

Особенности рождения антипротонов с большими поперечными импульсами под углом 40° в $p + A$ взаимодействиях при энергии пучка 50 ГэВ

Н. Н. Антонов⁺, В. А. Виктор⁺, В. А. Гапиенко⁺¹⁾, Г. С. Гапиенко⁺, И. В. Лобов⁺, Ф. Н. Новоскольников⁺, А. Ф. Прудкогляд⁺, А. А. Семак⁺, И. П. Солодовников⁺, В. И. Терехов⁺, М. Н. Уханов⁺, С. С. Шиманский*

⁺ Институт физики высоких энергий, НИЦ “Курчатовский институт”, 142281 Протвино, Россия

*Объединенный институт ядерных исследований, 141980 Дубна, Россия

Поступила в редакцию 27 сентября 2023 г.

После переработки 15 ноября 2023 г.

Принята к публикации 22 ноября 2023 г.

Представлены данные по рождению антипротонов под углом 40° (лаб. сист.) во взаимодействиях протонов с энергией 50 ГэВ с четырьмя ядерными мишенями: С, Al, Cu и W. Инвариантные сечения измерены при поперечных импульсах вплоть до $p_T \approx 2.6$ ГэВ/с. Анализ импульсных спектров показал, что в процессе образования антипротонов участвуют многонуклонные (многокварковые) конфигурации внутри ядра. Результаты получены в эксперименте СПИН (ИФВЭ, Протвино).

DOI: 10.31857/S1234567824010014, EDN: sanlaf

При анализе данных с космических аппаратов выяснилось, что точность измерения потоков антипротонов в космических лучах значительно выше точности расчетов, базирующихся на результатах ускорительных экспериментов. Желательность получения новых данных по рождению антипротонов в $p + A$ столкновениях в широком диапазоне энергий, в том числе и при $\sqrt{S} \sim 10$ ГэВ, была отмечена в [1].

В работе представлены данные эксперимента СПИН по образованию антипротонов в $p + A$ взаимодействиях при энергии пучка 50 ГэВ. Основной задачей эксперимента является детальное изучение процессов рождения частиц с большими поперечными импульсами ($p_T > 1$ ГэВ/с) в предкумулятивной и кумулятивной областях. Под кумулятивной областью понимается область значений импульсов, запрещенных по кинематике для взаимодействий с участием свободных нуклонов, а сами частицы, рожденные в кумулятивной области, принято называть кумулятивными. Выбранная кинематическая область дает возможность [2, 3] наблюдать процессы жесткого взаимодействия налетающей частицы с многонуклонными (многокварковыми) компонентами в ядерной материи при минимальном вкладе вторичных перерасеяний.

Исследование проводится с помощью одноплечевого, узкоапертурного магнитного спектрометра, ко-

торый позволяет измерять инклюзивные спектры заряженных частиц, вылетающих под фиксированным углом при облучении тонких ядерных мишеней высокоинтенсивными пучками протонов или ядер углерода, выведенными из ускорителя У70. Схему установки и детали эксперимента можно найти в [4].

Настоящие результаты получены при регистрации частиц, вылетающих из мишеней под углом 40° (лаб. сист.) по отношению к направлению пучка, что соответствует $\sim 150^\circ$ в с.д.м. налетающего протона и покоящегося нуклона ядра. Измерения проводились с использованием выведенного из ускорителя У70 протонного пучка с интенсивностью $\sim 2 \cdot 10^{12}$ протонов/цикл при длительности вывода ~ 1 с. Диапазон импульсов, доступный для анализа спектров антипротонов, составлял 1–4 ГэВ/с. Ширина захвата импульсов спектрометром в этом диапазоне составляла $\Delta p/p \approx 2\%$. Идентификация заряженных частиц в эксперименте проводится с помощью измерения времени пролета. Дополнительно используются данные с порогового черенковского детектора, что позволяет проводить разделение заряженных π/K мезонов. Максимальное значение измеренного поперечного импульса было $p_T = 2.57$ ГэВ/с.

Инвариантные сечения рождения антипротонов показаны на рис. 1 для четырех разных мишеней: С, Al, Cu и W. Для описания инклюзивных спектров частиц в кумулятивной области и в области с большими p_T В. С. Ставинский предложил [5] использовать кинематические переменные квазибинар-

¹⁾e-mail: Vladimir.Gapienko@ihep.ru

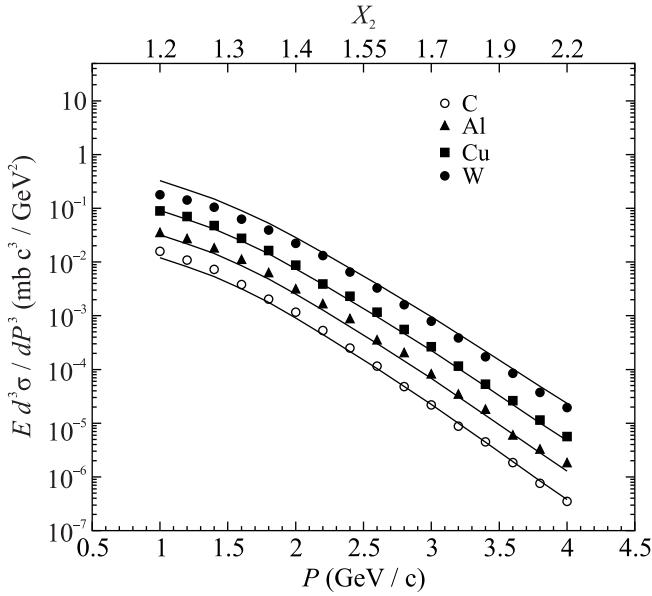


Рис. 1. Инвариантные сечения рождения антипротона как функции импульса. На верхней горизонтальной оси приведены расчетные значения переменной X_2 . Кривые представляют результат расчетов согласно (1)

ных подпроцессов, в которых участвуют части сталкивающихся объектов (аналогично, как это делается в партонной модели). Для этого он ввел переменные X_1 и X_2 (“переменные Ставинского”), описывающие участвующие в столкновениях доли от первоначальных четырех-импульсов, соответственно, налетающей частицы и мишени. Значения “переменной Ставинского” X_2 , вычисленные согласно [5, 6], приведены на верхней горизонтальной оси рис. 1. В нашем случае величина X_2 является минимальной массой мишени (измеренной в единицах массы нуклона), необходимой для рождения антипротона под углом 40° . Как следует из приводимых значений X_2 , во всем диапазоне доступных импульсов процесс рождения антипротона идет с участием мишени с массой большей массы нуклона.

В предыдущих работах [8, 9], где анализировались данные эксперимента СПИН, по образованию заряженных частиц с большими p_T в пред- и кумулятивной областях в $p + A$ и $C + A$ взаимодействиях, было показано, что инвариантные сечения могут быть описаны параметризацией [6, 7]:

$$E \frac{d^3 \sigma}{dp^3} = C_1 \cdot A_1^{\alpha(X_1)} \cdot A_2^{\alpha(X_2)} \cdot \exp(\Pi/C_2), \quad (1)$$

где A_1 и A_2 атомные массы сталкивающихся ядер, C_1 и C_2 – константы, Π -безразмерная скейлинговая переменная, $\Pi = \sqrt{S_{\min}}/2m_N$, $\sqrt{S_{\min}}$ – минимальная инвариантная энергия квазибинарного подпро-

цесса, m_N – масса нуклона, $\alpha(X)$ – функция от X_1 или X_2 . Аппроксимация измеренных в эксперименте СПИН спектров π , d и t при $p_T > 1$ ГэВ/с выражением (1) выполнима [8, 9], если A -зависимость брать в виде $\alpha(X) = (K + X)/3$, где величина K определялась как $2.45 + 0.05$. Результат применения выражения (1) при степенной зависимости, взятой как $\alpha(X) = (2.4 + X_2)/3$, представлен на рис. 1 в виде кривых с параметром наклона $C_2 = 0.160$. Кривые хорошо описывают точки в широком интервале импульсов. Однако переменные X_1 и X_2 не могут дать абсолютно точное описание кинематики квазибинарного рассеяния, поскольку в процедуре [5, 6] никак не учитываются структурные функции налетающей частицы и частицы мишени. Возможно с этим связано наличие разницы между расчетом и экспериментальными данными в области импульсов $p \approx 1$ ГэВ/с.

В нашей предыдущей работе [10] для 4-х мишеней были представлены величины отношения \bar{p}/π^- в зависимости от поперечного импульса. Из этих данных, воспроизведенных здесь на рис. 2, был сделан

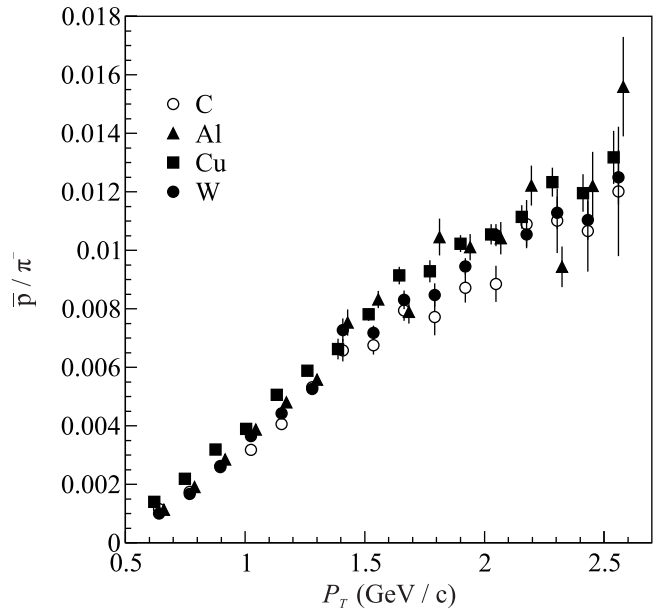


Рис. 2. Взят из [10]. Отношение \bar{p}/π^- как функция поперечного импульса для 4-х мишеней

вывод о тождественности \bar{p}/π^- для всех использованных ядер. Однако, более детальное рассмотрение позволяет увидеть возможный эффект от вторичных взаимодействий. На рисунке 3 для разных импульсов приведены двойные отношения $(\bar{p}/\pi^-)_w/(\bar{p}/\pi^-)_c$ и $(\bar{p}/\pi^-)_{Al}/(\bar{p}/\pi^-)_c$, где индексами “w”, “Al” и “c” обозначены мишени, для которых измерялось \bar{p}/π^- отношение. Точки для всех перечисленных выше двойных отношений лежат на рис. 3 систематически вы-

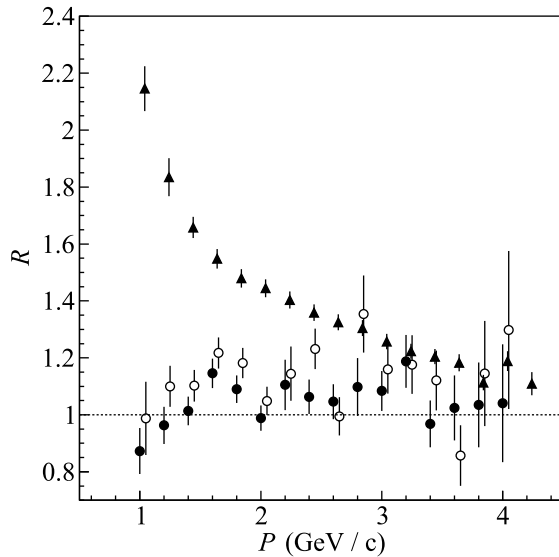


Рис. 3. Двойные отношения в зависимости от импульса частиц: черными кружками приведено $(\bar{p}/\pi^-)_w/(\bar{p}/\pi^-)_c$, светлыми кружками $(\bar{p}/\pi^-)_{Al}/(\bar{p}/\pi^-)_c$, отношение $(p/\pi^+)_w/(p/\pi^+)_c$ [11] показано треугольниками

ше единицы, что может свидетельствовать о наличии вторичных взаимодействий. Приведенное на этом же рисунке для сравнения двойное отношение $(p/\pi^+)_w/(p/\pi^+)_c$, полученное [11] нами из спектров протонов и π^+ мезонов, подчеркивает разницу между механизмами рождения протонов и антипротонов.

В работах [12, 13] исследовалось образование частиц с импульсами до 3 ГэВ/с под нулевым углом к направлению пучка при взаимодействии с различными ядрами пучка протонов с энергией 70 ГэВ ускорителя У70. Если для p/π^+ наблюдалась сильная зависимость от атомного веса мишени, то неожиданным результатом было обнаружение одинаковой А-зависимости для выходов как для \bar{p} , так и для π^- частиц, а именно $\sim A^{2/3}$. Это позволило сделать вывод [13] о слабом поглощении антипротонов ядром. Вывод о малом вкладе вторичных процессов был получен и в работе [14] при исследовании рождения антипротонов под малыми углами в протон-ядерных столкновениях при энергии протонного пучка с энергией 10 ГэВ.

На рисунке 4 измеренные нами величины \bar{p}/π^- приведены для разных p_T совместно с данными [15] эксперимента FODS ($\sqrt{S} = 11.5$ ГэВ) и данными [16] эксперимента на ускорителе FNAL ($\sqrt{S} = 23.8$ ГэВ). Для каждого из перечисленных экспериментов на рисунке 4 показаны результаты, полученные с двумя разными мишенями. Отличием представленного нами распределения от данных из [15] и [16] яв-

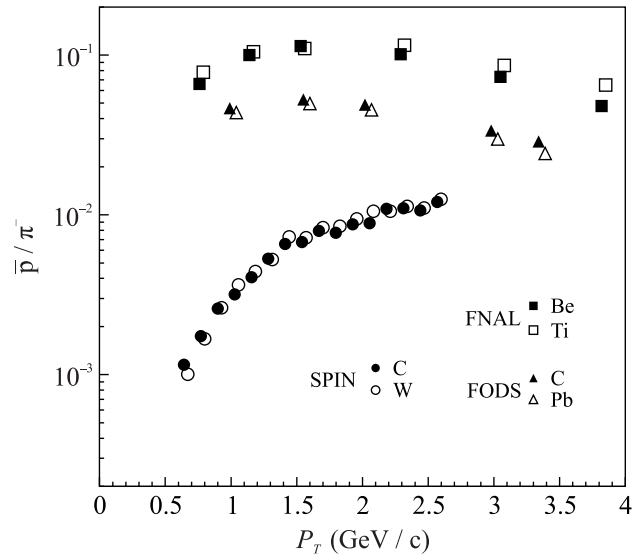


Рис. 4. Отношение (\bar{p}/π^-) как функция p_T . Данные для FODS взяты из [15], данные эксперимента FNAL позаимствованы из [16]

ляется отсутствие “перегиба” при $p_T \sim 1.5$ ГэВ/с. Отметим, что данные работ [15] и [16] получены под углами близкими к 90° в с.ц.м. и без выхода за область импульсов, разрешенных в кинематике нуклон-нуклонных взаимодействий.

Основные выводы. Выход антипротонов, вылетающих под углом 40° (лаб. сист.) из C, Al, Cu и W мишеней, имеет ту же самую сильную зависимость от массы ядра, что была ранее нами обнаружена [8, 9] для других частиц, рождающихся с $p_T > 1$ ГэВ/с под углами 35° и 40° после облучения ядерных мишеней протонами с энергией 50 ГэВ. Это отличается от степенной зависимости $\sim A^{2/3}$, установленной [12, 13] в измерениях на У70 при регистрации антипротонов под “нулевым” углом к направлению пучка. Анализ инклюзивных спектров указывает на механизм образования антипротонов с участием многокварковой (многонуклонной) компоненты ядра. Отношение \bar{p}/π^- , измеренное для разных ядер, свидетельствует о наличии искажающего влияния вторичных взаимодействий.

Авторы признательны руководству НИЦ “Курчатовский институт” – ИФВЭ за поддержку данного исследования, персоналу отделения ускорителя и отделения пучков за эффективную работу. Авторы благодарят Головина А.Т. за неоценимую техническую помощь, оказываемую при подготовке установки СПИН к проведению измерений.

Финансирование работы. Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Института физики высоких энергий, НИЦ “Курчатовский ин-

ститут”. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Конфликт интересов. Конфликт интересов отсутствует.

1. M. Korsmeier, F. Donato, and M. Di Mauro, *Phys. Rev. D* **97**, 103019 (2018).
2. А. В. Ефремов, В. Т. Ким, Г. И. Лыкасов, *ЯФ* **44**, 241 (1986).
3. Л. П. Каптарь, Б. Л. Резник, А. И. Титов, *ЯФ* **42**, 777 (1985).
4. Н. Н. Антонов, В. А. Виктор, В. А. Гапиенко, Г. С. Гапиенко, В. Н. Гресь, А. Ф. Прудкогляд, В. А. Романовский, А. А. Семак, И. П. Солодовников, В. И. Терехов, М. Н. Уханов, (эксперимент СПИН), *ПТЭ* **5**, 43 (2022).
5. В. С. Ставинский, *Краткие сообщения ОИЯИ* **18**, 5(1986).
6. А. А. Балдин, *Краткие сообщения ОИЯИ* **3**(54), 27 (1992).
7. А. А. Балдин, Е. Н. Кладницкая, О. В. Рогачевский, *Краткие сообщения ОИЯИ* **2**(94), 20 (1999).
8. В. В. Аммосов, Н. Н. Антонов, В. А. Виктор и др. (эксперимент СПИН), *ЯФ и ИНЖ.* **4**(9–10), 773 (2013).
9. Н. Н. Антонов, А. А. Балдин, В. А. Виктор (эксперимент СПИН), *Письма в ЖЭТФ* **111**(5), 291 (2020).
10. Н. Н. Антонов, В. А. Гапиенко, Г. С. Гапиенко, В. Н. Гресь, М. А. Илюшин, А. Ф. Прудкогляд, В. А. Романовский, А. А. Семак, И. П. Солодовников, В. И. Терехов, М. Н. Уханов, В. А. Виктор, (эксперимент СПИН), *ЭЧАЯ* **53**(2), 329 (2022).
11. Н. Н. Антонов, А. А. Балдин, В. А. Виктор и др. (эксперимент СПИН), *Письма в ЖЭТФ* **108**(12), 799 (2018).
12. Л. М. Барков, В. Г. Васильченко, Н. К. Вишневецкий, В. С. Дацко, Ю. М. Иванов, В. И. Котов, В. Г. Лапшин, П. К. Лебедев, А. И. Мысник, С. Б. Нурушев, Р. А. Рзаев, А. И. Ронжин, В. И. Рыкалин, В. П. Сахаров, *Ядерная Физика* **35**(5), 1186 (1982).
13. Л. М. Барков, М. С. Золотарев, В. И. Котов, П. К. Лебедев, Л. А. Макарьина, А. П. Мишакова, В. С. Охалкин, Р. А. Рзаев, В. П. Сахаров, В. П. Смахтин, С. С. Шиманский, *Ядерная Физика* **37**(5), 1232 (1983).
14. А. О. Вайсенберг, Ю. Б. Лепихин, В. А. Смирнитский, Ю. М. Шабельский, В. А. Шейнкман, *Письма ЖЭТФ* **29**(11), 719 (1979).
15. V. V. Abramov, V. Yu. Baldin, A. F. Buzulutskov et al. (FODS experiment), *Z. Phys. C* **24**, 205 (1984).
16. J. W. Cronin, H. J. Frisch, M. J. Shochet, J. P. Boymond, R. A. Piroue, and R. L. Sumner, *Phys. Rev. D* **11**, 3105 (1975).