

*A. V. Dmitriev, A. A. Zaitsev, A. I. Malakhov*

## Эксперимент NA61/SHINE. Новые результаты и ближайшие планы

NA61/SHINE — это установка с фиксированной мишенью, расположенная в северной зоне SPS ЦЕРН. Она представляет собой многоцелевой спектрометр большого акцептанса, позволяющий измерять с высокой точностью кинематические характеристики частиц, рожденных в адрон-адронных, адрон-ядерных и ядро-ядерных столкновениях в диапазоне значений энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 5,12\text{--}17,3$  ГэВ. Физическая программа эксперимента охватывает три области исследований: физику тяжелых ионов, физику космических лучей и физику нейтрино.

Во время длительной остановки (LS2) в ЦЕРН установка NA61/SHINE была значительно модифицирована. Реконструкция детектора NA61/SHINE включала: замену электроники считывания времяпроекционной системы (TPC), создание нового вершинного детектора (VD), разработку новой времяпролетной системы (ToF-L), изготовление новых детекторов по-

ложения пучка (BPD), создание реперной камеры для измерений скорости дрейфа в TPC (GRC), модернизацию калориметра (PSD), ввод в эксплуатацию системы сбора данных, внедрение новой триггерной системы, интеграцию системы считывания на основе чипа DRS4. Схематическое изображение модернизированной установки NA61/SHINE приведено на рисунке. Значительные усилия, которые коллаборация вложила в модернизацию детектора, открывают новые возможности для физических исследований и обеспечивают работу эксперимента NA61/SHINE в течение следующих нескольких лет.

Группа ОИЯИ внесла существенный вклад в модернизацию установки: была ответственна за разработку, создание и ввод в эксплуатацию 1728-канальной времяпролетной системы (ToF-L) с высоким временным разрешением ( $\sim 50$  пс) [1]. В течение 2022 г. велась работа по изготовлению второго плеча (ToF-R) вре-

*A. V. Dmitriev, A. A. Zaitsev, A. I. Malakhov*

## NA61/SHINE Experiment. New Results and Future Plans

NA61/SHINE is a fixed target experiment located in the North Area of the CERN SPS. The facility is a multipurpose large acceptance spectrometer which makes it possible to measure with high accuracy the kinematic characteristics of particles produced in hadron-hadron, hadron-nucleus, and nucleus-nucleus collisions in the energy range  $\sqrt{s_{NN}} = 5,12\text{--}17,3$  GeV. The physics programme of the experiment covers three areas of research: heavy ion physics, cosmic ray physics, and neutrino physics.

During a Long Shutdown (LS2) at CERN, the NA61/SHINE facility was significantly modified. The reconstruction of the NA61/SHINE detector included the following: replacement of the readout electronics of the Time Projection Chambers (TPC), construction of a new Vertex Detector (VD), development of a new Time-of-Flight sys-

tem (ToF-L), production of new Beam Position Detectors (BPD), assembling the reference chambers for drift velocity measurements in TPC (GRC), calorimeter upgrade (PSD), implementation of the data acquisition system, introduction of a new trigger system, integration of a readout system based on the DRS4 chip. A scheme of the upgraded NA61/SHINE facility is shown in the figure. The significant effort was made by the Collaboration in upgrading the detector to open new opportunities for physics research and keep the NA61/SHINE experiment running for the next few years.

The JINR group made a significant contribution to the modernization of the facility regarding the development, assembling and commissioning of the 1728-channel Time-of-Flight (ToF-L) system with a high time resolu-

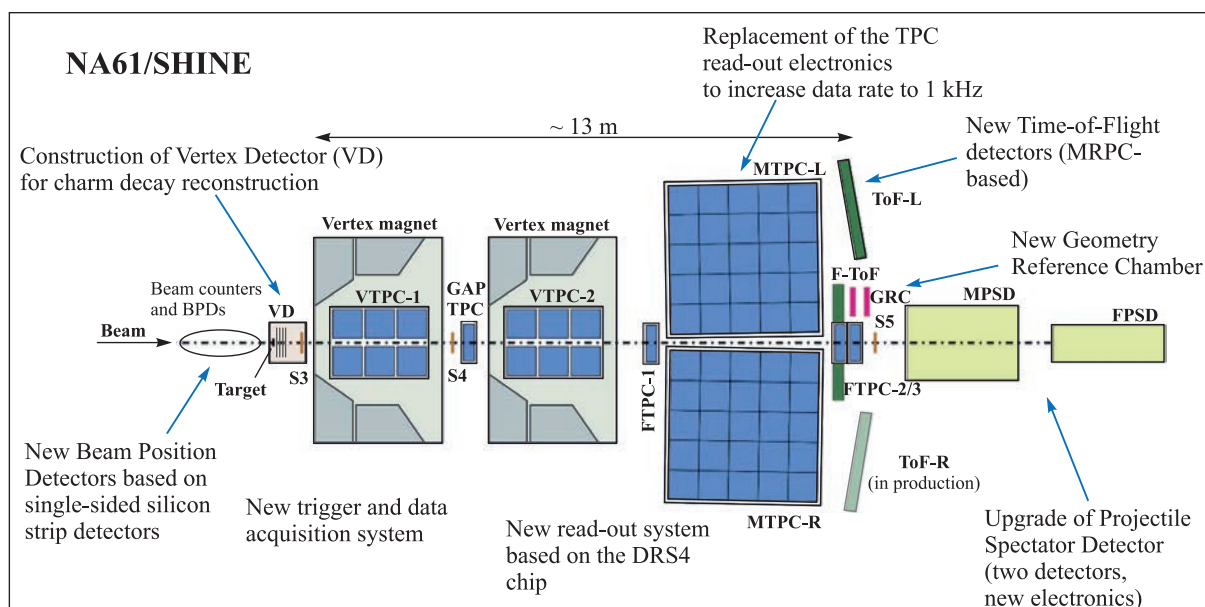
мяпролетной системы. Наличие второго плеча ToF-R позволит полностью перекрыть аксептанс установки. Также группа ОИЯИ приняла участие в интеграции новой системы считывания на основе чипа DRS4 и кампании по замене электроники считывания TPC.

После ввода в эксплуатацию обновленной установки были успешно проведены два сеанса набора данных. В рамках нейтринной программы накоплено более 180 млн взаимодействий протонов с импульсом 31 ГэВ/с на копии мишени эксперимента T2K. Физический набор данных по программе сильных взаимодействий, расширенной исследованием образования  $D$ -мезонов в столкновениях ядер Pb при энергии 150А ГэВ/с, успешно завершен в конце 2022 г. с накопленной статистикой порядка 56 млн событий.

Ионная программа NA61/SHINE нацелена на изучение фазовой диаграммы сильно взаимодействующего вещества. В эксперименте исследуется область фазовой диаграммы КХД путем двумерного сканирования по размеру сталкивающихся систем ( $pp$ -PbPb) и энергии (13А–150А ГэВ/с).

Наибольший интерес в современной физике вызывает поиск критической точки фазовой диаграммы КХД. Теоретические исследования предлагают широкий набор измеряемых величин, которые могут быть чувствительны к фазовому переходу второго рода. Такими величинами являются флуктуации множественности рожденных частиц, которые могут быть выявлены с помощью факториальных моментов.

Схема установки NA61/SHINE после модернизации



Scheme of the NA61/SHINE facility after modernization

tion ( $\sim 50$  ps) [1]. In 2022, the work has been continued to manufacture the second arm (ToF-R) of the Time-of-Flight system. The presence of the second ToF-R arm will completely overlap the acceptance of the NA61/SHINE facility. The JINR group has also taken part in the integration of the new readout system based on the DRS4 chip, as well as in the work to replace the read-out TPC electronics.

After commissioning the upgraded facility, two data taking runs were successfully performed. More than 180 million interactions of protons with a momentum of 31 GeV/c on the T2K replica target have been accumulated within the framework of the neutrino programme. The physical data acquisition was successfully completed at the end of 2022 with the statistics of about 56 million events.

These data were obtained for the programme of strong interactions added by the study of the  $D$ -meson production in collisions of Pb nuclei at the energy of 150А GeV/c.

The NA61/SHINE ion programme is aimed at studying the phase diagram of strongly interacting matter. The experiment studies the region of the QCD phase diagram by means of two-dimensional scanning on the colliding system sizes ( $pp$ -PbPb) and energies (13А–150А GeV/c).

The search for the critical point of the QCD phase diagram is of the greatest interest in modern physics. Theoretical studies offer a wide range of measurable probes sensitive to the second-order phase transition. The ones of these probes are fluctuations in the multiplicity of produced particles, which can be revealed using factorial

Факториальные моменты  $F_2(M)$  2-го порядка для протонов определяются как

$$F_2(M) = \frac{\left\langle \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M n_i (n_i - 1) \right\rangle}{\left\langle \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M n_i \right\rangle^2},$$

где  $M$  — количество 2-мерных ячеек на плоскости  $(p_x, p_y)$  импульсов протонов;  $n_i$  — количество протонов в  $i$ -й ячейке;  $\langle \dots \rangle$  — средняя величина по событиям.

Факториальные моменты следуют степенной зависимости от ширины ячейки импульса:

$$F_2(M) \sim (M)^{\varphi_2}.$$

Теоретические ожидания для  $\varphi_2$  составляют 5/6, если происходит вымораживание системы в критической точке КХД. Некоторые экспериментальные результаты по зависимости факториальных моментов распределения множественности протонов от ширины ячейки импульсов опубликованы в [2]. Они представляли  $\Delta F_2(M) = F_2^{\text{data}}(M) - F_2^{\text{mixed}}(M)$  для протонов в центральной области быстрот для центральных Si + Si-столкновений и полужентральных Ar + Sc-столкновений. Наблюдалось отклонение от нуля, ко-

торое могло быть определено степенным законом. Однако эти точки данных были коррелированы.

В работе [3] представлена зависимость второго факториального момента от размера ячейки поперечных импульсов для протонов в центральной области быстрот, образующихся в Ar + Sc-столкновениях при 13A–150A ГэВ/с и Pb + Pb-столкновениях при 13A и 30A ГэВ/с с использованием независимых точек. Отдельный анализ показал, что импульсное разрешение детектора может существенно исказить степенную форму  $F_2(M)$ . В связи с этим  $F_2(M)$  анализировался в двух диапазонах размеров ячеек импульса, т. е. для  $M^2$  от 1 до 150<sup>2</sup> и от 1 до 32<sup>2</sup>. Оказалось, что никаких признаков увеличения степенного закона с увеличением количества ячеек не наблюдается.

Таким образом, предварительные результаты по поиску критической точки пока отрицательные. В частности, фемтоскопический анализ центральных Ar + Sc-взаимодействий при энергиях 150A ГэВ/с также дал результат, далекий от критической точки [4].

В 2022 г. были получены новые данные о рождении  $\Xi(1530)^0$  и анти- $\Xi(1530)^0$  в неупругих  $p + p$ -столкновениях при 158 ГэВ/с [5]. Описание образования странных кварков при адрон-адронных взаимодействиях и их последующая адронизация являются сложными за-

moments. Factorial moments  $F_2(M)$  of the second order for protons are defined as follows:

$$F_2(M) = \frac{\left\langle \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M n_i (n_i - 1) \right\rangle}{\left\langle \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M n_i \right\rangle^2},$$

where  $M$  is the number of two-dimensional cells on the plane  $(p_x, p_y)$  of proton momenta,  $n_i$  is the number of protons in the  $i$ th cell,  $\langle \dots \rangle$  is the average value on the events.

The factorial moments follow the power law dependence on the momentum cell width

$$F_2(M) \sim (M)^{\varphi_2}.$$

The theoretical expectations for  $\varphi_2$  are 5/6 if the system freezes out at the QCD critical point. Some experimental results about the dependence of the factorial moments of the proton multiplicity distributions on the width of the momentum cell were published in [2]. They showed  $\Delta F_2(M) = F_2^{\text{data}}(M) - F_2^{\text{mixed}}(M)$  for protons in the central rapidity region for central Si + Si collisions and the semi-central Ar + Sc ones. A deviation from zero of these

distributions was observed, which could be explained by the power law mentioned above. However, these data points were correlated.

The paper [3] presents the dependence of the second factorial moment on the cell size of transverse momenta for protons in the central rapidity region produced in Ar + Sc collisions at 13A–150A GeV/c and Pb + Pb collisions at 13A and 30A GeV/c using independent points. A separate analysis has shown that the momentum resolution of the detector can significantly distort the power law form  $F_2(M)$ . In this regard,  $F_2(M)$  was analyzed in two ranges of momentum cell sizes, i.e., for  $M^2$  from 1 to 150<sup>2</sup> and from 1 to 32<sup>2</sup>. It has turned out that no signs of increasing in the power law were observed while growing the number of cells.

Thus, preliminary results on the search for the critical point are still negative. In particular, femtoscopic analysis of central Ar + Sc interactions at energies of 150A GeV/c has also given a result far from the critical point [4].

In 2022, new data were obtained on the production of  $\Xi(1530)^0$  and anti- $\Xi(1530)^0$  in inelastic  $p + p$  collisions at 158 GeV/c [5]. Description of the production of strange quarks in hadron-hadron interactions and their subsequent

дачами для феноменологических моделей. Сведения о рождении странностей и особенно о дважды странных резонансах в  $p + p$ -взаимодействиях предоставляют важные входные данные для этих моделей.

Также было изучено рождение  $K_S^0$ -мезонов в неупругих  $p + p$ -взаимодействиях при 158 ГэВ/с [6]. Результаты сравниваются с модельными предсказаниями (EPOS 1.99, SMASH 2.0, PHSD и UrQMD 3.4) и опубликованными данными. Модель EPOS 1.99 обеспечивает наилучшие предсказания для экспериментальных данных. Благодаря высокой статистической точности результаты рождения  $K_S^0$  в  $p + p$ -взаимодействиях значительно улучшают знания о рождении странности в элементарных взаимодействиях.

Опубликованы новые данные по  $K^*(892)^0$  мезонному рождению в неупругих  $p + p$ -взаимодействиях при 40 и 80 ГэВ/с [7]. Анализ рождения резонанса  $K^*(892)^0$  позволяет лучше понять эволюцию во времени столкновений ядро–ядро с высокой энергией. А именно, отношение  $K^*(892)^0$  к заряженным каонам используется для определения времени между химическим и термическим вымораживанием.

Отсутствие адекватного модельного описания данных эксперимента мотивирует развитие теоретических предсказаний. В частности, группой ОИЯИ

были изучены инклюзивные спектры пионов и каонов, рожденных в столкновениях Be + Be, как функции их поперечного импульса  $p_T$  в центральной области быстрой, рассчитанные в рамках модифицированного подхода, основанного на предположении о подобии инклюзивных спектров адронов. Суть модификации автомодельного подхода состоит во включении кварк-глюонной динамики в рождение адронов в нуклон-нуклонном взаимодействии в области быстрой  $y = 0$ . Было показано удовлетворительное описание данных NA61/SHINE для отношений выходов  $K^+/\pi^+$  и  $K^-/\pi^-$  как функции  $\sqrt{s}$  в столкновениях Be + Be. Показано сходство этих распределений с наблюдаемыми для  $p + p$ -столкновений в широком диапазоне начальных энергий [8].

В рамках нейтринной программы выполнены прецизионные измерения полных сечений и дифференциальных спектров выхода адронов на копиях и однокомпонентных мишенях для экспериментов T2K и NOvA [9]. Исследования по физике космических лучей включают в себя измерения сечений фрагментации адронов, необходимые для калибровки моделей экспериментов Pierre Auger Observatory, KASCADE-Grande, IceTop и Telescope Array [10].

hadronization are complex problems for phenomenological models. The data on the strangeness production, and especially on double-strange resonances in  $p+p$  interactions, provide important inputs to these models.

The experiment has also studied  $K_S^0$  mesons in inelastic  $p + p$  interactions at 158 GeV/c [6]. The results have been compared with model predictions (EPOS 1.99, SMASH 2.0, PHSD and UrQMD 3.4) and the published data. The EPOS 1.99 model provides the best prediction for experimental data. Due to the high statistical accuracy, the results of  $K_S^0$  production in  $p + p$  interactions have significantly improved the knowledge about the strangeness production in elementary interactions.

Data on  $K^*(892)^0$ -meson production in inelastic  $p + p$  interactions at 40 and 80 GeV/c have been published [7]. The analysis of the production of the  $K^*(892)^0$  resonance makes it possible to better understand the time evolution of high energy nucleus–nucleus collisions. Namely, the ratio  $K^*(892)^0$  to charged kaons is used to determine the time between chemical and thermal freeze-out.

The lack of an adequate model description of the experimental data motivates to develop theoretical predictions. In particular, the JINR group studied the inclusive

spectra of pions and kaons produced in Be + Be collisions as a function of their transverse momentum  $p_T$  in the central rapidity region, calculated by using a modified approach based on the assumption of the similarity of the hadron inclusive spectra. The point to modify the self-similar approach is to include the quark–gluon dynamics in the production of hadrons in the nucleon–nucleon interaction in the rapidity region of  $y = 0$ . A satisfactory description of the NA61/SHINE data for the  $K^+/\pi^+$  and  $K^-/\pi^-$  yield ratios as a function of  $\sqrt{s}$  in Be + Be collisions has been shown. These distributions are similar to those observed for  $p + p$  collisions in a wide range of initial energy values [8].

The neutrino programme fulfilled precision measurements of the total cross sections and differential yield spectra of hadrons on replica and single-component targets for the T2K and NOvA experiments [9]. Research in cosmic ray physics includes measurements of hadron fragmentation cross sections needed to calibrate models of Pierre Auger Observatory, KASCADE-Grande, IceTop and Telescope Array experiments [10].

The development of the programme with heavy ions will be focused on the study of the charm hadron produc-

Развитие программы с тяжелыми ионами будет сосредоточено на изучении образования очарованных адронов (в основном  $D$ -мезонов) при взаимодействии свинца со свинцом, а также на измерениях с пучками ядер кислорода.

Целью измерений образования очарованных адронов при столкновениях Pb + Pb является получение первых данных о среднем количестве очарованных кварк-антикварковых пар, образующихся в полном фазовом пространстве при столкновениях тяжелых ионов. Кроме того, будут представлены первые результаты по зависимости энергии столкновения и размера системы. Это, в частности, должно существенно помочь ответить на вопросы: каков механизм рождения открытого очарования, как начало деконфайнмента влияет на рождение открытого очарования и как образование кварк-глюонной плазмы влияет на образование  $J/\psi$  [11].

Комитет по экспериментам SPS и PS (SPSC) ЦЕРН рекомендовал утвердить пучковое время на SPS для программы NA61/SHINE, а комитет по исследованиям ЦЕРН одобрил данные рекомендации.

tion (mainly  $D$  mesons) in Pb + Pb interactions, as well as on the measurements with oxygen nucleus beams.

The goal of measuring the charm hadron production in Pb + Pb collisions is to obtain the first data on the average number of charm quark–antiquark pairs produced in the full phase space in heavy ion collisions. Besides, the first results on the collision energy dependence and the system size will be presented. This should significantly help to answer the following questions: what is the mechanism of the open charm production, what is the influence of the deconfinement onset on the open charm production, and, how does the quark–gluon plasma affect the  $J/\psi$  production [11]?

The SPS and PS Experiments Committee (SPSC) at CERN has recommended the approval of the SPS beam time for the NA61/SHINE programme, and the CERN Research Committee has endorsed these recommendations.

## Список литературы / References

1. Babkin V., Baskov V.A., Burdyko A., Buryakov M., Buzin S., Dmitriev A., Dronov V.A., Dulov P., Golovatyuk V., Kolesnikov R., L'vov A.I., Malakhov A., Polyansky V.V., Rummyantsev M. Beam Test Results of the MRPC Prototype for the New NA61/SHINE ToF System // Nucl. Instr. Meth. A. 2022. V. 1034. P. 166735.
2. Malakhov A.I., Matveev V.A. New Results and Research Perspectives of Experiment NA61/SHINE on SPS at CERN // JINR News. 2020. No. 3. P. 12–17.
3. Adhikary H. (for the NA61/SHINE Collab.). arXiv:2211.10504.
4. Porfy B. (NA61/SHINE Collab.) // Universe. 2019. V. 5, No. 6. P. 154; arXiv:1906.06065.
5. Achary A. et al. Measurements of  $\Xi(1530)^0$  and Anti- $\Xi(1530)^0$  Production in Inelastic  $p + p$  Collisions at 158 GeV/c // Eur. Phys. J. C. 2021. V. 81. P. 911.
6. Achary A. et al.  $K_S^0$  Meson Production in Inelastic  $p + p$  Interactions at 158 GeV/c Beam Momentum Measured by NA61/SHINE at the CERN SPS // Eur. Phys. J. C. 2022. V. 82, No. 1. P. 96.
7. Achary A. et al.  $K^*(892)^0$  Meson Production in Inelastic  $p + p$  Interactions at 40 and 80 GeV/c Beam Momenta Measured by NA61/SHINE at the CERN SPS // Eur. Phys. J. C. 2022. V. 82. P. 322.
8. Lykasov G.I., Malakhov A.I., Zaitsev A.A. Ratio of Kaon-to-Pion Production Cross Sections in BeBe Collisions as a Function of  $\sqrt{s}$  // Eur. Phys. J. A. 2022. V. 58. P. 112.
9. Adhikary H. et al. Measurements of  $K_S^0$ ,  $\Lambda$  and  $\Lambda^-$  Production in 120 GeV/c  $p + C$  Interactions. arxiv: 2211.00183.
10. Adhikary H. et al. Measurement of Hadron Production in  $\pi^-C$  Interactions at 158 and 350 GeV/c with NA61/SHINE at the CERN SPS. arxiv: 2209.10561.
11. Aduszkiewicz A. et al. (NA61/SHINE Collab.). Study of Hadron–Nucleus and Nucleus–Nucleus Collisions at the CERN SPS: Early Post-LS2 Measurements and Future Plans. Addendum (Proposal). CERN-SPSC-2018-008, SPSC-P-330-ADD-10.