

*Р. Ледницки, Ю. А. Панебратцев, М. В. Токарев*

## STAR: результаты и перспективы

В 1993 г. в ОИЯИ было принято решение об участии в эксперименте STAR (Solenoidal Tracker at RHIC) на коллайдере релятивистских ядер и поляризованных протонов RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider) в BNL (США). Это решение связано с расширением физической программы исследований, проводимой на дубненском синхрофазотроне, по изучению релятивистских адрон-ядерных, ядро-ядерных взаимодействий и процессов с поляризованными дейтронами. Коллайдер RHIC позволял перейти в новую, ранее неизведанную область энергий и исследовать ядерную материю в экстремальных условиях, например, при температурах, в миллионы раз превышающих температуры на поверхности Солнца, или магнитных полях порядка  $10^{17}$  Гс. Цель исследований — установить экспериментально закономерности перехода кварков и глюонов в протоны и нейтроны, особенности возникновения ядерных сил, фазовую диаграмму ядерной материи. Такая информация необходима для понимания теории сильных взаимодействий — квантовой хромодинамики (КХД) — в непертурбативной области.

Исследования с поляризованными протонами нацелены на прямое измерение спин-зависимой глюонной функции распределения и определение вклада глюонов в спин протона. Квантовое число спин связано с существованием фундаментальных симметрий, поэтому изучение по-

*R. Lednický, Yu. Panebratsev, M. Tokarev*

## STAR: Results and Future

In 1993, JINR made a decision on participation in the STAR experiment (Solenoidal Tracker At RHIC) at the Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) at the Brookhaven National Laboratory. This decision was connected with extension of the physical research program performed at the Dubna Synchrophasotron to study relativistic hadron–nucleus, nucleus–nucleus interactions and processes with polarized deuterons. The RHIC collider has opened a new possibility to switch to unexplored energy region and study the nuclear matter in extreme conditions — at the temperatures million times higher than temperatures on the Sun surface or in the magnetic fields of about  $10^{17}$  G. The goal of experimental investigations is to search for and study regularities of transition of quarks and gluons into protons and neutrons. Such information is necessary for understanding of the theory of the strong interaction — Quantum Chromodynamics (QCD) — in nonperturbative region.

The experiments with polarized protons were aimed at the direct measurement of the spin-dependent gluon distribution function, determination of the gluon contribution to the proton spin and the solution of the “spin crisis” problem. Spin is a quantum number characterizing the fundamental property

ляризации кварков, глюонов и кварк-антикваркового моря протона — одна из главных задач современной физики частиц. В ОИЯИ были заложены и продолжают развиваться традиции в области экспериментальных и теоретических исследований по спиновой физике. Поэтому основной вклад ОИЯИ в проект STAR — участие в создании детекторов для исследования поляризационных явлений — центрального и торцевого электромагнитных калориметров.

Первый сеанс набора статистики на установке STAR для Au+Au столкновений состоялся в 2000 г. После пяти лет работы были сформулированы основные результаты первого этапа исследований на RHIC при максимальной энергии столкновений ядер золота  $\sqrt{s} = 200$  ГэВ. Это эффект гашения струй, подавление выходов частиц в области больших поперечных импульсов, существование коллективных потоков ядерной материи, кварковый скейлинг для эллиптического потока и др. На основе полученных результатов был сформулирован важный вывод об образовании в ядро-ядерных столкновениях сильно взаимодействующей материи, похожей по своим свойствам на жидкость с очень маленькой вязкостью, состоящую из кварков и глюонов. Этот вывод кардинально изменил ранее существующее представление о кварк-глюонной плаз-

ме как об идеальном газе, образованном свободными кварками и глюонами. В дальнейшем эти результаты, впервые полученные на RHIC, были подтверждены при гораздо более высоких энергиях на коллайдере LHC.

Новое состояние вещества, образующееся в столкновениях тяжелых ионов на RHIC, продолжают изучать в экспериментах с тяжелыми кварками. Считается, что адроны, состоящие из тяжелых  $c$ -,  $b$ -кварков, являются хорошими зондами эволюции плотной горячей среды. Для изучения свойств ядерной материи  $D^0$ -,  $J/\psi$ - и  $Y$ -мезонами, в состав которых входят  $c$ - и  $b$ -кварки, для установки STAR были созданы новые детекторные подсистемы: прецизионный вершинный детектор (Heavy Flavor Tracker) и система детекторов для регистрации мюонов (Muon Telescope Detector). Эти системы использовались в сеансах 2014–2016 гг. для набора статистики. Проведенный анализ данных показал, что как для тяжелых, так и для легких кварков существует эффект подавления. В настоящее время набрана статистика и идет обработка данных с целью изучения эффектов подавления и коллективных потоков в событиях с рождением открытых ароматов — charm ( $c$ ) и beauty ( $b$ ) ( $D_s, \Lambda_c, B, \dots$ ) и кваркониев ( $J/\psi, Y$ ). Трехмерный корреляционный анализ, при-

of every particle. It is connected with physics symmetries. Therefore, the study of polarization of quarks, gluons and sea quarks in the proton is one of the main problems of modern particle physics. JINR maintains and develops the tradition of the experimental and theoretical researches in relativistic nuclear physics and spin physics. Therefore, the main contribution of JINR to the STAR project was the participation in the creation of the detectors — the Central Barrel and End-Cap electromagnetic calorimeters, for the study of the polarization phenomena.

The first run of data taking for Au + Au collisions at  $\sqrt{s} = 200$  GeV at STAR was performed in 2000. After five years of work at maximum RHIC energy, main results were formulated: jet quenching, suppression of hadron yields at high transverse momentum, observation of collective flow of nuclear matter, constituent quark number scaling for elliptic flow, etc. Based on the obtained results, the important conclusion on creation of the strongly interacting matter in the central nucleus–nucleus collisions has been formulated: the produced matter is similar to perfect liquid and not ideal gas of quarks and gluons. In future the many results observed at RHIC were confirmed at higher energy at the LHC.

A new state of matter created in the heavy-ion collisions is studied in the experiments with heavy quarks. It is considered that hadrons consisting of  $c$ ,  $b$  quarks are good probes of the dynamical evolution of highly dense and hot medium. To study the properties of nuclear matter by  $D^0$ ,  $J/\psi$  and  $Y$  mesons, which contain  $c$  and  $b$  quarks, the new STAR detector subsystems — the precision vertex detector (Heavy Flavor Tracker) and the detector system registration of muons (Muon Telescope Detector) — have been installed. These subsystems were used in 2014–2016 runs for data taking. The performed data analysis has shown that the suppression effect is observed for both heavy and light quarks. At present a large statistics has been taken. The data processing is going on and the effects of suppression and collective flows in the events with open flavor ( $D_s, \Lambda_c, B, \dots$ ) and quarkonia ( $J/\psi, Y$ ) production are studied. The method of three-dimension correlation analysis [1] applied for the study of low-transverse-momentum like-sign kaon pairs will also be used for a search for significant non-Gaussian features in the heavy flavor source function.

The double longitudinal asymmetry  $A_{LL}$  of the meson and jet production in collisions of polarized protons at the

мененный в [1] для изучения пар заряженных каонов, будет также использован для поиска значительных негауссовых особенностей в функциях источников тяжелых ароматов.

В экспериментах на пучках продольно-поляризованных протонов с энергией столкновения  $\sqrt{s} = 200$  ГэВ были измерены двухспиновые асимметрии  $A_{LL}$  рождения пионов и струй. Они использовались для извлечения спинзависимой глюонной функции распределения и дали убедительное доказательство о положительном знаке интегрального вклада глюонов  $\Delta G$  в спин протона. В экспериментах с поперечно-поляризованными протонами установлен рост односпиновой асимметрии  $A_N$  рождения пионов с увеличением поперечного импульса. Первые измерения односпиновой продольной асимметрии  $A_L$  рождения  $W^\pm$ -бозонов при энергии  $\sqrt{s} = 510$  ГэВ позволили извлечь спинзависимые функции распределения морских  $u$ - и  $d$ -кварков  $\Delta\bar{u}$ ,  $\Delta\bar{d}$  [2].

В 2017 г. запланирован очередной сеанс с поперечно-поляризованными протонами при максималь-

ной энергии  $\sqrt{s} = 510$  ГэВ с набором статистики, соответствующей интегральной светимости  $L \approx 360$  пб $^{-1}$ . Цель измерений — проверить одно из предсказаний КХД — изменение знака функции Сиверса — и изучить поперечные односпиновые асимметрии в рождении  $W^\pm$ ,  $Z$ -бозонов, прямых фотонов и дрелл-яновских пар.

При активном участии физиков ОИЯИ совместно с коллегами из Чехии, Словакии и России методами корреляционной фемтоскопии были получены новые и чрезвычайно интересные физические результаты:  $\Lambda\Lambda$ -корреляции в столкновениях ядер золота при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ (рис. 1) [3]. STAR рассматривается как уникальная фабрика для исследования гиперон-гиперонных взаимодействий. Они используются для описания различных барион-барионных взаимодействий и изучения уравнения состояния материи, образующейся в нейтронных звездах. Особенности  $\Lambda\Lambda$ -взаимодействий связаны с существованием  $H$ -дибариона — одной из экзотических частиц, которую интенсивно ищут в ядерных столкновениях.

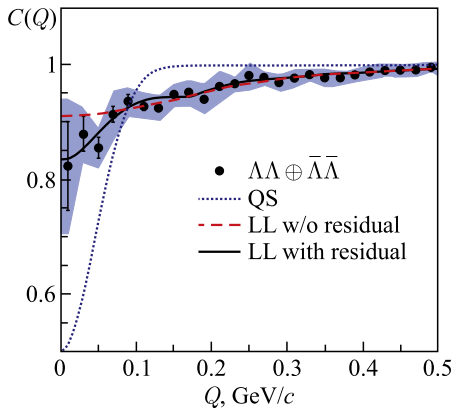


Рис. 1. Корреляционная функция образования  $\Lambda\Lambda$  и  $\bar{\Lambda}\bar{\Lambda}$  в Au+Au столкновениях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ и центральности 0–80%. Сплошная и штриховая линии — расчеты с и без остаточного корреляционного вклада в аналитической модели Ледницкого–Любошица; пунктирная линия — расчет в рамках статистики Ферми с источником. Заштрихованная область показывает величину систематических ошибок [3]

Fig. 1. The combined  $\Lambda\Lambda$  and  $\bar{\Lambda}\bar{\Lambda}$  correlation function for 0–80% centrality Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV. The solid and dashed curves correspond to fits using the Lednický–Lyuboshitz analytical model with and without a residual correlation term. The dotted line corresponds to Fermi statistics with a source size of 3.13 fm. The shaded band corresponds to the systematic errors [3]

energy  $\sqrt{s} = 200$  GeV has been measured. The asymmetry was used to extract the spin-dependent gluon distribution. Compelling evidence of positive sign of the integral gluon contribution  $\Delta G$  in the proton spin was obtained. The growth of the single spin asymmetry  $A_N$  of pion production in experiments with transversely polarized protons was found. The first measurements of the single longitudinal asymmetry  $A_L$  of  $W^\pm$ -boson production in proton–proton collisions at energy  $\sqrt{s} = 510$  GeV allow us to extract spin-dependent distribution of sea  $u$  and  $d$  quarks ( $\Delta\bar{u}$ ,  $\Delta\bar{d}$ ) [2].

The next run for data taken with transversely polarized protons at maximum energy  $\sqrt{s} = 510$  GeV corresponding to integral luminosity  $L \sim 360$  пб $^{-1}$  was planned for 2017. The aim is to verify one of the QCD predictions — the change of the Sivers function sign and to measure the transverse single spin asymmetry of  $W^\pm$ ,  $Z^\pm$  bosons, direct photons and Drell–Yan pairs production.

New and extremely interesting physical results were obtained with the active participation of JINR physicists in collaboration with colleagues from the Czech Republic, Slovakia and Russia, using the methods of correlation femtосcopy: first high statistics measurement of  $\Lambda\Lambda$  correlation function in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV (Fig. 1) [3]. This research pioneered the venue of using RHIC as a hyperon factory to investigate hyperon–hyperon interactions. The STAR measurement can provide precious data for the understanding of hyperon–hyperon interaction which is an important input to various baryon–baryon interaction potential models as well as for the study of equation of state for neutron stars. The  $\Lambda\Lambda$  interaction is also closely related to the existence of the  $H$  dibaryon, one of the most searched for exotic hadrons in nuclear collisions.

One of the primary goals of Nuclear Physics is to understand the nature of the force between nucleons, which

Одна из основных задач ядерной физики — выяснить природу сил между нуклонами. Это является необходимым шагом в изучении структуры ядер и их взаимодействий. Хотя антиядра, вплоть до антигелия-4, экспериментально открыты, очень немного известно о взаимодействиях между антинуклонами. Статистика, набранная STAR для взаимодействий ядер золота при энергии 200 ГэВ, позволила изучить парные корреляции между антипротонами, которые в огромном количестве рождаются в таких столкновениях [4]. Установлено, что между антипротонами действуют силы притяжения, и определены два ключевых параметра, характеризующих сильное взаимодействие, — длина рассеяния ( $f_0$ ) и эффективный радиус ( $d_0$ ). Продемонстрирована уникальная возможность корреляционной методики для измерения пара-

метров сильного взаимодействия, получение которых практически невозможно другими методами. Данная информация о взаимодействиях двух антипротонов является важнейшей составляющей для более глубокого понимания структуры антиядер и их свойств.

Поиск новых симметрий и скейлинговых закономерностей во взаимодействиях адронов и ядер высоких энергий всегда был целью интенсивных исследований. Такие закономерности используются как экспериментальные свидетельства о новых физических явлениях и способствуют открытию новых принципов или симметрий. Скейлинговое поведение инклюзивных спектров рождения частиц, связанное с идеями самоподобия и фрактальности адронных взаимодействий на уровне конstituентов, проявляется в  $z$ -скейлинге [5]. На рис. 2 показана скейлинговая

Рис. 2. Зависимость скейлинговой функции  $\psi(z)$  (а) от параметра самоподобия  $z$  для соответствующих импульсных спектров (б) отрицательно заряженных частиц, образующихся в центральных Au+Au столкновениях при энергиях  $\sqrt{s_{NN}} = 7,7$ –200 ГэВ в области  $|\eta| < 0,5$  [6]

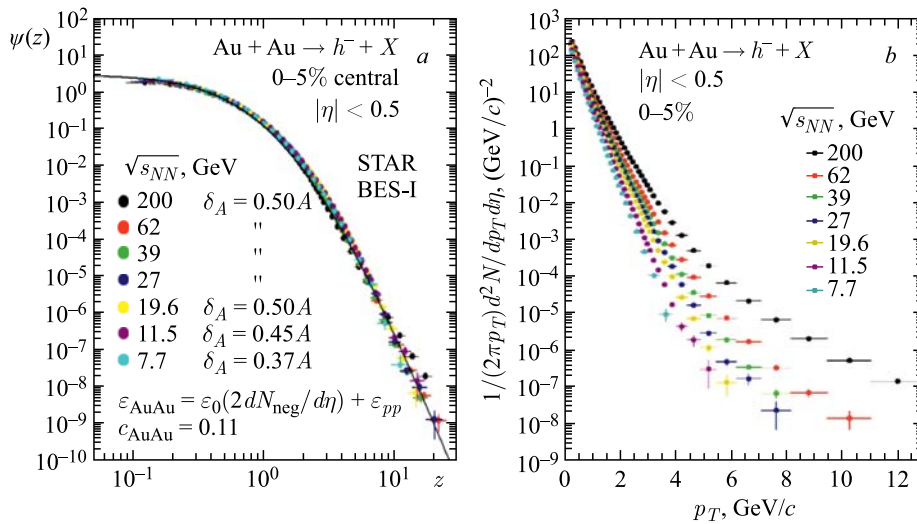


Fig. 2. The dependence of the scaling function  $\psi(z)$  (a) on the self-similarity parameter  $z$  for the corresponding momentum spectra (b) of negatively charged particles produced in the central Au + Au collisions at energy  $\sqrt{s_{NN}} = 7.7$ –200 GeV in the range  $|\eta| < 0.5$  [6]

is a necessary step for understanding the structure of nuclei and how nuclei interact with each other. Although antinuclei up to antihelium-4 have been discovered and their masses measured, little is known directly about the nuclear forces between antinucleons. Here we study antiproton pair correlations among data collected by the STAR experiment with gold ions at 200 GeV per nucleon. Antiprotons are abundantly produced at such collisions, thus making feasible to study details of the antiproton–antiproton interactions [4]. Studies of two antiproton correlation functions with data taken by the STAR experiment at RHIC show the attracting nuclear force between two antiprotons. The measurement of the two key parameters that characterize the corresponding strong interaction, namely, the

scattering length ( $f_0$ ) and effective range ( $d_0$ ), has been made. As a direct knowledge from the interaction between two antiprotons, the simplest system of antinucleons (nuclei), our result provides a fundamental ingredient for understanding the structure of more sophisticated antinuclei and their properties.

The search for new symmetries and scaling laws in interactions of hadrons and nuclei of high energy has always been a subject of intense research. These patterns are used as experimental evidence of new physical phenomena and lead to discovery of new principles or symmetries. Scaling features of inclusive spectra of produced particles connected with principles of self-similarity and fractality of hadron interactions at the constituent level



функция  $\psi(z)$ , соответствующая импульсным спектрам рождения отрицательно заряженных адронов в центральных Au+Au столкновениях на RHIC при энергиях  $\sqrt{s_{NN}} = 7,7\text{--}200$  ГэВ в области псевдобыстрот  $|\eta| < 0,5$  [6]. Полученная зависимость демонстрирует универсальность формы скейлинговой кривой и постоянство фрактальных размерностей ядер и механизма фрагментации при энергиях  $\sqrt{s_{NN}} > 19,6$  ГэВ. Предполагается, что скачкообразное поведение параметров модели («удельной теплоемкости» и фрактальных размерностей) является указанием на существование критических явлений в ядерной материи.

Огромная статистика, набранная в эксперименте STAR по ядро-ядерным столкновениям, позволяет изучать образование антиматерии — рождение ядер антигелия-4 [7] и странной антиматерии — рождение ядер антигипертрития  ${}^3\bar{\Lambda}\bar{H}$  [8]. Например, для обнаружения 18 ядер антигелия-4 было проанализировано свыше миллиарда центральных столкновений ядер золота при энергиях 200 и 62,4 ГэВ.

Большая светимость RHIC и высокая скорость системы сбора данных на установке STAR позволили набрать более 24 петабайт информации об Au+Au столкновениях. Ожидается, что к 2020 г. этот объем информации увеличится более чем в два раза. Он уже

не может быть обработан только в компьютерном центре BNL. Поэтому использование распределенных вычислительных центров различных институтов коллаборации STAR является одним из возможных решений этой проблемы. Лаборатория информационных технологий вывела ОИЯИ в число ведущих мировых центров по обработке данных с помощью системы GRID. Ресурсы Дубны уже используются для обработки данных коллаборации STAR. Первые результаты этой работы были представлены на 7-й Международной конференции «Распределенные вычисления и Grid-технологии в науке и образовании» (Дубна, июль 2016 г.).

На коллайдере RHIC в 2010, 2011 и 2014 гг. проведены измерения в широком диапазоне энергии столкновения ядер золота  $\sqrt{s_{NN}} = 62,4, 39, 27, 19,6, 14,5, 11,5$  и  $7,7$  ГэВ. В этой области энергий исследуется фазовая диаграмма ядерной материи в переменных температурно-барионного химического потенциала  $\{T, \mu_B\}$ . Ожидается, что при сканировании по энергии в этом диапазоне проявятся особенности фазового перехода первого рода и будет найдена критическая точка. Наличие больших флуктуаций измеряемых физических величин (средний поперечный импульс, отношение выходов частиц и т. д.) является характер-

are revealed in the  $z$ -scaling [5]. Figure 2 shows the scaling function  $\psi(z)$  (a), corresponding to the momentum spectra (b) of negatively charged hadrons produced in central Au+Au collisions at RHIC energy  $\sqrt{s_{NN}} = 7.7\text{--}200$  GeV in the pseudorapidity range  $|\eta| < 0.5$  [6]. The dependence demonstrates the universality of the shape of the scaling curve, the constancy of the fractal dimensions of the nuclei and the fragmentation process in the range  $\sqrt{s_{NN}} > 19.6$  GeV. It is assumed that the discontinuity of the model parameters (“heat capacity” and fractal dimensions) indicates the existence of critical phenomena in nuclear matter.

Huge statistics taken by the STAR experiment in the nucleus–nucleus collisions allows us to study the formation of the antimatter — the production of the nuclei of antihelium-4 [7], and of the strange antimatter — the production of the antinuclear hypertritium  ${}^3\bar{\Lambda}\bar{H}$  [8]. In total, 18 counts were detected in the STAR experiment at the Relativistic Heavy Ion Collider in  $10^9$  recorded gold–gold collisions at centre-of-mass energies of 200 and 62 GeV.

The large luminosity of RHIC and high speed data acquisition system at the STAR allowed us to collect more than 24 petabytes of information about Au+Au

collisions. It is expected that by 2020 the amount of information will increase more than twice. The taken data can no longer be processed only by the RHIC computer facility. Therefore, the use of the distributed data centres of different institutions of the STAR collaboration is one of the possible solutions to this problem. The Laboratory of Information Technologies of JINR became one of the world’s leading centres for the processing by the GRID system. Dubna resources are already used to process the STAR data. The first results of this work were presented at the 7th International Conference “Distributed Computing and Grid Technologies in Science and Education” (GRID 2016, Dubna, July 2016).

The Beam Energy Scan (BES) program in search of the QCD critical point demonstrates the flexibility of the RHIC. The BES phase I was conducted in 2010, 2011 and 2014. The data was taken for Au + Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 62.4, 39, 27, 19.6, 14.5, 11.5$  and  $7.7$  GeV. In the range the phase diagram of the produced nuclear matter is explored as a function of the baryon chemical potential  $\mu_B$  and temperature  $T$ . It is expected to observe the first-order phase transition and location of the critical

ной особенностью поведения многочастичных систем вблизи критической точки. Для получения убедительных экспериментальных доказательств этого явления требуется большая статистика.

Поэтому в 2018 г. будут выполнены работы по созданию системы электронного охлаждения, необходимой для увеличения светимости коллайдера в области малых энергий  $\sqrt{s_{NN}} < 20$  ГэВ, и созданы для установки STAR две новые детекторные подсистемы, улучшающие точность реконструкции треков во времяпроекционной камере (iTPC) и определение плоскости реакции (EPD). Мы надеемся набрать необходимую статистику и изучить более детально фазовую диаграмму ядерной материи. Эти измерения запланированы на 2019–2020 гг. К тому времени, возможно, уже начнутся первые эксперименты на коллайдере NICA, на котором при высокой светимости будет изучаться область энергий меньших, чем те, которые доступны на коллайдере RHIC. Пока не известно, где будет сделано открытие критической точки КХД, но совершенно ясно, что эти исследования находятся на переднем крае науки.

point in the range. The capability to explore this regime is a unique feature of the RHIC.

Therefore, the electron cooling of the RHIC will be carried out in 2018, which is necessary to increase the collider luminosity at low energies  $\sqrt{s_{NN}} < 20$  GeV. The new detector subsystems improving the accuracy of the reconstruction of the tracks in the time projection chamber (iTPC) and determination of the reaction plane (EPD) will extend the capability of the STAR. We hope to collect the necessary statistics and explore in more detail the phase diagram. These measurements are planned for the years 2019–2020. The first experiments at the NICA collider would probably be launched by that time. The lower energy range will be explored at higher luminosity than the one available at the RHIC collider. The answer to the question “Where is the location of the critical point?” has not yet been found, but it is clear that these investigations are at the forefront of science.

## Список литературы / References

1. Adamczyk L. et al. (STAR Collab.). Freeze-Out Dynamics via Charged Kaon Femtoscopy in  $\sqrt{s_{NN}} < 200$  GeV Central Au+Au Collisions // Phys. Rev. C. 2013. V. 88. P.034906;  
Adamczyk L. et al. (STAR Collab.). Measurement of Longitudinal Spin Asymmetries for Weak Boson Production in Polarized Proton–Proton Collisions at RHIC // Phys. Rev. Lett. 2014. V. 113. P.072301.
2. Adamczyk L. et al. (STAR Collab.).  $\Lambda\Lambda$  Correlation Function in Au+Au Collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV // Phys. Rev. Lett. 2015. V. 114. P.022301.
3. The STAR Collaboration. Measurement of Interaction between Antiprotons // Nature. 2015. V. 527. P. 345.
4. Zborovsky I., Tokarev M. Generalized  $z$ -Scaling in Proton–Proton Collisions at High Energies // Phys. Rev. D. 2007. V. 75. P.094008.
5. Zborovsky I., Tokarev M. New Properties of  $z$ -Scaling: Flavor Independence and Saturation at Low  $z$  // Intern. J. Mod. Phys. A. 2009. V. 24. P. 1417.
6. Tokarev M.V. for the STAR Collab. Self-Similarity of Negative Particle Production from the Beam Energy Scan Program at STAR // Intern. J. Mod. Phys.: Conf. Ser. 2015. V. 39. P. 1560103.
7. The STAR Collaboration. Observation of the Antimatter Helium-4 Nucleus // Nature. 2011. V. 473. P. 353.
8. The STAR Collaboration. Observation of an Antimatter Hypernucleus // Science. 2010. V. 328. P. 58.