Письма в ЭЧАЯ. 2025. Т. 22, № 3(260). С. 469–474

РОЖДЕНИЕ АНТИПРОТОНОВ И НУКЛОННЫЕ КОРРЕЛЯЦИИ НА КОЛЛАЙДЕРЕ NICA

А. Б. Курепин [1], *В. С. Попов* [2], *Н. А. Курепин* [3], *Л. А. Якобнюк* [4]

Институт ядерных исследований РАН, Москва

Рассмотрена возможность проведения экспериментов по исследованию рождения антипротонов при столкновении ядер висмута с энергией $\sqrt{s_{NN}} = 8{,}4$ ГэВ на коллайдере NICA для обнаружения двух нуклонных корреляций. Выполнен расчет сечений рождения антипротонов для значений кинематических параметров, при которых наиболее эффективна регистрация антипротонов, рожденных на коррелированных нуклонах. Распределения по поперечному импульсу при отсутствии корреляций получены по программе UrQMD. Оценки сечений при параметрах Бьеркена больше единицы проведены по данным феноменологической партонной модели.

The possibility of experimental research on studying the production of antiprotons in collisions of bismuth nuclei with the energy $\sqrt{s_{NN}} = 8.4$ GeV at the NICA collider by detecting two nucleon correlations is considered. The calculation of the cross sections of antiproton production is performed for the values of kinematic parameters at which the registration of antiprotons produced on correlated nucleons is most effective. The distributions by transverse momentum in the absence of correlations are obtained using the UrQMD program. The estimates of the cross sections for Bjorken parameters greater than unity are carried out using the data of the phenomenological parton model.

PACS: 29.30.Kv; 29.40.Wk; 25.40.Fq

ВВЕДЕНИЕ

Поиск эффектов, связанных с возможным образованием кварк-глюонной материи при столкновении тяжелых ионов, проводится при различных энергиях, на разных ускорителях в различных кинематических условиях и на разных специализированных установках. При энергиях коллайдера NICA до $\sqrt{s_{NN}} = 11$ ГэВ предполагается образование состояний с большой барионной плотностью, что может привести к проявлению фазового перехода первого рода. Получение экспериментальных данных о рождении антипротонов в кинематических условиях, запрещенных для нуклон-нуклонных столкновений, но достижимых за счет коллективных корреляций в ядрах, дает информацию о начальных этапах образования кварк-глюонной плазмы.

[1] E-mail: kurepin@inr.ru
[2] E-mail: mr.vovapopow@yandex.ru
[3] E-mail: kurepin@theory.sinp.msu.ru
[4] E-mail: lenya20010711@gmail.com

Корреляции нуклонов на малых расстояниях (SRC) представляют собой очень важную тему в последнее время в ядерной физике. SRC может частично возникать из-за нуклон-нуклонных короткодействующих центральных взаимодействий. Прямым отражением SRC является импульсное распределение нуклонов в ядерной системе, изученное во многих работах [1–3]. В результате SRC появляются нуклоны с большим импульсом (НМТ) в импульсном распределении нуклонов. Некоторые исследования [4–6] показывают, что вклад НМТ в полную волновую функцию составляет около 20 %. В рассеянии электронов высоких энергий в экспериментах Лаборатории Джефферсона [7, 8] путем измерения относительного содержания нейтронно-протонных пар, нейтрон-нейтронных пар и протон-протонных пар в ядрах от C до Pb установлено, что нейтронно-протонные пары играют доминирующую роль в SRC, и их соотношение намного выше двух других. Недавно в ОИЯИ выполнен эксперимент с инверсной кинематикой реакции $(p, 2p)$ для исследования одночастичных состояний и SRC в хорошо изученном ядре ^{12}C [9]. Некоторые исследования [10, 11] показывают, что существуют зависимости от спина и изоспина в нуклон-нуклонном взаимодействии, которые являются очень важными для SRC.

К процессам, обусловленным корреляциями нуклонов на малых расстояниях в ядрах, относятся также реакции подпорогового рождения адронов, т. е. реакции рождения при энергиях ниже порога рождения при нуклон-нуклонном столкновении. Исследованию рождения адронов в протон-ядерных и ядро-ядерных столкновениях при энергиях ниже порога рождения в нуклон-нуклонном столкновении было посвящено значительное количество работ [12–15]. Такие данные были получены при промежуточных энергиях в несколько гигаэлектронвольт на установках ОИЯИ, BNL, KEK и GSI. Впервые рождение антипротонов в подпороговых процессах было измерено в эксперименте, проведенном на синхрофазотроне на пучке ядер углерода [12, 13]. Методика выделения антипротонов заключалась в использовании аннигиляционного детектора антипротонов. Во всех экспериментах получены значения сечений рождения, которые значительно превышают оценки, полученные при учете понижения порога рождения за счет фермиевского движения нуклонов в ядре. Этот эффект удалось объяснить проявлением скейлинга при параметрах Бьеркена больше единицы. Единое феноменологическое описание всех экспериментальных данных было получено в обобщенной партонной модели [16]. Модель основана на введении партонного параметра не только в ядре мишени (X), но и в налетающем ядре (Z).

Для проверки универсальности скейлинга необходимо проведение экспериментов при более высоких энергиях. В этом случае рождение частиц в кинематических условиях, запрещенных для нуклон-нуклонных столкновений, возможно также вследствие нуклон-нуклонных корреляций в ядрах. Для получения экспериментальных данных о корреляции нуклонов при столкновении ядер при высоких энергиях планируется измерить сечение рождения антипротонов в кинематических условиях, запрещенных для нуклон-нуклонных взаимодействий в протон-ядерных и ядро-ядерных столкновениях при энергиях около 11 ГэВ/нуклон в системе центра масс на пучке коллайдера NICA, что эквивалентно 60 ГэВ для фиксированной мишени. Первые данные по рождению пионов, каонов и антипротонов в кинематических условиях, запрещенных для нуклон-нуклонных столкновений, получены на пучке ядер углерода (19 ГэВ) на ускорителе У-70 в Протвино [17]. Измерения были выполнены при малых углах, что приводит к более высоким импульсам рожденных частиц и к меньшей точности опре-

деления импульса частиц. Настоящий эксперимент будет использовать уникальные спектрометрические возможности установки MPD на коллайдере NICA при энергиях в три раза больших и на пучке тяжелых ядер.

Исследование рождения частиц в кинематических условиях, запрещенных для нуклон-нуклонных столкновений, представляет собой новый метод изучения нуклонных корреляций в ядрах. Измерение рождения антипротонов имеет преимущество из-за лучшего выделения над фоновыми процессами. Детальное исследование короткодействующих корреляций в ядрах имеет большое значение для интерпретации центральных столкновений тяжелых ядер. Возможное увеличение сечения реакции рождения антипротонов в кинематических условиях, запрещенных для нуклон-нуклонных столкновений, подобное аномальному увеличению сечения рождения подпорогового рождения антипротонов при меньших энергиях, актуально для планирования экспериментов по поиску кварк-глюонной плазмы.

РОЖДЕНИЕ АНТИПРОТОНОВ В КИНЕМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ, ЗАПРЕЩЕННЫХ ДЛЯ НУКЛОН-НУКЛОННЫХ СТОЛКНОВЕНИЙ

В качестве основного детектора наиболее эффективно использование времяпроекционной камеры TPC установки MPD, которая должна начать работать в 2025 г. Выделение антипротонов, рожденных в кинематических условиях, запрещенных для нуклон-нуклонных столкновений, от антипротонов, рожденных в нуклон-нуклонных столкновениях, возможно по измерению поперечного импульса антипротонов.

TPC является основным трековым детектором центральной части MPD. Времяпроекционная камера предназначена для выполнения трехмерных регистраций треков заряженных частиц и измерения импульса для поперечного импульса больше 50 МэВ/c. Реконструкция трека основана на измерении времени дрейфа и цилиндрических координат $R{-}\varphi$ первичных ионизационных кластеров, созданных заряженной частицей, пересекающей TPC. Также важной задачей TPC является идентификация заряженных частиц по измерению их удельных потерь энергии на ионизацию (dE/dx) в газе. TPC представляет собой цилиндр с внутренним и внешним радиусами 27 и 140 см соответственно и длиной 340 см. Внутренний объем разделен на две половины центральным электродом, создающим однородное электрическое поле 140 В/см. Считывающие камеры состоят из пропорциональных камер на торцевых крышках. Магнит MPD предназначен для создания высокооднородного магнитного поля до 0,57 Тл любой полярности по оси z внутри объема TPC. Ионизационный заряд заряженных частиц дрейфует к торцевым крышкам и собирается считывающими камерами с выборкой по времени. Это позволяет получить трехмерную траекторию, а также измерить удельные потери энергии на ионизацию. Максимальная расчетная частота событий для TPC составляет 7 кГц.

Для идентификации антипротонов будет использована также времяпролетная система TOF. Система TOF MPD, разработанная для идентификации заряженных адронов при промежуточных импульсах, основана на технологии многозазорных резистивных пластинчатых камер (MRPC). Детектор предназначен для обеспечения измерения времени и координат с точностью ~ 80 пс и $\sim 0{,}5$ см соответственно. Будут использованы трехмодульные MRPC с 5 промежутками 200 мкм. В базовой конфи-

гурации детектор TOF представляет собой цилиндр, состоящий из 14 пластинчатых секторов. Сигналы считываются с обеих сторон полосы. Таким образом, общее количество MRPC детектора TOF составляет 280 и количество каналов считывающей электроники — 13 440.

Поскольку сечение исследуемого процесса мало, должны быть изучены все возможные фоновые реакции, в том числе рассеяние на остаточном газе в коллайдере. Для определения величины абсолютного сечения реакции планируются работы по разработке и созданию детектора светимости на основе метода Ван дер Меера [18, 19]. Метод позволяет определить эффективную площадь пересечения сталкивающихся пучков по измерению выхода частиц при сдвиге пучков в плоскости, перпендикулярной пучку.

Очевидно, что рождение антипротонов при столкновении тяжелых ядер в основном процессе многократных нуклон-нуклонных соударений имеет значительно большую вероятность, чем в кинематически запрещенном столкновении. Поэтому большое значение для проведения эксперимента по поиску нуклонных корреляций имеет выбор кинематических параметров, при которых разрешенный и запрещенный процессы существенно различаются. В работе [20] было показано, что наибольшее различие в величине поперечного импульса антипротонов, рожденных при столкновении ядер висмута в процессе нуклон-нуклонного столкновения и взаимодействия нуклона одного ядра с двухнуклонным кластером другого ядра, наблюдается при псевдобыстротах от 0 до -2.

В настоящей работе проведены оценки сечения процессов рождения антипротонов при столкновении ядер висмута с энергией $\sqrt{s_{NN}} = 8{,}4$ ГэВ в модели только нуклон-нуклонного столкновения и учетом нуклон-нуклонных корреляций. Для кинематически разрешенного рождения антипротонов при нуклон-нуклонном столкновении расчеты выполнены по программе UrQMD, которая основана на рассмотрении адронного каскада с перерассеянием адронов с бинарными столкновениями при прохождении ядерной материи с учетом возбуждения цветных струн.

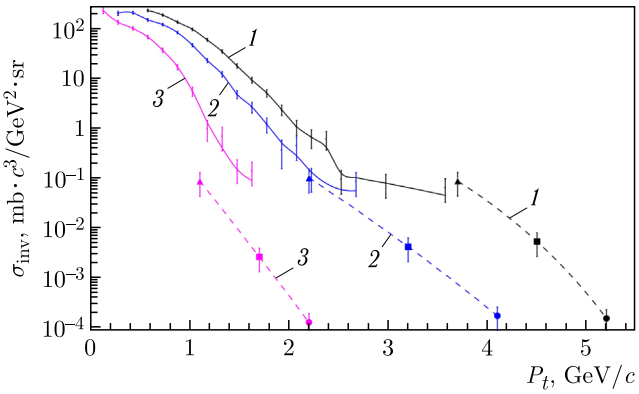
Для оценки сечения процесса рождения антипротонов при столкновении нуклона одного ядра с коррелированной парой нуклонов другого ядра использована зависимость сечения от обобщенного параметра Бьеркена X по данным феноменологической партонной модели [16, 21]:

$$X = \frac{E_i E_a - p_i p_a \cos\theta + m^2}{E_i^2 + p_i^2 - E_i E_a - p_i p_a \cos\theta - 2m^2}, \tag{1}$$

где E_i, p_i, m — энергия, импульс и масса нуклона в сталкивающихся ядрах; E_a, p_a, θ — энергия, импульс и угол вылета рожденного антипротона.

Анализ данных нескольких экспериментов по подпороговому рождению антипротонов в диапазоне энергий несколько ГэВ/нуклон для ядер разного атомного веса (A_1 и A_2) показал, что лоренц-инвариантное сечение при значениях X от 1 до 3 может быть аппроксимировано эмпирической зависимостью (2) при точности описания экспериментальных данных около 50 % при значениях сечений, отличающихся на 5 порядков величины [16]:

$$(A_1 A_2)^{-0{,}43} E \frac{d^3\sigma}{dp^3}\ [\text{мб} \cdot \text{ГэВ}^{-2} \cdot c^3 \cdot \text{ср}^{-1}] = 0{,}57 \exp(-X/0{,}158). \tag{2}$$



(Рисунок цветной в электронной версии). Зависимость инвариантного сечения рождения антипротонов при столкновении ядер висмута с энергией $\sqrt{s_{NN}} = 8{,}4$ ГэВ от поперечного импульса антипротона при псевдобыстротах $\eta = -0{,}1$ (черная линия, *1*), $\eta = -1{,}1$ (синяя линия, *2*), $\eta = -1{,}9$ (фиолетовая линия, *3*). Сплошные линии — результаты расчета по программе UrQMD, штриховые — по формуле (2), где треугольники — $X = 1$, квадраты — $X = 1{,}5$, кружки — $X = 2$

Результаты расчетов инвариантных сечений в диапазоне псевдобыстрот, где наблюдается наибольшее различие значений поперечных импульсов антипротонов, рожденных при столкновении ядер висмута в процессе нуклон-нуклонного столкновения и взаимодействия нуклона одного ядра с двухнуклонным кластером другого ядра, приведены на рисунке.

Для значений псевдобыстрот $\eta = -0{,}1$ и $\eta = -1{,}1$ величины сечений, полученные по программе UrQMD и по эмпирической зависимости (2) хорошо согласуются при значении $X = 1$, т. е. для нуклон-нуклонного механизма рождения антипротонов. При значении псевдобыстроты $\eta = -1{,}9$ наблюдается заметное расхождение, которое, по-видимому, связано с тем, что работы по подпороговому рождению антипротонов выполнялись в основном при небольших значениях псевдобыстрот.

При светимости 10^{27} см$^{-2}\cdot$с$^{-1}$ в полном телесном угле детектора TPC оценка скорости счета рождения антипротонов при двухчастичных корреляциях нуклонов составляет около 10 событий в час при значениях псевдобыстроты меньше единицы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены оценки сечения рождения антипротонов при столкновении ядер висмута на установке MPD/NICA в кинематических условиях, запрещенных для рождения антипротонов при нуклон-нуклонном взаимодействии. Для расчета использована зависимость от параметра Бьеркена $X \geqslant 1$, полученная по данным скейлинга, обнаруженного в экспериментах по подпороговому рождению антипротонов, выполненных ранее на синхрофазотроне в ОИЯИ и в других лабораториях. Показано, что при параметре $X = 1$, т. е. при нуклон-нуклонном взаимодействии, значение сечения, полученного по зависимости скейлинга, согласуется с результатами расчета по программе UrQMD при малых и средних значениях псевдобыстроты. Выполнены оценки

скорости счета рождения антипротонов при рождении на короткодействующих корреляциях двух нуклонов при планируемой светимости коллайдера NICA.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-22-00077, https://rscf.ru/project/23-22-00077/.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Pandharipande V. R., Sick I., deWitt Huberts P. K. A.* // Rev. Mod. Phys. 1997. V. 69. P. 981.
2. *Egiyan K. S. et al. (CLAS Collab.)* // Phys. Rev. C. 2003. V. 68. P. 014313; Phys. Rev. Lett. 2006. V. 96. P. 082501.
3. *Frankfurt L., Sargsian M., Strikman M.* // Intern. J. Mod. Phys. A. 2008. V. 23. P. 2991.
4. *Hen O. et al. (CLAS Collab.)* // Science. 2014. V. 346. P. 614.
5. *Ciofi degli Atti C.* // Phys. Rep. 2015. V. 590. P. 1.
6. *Hen O., Miller G. A., Piasetzky E., Weinstein L. B.* // Rev. Mod. Phys. 2017. V. 89. P. 045002.
7. *Subedi R., Shneor R., Monaghan P., Anderson B. D., Aniol K., Annand J., Arrington J., Benaoum H.* // Science. 2008. V. 320. 1476.
8. *Duer M. et al. (CLAS Collab.)* // Phys. Rev. Lett. 2019. V. 122. P. 172502.
9. *Patsyuk M. et al. (BM@N Collab.)* // Nature Phys. 2021. V. 17. P. 693.
10. *West J. R., Brodsky S. J., de Teramond G. F., Schmidt I.* // Phys. Lett. B. 2020. V. 805. P. 135423.
11. *Guo W. M., Li B. A., Yong G. C.* // Phys. Rev. C. 2021. V. 104. P. 034603.
12. *Baldin A. A., Gavrilov Yu. K., Guber F. F., Krasnov V. A., Kurepin A. B., Pantuev V. S., Prokhvitilov M. A., Razin V. I., Reshetin A. I., Filippov S. N.* // JETP Lett. 1988. V. 48. P. 137–140.
13. *Baldin A. A., Gavrilov Yu. K., Guber F. F., Kurepin A. B., Pantuev V. S., Prokhvitilov M. A., Razin V. I., Reshetin A. I., Filippov S. N.* // Nucl. Phys. A. 1990. V. 519. P. 407–411.
14. *Carroll J. B., Carlson S., Gordon J., Hallman T., Igo G., Kirk K., Krebs G. F., Lindstrom P., McMahan M. A., Perez-Mendez V., Shor A., Trentalange S., Wang Z. F.* // Phys. Rev. Lett. 1989. V. 62. P. 1829–1832.
15. *Chiba J., Ashery D., Kimura K., Kiselev Yu. T., Koda S., Miyano K., Murakami T., Nagae T., Nakai Y., Nomachi M., Sawada S., Sekimoto M., Suzuki T., Tanaka K. H., Vlasov M. K., Yoshimura Y.* // Nucl. Phys. A. 1993. V. 553. P. 771–774.
16. *Kurepin A. B., Shileev K. A., Topilskaya N. S.* // Genshiryoku Kenkyu (Tokyo). 1997. V. 41. P. 177–182.
17. *Афонин А. Г., Боголюбский М. Ю., Волков А. А., Елумахов Д. К., Запольский В. Н., Иванилов А. А., Калинин А. Ю., Криницын А. Н., Кулагин Н. В., Крышкин В. И., Паталаха Д. И., Романишин К. А., Скворцов В. В., Талов В. В., Турчанович Л. К., Чесноков Ю. А.* // ЯФ. 2020. Т. 83, № 2. С. 140–148.
18. *Игамкулов З., Кручеру М., Курепин А. Б., Литвиненко А. Г., Литвиненко Е. И., Переседов В. Ф.* // Письма в ЭЧАЯ. 2019. Т. 16, № 6. С. 535–551.
19. *Avdeev S. P., Busin S. G., Buryakov M. G., Golovatyuk V. M., Malakhov A. I., Milnov G. D., Kurepin A. B., Litvinenko A.G., Litvinenko E. I.* // Phys. At. Nucl. 2023. V. 86, No. 5. P. 680–691.
20. *Kurepin A. B., Lavrov B. O.* // Phys. At. Nucl. 2022. V. 85, No. 6. P. 1004–1006.
21. *Kurepin A.* // J. Mod. Phys. 2021. V. 12. P. 433–439.

Получено 23 октября 2024 г.