

## ИЗМЕРЕНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ АДРОНОВ В СТОЛКНОВЕНИЯХ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ИОНОВ

*Д. М. Ларионова\**, *А. Я. Бердников*, *Я. А. Бердников*,  
*Д. О. Котов*, *Ю. М. Митранков*, *Б. Родригес-Агилар*

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

Измерение выходов заряженных адронов в столкновениях различных ядер при релятивистских энергиях является одним из основных методов изучения кварк-глюонной плазмы (КГП) — состояния вещества, в котором кварки и глюоны асимптотически свободны. Согласно расчетам КХД в легких системах столкновений, таких как  $p + \text{Al}$ ,  $d + \text{Au}$ ,  $^3\text{He} + \text{Au}$  при энергиях  $\sqrt{s_{NN}} \approx 200$  ГэВ, условия, необходимые для образования КГП, не достигаются, однако в эксперименте PHENIX были получены результаты, которые могут быть интерпретированы как свидетельства образования КГП в таких системах. В связи с этим исследование механизмов рождения заряженных адронов в легких системах столкновений важно для изучения и разделения эффектов холодной ядерной материи и возможных эффектов КГП.

Measurement of charged hadron production in relativistic ion collision systems is one of the main methods to study hadronization of quark–gluon plasma (QGP) — a state of matter, which is thought to consist of asymptotically free quarks and gluons. According to QCD calculations, conditions in small collision systems, such as  $p + \text{Al}$ ,  $d + \text{Au}$ ,  $^3\text{He} + \text{Au}$  at the energy  $\sqrt{s_{NN}} \approx 200$  GeV, are not sufficient for the QGP formation, but flow studies in the PHENIX experiment established the evidence of possible QGP formation in such systems. Therefore, investigation of charged hadron production in small collision systems is important to distinguish cold nuclear matter effects and possible QGP effects.

PACS: 25.75.–q

### ВВЕДЕНИЕ

Согласно квантовой хромодинамике (КХД) кварки и глюоны находятся в связанном состоянии внутри адронов. Однако при достижении температуры и/или плотности, превышающих критические значения ( $T_c \approx 170$  МэВ,  $\rho_c \approx 10^{15}$  г/см<sup>3</sup>) [1, 2], наступает состояние деконфайнмента, в котором кварки и глюоны асимптотически свободны. Такое состояние вещества называется кварк-глюонной плазмой (КГП). Считается, что в первые мгновения ( $10^{-11}$  с) [1] после Большого взрыва Вселенная

---

\* E-mail: dashalarior@gmail.com

находилась в фазе КГП. Согласно КХД условия, достигающиеся в столкновениях тяжелых ионов, также достаточны для образования КГП.

Системы релятивистских столкновений можно классифицировать следующим образом: протон-протонные столкновения ( $p + p$ ), легкие системы столкновений (легкого и тяжелого ядра) и тяжелые системы столкновений (двух тяжелых ядер) [3, 4]. Протон-протонные столкновения хорошо изучены и описываются КХД [2, 5]. В данной работе рассмотрены легкие системы  $p + Al$ ,  $d + Au$  и  ${}^3\text{He} + Au$ . В таких столкновениях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ возникают эффекты холодной ядерной материи (эффекты Кронины, многократного рассеяния и потерь энергии в начальном состоянии). Условия в легких системах столкновений при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ считались недостаточными для образования КГП [3, 5], однако в эксперименте RHENIX были обнаружены эффекты, которые могут быть интерпретированы как свидетельства образования КГП в таких системах [5]. В связи с этим дальнейшее изучение легких систем столкновений является актуальной задачей. В качестве примеров тяжелых систем можно привести системы  $Cu + Au$ ,  $Au + Au$ ,  $U + U$ . Образование КГП в тяжелых системах предсказано КХД, а также подтверждается экспериментальным обнаружением эффектов, свидетельствующих об образовании КГП [3]. К таким эффектам относятся: увеличенный выход странности, гашение струй и увеличение отношения выходов протонов к выходам  $\pi$ -мезонов ( $p/\pi$ ) в столкновениях релятивистских ионов по сравнению с  $p + p$ -столкновениями [3].

Впервые увеличение отношения ( $p/\pi$ ) по сравнению с  $p + p$ -столкновениями было обнаружено в эксперименте RHENIX [7] в столкновениях  $Au + Au$  при энергии 200 ГэВ [3, 8]. В  $p + p$ -столкновениях значение отношения  $p/\pi$  не превосходит значения 0,25, в то время как в столкновениях  $Au + Au$  отношение  $p/\pi$  достигает значения 0,8, причем величина отношения  $p/\pi$  зависит от центральности столкновения — меры перекрытия сталкивающихся ядер. Данный эффект был теоретически описан с помощью модели рекомбинации [9].

Модель рекомбинации является одной из моделей адронизации КГП. В ней адроны в столкновении образуются из кварков в КГП, близких друг к другу в фазовом пространстве, т. е. имеющих близкие значения импульса и координаты. Другой моделью адронизации КГП является модель фрагментации [9], согласно которой адроны образуются в результате разрыва партонных струй. Считается [9], что рекомбинация является доминирующим механизмом образования адронов в диапазоне малых поперечных импульсов ( $p_T < 3$  ГэВ/с), а фрагментация — доминирующим механизмом образования адронов в диапазоне высоких  $p_T$  ( $p_T > 3$  ГэВ/с).

Основными параметрами рекомбинационных моделей являются: температура КГП, химический потенциал кварков и параметры, отвечающие за условие «близости» кварков в фазовом пространстве [9]. В настоящее время все теоретические расчеты и определение перечисленных

параметров основаны на экспериментальных результатах, полученных только в симметричной системе столкновений Au + Au и в столкновениях  $d + Au$ .

Систематическое изучение образования адронов в различных системах столкновений позволит исследовать условия образования КГП и уточнить параметры рекомбинационных моделей. Данная работа посвящена изучению образования легких адронов в столкновениях  $p + Al$  и  ${}^3He + Au$ .

### МЕТОДИКА РАБОТЫ

В настоящей работе представлены инвариантные спектры, факторы ядерной модификации ( $R_{AB}$ ) и отношения выходов протонов к выходам  $\pi$ -мезонов, полученные в эксперименте PHENIX во взаимодействиях  $p + Al$ ,  $d + Au$ ,  ${}^3He + Au$  и  $Au + Au$  при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ в области малых быстрот ( $|y| < 0,35$ ).

Инвариантные спектры по поперечному импульсу вычисляются согласно формуле [10, 11]

$$\frac{1}{2\pi p_T} \frac{d^2 N}{dp_T dy} = \frac{N_h}{2\pi p_T N_{evt} \varepsilon_{rec} \Delta p_T \Delta y}, \quad (1)$$

где  $\Delta p_T$  — диапазон поперечных импульсов;  $\Delta y = 0,35$  — диапазон быстрот;  $N_h$  — количество заряженных адронов  $h$ , зарегистрированных в диапазонах  $\Delta p_T$ ,  $\Delta y$ ;  $\varepsilon_{rec}$  — эффективность регистрации адронов  $h$ . Для оценки значения величины  $\varepsilon_{rec}$  было проведено моделирование Монте-Карло.

Полученные инвариантные спектры были использованы для вычисления отношений  $p/\pi$  и факторов ядерной модификации согласно формуле [10, 11]

$$R_{AB} = \frac{1}{N_{coll}} \frac{d^2 N_{A+B}/dp_T dy}{d^2 N_{p+p}/dp_T dy}, \quad (2)$$

где  $N_{coll}$  — количество парных нуклон-нуклонных соударений;  $d^2 N_{A+B}/dp_T dy$  и  $d^2 N_{p+p}/dp_T dy$  — инвариантные спектры адронов в столкновениях  $A + B$  и  $p + p$  соответственно.

### РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис.1 представлены значения  $R_{AB}$  различных легких адронов ( $\pi^\pm$ ,  $\pi^0$ ,  $K^{*0}$ ,  $K^\pm$ ,  $\varphi$ ,  $(p + \bar{p})/2$ ), измеренные в центральных столкновениях  $p + Al$  (а), центральных столкновениях  ${}^3He + Au$  (б), периферийных столкновениях  $p + Al$  (в), периферийных столкновениях  ${}^3He + Au$  (г) при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ.

Значения  $R_{AB}$  всех рассматриваемых мезонов совпадают в пределах погрешностей как в центральных, так и в периферийных столкновениях

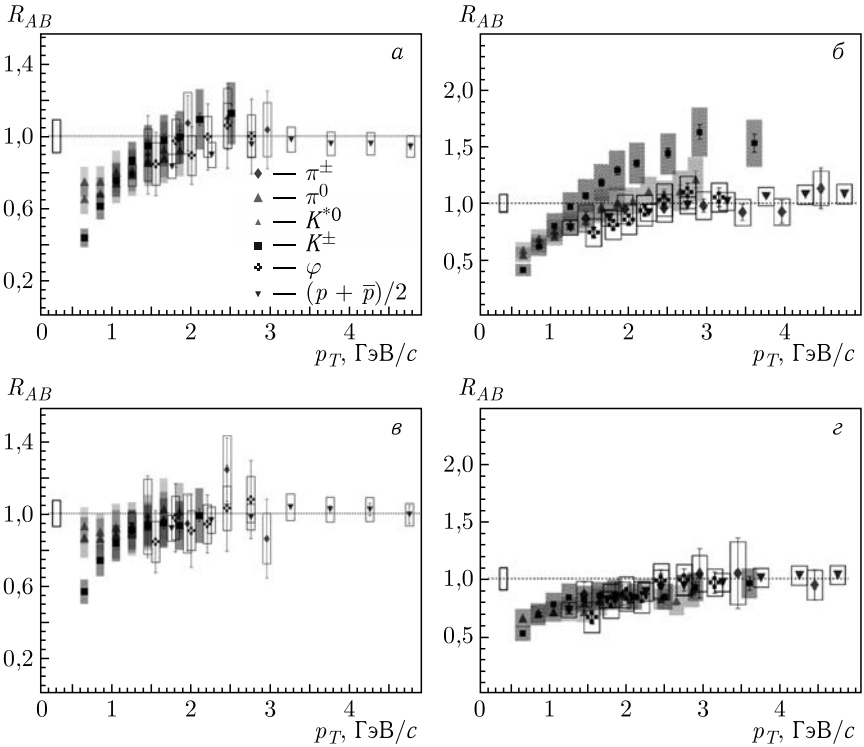


Рис. 1.  $R_{AB}$  различных легких адронов ( $\pi^\pm$ ,  $\pi^0$ ,  $K^{*0}$ ,  $K^\pm$ ,  $\varphi$ ,  $(p + \bar{p})/2$ ), измеренные в центральных столкновениях  $p + \text{Al}$  (а), центральных столкновениях  ${}^3\text{He} + \text{Au}$  (б), периферийных столкновениях  $p + \text{Al}$  (в), периферийных столкновениях  ${}^3\text{He} + \text{Au}$  (г)

$p + \text{Al}$  и  ${}^3\text{He} + \text{Au}$ . В частности, значения  $R_{AB}$  мезонов, содержащих странный кварк ( $\varphi, K^\pm, K^{*0}$ ), совпадают в пределах погрешностей со значениями  $R_{AB}$  мезонов, не содержащих странный кварк ( $\pi^\pm, \pi^0$ ). Это может означать, что в столкновениях  $p + \text{Al}$  и  ${}^3\text{He} + \text{Au}$  в диапазоне малых быстрот ( $|y| < 0,35$ ) не наблюдается увеличенного выхода странности, являющегося одним из признаков образования КГП. Увеличенный по сравнению со столкновениями  $p + p$  ( $R_{AB} > 1$ ) выход протонов наблюдается только в центральных столкновениях  ${}^3\text{He} + \text{Au}$ . В периферийных столкновениях  ${}^3\text{He} + \text{Au}$  и столкновениях  $p + \text{Al}$   $R_{AB}$  протонов совпадают со значениями  $R_{AB}$  мезонов в пределах погрешностей.

На рис.2 представлены отношения выходов протонов к выходам  $\pi$ -мезонов в различных классах событий по центральности столкновений  $p + \text{Al}$  и  ${}^3\text{He} + \text{Au}$ . Зависимость отношений выходов протонов к выхо-

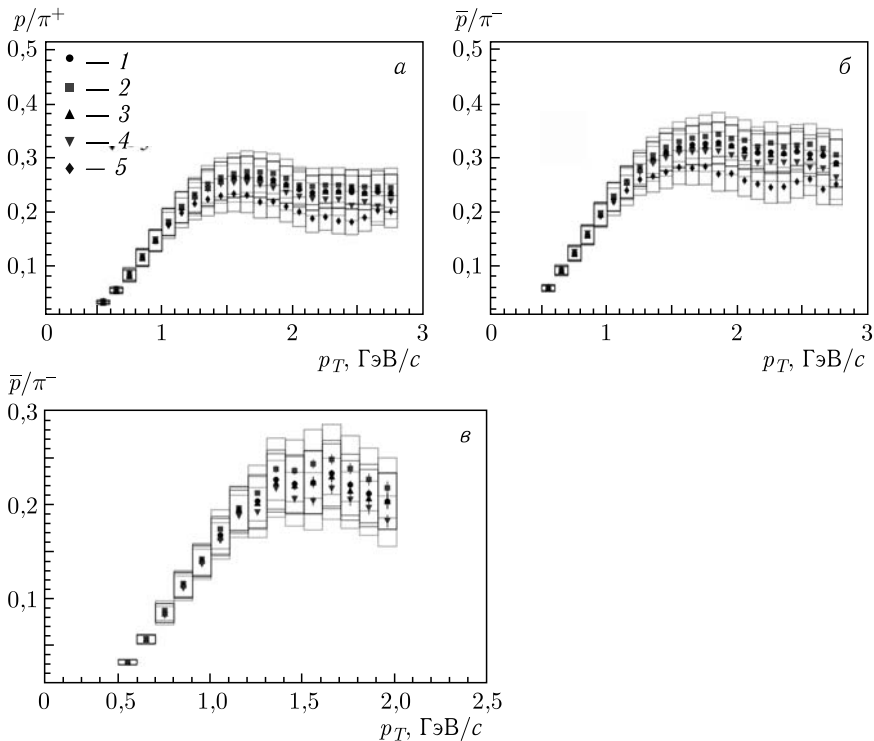


Рис. 2. Сравнение величин отношений выходов  $p/\pi^+$  в столкновениях  $^3\text{He} + \text{Au}$  (а),  $\bar{p}/\pi^-$  в столкновениях  $^3\text{He} + \text{Au}$  (б),  $\bar{p}/\pi^-$  в столкновениях  $p + \text{Al}$  (в) в центральностях: 1 – 0–88%; 2 – 0–20%; 3 – 20–40%; 4 – 40–60%; 5 – 60–88% при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ

дам  $\pi$ -мезонов от центральности, ярко выраженная в тяжелых системах столкновений [3, 7], в столкновениях  $p + \text{Al}$  и  $^3\text{He} + \text{Au}$  не наблюдается.

На рис.3 представлено сравнение значений  $R_{AB}$ , измеренных для  $\pi^\pm$ ,  $K^\pm$ -мезонов и  $\bar{p}$  в  $p + \text{Al}$ -столкновениях, и значений  $R_{AB}$ , измеренных для  $\pi^\pm$ ,  $K^\pm$ -мезонов и  $(p + \bar{p})/2$  в  $d + \text{Au}$ - и  $^3\text{He} + \text{Au}$ -столкновениях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ. Значения  $R_{AB}$ , измеренные для  $\pi^\pm$ ,  $K^\pm$ -мезонов, совпадают в пределах погрешностей во всех системах столкновений. Значения  $R_{AB}$ , измеренные для  $(p + \bar{p})/2$  в  $p + \text{Al}$ -столкновениях, близки к единице и меньше значений  $R_{AB}$ , измеренных для  $(p + \bar{p})/2$  в  $^3\text{He} + \text{Au}$ - и  $d + \text{Au}$ -столкновениях. Также важно отметить, что зависимость значений  $R_{AB}$  от  $p_T$ , измеренных для  $\pi^\pm$ ,  $K^\pm$ -мезонов в столкновениях  $p + \text{Al}$ , имеет меньший наклон, чем наклон зависимостей значений  $R_{AB}$  от  $p_T$ , измеренных для  $\pi^\pm$ ,  $K^\pm$ -мезонов в столкновениях  $d + \text{Au}$  и  $^3\text{He} + \text{Au}$ . Данные измерения

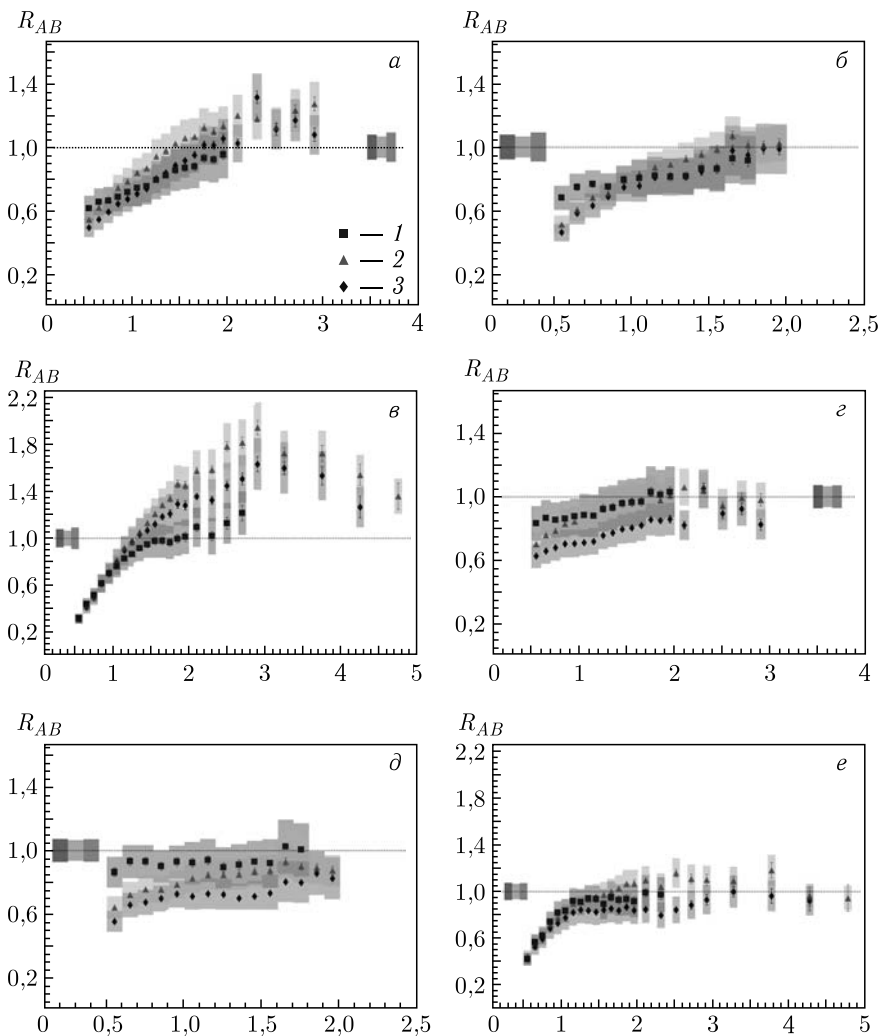


Рис. 3. Сравнение значений  $R_{AB}$ , измеренных для  $\pi^{\pm}$ - (а),  $K^{\pm}$ -мезонов (б) и  $(p + \bar{p})/2$  (в) в центральных столкновениях: 1 –  $p + \text{Al}$ ; 2 –  $d + \text{Au}$ ; 3 –  ${}^3\text{He} + \text{Au}$ , и значений  $R_{AB}$ , измеренных для  $\pi^{\pm}$ - (г),  $K^{\pm}$ -мезонов (д) и  $(p + \bar{p})/2$  (е) в периферийных столкновениях: 1 –  $p + \text{Al}$ ; 2 –  $d + \text{Au}$  и 3 –  ${}^3\text{He} + \text{Au}$

могут свидетельствовать о том, что механизм образования  $\pi^{\pm}$ ,  $K^{\pm}$  и  $\bar{p}$  в столкновениях  $p + \text{Al}$  отличается от механизма образования данных частиц в столкновениях  $d + \text{Au}$  и  ${}^3\text{He} + \text{Au}$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены факторы ядерной модификации легких адронов в столкновениях  $p + \text{Al}$  и  ${}^3\text{He} + \text{Au}$  при энергии 200 ГэВ, полученные в эксперименте PHENIX в диапазоне малых быстрот ( $|y| < 0,35$ ). Также представлено сравнение отношений  $p/\pi$  в различных центральностях столкновений  $p + \text{Al}$  и  ${}^3\text{He} + \text{Au}$ .

Сравнение факторов ядерной модификации легких адронов в столкновениях  $p + \text{Al}$  и  ${}^3\text{He} + \text{Au}$  показало, что эффект увеличенного выхода странности в данных системах не наблюдается, а увеличенный выход протонов наблюдается только в столкновениях  ${}^3\text{He} + \text{Au}$ . Анализ значений отношений  $p/\pi$  не выявил зависимости от центральности, наблюдаемой в тяжелых системах столкновений и свидетельствующей об образовании КГП [7, 8].

Значения факторов ядерной модификации, измеренные для  $\pi^\pm$ ,  $K^\pm$ ,  $\bar{p}$ , совпадают в пределах погрешностей в столкновениях  $d + \text{Au}$ ,  ${}^3\text{He} + \text{Au}$ . Однако зависимость  $R_{AB}(p_T)$ , измеренная для  $\pi^\pm$ ,  $K^\pm$ ,  $\bar{p}$  в столкновениях  $p + \text{Al}$ , носит другой характер, более близкий к характеру зависимости  $R_{AB}(p_T)$ , измеренной в столкновениях  $p + p$ .

Полученные результаты позволяют сделать предположение о том, что в столкновениях  $p + \text{Al}$  при энергии 200 ГэВ механизм образования легких адронов отличается от механизма образования легких адронов в  $d + \text{Au}$ ,  ${}^3\text{He} + \text{Au}$ . Данный факт может означать, что условия для образования КГП в столкновениях  $p + \text{Al}$  при энергии 200 ГэВ могут не выполняться.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шматов С. В. Начальные условия эволюции неравновесной кварк-глюонной плазмы. Препринт ОИЯИ Р2-2002-180. Дубна, 2002.
2. Adox 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.
3. 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.
4. Bierlich C., Gustafson G., Shah H. The Angantyr Model for Heavy-Ion Collisions in PYTHIA8 // JHEP. 2018. V. 2018, No. 10. P. 1–56.
5. Adare A. et al. (PHENIX Collab.). Identified Charged Hadron Production in  $p + p$  Collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  and 62.4 GeV // Nucl. Phys. C. 2011. V. 83, No. 6. P. 1–32.
6. Aidala C. et al. (PHENIX Collab.). Creation of Quark–Gluon Plasma Droplets with Three Distinct Geometries // Nature Phys. V. 15, No. 3. P. 214–220.
7. Adox K. et al. (PHENIX Collab.). PHENIX Detector Overview // Nucl. Instr. Meth. A. 2005. V. 499. P. 469.

8. *Chujo T. (PHENIX Collab.)*. Results on Identified Hadrons from the PHENIX Experiment at RHIC // Nucl. Phys. A. 2003. V. 715. P. 151–160.
9. *Fries R., Greco V., Sorensen P.* Coalescence Models for Hadron Formation from Quark–Gluon Plasma // Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 2008. V. 58. P. 177–205.
10. *Mitrakov I.* Phi Meson Measurements in Cu + Au Collisions at 200 GeV and in U + U Collisions at 192 GeV // Proc. Sci. 2018. V. 345. No. 1. P. 0108.
11. *Бердников А.Я., Бердников Я.А., Котов Д.О., Ларионова Д.М., Ларионова М.М., Митранков Ю.М.* Измерения фи-мезона в  $p + Au$ - и  $He + Au$ -столкновениях при энергии 200 ГэВ // Изв. РАН. Сер. физ. 2020. Т. 84, № 12. С. 1796.