

## **Эксперимент для изучения барионной материи на нуклотроне (BM@N)**

Процессы взаимодействия тяжелых ионов высоких энергий предоставляют уникальные возможности для изучения свойств ядерной материи при экстремальной плотности и температуре. При столкновении ядерная материя нагревается и сжимается в течение очень короткого промежутка времени. При умеренных температурах нуклоны возбуждаются в барионные резонансы, распадающиеся с испусканием мезонов. При более высоких температурах рождаются также барион-антибарионные пары. Отношение выхода мезонов к выходу барионов в результате взаимодействия возрастает с увеличением энергии столкновения. В продуктах ядро-ядерных столкновений при кинетической энергии пучка нуклотрона в диапазоне от 1 до 4,5 ГэВ/нуклон доминируют барионы, в отличие от взаимодействий при более высоких энергиях на RHIC или SPS. При энергиях нуклотрона плотность нуклонов в зоне столкновения двух ядер золота превышает плотность насыщения в 3–4 раза. При таких плотностях

*М. N. Kapishin*

## **Experiment for Studies of Baryonic Matter at the Nuclotron (BM@N)**

Relativistic heavy-ion collisions provide the unique opportunity to study nuclear matter under extreme density and temperature. In the collision, nuclear matter is heated up and compressed for a very short period of time. At moderate temperatures, nucleons are excited to baryonic resonances which decay by the emission of mesons. At higher temperatures, also baryon-antibaryon pairs are created. The ratio of produced mesons to baryons in the fireball increases with the collision energy. A nucleus-nucleus collision at the Nuclotron beam kinetic energy in the range from 1 to 4.5 GeV/nucleon produces a baryon dominated fireball contrary to higher energies at RHIC or SPS. At the Nuclotron energies the nucleon densities in the collision zone of two gold nuclei exceed the saturation density by a factor of 3–4. At these densities nucleons start to overlap, and it is expected that under such extreme conditions the onset of chiral symmetry restoration might occur although quarks are still confined [1–5]. The focus of experimental studies will be on hadrons with strangeness, which are

нуклоны начинают перекрываться. В подобных экстремальных условиях могут проявиться признаки, характерные для восстановления киральной симметрии, хотя кварки по-прежнему связаны в адронах [1–5]. В центре внимания экспериментальных исследований будут адроны со странностью, которые рождаются в столкновении и не присутствуют в исходном состоянии двух сталкивающихся ядер, в отличие от нуклонов, состоящих из легких ( $u, d$ ) кварков.

Диапазон энергии пучков ионов нуклотрона хорошо подходит для изучения странных мезонов и мультистранных гиперонов, которые рождаются в ядроядерных столкновениях близко к кинематическому порогу. Столкновения тяжелых ионов являются богатым источником рождения странных адронов, а слияние  $\Lambda$ -гиперонов с нуклонами приводит к образованию различных легких гиперядер [4, 5]. Изучение процессов рождения гиперядер, как ожидается, обеспечит более глубокое понимание свойств гиперон-нуклонных и гиперон-гиперонных взаимодействий. В целом программа по исследованию столкновений тяжелых ионов на нуклотроне [6–8] включает следующие направления: исследование динамики реакций и изучение уравнения состояния ядерной материи (EoS), изучение модификации свойств адронов в ядерной ма-

терии, рождения (мульти)странных гиперонов около порога и поиск гиперядер. Для интерпретации экспериментальных данных в процессах столкновения тяжелых ионов и для обеспечения нормировки измеренных спектров, полученных во взаимодействии ядер, планируется также изучение элементарных реакций ( $p + p, p + n(d)$ ).

BM@N (Baryonic Matter at Nuclotron) является первым экспериментом на ускорительном комплексе нуклотрон–NICA. Физическая программа с тяжелыми ионами ускорительного комплекса NICA и эксперимента MPD, запланированного на коллайдере NICA, описана в работах [9–11]. Целью эксперимента BM@N является изучение взаимодействия релятивистских пучков тяжелых ионов с фиксированными мишенями [7, 8]. Нуклотрон обеспечит эксперимент пучками частиц от протонов до ионов золота с кинетической энергией в диапазоне от 1 до 6 ГэВ/нуклон. Максимальная кинетическая энергия для тяжелых ионов с отношением  $Z/A \sim 1/3$  составляет 4,5 ГэВ/нуклон. Планируемая интенсивность пучка ионов золота, ускоренных и накопленных в нуклотроне и бустере и выведенных на установку BM@N, составит до  $10^7 \text{ с}^{-1}$ . Выведенный пучок ионов золота ожидается в начале 2019 г. В период до 2018 г. планируется ускорить и вы-

early produced in the collision and are not present in the initial state of two colliding nuclei, unlike nucleons made up from light ( $u, d$ ) quarks.

The Nuclotron beam energy range is well suited for studies of strange mesons and (multi-)strange hyperons which are produced in nucleus–nucleus collisions close to the kinematic threshold. Heavy-ion collisions are a rich source of strangeness, and the coalescence of  $\Lambda$  hyperons with nucleons can produce a variety of light hypernuclei [4, 5]. The study of the hyper-nuclei production is expected to provide new insights into the properties of the hyperon–nucleon and hyperon–hyperon interactions. In sum, the research programme on heavy-ion collisions at the Nuclotron [6–8] includes the following topics: investigation of the reaction dynamics and nuclear Equation of State (EoS), study of the in-medium properties of hadrons, production of (multi-)strange hyperons at the threshold and search for hyper-nuclei. In order to interpret experimental data from heavy-ion collisions and to provide normalization for the measured  $A + A$  spectra, a study of elementary reactions ( $p + p, p + n(d)$ ) is planned.

BM@N (Baryonic Matter at Nuclotron) is the first experiment at the accelerator complex of Nuclotron–NICA.

The heavy-ion physics programme of the NICA accelerator complex and the MPD experiment planned at the NICA collider is described in [9–11]. The aim of the BM@N experiment is to study interactions of relativistic heavy-ion beams with fixed targets [7–8]. The Nuclotron will provide a variety of beams from protons to gold ions with the kinetic energy of ions ranging from 1 to 6 GeV/nucleon. The maximum kinetic energy for heavy ions with the ratio of  $Z/A \sim 1/3$  is 4.5 GeV/nucleon. The planned intensity of the gold ion beam accelerated and accumulated in the Nuclotron and the Booster and transported to the BM@N experimental zone is up to  $10^7 \text{ s}^{-1}$ . The gold ion beam is expected in early 2019. In the period before 2018 the following ions are foreseen to accelerate: the polarized deuteron beam in 2016, the carbon, argon and krypton beams in 2017. In this period of operation the planned intensity of the beam interacting with the target inside the BM@N setup is  $10^6 \text{ s}^{-1}$ . The proton–proton interactions will be studied after the Nuclotron upgrade in 2018, using the proton beam and the liquid hydrogen target. Figure 1 shows the diagram of the interaction rates accepted by data acquisition systems of heavy-ion experiments running at different energies of colliding nuclei. The beam energy range in the

вести в экспериментальную зону BM@N следующие пучки: поляризованный пучок дейтронов — в 2016 г., пучки ядер углерода, аргона и криптона — в 2017 г. В этот период планируемая интенсивность пучка на установке BM@N составит  $10^6 \text{ с}^{-1}$ . Протон-протонные взаимодействия будут изучаться после модернизации нуклотрона в 2018 г. с использованием протонного пучка и мишени из жидкого водорода. На рис. 1 приведены диаграммы частоты приема данных в экспериментах на пучках тяжелых ионов при различных энергиях сталкивающихся ядер в с. ц. м. Диапазон энергии пучка в эксперименте BM@N частично перекрывает диапазон энергий эксперимента HADES. Ожидается, что частота регистрации непериферических, т. е. цен-

Рис. 1. Частота приема данных и энергия нуклон-нуклонного столкновения в с. ц. м. в экспериментах на пучках тяжелых ионов

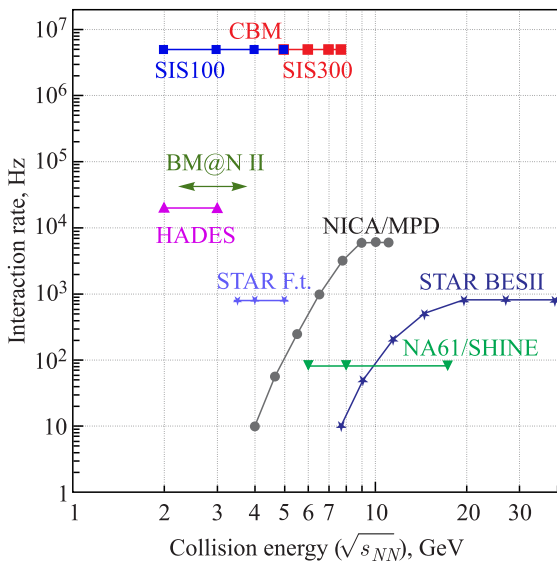


Fig. 1. Interaction rate and nucleon–nucleon collision energy in c. m. s. in heavy-ion experiments

BM@N experiment overlaps partially that in the HADES experiment. The interaction rate of triggered nonperipheral central and intermediate events at the second stage of the BM@N experiment is expected to be around 50 kHz.

A sketch of the proposed experimental setup is shown in Fig. 2. The experiment combines high-precision track measurements with time-of-flight information for particle identification and uses total energy measurements for the analysis of the collision centrality. The charged track momentum and multiplicity will be measured with the set of two-coordinate planes of GEM (Gaseous Electron Multipliers) detectors located downstream of the target in the analyzing magnet and the drift/straw chambers (DCH, Straw) situated outside the magnetic field. The GEM detectors sustain high rates of particles and are operational

тральных или промежуточных, взаимодействий на втором этапе эксперимента BM@N составит около 50 кГц.

Схема предлагаемой экспериментальной установки представлена на рис. 2. Она предназначена для измерения параметров треков с высокой точностью и получения времяпролетной информации для идентификации частиц, а также для измерения полной энергии для анализа центральности соударений. Импульс и множественность заряженных треков будут измеряться с помощью двухкоординатных детекторов GEM (Gaseous Electron Multipliers), расположенных за мишенью внутри анализирующего магнита, а также дрейфовых/строу-камер (DCH, Straw), расположенных за пределами магнитного поля. Детекторы GEM способны функционировать при высоких нагрузках ча-

Рис. 2. Схема установки BM@N

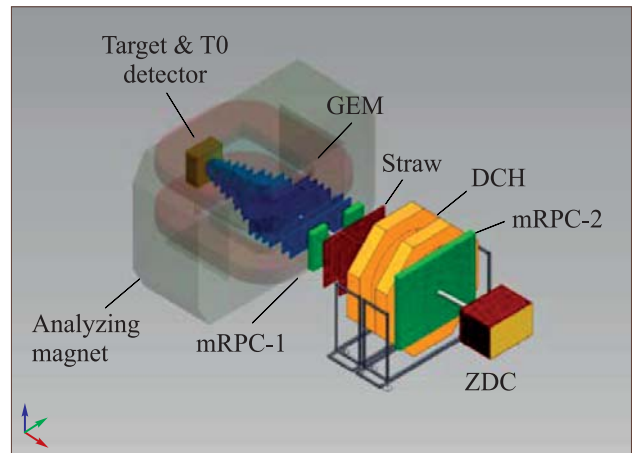


Fig. 2. Schematic view of the BM@N setup

in the strong magnetic field. The gap between the poles of the analyzing magnet is around 1 m. The magnetic field can be varied up to 1.2 T to get the optimal BM@N detector acceptance and momentum resolution for different processes and beam energies. The design parameters of the time-of-flight detectors based on multi-gap resistive plate chambers (mRPC-1,2) with a strip read-out allow us to discriminate between hadrons ( $\pi$ ,  $K$ ,  $p$ ), as well as light nuclei with the momentum up to few GeV/c produced in multi-particle events. 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, partially covering the backward hemisphere around the target, is planned to trigger central heavy-ion collisions and provide a start time (T0) signal for the mRPC-1, 2 detectors. An electromagnetic calorimeter will be installed behind the outer drift/straw chambers and mRPC-2 wall to study processes with electromagnetic probes ( $\gamma$ ,  $e^\pm$ ) in the final state.

стиц, а также в сильном магнитном поле. Промежуток для детекторов между полюсами анализирующего магнита составляет около 1 м. Магнитное поле может изменяться до максимальной величины 1,2 Тл, что позволяет оптимизировать для детектора BM@N геометрическую эффективность (акцептанс) и импульсное разрешение для различных процессов и энергий пучка. Времяпролетные детекторы на основе технологии mRPC (multigap Resistive Plate Chambers) со стриповым считыванием позволяют разделять адроны ( $\pi$ ,  $K$ ,  $p$ ), а также легкие ядра с импульсом до нескольких ГэВ/с, образованные в многочастичных событиях. Калориметр ZDC (Zero Degree Calorimeter) предназначен для определения прицельного параметра столкновения (центральности) путем измерения энергии частиц — фрагментов пучка. Детектор T0, частично перекрывающий заднюю полусферу вокруг мишени, планируется использовать для измерения центральности столкновения тяжелых ионов, формирования триг-

Рис. 3. Установка BM@N в первом техническом сеансе в марте 2015 г.



Fig. 3. BM@N setup in the first technical run in March 2015

The first technical run of the BM@N detectors was performed with the deuteron and carbon beams in March 2015. The view of the BM@N setup in the run is presented in Fig. 3. The experimental data from the drift chambers, time-of-flight detectors, zero-degree calorimeter, start time and trigger detectors were read out using the integrated data acquisition system. Momentum of the deuteron beam measured from the angular distributions in the drift chambers is given in Fig. 4.

Meanwhile, the GEM detectors for the BM@N central tracker are being produced at the CERN workshop. The GEM detectors with the maximum size of  $200 \times 45$  cm are foreseen for the BM@N central tracker. The configuration of the central tracker in 2016 is based on at least six GEM planes of the half size. It will be extended up

to eight GEM stations of the full size by the end of 2018. At the second stage of the BM@N experiment in 2020, at least four planes of two-coordinate silicon strip detectors will be installed between the GEM tracker and the target to improve the track reconstruction in Au+Au collisions. Presently, the detectors of this type are being developed for the CBM experiment.

гера и стартового сигнала (T0) для детекторов mRPC-1,2. Электромагнитный калориметр будет установлен позади дрейфовых/строу-камер и детектора mRPC-2 для изучения процессов с образованием  $\gamma$ ,  $e^\pm$  в конечном состоянии.

Первый технический сеанс на установке BM@N был проведен на пучках дейтронов и ядер углерода в марте 2015 г. Вид установки BM@N в сеансе представлен на рис. 3. Экспериментальные данные с дрейфовых камер, времяпролетных детекторов, калориметра ZDC, T0 и триггерных детекторов считывались с использованием интегрированной системы сбора данных. Результаты измерения импульса пучка дейтронов по угловым распределениям в дрейфовых камерах приведены на рис. 4.

В то же время было начато производство детекторов GEM в ЦЕРН. Детекторы GEM с максимальным размером  $200 \times 45$  см предусмотрены для центральной трековой системы установки BM@N. Конфигурация центральной трековой системы в 2016 г. предусматривает использование по крайней мере шести GEM-плоскостей половинного размера по вертикали. Она

Рис. 4. Импульс пучка дейтронов, рассчитанный из угловых распределений в дрейфовых камерах при различных значениях интеграла магнитного поля. Красная линия с полосой ошибок дает номинальное значение импульса пучка с неопределенностью ускорителя

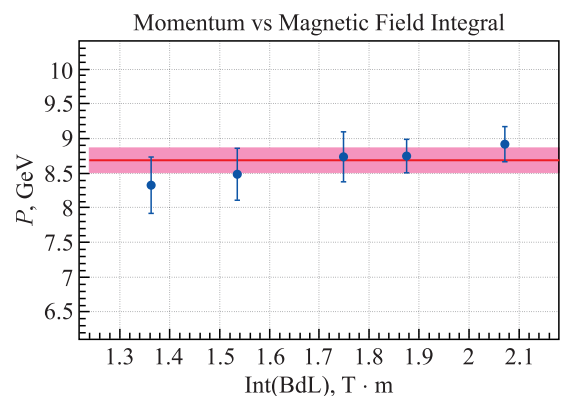


Fig. 4. Momentum of the deuteron beam calculated from the angular distributions measured in the drift chambers for different values of the magnetic field integral. The red line with the error bar gives the nominal value of the beam momentum with the accelerator uncertainty

to eight GEM stations of the full size by the end of 2018. At the second stage of the BM@N experiment in 2020, at least four planes of two-coordinate silicon strip detectors will be installed between the GEM tracker and the target to improve the track reconstruction in Au+Au collisions. Presently, the detectors of this type are being developed for the CBM experiment.

будет расширена до восьми GEM-станций полного размера по вертикали к концу 2018 г. На втором этапе эксперимента BM@N в 2020 г. планируется введение в действие четырех плоскостей двухкоординатных кремниевых детекторов, установленных между детекторами GEM и мишенью для улучшения реконструкции трека в столкновениях ядер Au+Au. В настоящее время детекторы такого типа разрабатываются для эксперимента CBM.

### Список литературы / References

1. *Rapp R., Wambach J.* // Eur. Phys. J. A. 1999. V.6. P.415.
2. *Brown G.E.* // Prog. Theor. Phys. 1987. V.91. P.85.
3. *Cassing W., Bratkovskaya E.L.* // Phys. Rep. 1999. V.308. P.65.
4. *Steinheimer J. et al.* // Prog. Part. Nucl. Phys. 2009. V.62. P.313–317.
5. *Steinheimer J., Gudima K., Botvina A., Mishustin I., Bleicher M., Stocker H.* // Phys. Lett. B. 2012. V.714. P.85.
6. NICA White Paper. <http://nica.jinr.ru>, free access.
7. BM@N Conceptual Design Report. [http://nica.jinr.ru/files/BM@N/BMN\\_CDR.pdf](http://nica.jinr.ru/files/BM@N/BMN_CDR.pdf)
8. BM@N Project Status 2016. [http://bmnshift.jinr.ru/wiki/lib/exe/fetch.php?media=bmnproject\\_2016.pdf](http://bmnshift.jinr.ru/wiki/lib/exe/fetch.php?media=bmnproject_2016.pdf)
9. *Trubnikov G., Kovalenko A., Kekelidze V., Meshkov I., Lednicky R., Sissakian A., Sorin A.* // PoS (ICHEP 2010). P.523.
10. *Trubnikov G., Agapov N., Kekelidze V., Kovalenko A., Matveev V., Meshkov I., Lednicky R., Sorin A.* // PoS 36th Intern. Conf. on High Energy Physics (ICHEP 2012), July 4–11, Melbourne, Australia.
11. *Kekelidze V., Kovalenko A., Lednicky R., Matveev V., Meshkov I., Sorin A., Trubnikov G.* // Nucl. Phys. B. Proc. Suppl. 2014. 37th Intern. Conf. on High Energy Physics (ICHEP 2014), July 2–9, Valencia, Spain.