

*М. Пацюк*

## Измерение короткодействующих двухнуклонных корреляций в обратной кинематике

В марте 2022 г. в Лаборатории физики высоких энергий состоялся первый физический эксперимент на обновленных синхротронах комплекса NICA с пучком ионов  $^{12}\text{C}$ , ускоренным последовательно в цепочке LINAC–бустер–нуклотрон. Высокоэнергетичный пучок с импульсом 3,75 ГэВ/с/нуклон бомбардировал жидководородную мишень, а спектрометр BM@N регистрировал полностью эксклюзивную реакцию жесткого рассеяния  $^{12}\text{C}(p,2pN)A-2^*$ .

Реакция  $^{12}\text{C}(p,2pN)A-2^*$  (рис. 1) была выбрана для исследования так называемых короткодействующих двухнуклонных корреляций (КДК) в ядре  $^{12}\text{C}$ . Такие исследования преследуют цель разобраться в деталях структуры и взаимодействий в атомных ядрах, объектах размером менее  $10^{-15}$  м. Нейтроны и протоны (нуклоны) являются компонентами ядра и связаны между собой одной из фундаментальных сил природы — сильным взаимодействием. Отдельные нукло-

ны движутся внутри ядра и взаимодействуют друг с другом. Периодически нуклон находит партнера внутри ядра и образует пару с уникальными свойствами. Эксперименты по электронному и протонному рассеянию на ядрах [1] показали, что такие спаренные нуклоны обладают большим импульсом, чем импульс Ферми для данного ядра, в основном из-за интенсивного взаимодействия нуклонов, находящихся в непосредственной близости друг от друга. Этот феномен получил название короткодействующих двухнуклонных корреляций.

Исследование этих КДК-пар важно для таких областей знаний, как холодная плотная ядерная материя (как в нейтронных звездах) и ядерное взаимодействие на малых расстояниях. Кроме того, существует свидетельство взаимосвязи КДК-пар и изменения нуклонной структуры в ядре — EMC-эффект. Феномен КДК проявляется на различных ядерных масштабах —

*М. Patsyuk*

## Inverse Kinematics Measurements of Short-Range Correlations in Nuclei

In March 2022, the first physics experiment was carried out at VBLHEP’s upgraded NICA synchrotrons with a carbon ion beam accelerated sequentially in the LINAC–Booster–Nuclotron chain. A high-energy beam with a momentum of 3.75 GeV/c per nucleon hit a liquid hydrogen target, and the BM@N spectrometer recorded a completely exclusive  $^{12}\text{C}(p,2pN)A-2^*$  hard scattering reaction.

The  $^{12}\text{C}(p,2pN)A-2^*$  reaction (Fig. 1) was chosen to study the so-called Short-Range Correlations (SRC) in the  $^{12}\text{C}$  nucleus. Such studies aim to understand the details of the structure and interactions in atomic nuclei, objects less than  $10^{-15}$  m in size. Neutrons and protons (nucleons) are components of the nucleus and are interconnected by one of the fundamental forces of nature — the strong interaction. Individual nucleons move inside the nucleus and interact with each other. From time to time, the nucleon finds a partner inside the nucleus and forms a pair with unique properties. Electron- and proton-scattering experiments

on nuclei [1] have demonstrated that such paired nucleons have momenta greater than the nuclear Fermi momentum. This is mainly due to the intense interaction of nucleons in close proximity. This phenomenon is commonly referred to as short-range correlations.

The measurements of these SRC pairs offer the potential to study cold dense nuclear matter, as in neutron stars, details of nuclear interaction at short distances, and, in addition, there is evidence that SRC pairs are related to nucleon-structure modification in nuclei (the EMC effect). SRC is a phenomenon that affects all nuclear scales — from astrophysics to particle physics, and is therefore of great scientific interest.

When an SRC pair breaks in a  $^{12}\text{C}(p,2pN)A-2^*$  reaction, the scattered protons escape with a large opening angle, while the A-2 fragment and the pair recoil nucleon move with almost the same beam momentum in the forward direction. Taking advantage of this so-called inverse

от астрофизики до физики частиц — и поэтому представляет большой научный интерес.

При разбивании КДК-пары в реакции  $^{12}\text{C}(p,2pN)A-2^*$  рассеянные протоны вылетают с большим углом друг относительно друга, тогда как фрагмент  $A-2$  и нуклон отдачи продолжают двигаться практически с начальным импульсом вдоль направления пучка. Благодаря тому, что эксперимент проходил в так называемой обратной кинематике, где есть возможность исследовать пучковую частицу, удалось одновременно измерить все частицы конечного состо-

яния. Установка BM@N, имеющая дипольный магнит с большим зазором, предоставляет идеальные условия для проведения подобных исследований.

Набор данных, проведенный в 2022 г., является вторым после пилотного эксперимента 2018 г., результаты которого были опубликованы в журнале «Nature Physics» [2]. Предыдущий эксперимент удалось улучшить, установив несколько новых детекторных систем, таких как зарядочувствительные временные сцинтилляционные счетчики для пучка, времяпролетная сцинтилляционная стенка и калориметр площадью

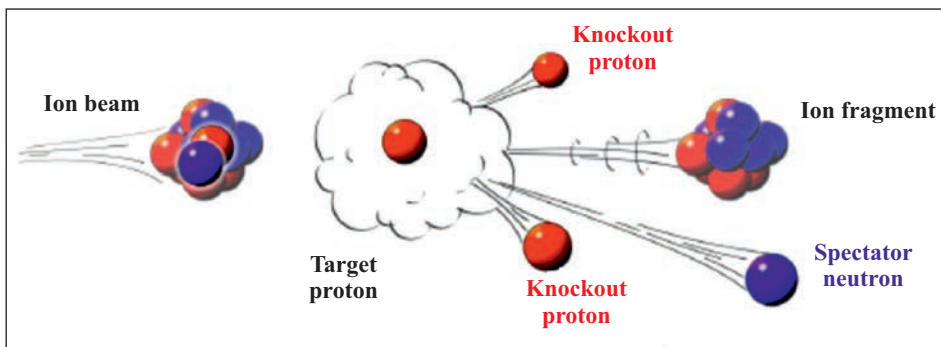


Рис. 1. Иллюстрация регистрируемого взаимодействия в эксперименте по исследованию КДК на установке BM@N

Fig. 1. Artistic view of the recorded interaction in the experiment on the study of SRC at BM@N

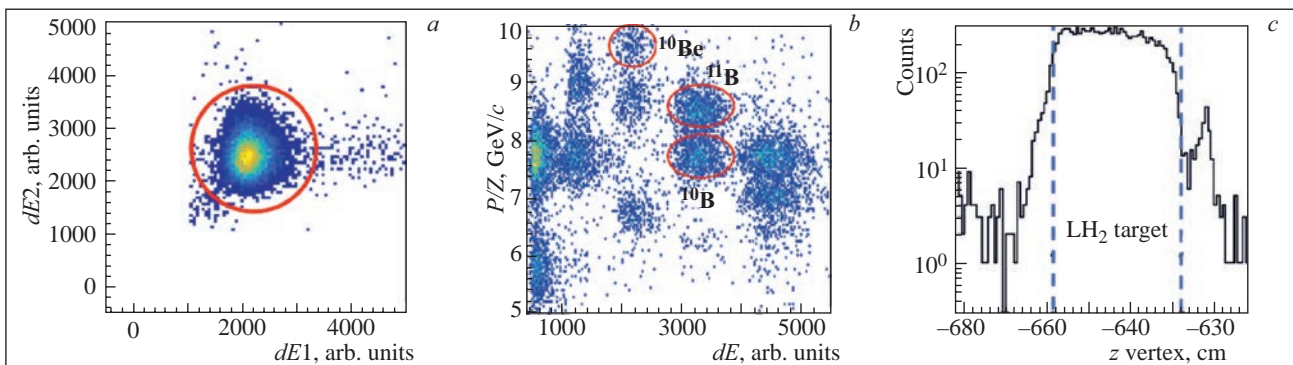


Рис. 2. Предварительные результаты анализа данных: *a*) сигнал с двух зарядочувствительных сцинтилляционных счетчиков частицы на входе в мишень, выделено пятно  $^{12}\text{C}$ ; *b*) отношение импульса к заряду для фрагмента ядра после взаимодействия как функция сигнала с зарядочувствительного сцинтилляционного счетчика, красным выделены ионы  $^{10}\text{B}$ ,  $^{11}\text{B}$  и  $^{10}\text{Be}$ ; *c*) реконструкция координаты  $z$  (вдоль пучка) вершины взаимодействия по трекам протонов конечного состояния, штриховыми линиями показаны границы резервуара с жидким водородом

Fig. 2. The preliminary results of data analysis: *a*) a signal from two charge-sensitive scintillation counters of a particle at the input to the target ( $^{12}\text{C}$  is highlighted in red); *b*) the momentum-to-charge ratio for the nucleus fragment after interaction as a function of the signal from the charge-sensitive scintillation counter ( $^{10}\text{B}$ ,  $^{11}\text{B}$  and  $^{10}\text{Be}$  ions are highlighted in red); *c*) reconstruction of the  $z$  coordinate (along the beam) of the interaction vertex from the tracks of the protons of the final state (dotted lines indicate the boundaries of the reservoir with liquid hydrogen)

kinematics experiment, where the beam particle is the object of interest, we were able to measure all the reaction particles in coincidence. At the BM@N facility with its large-gap dipole magnet, we found ideal environment for such measurements.

The data set of 2022 is the second one after the pilot experiment of 2018, the results of which were published in the journal “Nature Physics” [2]. The performance of

the previous experiment had been enhanced by installing several new detector systems, such as charge-sensitive in-beam scintillator detectors, a dedicated scintillator TOF and calorimeter system with an area of  $2 \times 1.5$  m and weight of more than 7500 kg, which were delivered from the USA and Europe and assembled at JINR (with the help of S. Anisimov), as well as a new cryogenic target (D. Klimansky).

$2 \times 1,5$  м и массой более 7,5 т, которые были присланы из США и Европы и собраны в ОИЯИ (при содействии С. Анисимова), а также новую криогенную мишень (Д. Климанский).

В феврале 2022 г. коллегам из ускорительного отделения ЛФВЭ удалось получить стабильную циркуляцию пучка ионов углерода в кольце нуклотрона. Пучок был успешно инжектирован и ускорен в цепочке LINAC–бустер–нуклотрон. После полного цикла ускорения пучок был выведен из кольца и транспортирован по каналу длиной 130 м в зону BM@N (настройка канала осуществлена П. А. Рукояткиным), где был направлен на жидководородную мишень. Большая часть пути пучка по каналу вывода проходила в вакууме. Впервые новая ускорительная цепочка, включающая бустер, успешно использована для вывода пучка на физический эксперимент. Зарегистрированный на установке углеродный пучок был высококачественным и относительно стабильным, а также не содержал примеси благодаря новому ионному источнику. Длительность вывода была обычно более 5 с при интенсивности  $5 \cdot 10^5$  с<sup>-1</sup>. С 7 по 13 марта были проведены калибровки, с 14 по 30 марта проводился набор данных. Весь эксперимент с начала подготовки до окончания набора данных успешно проведен объединенными усилиями

коллективом КДК, BM@N, ГиперНИС с привлечением более 80 человек. Наряду с колоссальными усилиями ускорительного отделения по настройке пучка хотелось бы также отметить исключительную работу коллег из коллаборации BM@N, которые обеспечили стабильное функционирование всех систем установки на протяжении всего периода набора данных.

В сеансе 2022 г. удалось набрать 185 млн физических триггеров и записать около 80 Тбайт данных. Сейчас ведутся работы по анализу набранных данных несколькими рабочими группами, включающими 5 аспирантов. Предварительные результаты анализа, представленные на рис. 2, указывают на высокое качество полученных экспериментальных данных.

Следующий сеанс набора экспериментальных данных по тематике КДК планируется провести на выведенном пучке нуклотрона в экспериментальной зоне установки ГиперНИС. В настоящее время ведется работа по подготовке совместного проекта объединенного эксперимента по тематикам ГиперНИС и КДК.

#### Список литературы

1. Subedi R. et al. // Science. 2008. V. 320. P. 1476; Hen O. et al. // Rev. Mod. Phys. 2017. V. 89. P. 045002.
2. Patsyuk M. et al. // Nat. Phys. 2021. V. 17. P. 693.

In February 2022, colleagues from the VBLHEP Accelerator Department succeeded in achieving a stable circulation of a carbon ion beam in the Nuclotron ring. The beam was successfully injected and accelerated from LINAC into the Booster and further to the Nuclotron. Following full acceleration, the carbon nuclei were extracted from the ring and transported along the 130 m beam channel up to the BM@N area (channel adjustment was carried out by P. Rukoyatkin), where they were directed at a liquid hydrogen target. The beam traveled most of the channel under vacuum conditions. For the first time, the new accelerator chain, including the new Booster ring, successfully delivered the beam for a physics experiment. With the new ion source, we obtained pure carbon beam, which was of high quality and relatively stable. The delivered spills were typically more than 5 s with an intensity of  $5 \cdot 10^5$  s<sup>-1</sup>. From 7 to 13 March, the experiment took calibration data with the beam. From 14 to 30 March, the team took data with the liquid hydrogen target. The whole experiment, from the preparation stage up to the data taking, was successfully conducted by joint efforts of SRC+BM@N+HyperNIS collaborations, involving more than 80 members. Along with the immense efforts

of the Accelerator Department to set up the beam, it is also worth mentioning the exceptional work of colleagues from BM@N, who ensured the stable functioning of all installation systems throughout the entire period of data taking.

During the 2022 run, we accumulated about 185 million physics triggers and recorded about 80 TB of data. These data are now being analyzed by different teams, including 5 PhD students. The preliminary results of the analysis presented in Fig. 2 demonstrate the high quality of the experimental data obtained.

The next run for the SRC data taking is planned to be held with the beam extracted from the Nuclotron in the experimental zone of the HyperNIS setup. Currently, a project is being prepared on a joint experiment on the topics of HyperNIS and SRC.

#### References

1. Subedi R. et al. // Science. 2008. V. 320. P. 1476; Hen O. et al. // Rev. Mod. Phys. 2017. V. 89. P. 045002.
2. Patsyuk M. et al. // Nat. Phys. 2021. V. 17. P. 693.