

Статус эксперимента BM@N

Исследование свойств ядерной материи в экстремальных условиях — одно из наиболее интенсивно развивающихся направлений современной физики. Эксперименты по столкновению тяжелых ионов, в которых создаются условия сверхвысоких температур и плотностей, интенсивно ведутся или планируются в различных мировых научных центрах. На изучение ядро-ядерных (вплоть до «золото–золото») столкновений при больших плотностях и направлен эксперимент BM@N («Барионная материя на нуклотроне») — первый эксперимент, который начал работу на ускорительном комплексе нуклотрон–NICA [1, 2]. Целью эксперимента является изучение взаимодействия пучков релятивистских тяжелых ионов с фиксированными мишенями. В центре внимания находятся адроны со странностью, которые рождаются в столкновении и не присутствуют в исходных состояниях двух сталкивающихся ядер. Измерения будут проводиться на создаваемой для этого экспериментальной установке, расположенной на выведенном пучке нуклотрона. Диапазон энергий пучка тяжелых ионов нуклотрона соответствует $\sqrt{s_{NN}} = 2,3\text{--}3,5$ ГэВ. Такие энергии хорошо подходят для изучения странных мезонов и мультистранных гиперонов,

Status of the BM@N Experiment

The study of the properties of nuclear matter under extreme conditions is one of the most rapidly developing areas of modern physics. Relativistic heavy ion collisions provide the unique opportunity to investigate the properties of nuclear matter at ultra-high density and temperature. Heavy ion experiments are intensively carried out or planned in various world scientific centers. The first experiment at the accelerator complex of Nuclotron–NICA — BM@N (Baryonic Matter at Nuclotron) — is aimed at studying nucleus–nucleus (up to “gold–gold”) collisions at high densities [1, 2]. The main goal of the experiment is to investigate the interactions of relativistic heavy ion beams with fixed targets. Experimental interest is focused on the hadrons with strangeness, which are produced in collisions and do not exist in the initial state of two colliding nuclei. The measurements will be carried out at the BM@N experimental setup located at the extracted beam of the Nuclotron. The Nuclotron heavy ion beam energy range corresponds to $\sqrt{s_{NN}} = 2.3\text{--}3.5$ GeV. It is well suited for studies of strange mesons and multistrange hyperons which are pro-

которые рождаются в ядро-ядерных столкновениях близко к кинематическому порогу, а также близки к энергиям, при которых, согласно предсказаниям тепловой модели, максимальна вероятность рождения гиперядер [3].

Первый технический сеанс на установке BM@N был проведен в 2015 г. на пучке дейтронов. Были исследованы характеристики детекторных подсистем, считывающей электроники, опробована интегрированная система сбора данных, разработаны алгоритмы анализа экспериментальных результатов. Первые физические данные были зарегистрированы установкой на пучке углерода в 2017 г., процесс их анализа находится на завершающей стадии. После запуска источника тяжелых ионов «Крион» в феврале-марте 2019 г. релятивистские пучки ионов аргона и криптона были впервые выведены на установку BM@N. Зарегистрировано около 130 миллионов событий, ана-

лиз которых позволит получить информацию о продуктах взаимодействия пучков ионов «средней» тяжести с различными мишенями (углерод, алюминий, медь, олово, свинец).

В настоящее время ведутся работы по подготовке установки к работе с пучками релятивистских тяжелых ионов, вплоть до ионов золота, максимальная интенсивность которых к 2022 г. достигнет $2 \cdot 10^6$ Гц. Высокая интенсивность взаимодействий и большая множественность заряженных частиц в каждом событии обуславливают повышенные требования ко всем детекторным подсистемам установки. К первым сеансам на пучках тяжелых ионов существующая экспериментальная установка будет расширена и дополнена новыми детекторами с учетом опыта работы, полученного в предыдущих сеансах нуклотрона. Полная конфигурация детекторов установки BM@N схематично представлена на рис. 1. Эксперимент сочетает в себе измерение параметров тре-

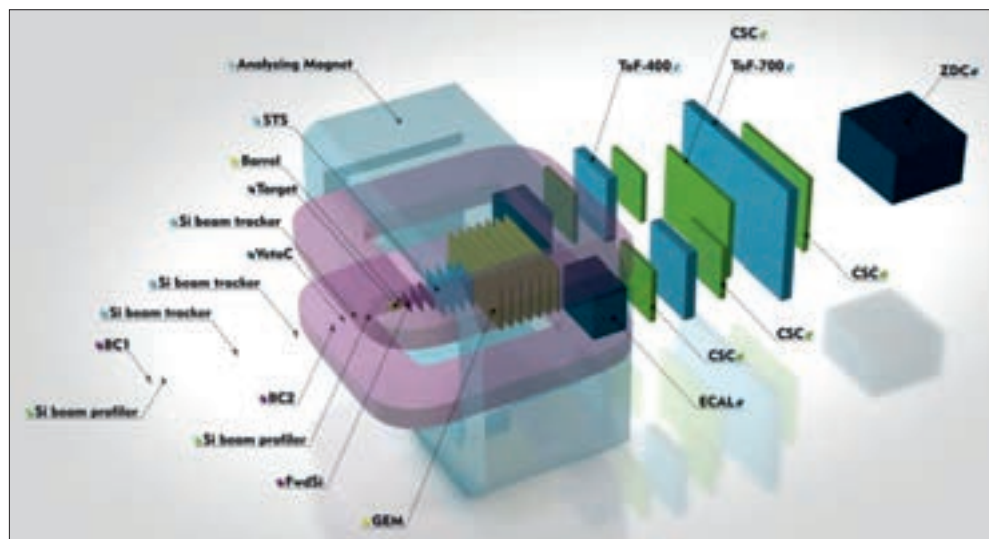


Рис. 1. Схема конфигурации детекторов экспериментальной установки BM@N

Fig. 1. Schematic view of the detector configuration of the BM@N experimental setup

duced in nucleus–nucleus collisions close to the kinematic threshold. The maximum in the hyper-nuclei production rate predicted by the thermal model [3] is also close to the Nuclotron energy range.

The first technical run at the BM@N experimental setup was performed in 2015 with the deuteron beam. The characteristics of the detector subsystems and read-out electronics were investigated, an integrated data acquisition system was tested, and the algorithms for data analysis were developed. The first physical data were recorded in 2017 with the carbon beam, the analysis process is at the final stage. After the Krion heavy ion source was launched, relativistic argon and krypton beams were accelerated and transported to the BM@N setup in February–March 2019 for the first time. About 130 million events were recorded. The analysis of the experimental data will provide the in-

formation about the products of interaction of “medium” ion beams with various targets (carbon, aluminum, copper, tin, lead).

Currently, work is underway to prepare the BM@N setup for data taking with the relativistic heavy ion beams. The expected maximal intensity of Au ions is $2 \cdot 10^6$ Hz by 2022. The requirements for the detector subsystems are very high, as all physical measurements will be performed in conditions of high beam intensities in collisions with large multiplicity of charged particles. By the first runs with heavy ion beams, the existing experimental setup will be expanded and supplemented with new detectors, taking into account the experience gained at previous Nuclotron runs. A complete scheme of the BM@N experimental setup is shown in Fig. 1. The experiment combines high-precision track measurements with time-of-flight information

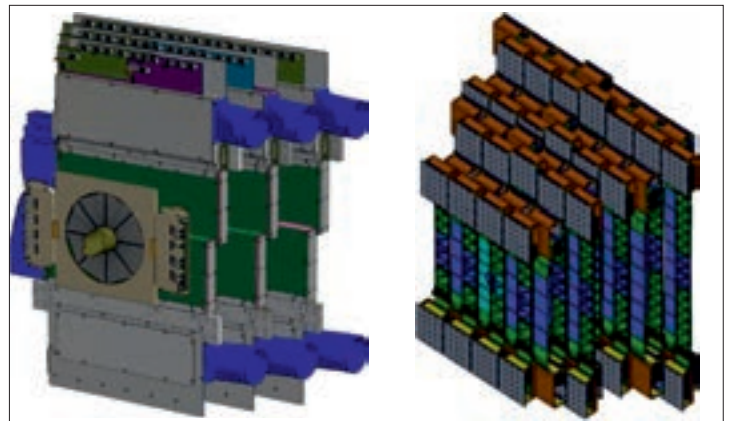
ков с высокой точностью с получением времяпролетной информации для идентификации частиц. Значение магнитного поля анализирующего магнита может быть изменено до максимальной величины 1 Тл, что позволит оптимизировать геометрическую эффективность и импульсное разрешение для различных реакций и энергий пучка. Широкоапертурная центральная трековая система на базе семи плоскостей GEM-детекторов [4] расположена за мишенью внутри анализирующего магнита. Импульс заряженных частиц — продуктов взаимодействия пучка и мишени — будет измеряться по кривизне их траектории в магнитном поле.

Между мишенью и центральной трековой системой будут установлены плоскости кремниевых двусторонних микростриповых детекторов (FwdSi, STS) (рис. 2), что позволит с высокой точностью определить вершину взаимодействия и улучшить точность реконструкции траекторий, особенно в области малых значений импульсов частиц. Внешняя трековая система, состоящая из шести плоскостей катодных стриповых

камер (CSC), расположена вне магнитного поля и предназначена для уточнения параметров трека, полученного GEM-детекторами (рис. 3) внутри анализирующего магнита. Помимо улучшения импульсного разрешения уточненный трек необходим для поиска соответствующего хита во времяпролетных системах ToF400 и ToF700. Времяпролетные детекторы на основе технологии mRPC со стриповым считыванием позволят разделять адроны (π , K , p) и легкие ядра с импульсом до нескольких ГэВ/с. Калориметр ZDC предназначен для определения прицельного параметра столкновения путем измерения энергии частиц — фрагментов пучка. Детектор T0 будет использован для измерения центральности столкновения тяжелых ионов, формирования стартового сигнала для времяпролетной системы, а также совместно со счетчиками BC1, BC2, VetoC — для формирования триггера. Для того чтобы минимизировать количество рассеивающего вещества на пути тяжелых ионов, в состав экспериментальной установки будет интегрирован вакуум-

Рис. 2. Проект интеграции в состав экспериментальной установки плоскостей кремниевых микростриповых детекторов — FwdSi (слева) и STS (справа)

Fig. 2. Design layout of the silicon microstrip detectors integration into the BM@N setup — FwdSi (left) and STS (right)



for particle identification. The magnetic field of the analyzing magnet can be varied up to 1 T to get the optimal detector acceptance and momentum resolution for different reactions and beam energies. A wide-aperture central tracking system is based on seven planes of GEM detectors [4]. It is located downstream the target inside the analyzing magnet. The momentum of charged particles — the products of interactions of the beam with the target — are measured by the curvature of their trajectories in magnetic field.

Double-sided silicon microstrip detectors (FwdSi, STS) (Fig. 2) are installed between the target and the central tracking system to determine the interaction vertex with high accuracy and to improve the precision of track reconstruction, especially in the region of small particle momentum. The outer tracking system consists of six planes of cathode strip chambers (CSC). It is situated outside the magnetic field and is intended to precise

parameters of tracks obtained in GEM detectors (Fig. 3) inside the analyzing magnet. In addition to improvement of particles momentum identification, refined track in CSC is used to find corresponding hit in time-of-flight systems ToF400 and ToF700. The design parameters of the time-of-flight detectors based on an mRPC technology with a strip read-out allows discriminating between hadrons (π , K , p) as well as light nuclei with the momentum up to few GeV/c. The zero degree calorimeter (ZDC) is designed for the analysis of the collision centrality by measuring the energy of forward going particles. The T0 detector is used to trigger central heavy ion collisions, to provide a start time signal for the time-of-flight system, and in combination with counters BC1, BC2, VetoC to form a trigger signal. A vacuum beam pipe will be integrated into the experimental setup to minimize the amount of scattering material on the way of heavy ions. Groups of trigger detectors and beam profile meters will be installed inside the beam

ный ионопровод. Группы триггерных детекторов и профилометров будут установлены внутри ионопровода в специальных вакуумных боксах. В настоящее время идет разработка конструкции мишенного узла, который позволит осуществлять смену мишени без нарушения вакуума. Также предусмотрена программа модернизации канала транспортировки пучка от нуклотрона до установки, длина которого составляет около 160 м.

Реализация такого масштабного проекта, как BM@N, невозможна в рамках одного научного института. Международная коллаборация BM@N была создана в апреле 2018 г., и к настоящему времени более 20 научных групп из российских и мировых научных центров являются членами этой коллаборации.

Рис. 3. Процесс сборки 1632×390 мм GEM-детектора в ЦЕРН

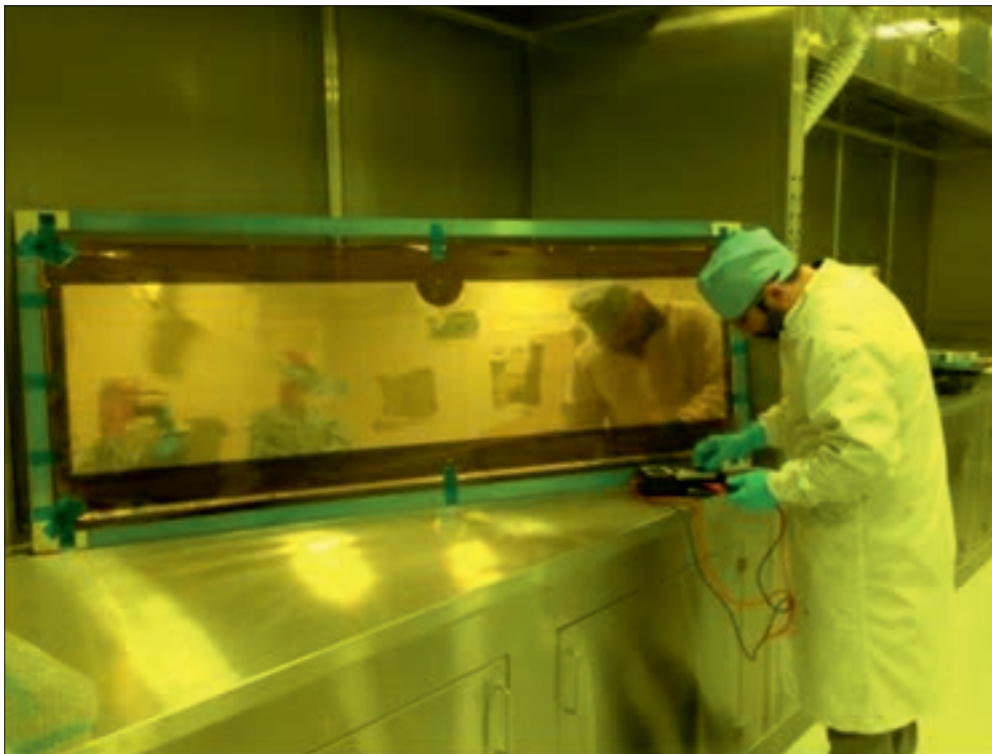


Fig. 3. Assembly process of the 1632×390 mm GEM detector at CERN

pipe in special vacuum boxes. At present, the design of the target station is being developed. The target station will allow changing the target without breaking the vacuum. The length of the beam transport line from the Nuclotron to BM@N setup is about 160 m. Its upgrade program is also foreseen.

It is impossible to build such a large-scale project as BM@N within a single scientific institute. The international collaboration BM@N was established in April 2018, and today more than 20 research teams from Russian and international scientific institutions are members of this collaboration.

Список литературы / References

1. NICA White Paper. <http://theor0.jinr.ru/twiki/cgi/view/NICA/NICAWhitePaper>
2. Kapishin M. // Eur. Phys. J. A. 2016. V. 52. P. 213.
3. Andronic A. et al. // Phys. Lett. B. 2011. V. 695. P. 203.
4. Sauli F. // Nucl. Instr. Meth. A. 2016. V. 805. P. 2–24.