

ОБЗОР ПОСЛЕДНИХ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗУЧЕНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ PHENIX

*Ю. М. Митранков, Д. О. Котов, Я. А. Бердников,
А. Я. Бердников*

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

Представлен обзор последних результатов изучения взаимодействий тяжелых ионов в эксперименте PHENIX. Приведены данные измерений эллиптических и триангулярных потоков для заряженных и нейтральных адронов, рождения легких адронов и прямых фотонов во взаимодействиях $p + Al$, $p/d/{}^3He + Au$, $Cu + Au$, $Au + Au$ и $U + U$ при энергиях коллайдера RHIC.

The paper is devoted to the PHENIX heavy ion program overview. The results on the measurements of elliptic and triangular flows for charged and neutral hadrons, high- p_T light hadron and direct photon production are provided in $p + Al$, $p/d/{}^3He + Au$, $Cu + Au$, $Au + Au$ and $U + U$ collisions at top RHIC energies.

PACS: 25.75.-q

ВВЕДЕНИЕ

Основная цель эксперимента PHENIX [1] на коллайдере RHIC [2] — экспериментальное исследование кварк-глюонной плазмы (КГП), представляющей собой идеальную жидкость с партонными степенями свободы [3], образующейся в столкновениях релятивистских ионов. Чтобы количественно оценить и охарактеризовать свойства КГП, описать различные стадии столкновения, а также определить параметры вязкой гидродинамики, которая описывает поведение КГП, в коллаборации PHENIX были изучены всевозможные наблюдаемые в различных системах взаимодействий.

В данной работе представлены результаты измерений эллиптических и триангулярных потоков заряженных и нейтральных адронов, рождения легких адронов и прямых фотонов во взаимодействиях $p + Al$, $p/d/{}^3He + Au$, $Cu + Au$, $Au + Au$ и $U + U$ при энергиях коллайдера RHIC.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1, *а* представлен эллиптический поток v_2 для φ -мезонов как функция поперечного импульса p_T в сравнении с $v_2(p_T)$ для заряженных пионов π^\pm и (анти)протонов $(p + \bar{p})/2$ [4] во взаимодействиях Cu + Au при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ. Если поделить $v_2(p_T)$ на количество кварков в соответствующем адроне n_q и построить график как функцию поперечной кинетической энергии на один кварк KE_T/n_q , значения эллиптических потоков будут одинаковы для различных адронов (рис. 1, *б*). Нормированный таким образом эллиптический поток $v_2/n_q(KE_T/n_q)$ для φ -мезона равен нормированному эллиптическому потоку для π^\pm -мезонов и (анти)протонов, которые интенсивнее участвуют в фазе адронного перерасеяния, исходя из правила Окубо–Цвейга–Иизуки [5]. Эти наблюдения можно интерпретировать как указание на то, что перерасеяние адронов не ведет к формированию эллиптического потока. Вместо этого

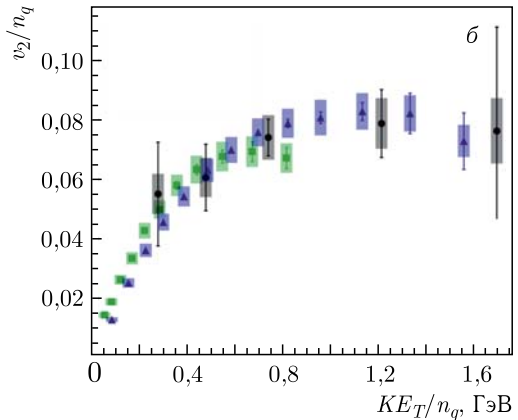
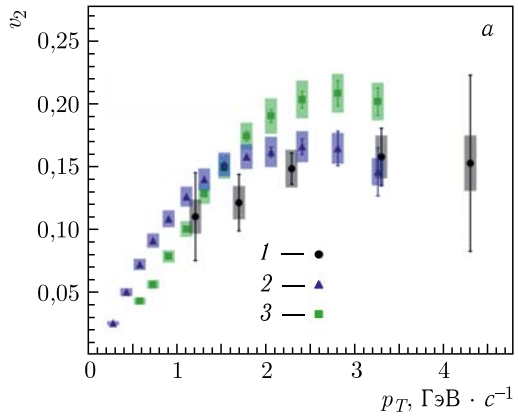


Рис. 1. Эллиптический поток v_2 для φ -мезонов (1), π^\pm -мезонов (2), $(p + \bar{p})/2$ (3) как функция поперечного импульса p_T (*а*) и нормированный на количество кварков в соответствующем адроне эллиптический поток v_2/n_q для тех же частиц как функция поперечной кинетической энергии на один кварк KE_T/n_q (*б*) во взаимодействиях Cu + Au при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ

наиболее вероятно, что коллективное поведение партонов доминирует в динамике поперечного расширения системы. Также согласие между значениями нормированных на n_q эллиптических потоков мезонов и барионов может быть интерпретировано как свидетельство того, что гидродинамическое расширение системы, образующейся при столкновении релятивистских ядер, происходит во время фазы с партонными степенями свободы, характеризующейся довольно низким отношением вязкости к энтропии [4, 6].

На рис. 2, *а* представлены эллиптические потоки для φ -мезонов в столкновениях U + U при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 192$ ГэВ и в Cu + Au и Au + Au при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ. Частное $v_2(p_T)$ и произведения эксцентриситета второго порядка нуклонов-участников (ε_2) и кубического корня из числа нуклонов-участников N_{part} показаны на рис. 2, *б*. Значения нормированного эллиптического потока для φ -мезонов одинаковы в пределах неопределенностей измерений для всех трех систем вне зависимости от центральности столкновения.

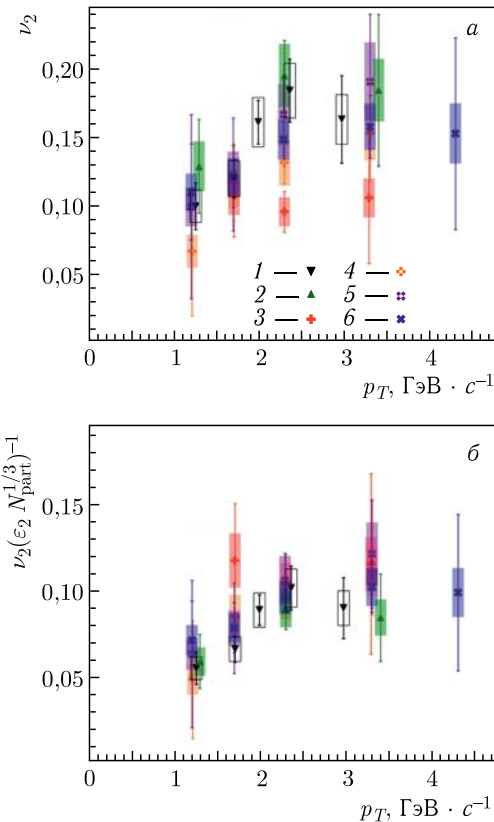


Рис. 2. Эллиптический поток v_2 для φ -мезонов (*а*) и нормированный эллиптический поток $v_2(\varepsilon_2 N_{part}^{1/3})^{-1}$ для φ -мезонов (*б*) как функция поперечного импульса p_T в столкновениях: 1 – 20–60% Au + Au; 2 – 0–50% U + U; 3 – 0–20% Cu + Au; 4 – 20–40% Cu + Au; 5 – 40–60% Cu + Au; 6 – 20–60% Cu + Au при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ

Данный результат показывает, что зависимость от начальной геометрии системы может быть учтена путем нормирования на эксцентриситет ε_2 , а зависимость от области перекрытия ядер — путем нормирования на $N_{\text{part}}^{1/3}$.

На рис. 3, *а* и *б* представлены результаты исследования эллиптического и треугольного потоков для заряженных адронов в столкновениях $p + \text{Au}$, $d + \text{Au}$ и ${}^3\text{He} + \text{Au}$ при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ [7]. Согласно данным расчетов, основанных на модели Глаубера, проведенных при моделировании методом Монте-Карло, эксцентриситет второго порядка нуклонов-участников ε_2 во взаимодействиях $p + \text{Au}$ меньше, чем в столкновениях $d/{}^3\text{He} + \text{Au}$, тогда как эксцентриситет третьего порядка ε_3 для ${}^3\text{He} + \text{Au}$ больше, чем для столкновений $p/d + \text{Au}$. Как видно из рис. 3, *а*, эллиптический поток в столкновениях $p + \text{Au}$ принимает меньшие значения, чем во взаимодействиях $d + \text{Au}$ и ${}^3\text{He} + \text{Au}$, а треугольный поток имеет наибольшие значения во взаимодействиях ${}^3\text{He} + \text{Au}$ (см. рис. 3, *б*). Эти результаты указывают на четкую корреляцию между

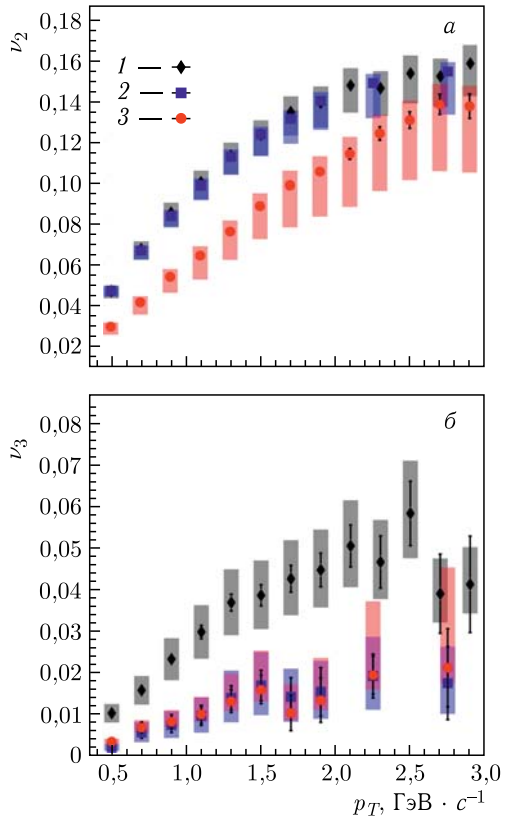


Рис. 3. Эллиптический (*а*) и треугольный (*б*) поток для заряженных адронов как функция поперечного импульса p_T во взаимодействиях ${}^3\text{He} + \text{Au}$ (1), $d + \text{Au}$ (2) и $p + \text{Au}$ (3) при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ

наблюдаемыми величинами эллиптического и триангулярного потоков и геометрией начального состояния. Данная зависимость численно согласуется с гидродинамическими моделями, учитывающими образование в легких системах мини-КГП с малой величиной отношения вязкости к энтропии [7].

На рис. 4, *a* и *б* приведены факторы ядерной модификации R_{AB} , измеренные для π^\pm , π^0 , η , φ , K^\pm , K_S^- , K^{*0} , ω -мезонов и $(p + \bar{p})/2$ [8, 9], в зависимости от p_T в центральных и периферийных столкновениях $\text{Cu} + \text{Au}$ при $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ. В центральных столкновениях значения факторов ядерной модификации (анти)протонов превышают значения R_{AB} мезонов в промежуточном диапазоне по поперечному импульсу $p_T \approx 3$ ГэВ $\cdot c^{-1}$. В частности, значения факторов ядерной модификации $(p + \bar{p})/2$ больше, чем значения R_{AB} φ -мезонов. Масса φ -мезона $m_\varphi = 1,019$ ГэВ $\cdot c^{-2}$ сравнима с массой протона $m_p = 0,938$ ГэВ $\cdot c^{-2}$. Отсюда следует вывод, что разница в модификации рождения адронов не может быть объяснена зависимостью от массы частицы. Аналогичное различие в значениях R_{AB} барионов и мезонов во взаимодействиях

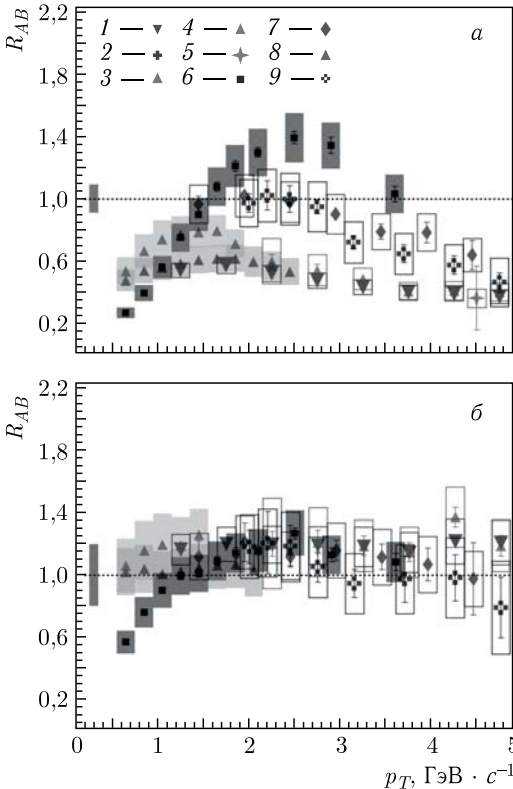


Рис. 4. Факторы ядерной модификации легких адронов, полученные в центральных (*a*) и периферийных (*б*) взаимодействиях $\text{Cu} + \text{Au}$ при энергии 200 ГэВ. Факторы ядерной модификации для частиц: 1 — π^0 ; 2 — K_S ; 3 — K^\pm ; 4 — η ; 5 — ω ; 6 — $(p + \bar{p})/2$; 7 — φ ; 8 — π^\pm ; 9 — K^*

Au + Au было объяснено в рамках модели рекомбинации [10]. В центральных взаимодействиях Cu + Au значения R_{AB} мезонов с наибольшей квантово-механической примесью s/\bar{s} -кварков, таких как K^{*-} , φ - и K^{\pm} -мезоны, совпадают в пределах погрешностей измерения во всем диапазоне p_T . Также стоит отметить, что значения R_{AB} мезонов с малой/нулевой примесью s/\bar{s} -кварков, таких как π^0 -, π^{\pm} -, η -мезоны, тоже совпадают, однако выходы данных частиц подавлены сильнее в промежуточном диапазоне по p_T , чем выходы K^{*-} , φ - и K^{\pm} -мезонов. Данная закономерность может быть качественно объяснена с помощью эффекта «увеличения выхода странности», являющегося одним из основных признаков образования КГП [3]. В легких системах столкновений $p + \text{Al}$, $p/d/{}^3\text{He} + \text{Au}$ данных различий не наблюдается [11]. В области больших поперечных импульсов $p_T > 5 \text{ ГэВ} \cdot c^{-1}$ выходы всех мезонов подавлены, что, вероятно, есть проявление эффекта гашения струй [3]. В периферийных взаимодействиях Cu + Au разница в значениях факторов модификации всех легких адронов исчезает, и они становятся близки к единице в пределах погрешности измерения.

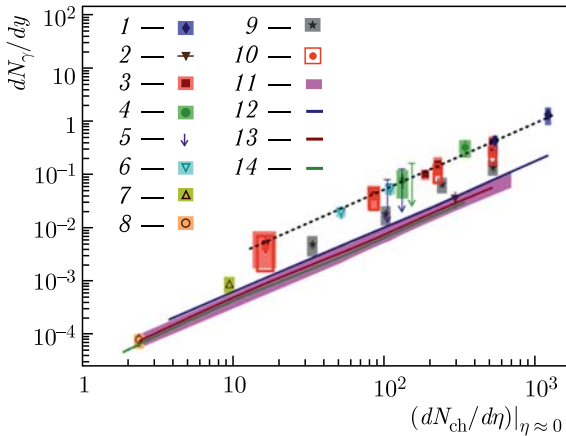


Рис. 5. Интегральные выходы прямых фотонов как функция множественности заряженных частиц в диапазоне малых быстрот $(dN_{\text{ch}}/d\eta)|_{\eta \approx 0}$ в интервале по поперечному импульсу $1,5 < p_T < 5,0 \text{ ГэВ} \cdot c^{-1}$ в столкновениях: 1 – Pb + Pb при $\sqrt{s_{NN}} = 2760 \text{ ГэВ}$ (эксперимент ALICE); 2 – Pb + Pb при $\sqrt{s_{NN}} = 17,3 \text{ ГэВ}$ (эксперимент WA98); 3 – Au + Au при $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ ГэВ}$; 4 – Au + Au при $\sqrt{s_{NN}} = 62,4 \text{ ГэВ}$; 5 – Au + Au при $\sqrt{s_{NN}} = 39 \text{ ГэВ}$; 6 – Cu + Au при $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ ГэВ}$; 7 – d + Au при $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ ГэВ}$; 8 – p + p при $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ ГэВ}$; 9 – Au + Au при $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ ГэВ}$ (эксперимент STAR); 10 – Au + Au при $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ ГэВ}$ (данные 2014 г). Интерполяция выходов прямых протонов в столкновениях $p + p$ при $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ ГэВ}$ – 11. Теоретические расчеты, основанные на пертурбативной квантовой хромодинамике для энергий: 12 – $\sqrt{s_{NN}} = 2760 \text{ ГэВ}$; 13 – $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ ГэВ}$; 14 – $\sqrt{s_{NN}} = 62,4 \text{ ГэВ}$

На рис. 5 показаны интегрированные выходы прямых фотонов как функция множественности заряженных частиц в области малых быстрот в различных взаимодействиях $A + A$, $d + A$ и $p + p$ при энергиях коллайдеров LHC, RHIC и SPS [12].

Также на рис. 5 приведены теоретические расчеты, основанные на пертурбативной квантовой хромодинамике при различных энергиях, и интерполяция значений выходов прямых фотонов в столкновениях $p + p$ при $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ. Данные расчеты предсказывают на порядок меньший выход прямых фотонов, чем наблюдается в тяжелых системах столкновений. Новый результат измерений выходов прямых фотонов в столкновениях $Au + Au$ при $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ совпадает с другими результатами для тяжелых систем. Выходы прямых фотонов в тяжелых системах хорошо аппроксимируются функцией $A(dN_{ch}/d\eta)^{1,25}$, представленной пунктирной линией на графике (см. рис. 5). Данная зависимость может указывать на то, что источник прямых фотонов во всех тяжелых системах взаимодействий вне зависимости от энергии пучка — одной и той же природы. В области $dN_{ch}/d\eta$ от 2 до 20 наблюдается переход от малого выхода прямых фотонов во взаимодействиях $p + p$ до большого в столкновениях $A + A$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлены результаты измерений эллиптических и триангулярных потоков для заряженных и нейтральных адронов, рождения легких адронов и прямых фотонов во взаимодействиях $p + A$, $p/d/{}^3\text{He} + Au$, $Cu + Au$, $Au + Au$ и $U + U$ при энергиях коллайдера RHIC.

Результаты измерений потоков различных порядков для легких адронов в столкновениях легких и тяжелых ионов коррелируют с количеством кварков в адроне n_q . Полученные данные показывают, что зависимость от начальной геометрии системы может быть учтена путем нормирования на эксцентриситет ε_2 , а зависимость от области перекрытия ядер — путем нормирования на $N_{part}^{1/3}$. Также результаты измерений потоков свидетельствуют о том, что гидродинамическое расширение системы, образующейся при столкновении релятивистских легких и тяжелых ядер, происходит во время фазы с партонами степенями свободы, характеризующейся довольно низким отношением вязкости к энтропии.

В коллаборации PHENIX были изучены факторы ядерной модификации различных легких адронов в тяжелых и легких системах. В центральных столкновениях в области больших поперечных импульсов $p_T > 5$ ГэВ $\cdot c^{-1}$ выходы всех мезонов подавлены, что, вероятно, является следствием потери партонами энергии в КПП. В промежуточном диапазоне по поперечному импульсу $p_T \approx 3$ ГэВ $\cdot c^{-1}$ наблюдается следующая зависимость модификации рождения легких адронов: $(p + \bar{p})/2 R_{CuAu} >$

$> \varphi, K^\pm, K^{*0} R_{\text{CuAu}} > \eta, \pi^\pm, \pi^0 R_{\text{CuAu}}$. Это различие в степени подавления выходов адронов можно качественно объяснить с помощью модели рекомбинации и эффекта «увеличения выхода странности».

Новые данные измерений выходов прямых фотонов в столкновениях $\text{Au} + \text{Au}$ при $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ совпадают с предыдущими результатами измерений в тяжелых системах. Выходы прямых фотонов в тяжелых системах хорошо аппроксимируются функцией $A (dN_{\text{ch}}/d\eta)^{1,25}$. Эта зависимость указывает на то, что источник прямых фотонов во всех тяжелых системах взаимодействий вне зависимости от энергии пучка — одной и той же природы.

Работа выполнена при частичной поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» (№ 075-15-2021-1333 от 30.09.2021).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Adcox K. et al. (PHENIX Collab.)*. PHENIX Detector Overview // Nucl. Instr. Meth. A. 2003. V. 499. P. 469.
2. *Wang X.N., Gyulassy M.* Gluon Shadowing and Jet Quenching in $A + A$ Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200A$ GeV // Phys. Rev. Lett. 1992. V. 68, No. 10. P. 1480.
3. *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.
4. *Adare A. et al. (PHENIX Collab.)*. Measurements of Directed, Elliptic, and Triangular Flows in Cu + Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV // Phys. Rev. C. 2016. V. 94. P. 054910.
5. *Okubo S.* φ -Meson and Unitary Symmetry Model // Phys. Lett. 1963. V. 5, No. 2. P. 165.
6. *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. P. 034913.
7. *Aidala C. et al. (PHENIX Collab.)*. Creation of Quark–Gluon Plasma Droplets with Three Distinct Geometries // Nature Phys. 2019. V. 15. P. 214–220.
8. *Berdnikov A., Berdnikov Ya., Kotov D., Mitrakov Yu.* φ -Meson Measurements in Cu + Au Collisions at 200 GeV and in U + U Collisions at 192 GeV // J. Phys: Conf. Ser. 2018. V. 1135, No. 1. P. 012044.
9. *Mitrakov Yu.* Scaling Properties of High- p_T Light Hadrons from Small to Large Systems by PHENIX // Proc. Sci. 2018. V. 345, No. 1. P. 0108.
10. *Adare A. et al. (PHENIX Collab.)*. Spectra and Ratios of Identified Particles in Au + Au and d + Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV // Phys. Rev. C. 2013. V. 88. P. 024906.

11. Бердников А. Я., Бердников Я. А., Котов Д. О., Ларионова Д. М., Ларионова М. М., Митранков Ю. М. Измерения ϕ -мезона в $p + \text{Au}$ и ${}^3\text{He} + \text{Au}$ столкновениях при энергии 200 ГэВ // Изв. РАН. Сер. физ. 2020. Т. 84, № 12. С. 1796–1799.
12. Adare A. et al. (PHENIX Collab.). Beam Energy and Centrality Dependence of Direct Photon Emission from Ultrarelativistic Heavy-Ion Collisions // Phys. Rev. Lett. 2019. V. 123, No. 2. P. 022301.