

*А. И. Малахов, В. А. Матвеев*

## Новые результаты и перспективы исследований в эксперименте NA61/SHINE на SPS в ЦЕРН

Программа научно-исследовательских работ эксперимента NA61/SHINE включает несколько направлений [1–3] и является продолжением исследований на установке NA49 [4], нацеленных на поиск критической точки сильно взаимодействующей ядерной материи в релятивистских ядро-ядерных столкновениях и детальное исследование начала деконфайнмента, т. е. поиск и исследование перехода между двумя фазами сильно взаимодействующей материи; измерения сечений выхода заряженных адронов для нейтринной физики; измерения сечений в адрон-ядерных реакциях для физики космических лучей; измерение выхода очарованных кварков в столкновениях ядер свинца при энергиях SPS.

Поиск критической точки сильно взаимодействующей материи ведется в эксперименте NA61/SHINE путем сканирования фазовой диаграммы как по температуре, так и по барионному химическому

потенциалу в процессе проведения измерений при различных энергиях и в исследованиях зависимостей от размеров сталкивающихся систем. Последнее достигается путем изменения типа используемых ядер и исследования столкновений в различных областях центральности.

В эксперименте NA61/SHINE помимо обычных распределений множественности и поперечного импульса частиц исследуются также пособытийные флуктуации так называемых сильноинтенсивных величин. Последние представляют собой комбинации первых и вторых моментов распределений таких физических величин, как множественность, поперечные импульсы вторичных частиц и энергии непроизводивших нуклонов-спектаторов.

Самые последние результаты относятся к свойствам образованных частиц, а также к событийным флуктуациям во взаимодействиях протон–протон,

*A. I. Malakhov, V. A. Matveev*

## New Results and Research Perspectives of NA61/SHINE Experiment at CERN SPS

The research program of NA61/SHINE experiment includes several directions [1–3] and continues the studies at NA49 setup [4]: search for the critical point of strongly interacting nuclear matter in relativistic nucleus–nucleus collisions and a detailed study of deconfinement start-up, i. e., search and investigation of the transition between two phases of strongly interacting matter; measurement of the cross section of the charged hadron yield for neutrino physics; measurement of the cross section in hadron–hadron reactions for the physics of cosmic rays; measurement of the charmed quark yield in the lead nucleus collisions at the SPS energy.

Search for the critical point of strongly interacting matter is performed in NA61/SHINE experiment by means of scanning the phase diagram both on tempera-

ture and baryonic chemical potential that is achieved by measurements at different energy as well as by studying dependences on sizes of colliding systems. The latter is reached by means of changing the type of the used nuclei and studying the collisions in different fields of centrality.

Besides casual distributions of multiplicity and transverse momenta of particles, the NA61/SHINE experiment also studies post-event fluctuations of the so-called strongly intensive values which represent a combination of the first and second distribution momenta of such physical values as multiplicity, transverse momenta of distributions of secondary particles and energy of the having-not-interacted spectator nucleons.

The latest results refer to the properties of the produced particles and event fluctuations in the proton–proton

Be + Be и Ar + Sc при энергиях пучков 19A, 30A, 40A, 75A и 158A ГэВ/с. Проанализированы предварительные результаты по заряженным каонам в Ar + Sc-взаимодействиях с центральностью в 10%.

На рис. 1 показано текущее состояние динамических свойств энергетической зависимости отношения выхода каонов к пионам и параметра наклона спек-

тров каонов по поперечной массе, хорошо известных как «step»- и «horn»-структуры. В столкновениях Pb + Pb такие структуры были предсказаны за счет образования смешанной фазы адронного газа (HG) и кварк-глюонной плазмы (QGP). Обнаружена быстрая смена «horn» в энергетической зависимости  $K/\pi$  в центральных столкновениях Pb + Pb и Au + Au, что интер-

Рис. 1. Вверху: параметр наклона спектров поперечных масс в центральной области быстрой для  $K^+$ - и  $K^-$ -мезонов в зависимости от энергии столкновения во взаимодействиях  $p + p$ , Be + Be, Ar + Sc и Pb + Pb/Au + Au. Внизу: отношение  $K^+/\pi^+$  в центральной области быстрой и отношение  $\langle K^+ \rangle / \langle \pi^+ \rangle$  в полном фазовом пространстве  $4\pi$  как функция энергии столкновений  $p + p$ , Be + Be, Ar + Sc и Pb + Pb/Au + Au

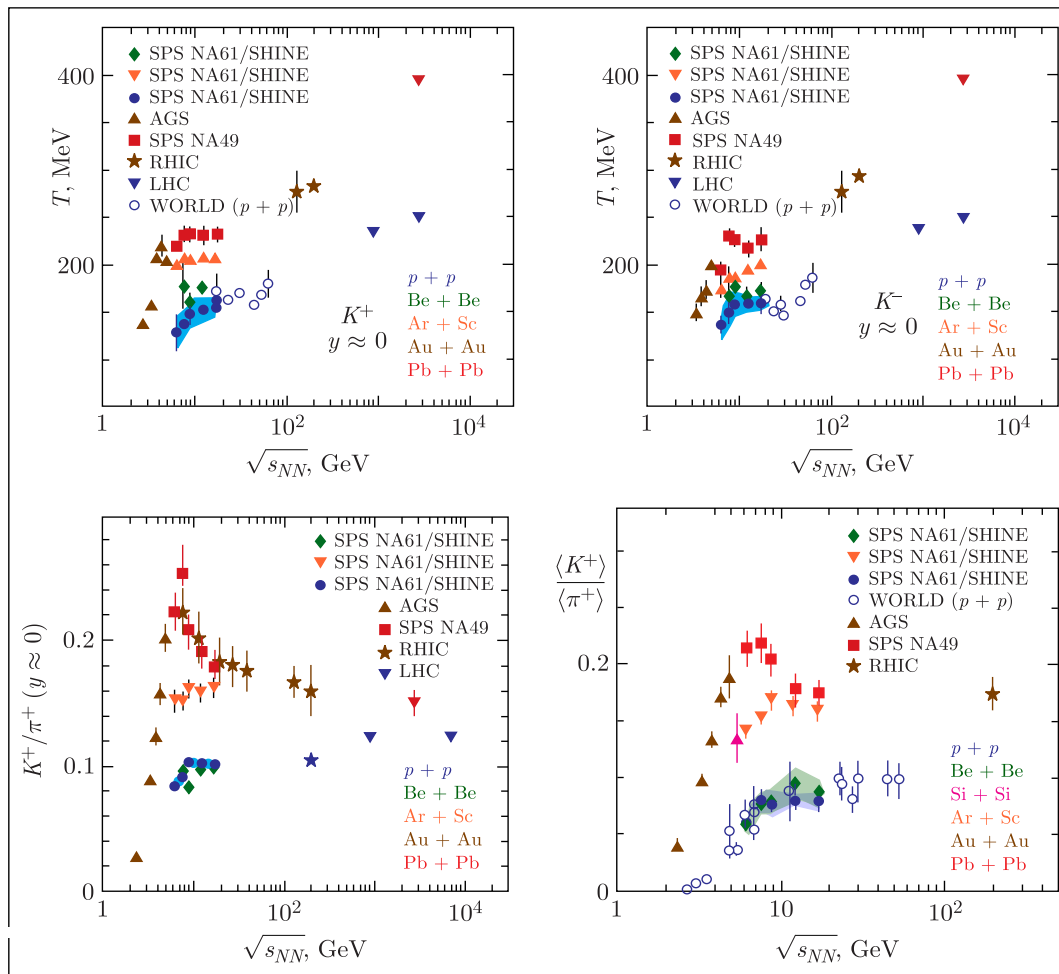


Fig. 1. Top: the inverse slope parameter of the transverse mass spectra in the central rapidity region for  $K^+$  and  $K^-$  mesons in dependence on collision energy in the  $p + p$ , Be + Be, Ar + Sc and Pb + Pb/Au + Au collisions. Bottom:  $K^+/\pi^+$  ratio in the central rapidity region and  $\langle K^+ \rangle / \langle \pi^+ \rangle$  ratio in the total phase space  $4\pi$  as the function of collision energy of  $p + p$ , Be + Be, Ar + Sc and Pb + Pb/Au + Au

interactions: Be + Be and Ar + Sc, at the beam energy of 19A, 30A, 40A, 75A and 158A GeV/c. Preliminary results have been obtained on charged kaons in the Ar + Sc interactions with the centrality of 10%.

Figure 1 demonstrates the current state of dynamic properties of the energy dependence of the kaon to pion yield ratio and the inverse slope parameter of the kaon

spectra on the transverse mass well-known as “step” and “horn” structures. In the Pb + Pb collisions these structures have been predicted due to mixed phase of hadron gas production (HG) and quark–gluon plasma (QGP). We have found a rapid change of “horn” in the energy dependence of  $K/\pi$  in the central Pb + Pb and Au + Au collisions that is interpreted by the motivated start-up of deconfinement

претируется как обусловленное началом деконфайнмента в ядерных взаимодействиях, т.е. переходом от HG к QGP. В эксперименте NA61/SHINE эти данные дополнились новыми измерениями в реакциях  $p + p$ , Be + Be и Ar + Sc, в которых проявляются неожиданные и очень интересные особенности.

Вкратце они состоят в следующем: энергетическая зависимость параметра наклона в  $p + p$ -взаимодействиях имеет форму плато «step»; данные по Be + Be-столкновениям близки к результатам для  $p + p$ -взаимодействий; данные по взаимодействиям Ar + Sc проявляют зависимость от энергии столкновения, качественно аналогичную данным в реакции  $p + p$ , но плато находится на значительно более высоком уровне.

Результаты для  $p + p$ -взаимодействий, полученные в эксперименте NA61/SHINE, были рассмотрены как указание на возможность проявления деконфайнмента в малых системах.

Удивительно, но в данных взаимодействия Ar + Sc нет указания на структуру «horn».

Данные в Xe + La-столкновениях, зарегистрированные в NA61/SHINE, ожидают своего анализа, чтобы прояснить физику вышеупомянутой картины.

Ранее были представлены предварительные результаты анализа методом «интермиттенци» для протонов в столкновениях Ar + Sc и Be + Be при 150A ГэВ/с. Предварительные результаты анализа данных столкновений Be + Be и Ar + Sc могут быть первым возможным указанием на существование критической точки в реакции Ar + Sc, в то время как в данных столкновения Be + Be нет сигнала. В настоящее время предпринимается попытка улучшить оценку статистической значимости этого результата. Основываясь на доверительном интервале в наблюдаемом факториальном моменте  $\Delta F_2(M)$  для экспериментальных данных Ar + Sc (рис. 2, слева), можно сделать вывод, что ~95% значений находятся выше нулевой линии, что указывает на статистически значимое отделение реальных данных от смешанных событий (фона). На рис. 2 (справа) показано, что только 1–5% некоррелированных протонных фоновых событий дают  $\Delta F_2(M)$  сигнал, столь же сильный, как и наблюдаемый случайный сигнал. Таким образом, наблюдаемому экспериментальному результату можно приписать 95%-ю статистическую значимость как случайному, т.е. реально скоррелированному.

Группа сотрудников из ЛФВЭ ОИЯИ внесла большой вклад в получение представленных выше экс-

in nuclear interactions, i.e., transition from HG to QGP. The NA61/SHINE experiment has supplemented these data with new measurements in reactions  $p + p$ , Be + Be and Ar + Sc, which show unexpected and interesting features.

Briefly they are as follows: the energy dependence of the inverse slope parameter in  $p + p$  interactions has a form of plateau “step”; the data on Be + Be collisions are close to the results for  $p + p$  interactions; the data on Ar + Sc interactions reveal the dependence on the collision energy which is qualitatively analogous to the data in the  $p + p$  reaction, but the plateau is located at a significantly higher level.

The results for the  $p + p$  interactions obtained in NA61/SHINE experiment have been considered as an indication of the opportunity of demonstrating deconfinement in smaller systems.

It is a surprise that in the Ar + Sc data there is no indication of the “horn” structure.

The data in the Xe + La collisions registered in NA61/SHINE expect to be analyzed to clarify the physics of the above mentioned picture.

Earlier the preliminary results of the analysis have been obtained by means of the intermittence method for protons in the Ar + Sc and Be + Be collisions at 150A GeV/c. The

analysis of preliminary results on the Be + Be and Ar + Sc collisions can be the first possible indication of the existence of the critical point in Ar + Sc reaction, in the meantime, there is no signal in the data on Be + Be. At present there is an attempt to improve the estimate of statistical significance of this result. Based on the observed factorial moment  $\Delta F_2(M)$  confidence interval for Ar + Sc experimental data (Fig. 2, left), one can conclude that ~95% of values are above the zero line, indicating a statistically significant separation of real data from mixed events (background). Figure 2 (right) shows that only 1–5% of uncorrelated proton background events produce a  $\Delta F_2(M)$  signal as strong as the one observed in experimental result being nonrandom. One may therefore assign 95% statistical significance to the observed experimental result being nonrandom.

A group of employees from the JINR Veksler and Baldin Laboratory of High Energy Physics contributed a lot of efforts to obtain the experimental data given above, in particular, in registering spectra of secondary particles and calibration of the time-of-flight system which had earlier been developed and constructed at JINR [4]. The employees from the Dzhelepov Laboratory of Nuclear Problems actively participated in NA61 experiment in

периментальных данных, в частности в получение спектров вторичных частиц и проведение калибровки времяпролетной системы, которая ранее была разработана и создана в ОИЯИ [4]. Сотрудники из ЛЯП активно участвовали в программе эксперимента NA61 по измерению сечений выхода заряженных адронов для нейтринной физики [5]. Физиками ОИЯИ также были выполнены оригинальные работы, в которых использовался разработанный ранее А. М. Балдиным подход к исследованию релятивистских ядерных взаимодействий в пространстве четырехмерных скоростей [6]. Следует отметить, что принципы подобия и автомодельности оказались очень плодотворными при

изучении ядерных взаимодействий при высоких энергиях [7].

В частности, с использованием метода подобия впервые было получено аналитическое представление быстротных распределений пионов при взаимодействии релятивистских ядер, прекрасно описывающих данные NA61/SHINE, полученные при всех налетающих импульсах в диапазоне от 20 до 158 ГэВ/с [8]. Эти результаты представлены на рис. 3 (слева).

На рис. 3 (справа) видно хорошее воспроизведение экспериментальных данных и показано, что метод подобия в пространстве четырехмерных скоростей прекрасно работает при описании взаимодействий ре-

Рис. 2. Слева: факториальный момент  $\Delta F_2(M)$  для 10–15% центральных столкновений Ar + Sc при 150A ГэВ/с (черные точки); интервалы ошибок соответствуют «bootstrap» стандартной ошибке; цветные диапазоны указывают на «bootstrap» доверительные интервалы; сплошная синяя линия дает среднее значение «bootstrap» выборки. Справа: те же экспериментальные значения  $\Delta F_2(M)$  (черные точки) в сравнении с результатами  $\Delta F_2(M)$  для моделируемых случайных фоновых протонов

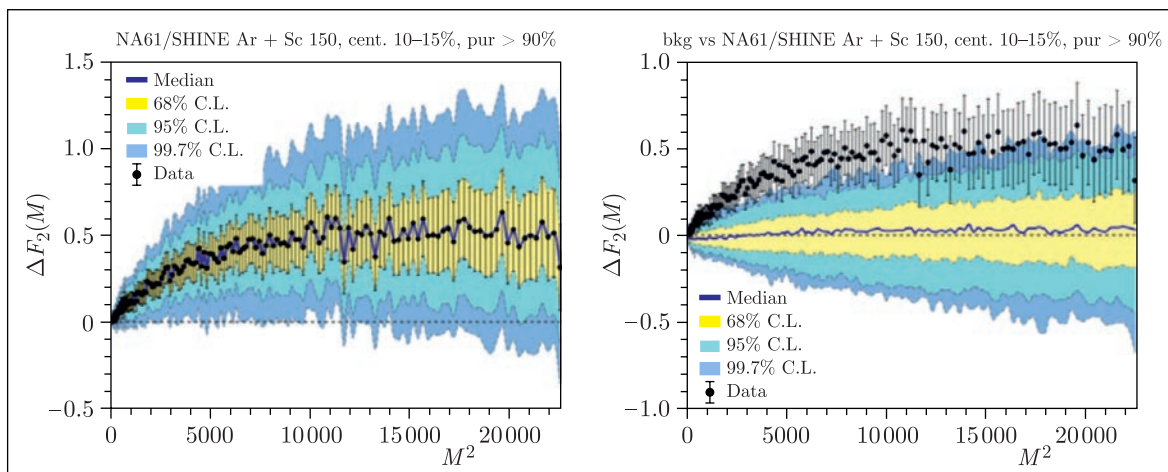


Fig. 2. Left: factorial moment  $\Delta F_2(M)$  original sample values for 10–15% central Ar + Sc collisions at 150A GeV/c (black points); the error bars correspond to “bootstrap” of the standard error; the color bands indicate the “bootstrap” confidence intervals; the solid blue line gives the medium value of the “bootstrap” samples. Right: the same experimental  $\Delta F_2(M)$  values (black points) compared to the  $\Delta F_2(M)$  results for simulated random background protons

measuring the cross section of the charged hadron yield for neutrino physics [5]. Physicists from JINR have also fulfilled original investigations using the approach to the study of relativistic nuclear interactions in the four-dimensional velocity space; this approach was developed earlier by A. Baldin [6]. The principles of similarity and automodelity turned out to be very fruitful in studying nuclear interactions at high energy [7].

In particular, using the similarity principle the physicists for the first time have obtained the analytical description of pion rapidity distributions while interacting with relativistic nuclei, which excellently describe the NA61/SHINE data registered at all projectile momenta in the range from 20 to 158 GeV/c [8]. These results are given in Fig. 3 (left).

Figure 3 (right) shows a good description of the experimental data, and thus it has been shown that the similarity method in the space of four-dimensional velocity is very efficient in defining interactions of relativistic nuclei. It is important to emphasize that there are only two constants required to describe the data at all the energies.

In 2018, the Program Advisory Committee of CERN approved a new physical program for NA61/SHINE experiment after 2021 which includes a study of *D*-meson production in lead nuclei collisions at the energy of 150A GeV [9].

In 2019, at CERN the upgrade of the NA61/SHINE setup began in practically all detector systems necessary to provide experiments after 2020 at increasing the intensity

лятивистских ядер. Важно отметить, что здесь используются только две константы, которые требуются для описания данных при всех энергиях.

В 2018 г. программным комитетом ЦЕРН была одобрена новая физическая программа эксперимента NA61/SHINE после 2021 г., которая дополнительно включает в себя исследование образования  $D$ -мезонов в столкновениях ядер свинца при энергии 150А ГэВ [9].

В 2019 г. на установке NA61/SHINE в ЦЕРН начата модернизация практически всех детекторных систем этой установки, которая необходима для проведения экспериментов после 2020 г. при увеличении более чем в 10 раз интенсивности пучка ионов свинца, а следовательно, и скорости срабатывания триггера.

Группа сотрудников из ОИЯИ ответственна за модернизацию времяпролетной системы установки.

Предыдущая времяпролетная система идентификации частиц состояла из двух стенок, содержащих 891 сцинтилляционный детектор каждая. Одна стенка была создана в ОИЯИ. Временное разрешение в среднем составляло 75 пс, что позволяло отделять каоны от пионов вплоть до импульса 8 ГэВ/с [4]. После 20 лет работы большинство частей системы потребовали бы существенной реконструкции. В связи с этим было решено заменить старую систему на новый детектор, основанный на многозачерных резистивных камерах (MRPC) [10], что стало возможным благодаря финансовой поддержке этой работы дирекцией ОИЯИ.

На SPS в ЦЕРН были проведены три испытания детекторов MRPC: в декабре 2016 г. с использованием протонного пучка 30А ГэВ/с, в августе 2018 г. в ореоле

Рис. 3. Слева: быстрое распределения пионов ( $y$ ) в  $p + p$ -столкновениях при начальных импульсах  $P_{in} = 158$  ГэВ/с (сплошная красная кривая), 80 ГэВ/с (штриховая красная кривая), 40 ГэВ/с (зеленая кривая), 31 ГэВ/с (синяя кривая), 20 ГэВ/с (красная нижняя кривая) в сравнении с данными эксперимента NA61/SHINE в процессе  $p + p \rightarrow \pi^- + x$ . Справа: результаты наших вычислений спектров  $m_{\pi t}$  в Pb + Pb-, Ar + Sc-, Be + Be- и  $p + p$ -столкновениях в центральной области быстрой при начальном импульсе на нуклон  $P_{in} = 40$  ГэВ/с в сравнении с данными эксперимента NA61/SHINE [8]

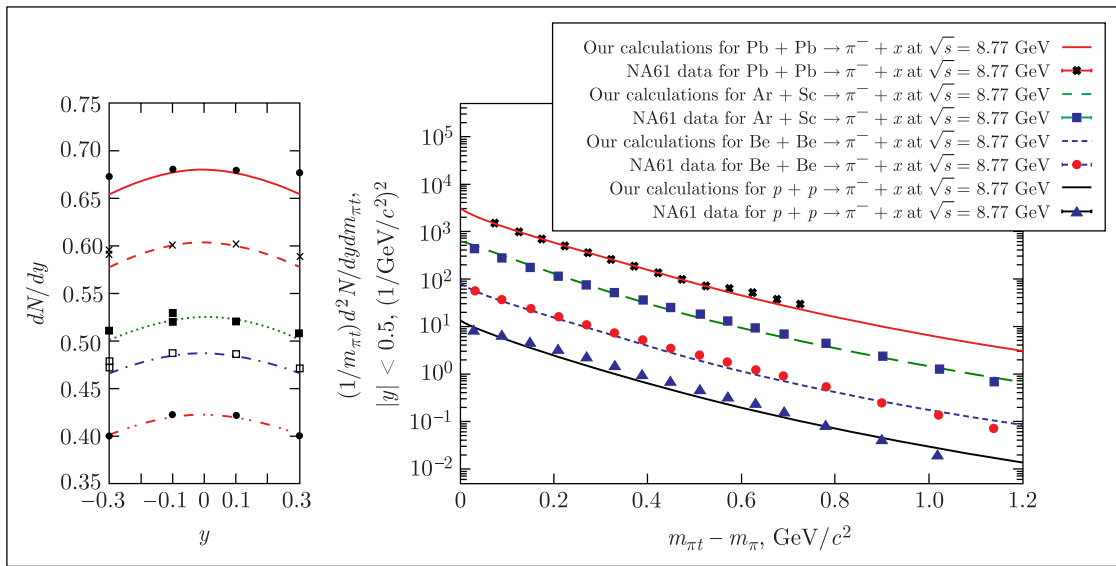


Fig. 3. Left: rapidity pion distributions ( $y$ ) in  $p + p$  collisions at projectile momenta  $P_{in} = 158$  GeV/c (solid red curve), 80 GeV/c (dashed red curve), 40 GeV/c (green curve), 31 GeV/c (blue curve), 20 GeV/c (red lower curve) in comparison with NA61/SHINE experiment in the process  $p + p \rightarrow \pi^- + x$ . Right: the results of our calculations of spectra  $m_{\pi t}$  in Pb + Pb, Ar + Sc, Be + Be and  $p + p$  collisions in the central rapidity region at the projectile momentum per nucleon  $P_{in} = 40$  GeV/c in comparison with the data of NA61/SHINE experiment [8]

of the lead ion beam by more than 10 times and, consequently, the velocity of the trigger operation.

A group of employees from JINR is responsible for upgrading the time-of-flight system (ToF) of the setup. The previous time-of-flight system for particle identification consisted of two walls having 891 scintillation detectors each. One of the walls was made at JINR. The time resolution on the average was 75 ps that provided to separate kaons from pions till the momentum 8 GeV/c [4].

After 20 years of work most of the parts of the system would have required a significant reconstruction. In this connection there was a decision to substitute the old system for the new detector based on Multigap Resistive Plate Chambers (MRPC) [10] that became possible due to the JINR Directorate grant.

There were three tests of MRPC detectors at CERN SPS: in December 2016 on the proton beam of 30А GeV/c, in August 2018 in the aureole of proton beam 150А GeV/c,

протонного пучка 150A ГэВ/с и в ноябре 2018 г. с использованием пучка Pb 150A ГэВ/с.

Измеренное временное разрешение MRPC было стабильно во всех тестах и составило величину, не превышающую 50 пс. В течение 2021–2022 гг. планируется завершить создание новой времяпролетной системы для эксперимента NA61/SHINE. В настоящее время начата работа по производству детекторов.

Данные, полученные в эксперименте NA61/SHINE, крайне важны для построения теории взаимодействий релятивистских ядер. Они широко используются для планирования экспериментов на комплексе MPD/NICA.

Однако, как можно видеть по полученным физическим результатам, представленным выше, еще остается много нерешенных вопросов в области взаимодействий релятивистских ядер. Таким образом, продолжение исследований на установке NA61 в следующий период работы ускорительного комплекса ЦЕРН является чрезвычайно важным. Также важны эксперименты, планируемые на комплексе NICA в ОИЯИ, которые помогут дополнить проводимые исследования и существенно продвинуться в понимании процессов взаимодействия релятивистских ядер.

and in November 2018 using the Pb proton beam of 150A GeV/c.

The measured time resolution of MRPC was stable in all the tests and did not exceed the value of 50 ps. During 2021–2022 it is planned to complete manufacturing the new ToF system for NA61/SHINE experiment. At present the start-up of detector production has begun.

The data obtained in the NA61/SHINE experiment are extremely important to construct a theory of relativistic interactions of nuclei. They are widely used for planning experiments at the MPD/NICA complex.

However, the obtained physical results presented above show that there are still many non-fixed issues in the field of relativistic nucleus interactions. Thus, to continue the research at the NA61 setup of the CERN accelerator complex in the coming period of its operation is extremely important. The research planned at the NICA complex of JINR would enrich the experiments being performed and significantly improve understanding the interaction process of relativistic nuclei.

## Список литературы / References

1. *Melkumov G. (NA61 Collab.)*. Recent Results of Strong Interaction Program from NA61/SHINE Experiment at CERN SPS // Eur. Phys. J. Web of Conf. 2019. V.204. P.010.
2. *NA61/SHINE Collab.* Report from the NA61/SHINE Experiment at the CERN. SPSCERN-SPSC-2019-041/SPSC-SR-261 04/10/2019.
3. *Gazdzicki M. (NA61 Collab.)*. Fluctuations and Correlations from NA61/SHINE // PoS CPOD. 2018. V.2017. P.012.
4. *Afanasev S. et al.* A Large Acceptance Hadron Detector // Nucl. Instr. Meth. A. 1999. V.430. P.210–244.
5. *Aduszkiewicz A. (NA61 Collab.)*. Measurements of Production and Inelastic Cross Sections for  $p + C$ ,  $p + Be$ , and  $p + Al$  at 60 GeV/c and  $p + C$  and  $p + Be$  at 120 GeV/c // Phys. Rev. D. 2019. V.100, No. 11. P. 112004.
6. *Baldin A.M., Malakhov A.I.* Relativistic Multiparticle Processes in the Central Rapidity Region at Asymptotically High Energies // JINR Rapid Commun. 1998. No. 1(87). P. 5–12.
7. *Matveev V.A., Muradyan R.M., Tavkhelidze A.N.* Automodelity in Strong Interactions // Teor. Mat. Fiz. 1973. V. 15, No. 3. P. 332–339.
8. *Malakhov A.I., Lykasov G.I.* Mid-Rapidity Dependence of Hadron Production in  $p-p$  and  $A-A$  Collisions // Eur. Phys. J. A. 2020. V. 56, No. 4. P. 114.
9. *Aduszkiewicz A. (NA61/SHINE Collab.)*. Study of Hadron–Nucleus and Nucleus–Nucleus Collisions at the CERN SPS: Early Post-LS2. Measurements and Future Plans // Tech. Rep. CERN-SPSC-2018-008. SPSC-P-330-ADD-10, CERN, Geneva, March, 2018; <https://cds.cern.ch/record/2309890>.
10. *Babkin V. et al.* Development of the MRPC for the TOF System of the MultiPurpose Detector // Nucl. Instr. Meth. A. 2016. V.824. P.490–492.