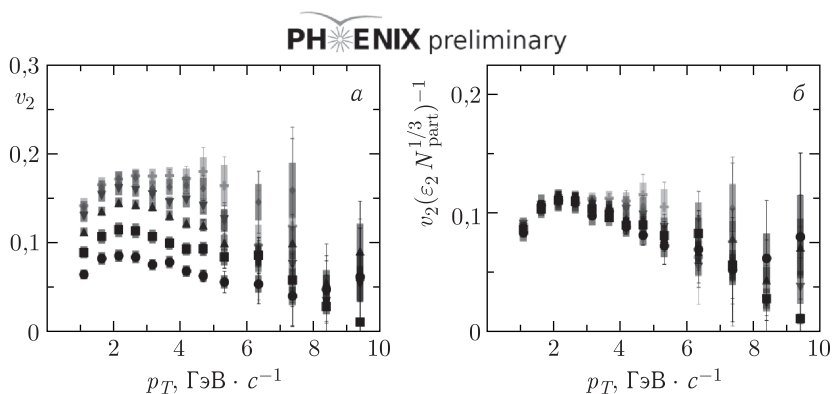


Рис. 2. Значения v_2 для π^0 -мезонов как функция p_T (а) и масштабированные на эмпирический фактор $v_2/(\varepsilon_2 N_{\text{part}}^{1/3})$ значения эллиптического потока как функция p_T (б) в столкновениях Cu + Au в шести диапазонах событий по центральности: кружки — 0–10%; квадраты — 10–20%; треугольники вверх — 20–30%; треугольники вниз — 30–40%; ромбы — 40–50%; крестики — 50–60% при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ

PHENIX preliminary

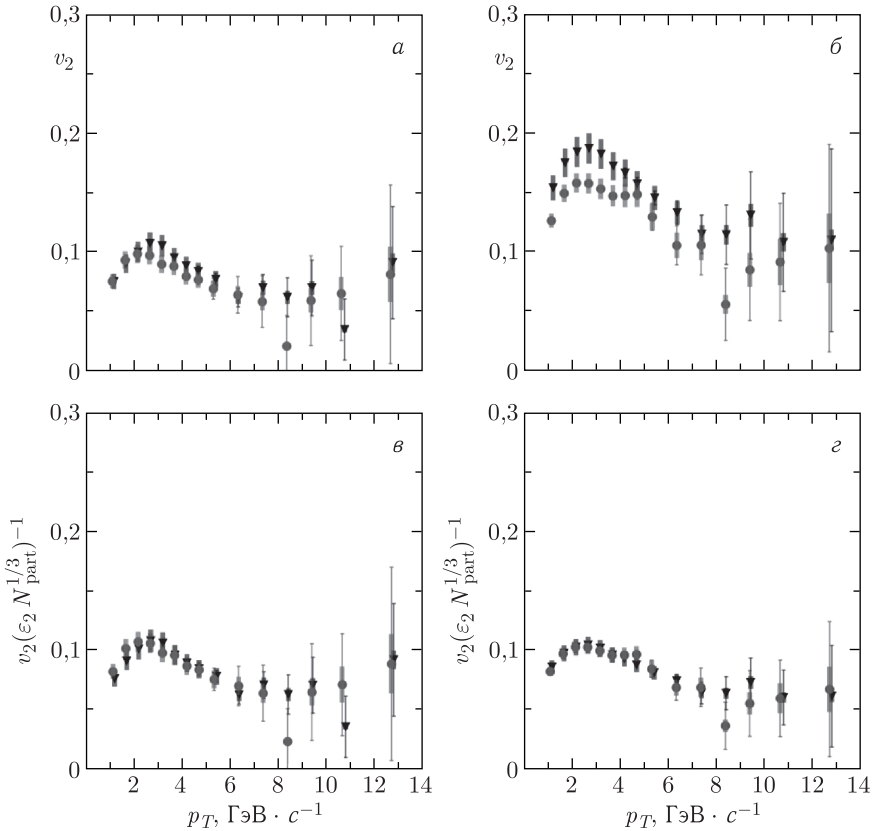


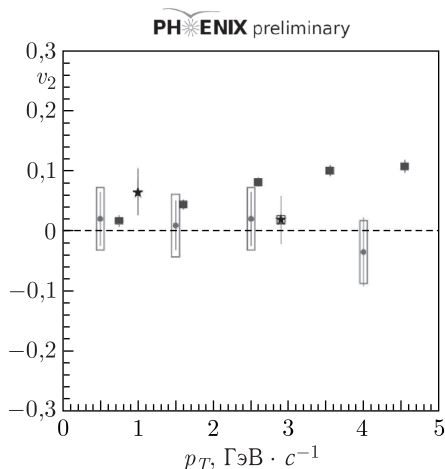
Рис. 3. Значения v_2 для π^0 -мезонов как функция p_T в двух диапазонах событий по центральности 0–20% (а), 20–60% (б) и масштабированные на эмпирический фактор $v_2/(\varepsilon_2 N_{\text{part}}^{1/3})$ значения эллиптического потока как функция p_T в центральностях 0–20% (в), 20–60% (з) в столкновениях: треугольники вниз — Au + Au; кружки — Cu + Au при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ

тральности, а на рис.3, а, б — значения $v_2(p_T)$ для π^0 -мезонов в асимметричных столкновениях Cu + Au и в симметричных столкновениях Au + Au [14]. Для учета влияния начальной геометрии системы столкновений на развитие эллиптического потока измеренные значения $v_2(p_T)$ для π^0 -мезонов масштабировались на эмпирический фактор $\varepsilon_2 N_{\text{part}}^{1/3}$ [15], где ε_2 — эксцентриситет нуклонов-участников, характеризующий эллиптичность формы области перекрытия ядер, а $N_{\text{part}}^{1/3}$ — кубический корень из числа нуклонов-участников, характеризующий линейный размер об-

разованной КГП. Значения $v_2/(\varepsilon_2 N_{\text{part}}^{1/3})$ как функция от p_T представлены на рис. 2, б и рис. 3, в, г. Из рисунков видно, что масштабированные значения эллиптических потоков совпадают во всех диапазонах событий по центральности в столкновениях Cu + Au, а также в центральностях 0–20 и 20–60% в столкновениях Cu + Au и Au + Au. Таким образом, масштабирование значений v_2 на ε_2 позволяет учесть влияние формы области перекрытия ядер [16], а масштабирование на $N_{\text{part}}^{1/3}$ — влияние размера области перекрытия ядер [15], что объясняется в рамках гидродинамической модели КГП [17].

На рис. 4 представлены значения эллиптических потоков J/ψ -мезонов, измеренных в столкновениях Au + Au при энергии 200 ГэВ [18] в сравнении с измеренными ранее в эксперименте STAR значениями при такой же энергии [19] и ALICE при $\sqrt{s_{NN}} = 5,02$ ТэВ [20]. Из рис. 4 видно, что измеренные в эксперименте PHENIX значения $v_2(p_T)$ для J/ψ -мезонов равны нулю с учетом неопределенностей во всем диапазоне по p_T , что находится в согласии с результатами, полученными коллаборацией STAR. Также из рисунка видно, что величина эллиптических потоков J/ψ -мезонов, измеренная коллаборацией ALICE, отлична от нуля, что не согласуется с результатами, полученными на RHIC. Положительная величина $v_2(p_T)$ для J/ψ -мезонов в эксперименте ALICE может возникать в результате процесса коалесценции c - и \bar{c} -кварков [20], поэтому на величину эллиптического потока J/ψ -мезонов может влиять количество образуемых пар $c\bar{c}$ -кварков [18]. Неопределенности измерений эллиптического потока J/ψ -мезонов в эксперименте PHENIX значительно выше неопределенностей, полученных коллаборацией ALICE. С учетом таких больших неопределенностей нулевые значения эллиптических потоков J/ψ -мезонов, измеренные коллаборацией PHENIX, могут

Рис. 4. Зависимость значений v_2 для J/ψ -мезонов от p_T в столкновениях: кружки — Au + Au при $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ на PHENIX в диапазоне событий 10–60% по центральности; звездочки — Au + Au при $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ на STAR в центральности 10–40%; квадраты — Pb + Pb при $\sqrt{s_{NN}} = 5,02$ ТэВ на ALICE в классе событий по центральности 20–40%



указывать на то, что энергии 200 ГэВ недостаточно для определения доминирующего процесса в развитии эллиптического потока J/ψ -мезонов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты измерений эллиптических потоков нейтральных и заряженных адронов во взаимодействиях $Cu + Au$ и $Au + Au$ при энергии 200 ГэВ в эксперименте PHENIX.

Обнаружено, что значения эллиптических потоков для π^0 - и π^\pm -мезонов как функция kE_T совпадают в пределах неопределенностей во всех диапазонах событий по центральности. Значения v_2 для (анти)протонов превышают измеренные значения $v_2(kE_T)$ для мезонов при значениях kE_T , соответствующих промежуточным значениям поперечного импульса ($2 < p_T < 4$ ГэВ/с). Это превышение может быть связано с процессом коалесценции кварков, вклад от которого в развитие эллиптического потока доминирует при промежуточных значениях p_T [11]. Следовательно, развитие эллиптического потока может происходить уже на уровне партонов.

Зависимость величины эллиптического потока от начальной геометрии системы может быть учтена масштабированием значений v_2 на эмпирический фактор $\varepsilon_2 N_{part}^{1/3}$. Полученные масштабированные значения $v_2/(\varepsilon_2 N_{part}^{1/3})$ для π^0 -мезонов в разных диапазонах событий по центральности и в разных системах столкновений совпадают друг с другом с учетом неопределенностей, что согласуется с предсказаниями гидродинамической модели КПП [17].

Измеренные величины эллиптического потока π^0 -мезонов в столкновениях $Cu + Au$ ненулевые в области высоких поперечных импульсов ($p_T > 5$ ГэВ/с), что может быть объяснено в рамках моделей, учитывающих эффекты, зависящие от длины пробега партонов в КПП, например, гашение струй [21].

Значения эллиптических потоков J/ψ -мезонов в столкновениях $Au + Au$ при энергии 200 ГэВ равны нулю с учетом неопределенностей во всем диапазоне по поперечному импульсу. Нулевые значения v_2 для J/ψ -мезонов с учетом больших неопределенностей могут свидетельствовать о том, что энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ недостаточно для определения доминирующего процесса в развитии эллиптического потока J/ψ -мезонов в эксперименте PHENIX.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shuryak E. V.* Quantum Chromodynamics and the Theory of Superdense Matter // Phys. Rep. 1980. V. 61. P. 71–158.
2. *Collins J. C., Perry M. J.* Superdense Matter: Neutrons or Asymptotically Free Quarks? // Phys. Rev. Lett. 1975. V. 34. P. 1353.

3. Matsui T., Satz H. J/ψ Suppression by Quark-Gluon Plasma Formation // Phys. Lett. B. 1986. V. 178. P. 416–422.
4. 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.
5. Bass S. A., Gyulassy M., Stoecker H., Greiner W. Signatures of Quark Gluon Plasma Formation in High-Energy Heavy Ion Collisions: A Critical Review // J. Phys. G. 1999. V. 25. P. R1–R57.
6. Kolb P. F., Heinz U. W. Hydrodynamic Description of Ultrarelativistic Heavy Ion Collisions. 2003. 5. P. 634–714; arXiv: nucl-th/0305084.
7. Gale C., Jeon S., Schenke B. Hydrodynamic Modeling of Heavy-Ion Collisions // Intern. J. Mod. Phys. A. 2013. V. 28. P. 1340011.
8. Ollitrault J. Y. Anisotropy as a Signature of Transverse Collective Flow // Phys. Rev. D. 1992. V. 46. P. 229–245.
9. Voloshin S., Zhang Y. Flow Study in Relativistic Nuclear Collisions by Fourier Expansion of Azimuthal Particle Distributions // Z. Phys. C. 1996. V. 70. P. 665–672.
10. Adare A. et al. (PHENIX Collab.). Measurements of Directed, Elliptic, and Triangular Flow in Cu + Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV // Phys. Rev. C. 2016. V. 94. P. 054910.
11. Voloshin S. A. Anisotropic Flow // Nucl. Phys. A. 2003. V. 715. P. 379–388.
12. Voloshin S. A., Poskanzer A. M., Snellings R. Collective Phenomena in Non-Central Nuclear Collisions // Landolt–Bornstein. 2010. V. 23. P. 293–333.
13. Adare A. et al. (PHENIX Collab.). Scaling Properties of Azimuthal Anisotropy in Au + Au and Cu + Cu Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV // Phys. Rev. Lett. 2007. V. 98. P. 162301.
14. Adare A. et al. (PHENIX Collab.). Azimuthal Anisotropy of π^0 and η Mesons in Au + Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV // Phys. Rev. C. 2013. V. 88, No. 6. P. 064910.
15. Adare A. et al. (PHENIX Collab.). Systematic Study of Azimuthal Anisotropy in Cu + Cu and Au + Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 62.4$ and 200 GeV // Phys. Rev. C. 2015. V. 92, No. 3. P. 034913.
16. Manly S. et al. (PHOBOS Collab.). System Size, Energy and Pseudorapidity Dependence of Directed and Elliptic Flow at RHIC // Nucl. Phys. A. 2006. V. 774. P. 523–526.
17. Lacey R. A., Taranenko A. What Do Elliptic Flow Measurements Tell Us about the Matter Created in the Little Bang at RHIC? // PoSC. 2006. V. FRNC2006. P. 021.
18. Abdulameer N. J. et al. (PHENIX Collab.). Highlights from the PHENIX Experiment // Acta Phys. Polon. Supp. 2023. V. 16, No. 1. P. 7–A7.
19. Adamczyk L. et al. (STAR Collab.). Measurement of J/ψ Azimuthal Anisotropy in Au + Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 111, No. 5. P. 052301.
20. Acharya S. et al. (ALICE Collab.). J/ψ Elliptic and Triangular Flow in Pb–Pb Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV // JHEP. 2020. V. 10. P. 141.
21. Snellings R. J. M., Poskanzer A. M., Voloshin S. A. Anisotropic Flow at STAR. arXiv: nucl-ex/9904003. 1999.