

Несколько лет назад был подписан меморандум о взаимопонимании между ОИЯИ и Европейским центром теоретических исследований в области ядерной физики и смежных областях (ЕСТ\*, Италия). ЕСТ\* обеспечивает целенаправленную и структурированную научную деятельность в мировом научном сообществе. Это способствует координации усилий в области ядерной и адронной физики, а также в смежных областях. В соответствии с меморандумом две научные организации будут искать дальнейшие пути сотрудничества в области научных исследований.

В 2019 г. Ученый совет ЕСТ\* совместно с действующим в то время директором центра профессором Й. Вамбахом приняли решение провести международное рабочее совещание по этой важной и актуальной тематике под названием «Теоретические и экспериментальные перспективы в физике ароматных адронов, кваркония и мультикварков». Был утвержден международный оргкомитет. Чтобы познакомить широкую аудиторию с тематикой предстоящих совещаний, ЕСТ\* предложил серию презентаций в стиле коллоквиумов. Записанная презентация, связанная с тематикой совещания, доступна по ссылке <https://youtu.be/XweiOIq6vIA>.

### Список литературы / References

1. Brambilla N., Eidelman S., Olsen S., Pakhlov P. // Eur. Phys. J. C. 2011. V.71. P. 1534.
2. Barabanov M. Yu., Vodopyanov A. S., Olsen S. L. // Phys. At. Nucl. 2014. V.77, No. 1. P. 126.
3. Olsen S. // Front. Phys. 2015. V. 10. P. 101401.
4. Patrignani C. et al. // Chin. Phys. C. 2017. V.40. P. 100001.
5. Barabanov M. Yu., Vodopyanov A. S., Zinchenko A. I. // Nuovo Cim. C. 2019. V.42. P. 110.
6. Barabanov M., Roberts C., Santopinto E. // Prog. Part. Nucl. Phys. 2021. V. 116. P. 103835.
7. Takeuchi S., Shimizu K., Takizawa M. // Prog. Theor. Exp. Phys. 2015. V. 2015, No. 7. P.079203.
8. Esposito A., Pilloni A., Polosa A. D. arXiv: 1603.07667 [hep-ph].

*Б. В. Батюня, А. С. Водопьянов*

## Эксперимент ALICE: статус и перспективы

ALICE (A Large Ion Collider Experiment) является многоцелевым экспериментом для исследования взаимодействий тяжелых ионов. Детектор ALICE был создан для изучения физики сильновзаимодействующей материи, кварк-глюонной плазмы (КГП) в ядро-ядерных столкновениях на ускорителе LHC в ЦЕРН. В настоящее время в этом эксперименте участвуют более 1800 специалистов из 174 институтов 42 стран. Главные усилия группы ОИЯИ в анализе данных и в физическом моделировании были сконцентрированы на изучении фемтоскопических корреляций, исследовании рождения тяжелых кваркониев и образования векторных мезонов в ультрапериферических Pb–Pb-столкновениях.

Как уже отмечалось, изучение столкновений релятивистских тяжелых ионов (вплоть до ионов свинца) является главным направлением исследований ALICE. Еще в начале 1980-х гг. было высказано предположение [1], что экстремально высокие плотности энергии, достигаемые в столкновениях тяжелых ядер (A–A), могут приводить к образованию кварк-глюонной плаз-

*B. V. Batiunya, A. S. Vodopyanov*

## ALICE Experiment: Status and Prospects

ALICE (A Large Ion Collider Experiment) is a multipurpose experiment for studying the interactions of heavy ions. The detector was designed to study the physics of the strongly interacting matter, the quark–gluon plasma (QGP) in nucleus–nucleus collisions at CERN LHC. More than 1 800 specialists from 174 institutes of 42 countries are currently participating in this experiment. The main efforts of the JINR group in data analysis and physical simulation were focused on the study of femtoscopic correlations, the study of the production of heavy quarkonia and the production of light vector mesons in ultraperipheral Pb–Pb collisions.

As already mentioned, the main focus of ALICE studies is the collisions of relativistic heavy ions (up to lead ions). In the early 80s of the last century, it was assumed that extremely high energy densities achieved in collisions of heavy nuclei (A–A) can result in the formation of quark–gluon plasma, a state characterized by

мы — состоянию материи, в котором кварки, будучи связанными в обычном веществе в более сложные частицы, освобождаются и двигаются свободно по всему объему (quark deconfinement). Согласно теоретическим представлениям [2] одним из основных проявлений КГП было подавление выхода ( $R_{AA}$ ) тяжелых кваркониев в столкновениях тяжелых ядер по сравнению с взаимодействием пучков протонов, что действительно наблюдалось для выхода  $J/\psi$  в Pb–Pb-столкновениях в эксперименте NA50 [3].

При этом предполагалось [4], что достижение полного состояния КГП может произойти при более плотной энергии столкновений с увеличением энергии ускорителей, что должно привести к усилению подавления выхода кваркониев. Однако результаты экспериментов на ускорителе RHIC (США) не подтвердили такое усиление [5], что вызвало большой интерес к исследованиям на ускорителе LHC с повышением энергии в 10–20 раз. На рис. 1 приведены величины  $R_{AA}$  в зависимости от числа нуклонов-участников ( $N_{part}$ ) в столкновениях ядер для  $J/\psi$ -частиц, полученные в экспериментах ALICE [6] и PHENIX [5]. Видно, что величина  $R_{AA}$  при энергии LHC заметно уменьшилась, особенно для больших  $N_{part}$ , т.е. для более центральных столкновений ядер. Такое уменьшение величины  $R_{AA}$

было объяснено теоретически [7] усилением механизма регенерации тяжелых кваркониев в КГП при энергиях LHC из-за обильного рождения тяжелых кварков. Величины  $R_{AA}$  были также измерены в эксперименте ALICE для более тяжелых состояний  $\Upsilon(1S)$  [8]. В рамках гидродинамических моделей возникающая в  $A$ – $A$ -столкновениях сжатая сильновзаимодействующая система подвергается продольному и поперечному расширению, определяющему размеры источника излучения наблюдаемых частиц.

Экспериментально пространственные и временные размеры таких источников могут быть изме-

Рис. 1. Подавление выхода  $J/\psi$ -частиц в  $A$ – $A$ -столкновениях в зависимости от числа нуклонов-участников

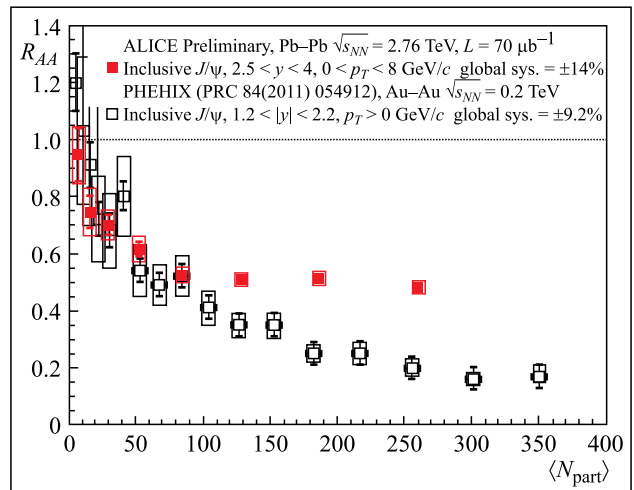


Fig. 1. Suppression values of  $J/\psi$  particle yield in  $A$ – $A$  collisions versus a number of nucleons-participants

partonic degrees of freedom [1]. According to theoretical predictions [2], one of the main signatures of such matter was the suppression of the production of heavy quarkonia ( $R_{AA}$ ) in heavy nuclei collisions compared to the  $pp$  interactions that was actually observed for  $J/\psi$  suppression in Pb–Pb collisions in the NA50 experiment [3]. It was also supposed [4] that the full QGP stage may occur at higher collision energy density with increase of an energy of the accelerator, that must lead to an enhancement of the quarkonia suppression. However, the results at the RHIC accelerator (USA) have not conformed to such an enhancement [5], that excited high interest to the investigation at the LHC with 10–20 times increase of energy. Figure 1 shows the  $R_{AA}$  values depending on the number of nucleons-participants ( $N_{part}$ ) in the nuclear collisions for  $J/\psi$  particles obtained in the ALICE [6] and PHENIX [5] experiments. One can see that the  $R_{AA}$  values at the LHC energy significantly decreased, especially at large  $N_{part}$ , i.e., for more central collisions of nuclei.

Such a decrease in the  $R_{AA}$  values was explained theoretically [7] by a strengthening of the regeneration mechanism of heavy quarkonia in QGP at the LHC energy due to the abundant production of heavy quarks. The  $R_{AA}$  values

were also measured in the ALICE experiment for more heavy states  $\Upsilon(1S)$  [8]. In frames of hydrodynamic models the highly compressed strongly-interacting system in  $A$ – $A$  collisions is expected to undergo longitudinal and transverse expansions, defining a size of the particle emitting source. Experimentally, such an expansion can manifest itself through the Bose–Einstein correlations (femtoscopic) [9] for pairs of identical particles or through the correlations of non-identical particle pairs due to strong interactions in the final state [10]. An important characteristic is the fall-down character of the radius behavior with increase of a transverse momentum conditioned in the model by parton and particle collective flows at the stages of QGP and hadronization in the  $A$ – $A$  collisions. The same behavior of radii has been observed in the ALICE experiment for pairs of different types [11]. A possible manifestation of the collective effects at a production of the small systems in  $pp$  and  $p$ – $Pb$  collisions is actively discussed in virtue of such observations as the “ridge” effect (CMS, LHC) [12]

рены через корреляции (фемтоскопические) Бозе–Эйнштейна [9] для пар тождественных частиц или через корреляции пар нетождественных частиц за счет взаимодействий в конечном состоянии [10]. Важной характеристикой таких измерений является спадающий характер поведения радиусов с ростом поперечного импульса пары частиц, обусловленный в модели коллективными потоками партонов и частиц на стадии КПП и адронизации при  $A$ – $A$ -столкновениях. Подобное поведение радиусов наблюдается в ALICE для пар частиц различных типов [11].

В последние годы активно обсуждается возможное проявление коллективных эффектов при образовании малых систем в  $p$ – $p$ - и  $p$ –Pb-столкновениях на основании таких наблюдений, как «ridge» эффект (CMS, LHC) [12], и увеличение выхода странных частиц с ростом множественности событий (ALICE) [13]. На рис. 2 приведены новые результаты, полученные группой ОИЯИ и показанные на конференции [14] для среднего радиуса источника  $R_{inv}^G$  в зависимости от поперечной массы пар частиц  $m_T = \sqrt{k_T^2 + m^2}$ , где  $k_T$  — поперечный импульс пары и  $m$  — масса частицы. Здесь пары пионов и каонов рассматривались от-

дельно для событий с наличием (сферисити  $S_T < 0,3$ ) и без наличия ( $S_T > 0,7$ ) струй. Видно, что спадающий характер зависимостей радиусов источника от  $m_T$  наблюдается в обоих случаях, в том числе и в событиях без образования струй, что может означать некоторое проявление коллективных гидродинамических механизмов. Эти предварительные результаты требуют дальнейшей проверки на увеличенной статистике в  $p$ – $p$ - и  $p$ –Pb-столкновениях.

В настоящее время ускорительный комплекс в ЦЕРН остановлен для подготовки перевода LHC к работе с высокой светимостью (Run 3, HL-LHC), начало которой запланировано на первую половину 2022 г. На всех установках LHC проводится модернизация различных детекторов. На установке ALICE наиболее серьезные изменения будут сделаны для внутренней трековой системы с кремниевыми детекторами и для внешней трековой времяпроекционной камеры. Планируется провести новые исследования по многим темам и проверить часть уже полученных результатов на увеличенной статистике.

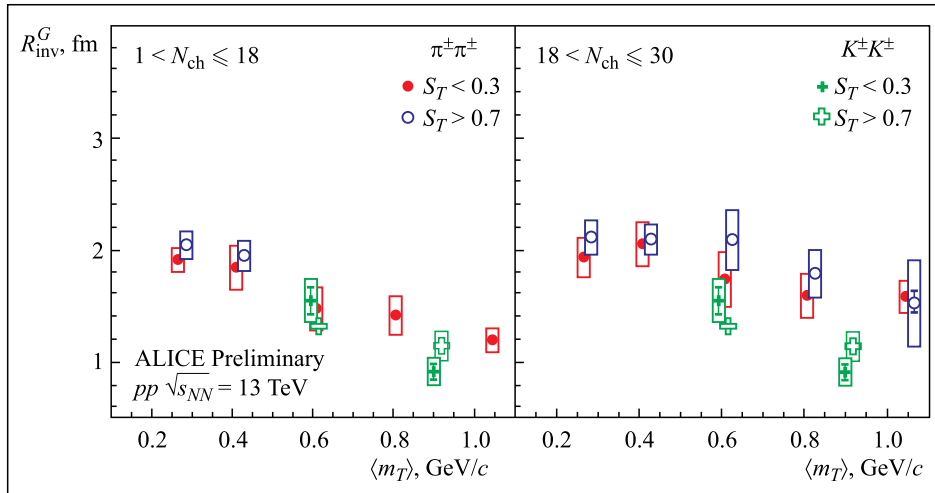


Рис. 2. Зависимость радиусов источников излучения  $R_{inv}^G$  пионов и каонов от  $m_T$  для событий с наличием ( $S_T < 0,3$ ) и без наличия ( $S_T > 0,7$ ) струй

Fig. 2. The radii of emitting source of pions and kaons  $R_{inv}^G$  versus  $m_T$  for the events with ( $S_T < 0.3$ ) and without ( $S_T > 0.7$ ) jet selection

and the enhancement of going out of strange particles with a rise of the event multiplicity (ALICE) [13]. Figure 2 shows the new results of the JINR group [14] for the mean source radius  $R_{inv}^G$  versus transverse momentum of the pair of particles  $m_T = \sqrt{k_T^2 + m^2}$ , where  $k_T$  is transverse momentum of the pair and  $m$  is the mass of the particle. The pion and kaon pairs were considered here separately for events with (sphericity  $S_T < 0.3$ ) and without ( $S_T > 0.7$ ) jet selection. It is seen that the descending character of the dependence of radii on  $m_T$  is observed in both cases, i.e., including the events without jet productions that may be a manifestation of collective hydrodynamic mechanisms.

These preliminary results require further verification with the higher statistics in  $pp$  and  $p$ –Pb interactions.

The operation of the CERN accelerator system has been stopped to prepare the LHC for operation with high luminosity (Run 3, HL-LHC), which is scheduled to start in the first half of 2022. Various detectors of all the LHC facilities are being upgraded now. The most serious changes at the ALICE facility will be made to the Inner Tracking System with silicon detectors and to the external tracking Time Projection Chamber. It is planned to conduct new research on many topics and check some of the already obtained results at higher statistics.

## Список литературы / References

1. *Shuryak E. V.* Quantum Chromodynamics and the Theory of Superdense Matter // *Phys. Rep.* 1980. V.61. P.71–158.
2. *Nardi M., Zatz H.* String Clustering and  $J/\psi$  Suppression in Nuclear Collisions // *Phys. Lett. B.* 1988. V.442. P.14–29.
3. *Abreu M. C. et al. (NA50 Collab.).* Anomalous  $J/\psi$  Suppression in Pb–Pb Interactions at 158 GeV/c per Nucleon // *Phys. Lett. B.* 1997. V.410. P.337–343.
4. *Digal S. et al.* Parton Percolation and  $J/\psi$  Suppression // *Phys. Lett. B.* 2002. V.549. P.101–108.
5. *Adare A. et al. (PHENIX Collab.).*  $J/\psi$  Production vs Centrality, Transverse Momentum, and Rapidity in Au+Au Collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV // *Phys. Rev. Lett.* 2007. V.98. P.232301.
6. *Abelev B. et al. (ALICE Collab.).*  $J/\psi$  Suppression at Forward Rapidity in Pb–Pb Collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV // *Phys. Rev. Lett.* 2012. V.109. P.072301.
7. *Zhao X., Rapp R.* Medium Modifications and Production of Charmonia at LHC // *Nucl. Phys. A.* 2011. V.859. P.114–125.
8. *Abelev B. et al. (ALICE Collab.).* Suppression of  $\Upsilon(1S)$  at Forward Rapidity in Pb–Pb Collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV // *Phys. Lett. B.* 2014. V.738. P.361–372.
9. *Kopylov G., Podgoretsky M.* Correlation of Identical Particles Emitted by Highly Excited Nuclei // *Sov. J. Nucl. Phys.* 1972. V.15. P.219–223.
10. *Lednicky R., Lyuboshits V.* Final State Interaction Effect on Pairing Correlations between Particles with Small Relative Momenta // *Sov. J. Nucl. Phys.* 1982. V.35. P.770.
11. *Adam J. et al. (ALICE Collab.).* One-Dimensional Pion, Kaon and Proton Femtoscopy in Pb–Pb Collisions at  $(s_{NN})^{0.5} = 2.76$  TeV // *Phys. Rev. C.* 2017. V.98, No. 6. P.064613.
12. *Khachatryan V. et al. (CMS Collab.).* Observation of Long-Range Near-Side Angular Correlations in Proton–Proton Collisions at the LHC // *JHEP.* 2010. V.09. P.091.
13. *Adam J. et al. (ALICE Collab.).* Enhanced Production of Multi-Strange Hadrons in High Multiplicity Proton–Proton Collisions // *Nat. Phys.* 2017. V.13. P.535–539.
14. *Malinina L. (on behalf of the ALICE Collab.).* Femtoscopic Correlations of Identical Charged Particles in  $pp$  Collisions at LHC Energies with Event-Shape Selection // *Proc. of the 5th Intern. Conf. on Particle Physics and Astrophysics (ICPPA-2020), Moscow, Russia, 5–9 Oct., 2020.*