ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА, 2023, том 86, № 1, с. 240–244

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ И ПОЛЯ

СРАВНЕНИЕ НЕКОТОРЫХ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОТОНОВ В СТОЛКНОВЕНИЯХ n^{12}C И p^{12}C ПРИ 4.2 ГэВ/c

© 2023 г. Р. Н. Бекмирзаев[1)*], Х. К. Олимов[2)]**

Поступила в редакцию 16.09.2022 г.; после доработки 16.09.2022 г.; принята к публикации 16.09.2022 г.

Приведены результаты сравнительного анализа средних значений различных кинематических характеристик протонов в столкновениях n^{12}C и p^{12}C при 4.2 ГэВ/c. Обнаружено различие в средних значениях полного импульса протонов в рассматриваемых столкновениях. Обнаружено совпадение инклюзивных спектров протонов по быстроте в области фрагментации мишени.

DOI: 10.31857/S0044002723010117, **EDN:** RALQUC

1. ВВЕДЕНИЕ

Взаимодействие протонов высоких энергий с нуклонами и ядрами достаточно хорошо изучено экспериментально в широком диапазоне первичных энергий, а из-за трудностей получения монохроматических пучков нейтральных частиц экспериментальная информация о столкновениях нейтронов с ядрами (nA), полученная в условиях 4π-геометрии, очень редка [1–7] и основана на небольшой статистике. Поэтому получение экспериментальных данных о nA-столкновениях и сравнение их с данными о pA-взаимодействиях при той же энергии и для того же ядра-мишени представляет значительный интерес. Эта работа продолжает наши исследования [1, 3, 4, 6] и посвящена сравнительному анализу различных кинематических характеристик протонов в столкновениях n^{12}C и p^{12}C при импульсе 4.2 ГэВ/c.

Экспериментальный материал был получен с помощью двухметровой пузырьковой пропановой камеры Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований (Дубна, Россия), облученной пучками протонов, ядер дейтронов ($d = {}^2$H) и гелия-4 при импульсе 4.2 ГэВ/c на нуклон, на синхрофазотроне в Дубне и состоит из 6736 столкновений p^{12}C, 7071 d^{12}C и 11 974 ^{4}He^{12}C. Общая статистика событий n^{12}C, выбранных из столкновений d^{12}C и ^{4}He^{12}C, составляет 2798 [8]. Отрицательные пионы визуально идентифицировались только по знаку заряда. Среди них примесь неидентифицируемых электронов не превышает 5%, а отрицательные странные частицы $\approx$1% [9]. Нижняя граница импульса, начиная с которой уверенно идентифицируются заряженные пионы, составляет 55 МэВ/c, а для протонов — 140 МэВ/c. В пузырьковой камере пропана протоны и π^+-мезоны эффективно визуально идентифицируются в области импульсов $p \leqslant$ $\leqslant$ 750 МэВ/c. Методологические особенности эксперимента и подробные данные по поправкам на потерю вторичных заряженных частиц обсуждаются в [8, 10–12].

2. ИМПУЛЬСНЫЕ И УГЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОТОНОВ

В табл. 1 показаны средние значения полного и поперечного импульсов протонов с их средними углами вылета и быстротой в столкновениях n^{12}C и p^{12}C отдельно для событий с отрицательными пионами и без них в конечном состоянии реакции.

Чтобы понять разницу в среднем импульсе протонов, наблюдаемую экспериментально, давайте рассмотрим возможные элементарные реакции, которые могут приводить к увеличению или уменьшению среднего импульса протонов в каждом отдельном событии столкновения:

реакции на столкновения n^{12}C (а),

реакции на столкновения p^{12}C (б)

$$nn \to nn + x, \tag{1а}$$

$$pp \to pp + x, \tag{1б}$$

$$nn \to np\pi^- + x, \tag{2а}$$

$$pp \to pn\pi^+ + x, \tag{2б}$$

[1)]Джизакский государственный педагогический университет, Джизак, Узбекистан.

[2)]Физико-технический институт АН Республики Узбекистан, Ташкент, Узбекистан.

[*]E-mail: bekmirzaev@mail.ru

[**]E-mail: olimov@uzsci.net

Таблица 1. Средние значения полных, поперечных импульсов, углов вылета и быстроты протонов в столкновениях n^{12}C и p^{12}C в событиях с отрицательными пионами и без них

Ценность	Тип столкновения					
	n^{12}C			p^{12}C		
	$n(\pi^-)=0$	$n(\pi^-)\geqslant 1$	Все	$n(\pi^-)=0$	$n(\pi^-)\geqslant 1$	Все
$\langle P\rangle$, ГэВ/c	0.79 ± 0.02	0.86 ± 0.02	0.83 ± 0.01	1.02 ± 0.01	0.82 ± 0.01	0.96 ± 0.01
$\langle P_\perp\rangle$, МэВ/c	327 ± 5	337 ± 4	332 ± 3	370 ± 3	353 ± 3	365 ± 2
$\langle\theta\rangle$, град.	58.1 ± 0.9	49.5 ± 0.6	53.5 ± 0.4	51.3 ± 0.4	50.5 ± 0.5	51.1 ± 0.3
Y	0.41 ± 0.01	0.51 ± 0.01	0.46 ± 0.01	0.56 ± 0.01	0.48 ± 0.01	0.53 ± 0.01

$$nn\to p\pi^- n+x, \tag{3а}$$

$$pp\to n\pi^+ p+x, \tag{3б}$$

$$nn\to p\pi^- p\pi^- +x, \tag{4а}$$

$$pp\to n\pi^+ n\pi^+ +x, \tag{4б}$$

$$np\to np+x, \tag{5а}$$

$$pn\to pn+x, \tag{5б}$$

$$np\to pn+x, \tag{6а}$$

$$pn\to np+x, \tag{6б}$$

$$np\to p\pi^- p+x, \tag{7а}$$

$$pn\to n\pi^+ n+x, \tag{7б}$$

$$np\to p\pi^- n\pi^+ +x, \tag{8а}$$

$$pn\to n\pi^+ p\pi^- +x, \tag{8б}$$

$$np\to nn\pi^+ +x, \tag{9а}$$

$$pn\to pp\pi^- +x, \tag{9б}$$

где x означает “что угодно”, разрешенное законами сохранения электрических и барионных зарядов. Отметим, что указанные выше элементарные реакции построчно сопряжены, т.е. реализуются с равной вероятностью. На основании изотопической инвариантности сильных взаимодействий можно получить следующие равенства. Вероятность реакции (1) W_1 равна вероятности реакции (5а) (W_5), т.е. $W_1=W_5$, вероятности реализации реакций (2а), (3а), (7а) и (9а) также равны друг другу, т.е. $W_2=W_3=W_7=W_9$. Такая же линия равенств может быть получена для реакций p^{12}C-столкновений.

В столкновениях p^{12}C протоны конечного состояния состоят в основном из первичного протона и протонов, выбитых из ядра-мишени — как в реакциях (1б), (2б), (3б), (5б), (6б), тогда как в столкновениях n^{12}C значительная их часть состоит из протонов, выбитых из ядра-мишени (реакция (5а)), и протонов, образующихся в процессах перезарядки между нейтроном-снарядом и протоном-мишенью (реакция (6а)). Из табл. 1 видно, что среднее значение полного импульса протонов имеет наибольшее значение, как и ожидалось, в столкновениях p^{12}C при отсутствии в событии отрицательных пионов.

Среднее значение полного импульса протонов, образующихся в столкновениях n^{12}C с $n(\pi^-)=0$, намного меньше, чем в столкновениях p^{12}C, поскольку большинство протонов в этом случае исходит из мишени. В случае, когда в событии образуются один или несколько отрицательных пионов, среднее значение полного импульса протонов в столкновениях n^{12}C больше, чем во взаимодействиях p^{12}C. Очевидно, это наблюдение можно объяснить вкладом протонов от процессов неупругой перезарядки исходного нейтрона в протон и π^--мезон. В столкновениях p^{12}C реакции (8б) и (9б) способствуют образованию протонов, и поскольку вклад в протоны от нейтрона ядра-мишени значительно выше, чем от снаряда, средний импульс протонов здесь ниже чем протонов, образующихся при столкновениях n^{12}C. Интересно отметить, что среднее значение полного импульса протонов в столкновениях n^{12}C с $n(\pi^-)=0$ близко к таковому при взаимодействии p^{12}C с $nn(\pi^-)\geqslant 1$. Как упоминалось выше, в обоих случаях основной вклад в образование протонов вносят нейтроны ядра-мишени, что приводит к нивелированию разницы в средних значениях полного импульса.

Таблица 1 также показывает, что средние значения поперечного импульса протонов больше в столкновениях p^{12}C, чем в столкновениях n^{12}C, независимо от наличия в событии отрицательных

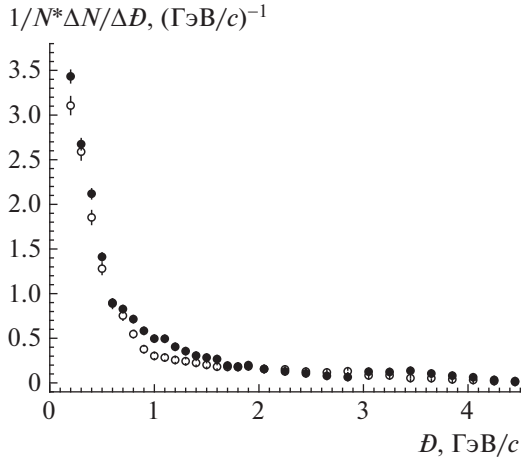

Рис. 1. Распределение протонов по полному импульсу в лабораторной системе координат p^{12}C- и n^{12}C- (•) столкновений при 4.2 ГэВ/c.

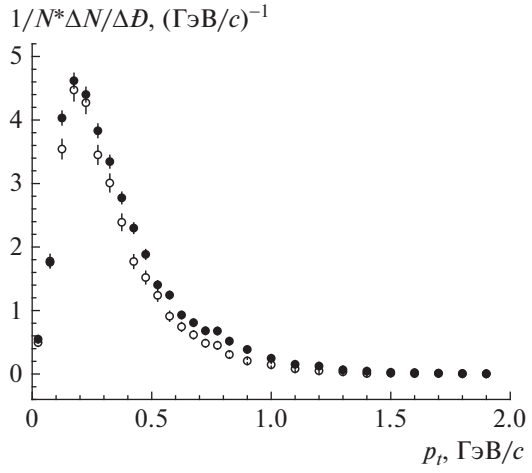

Рис. 2. Распределение по поперечному импульсу протонов в столкновениях p^{12}C и n^{12}C (•) при 4.2 ГэВ/c.

пионов. Более того, в столкновениях n^{12}C средние значения поперечного импульса протонов в пределах статистических ошибок не зависят от наличия отрицательного пиона в конечном состоянии.

Можно отметить, что в столкновениях n^{12}C с $n(\pi^-) = 0$ среднее значение угла вылета протона отклоняется от плавного поведения при $\theta = (58.1 \pm \pm 0.9)^\circ$. Здесь отчетливо проявляются вклады двух механизмов протонообразования, причем вклад от выбивания протона ядра-мишени исходным нейтроном больше (реакция (5а)), чем вклад механизма переноса заряда от протона мишени к исходному нейтрону (реакция (6а)).

Из табл. 1 следует, что средняя быстрота протонов достигает максимальных значений во взаимодействиях p^{12}C при $n(\pi^-) = 0$ и минимума в столкновениях n^{12}C без отрицательных пионов в конечном состоянии. Этот факт можно интерпретировать, следуя тем же аргументам, что и ранее, когда мы обсуждали средние значения полного импульса и угла вылета протона в столкновениях p^{12}C и n^{12}C с отрицательными пионами и без них в конечном состоянии.

Перейдем к сравнительному анализу спектров полного и поперечного импульсов, а также распределений вторичных протонов по быстротам в столкновениях p^{12}C и n^{12}C при 4.2 ГэВ/c.

На рис. 1 показано полное импульсное распределение протонов в лабораторной системе при столкновениях p^{12}C и n^{12}C. Оба распределения не имеют неоднородностей, показывают качественно идентичную зависимость от импульса и имеют вытянутые "хвосты" из-за эффектов ведущих первичных нуклонов. В области импульсов $p \leqslant \leqslant 1.7$ ГэВ/c множественность протонов в столкновениях p^{12}C систематически выше, чем во взаимодействиях n^{12}C. Разница множественностей в области фрагментации мишени ($p < 1$ ГэВ/c) связана как с процессами перезарядки $np \to pn$ (реакция (6б)) в столкновениях p^{12}C, которые увеличивают множественность протонов в этой области импульсов, так и с $np \to pn$ (реакция (6а), уменьшающая множественность протонов в столкновениях n^{12}C в той же области).

В области импульсов $1 < p < 1.7$ ГэВ/c различие этих кратностей, по-видимому, связано с потерями энергии из-за перерассеяния или образования изобар $\Delta^+ \to p + \pi^0$ и $\Delta^{++} \to p + \pi^+$, которые приводят к уменьшению импульса исходного протона в столкновениях p^{12}C. В случае столкновений n^{12}C протоны в этой области образуются

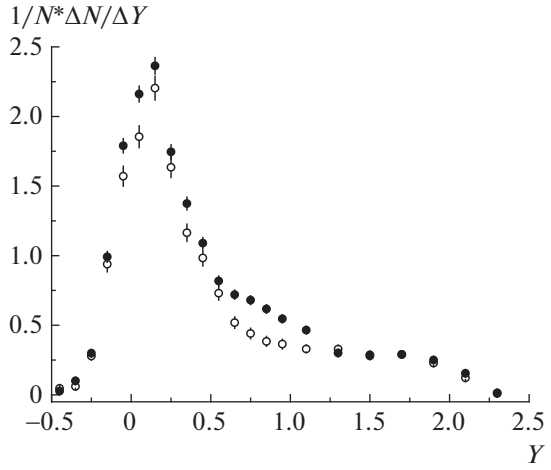

Рис. 3. Быстрое распределение протонов в лабораторной системе при столкновениях n^{12}C и p^{12}C (•) при 4.2 ГэВ/c.

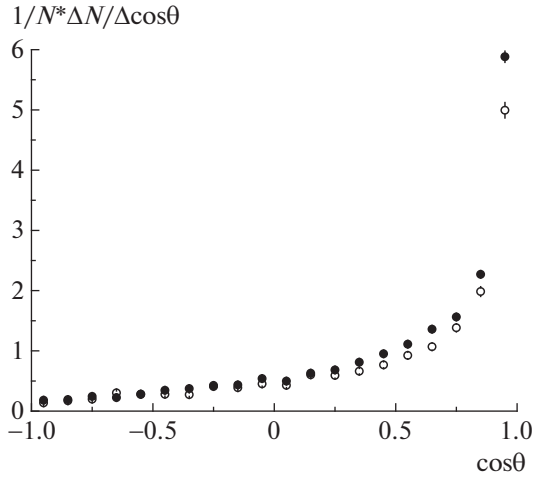

Рис. 4. Распределение углов вылета протонов в лабораторной системе при столкновениях n^{12}C и p^{12}C (•) при 4.2 ГэВ/c.

в результате рождения и распада изобары $\Delta 0 \to \to p + \pi^-$ (она может образовываться в реакциях (3а), (4а), (7а) и (8а)), сечение образования которой меньше полных сечений образования изобар Δ^+ и Δ^{++}, причем последние приводят к меньшей множественности протонов.

Интересно отметить, что в области импульсов $p > 1.25$ ГэВ/c (мы определили эту условную границу импульса протона из равенства средних множественностей протонов в областях $p < 1.25$ ГэВ/c и $p > 1.25$ ГэВ/c в столкновениях ^{12}C^{12}C, поскольку эта система симметрична) средняя множественность протонов в столкновениях n^{12}C численно совпадает с коэффициентом реакции неупругой перезарядки нейтронов на протоны и составляет 0.36 ± 0.01. Для p^{12}C-столкновений экспериментально она составляет 0.49 ± 0.1, что свидетельствует о смещении части ведущих протонов конечного состояния в область меньших импульсов.

На рис. 2 показано распределение p_t по поперечному импульсу протонов в столкновениях p^{12}C и n^{12}C. Оба распределения имеют качественно идентичную зависимость от p_t. Средние значения поперечных импульсов протонов различаются на (9–10)% (см. табл. 3). Разница в средних множественностях протонов в этих столкновениях сосредоточена в основном в области малых p_t 1 ГэВ/c, а ширина спектра поперечных импульсов в столкновениях p^{12}C на 10% больше, чем во взаимодействиях n^{12}C. В области высоких $p_t > 1$ ГэВ/c спектры совпадают между собой в пределах статистических ошибок.

На рис. 3 показано распределение протонов по скорости Y в лабораторной системе для столкновений p^{12}C и n^{12}C. Мы видим, что различие этих спектров локализовано в центральной области $-0.1 < Y < 1.25$. Совпадение спектров быстроты в нижней части области фрагментации мишени связано с образованием кумулятивных протонов. Действительно, легко показать, что область $Y < -0.1$ соответствует диапазону кумулятивных чисел $\beta > 1.3$ (β определяется как $\beta = (E - P_L)/m_p$, где E, P_L и m_p — полная энергия, продольный импульс и масса протона соответственно), в которой по определению такие протоны считаются кумулятивными. В [13] было показано, что для столкновений $\pi^-{}^{12}$C при 40 ГэВ/c и для столкновений p^{12}C, ^{4}He^{12}C и ^{12}C^{12}C при 4.2 A ГэВ/c средняя множественность кумулятивных протонов оказалась независимой от типа (заряда), а масса налетающей частицы равна 1.05 ± 0.01. Доля кумулятивных событий равна 10% от общего числа столкновений протонов, α-частиц и ядер углерода. Все эти обстоятельства в совокупности приводят к совпадению инклюзивных сечений образования кумулятивных протонов при столкновениях n^{12}C и p^{12}C. Отметим также совпадение инклюзивных распределений протонов по быстроте в области фрагментации снаряда.

На рис. 4 показано косинусное распределение углов вылета протонов в лабораторной системе для столкновений n^{12}C и p^{12}C. Различие спектров наблюдается в области $\cos\theta > -0.25$, тогда как в области $\cos\theta < -0.25$ спектры совпадают в пределах статистических ошибок. Средние значения этих спектров, равные 0.51 ± 0.01 и 0.52 ± 0.01 в столкновениях n^{12}C и p^{12}C соответственно, также совпадают в пределах статистических ошибок.

3. РЕЗЮМЕ

В этой статье мы представили новые данные о взаимодействии нейтронов с ядрами углерода при 4.2 ГэВ/c. Проведен сравнительный анализ средних значений различных кинематических характеристик протонов, образующихся в столкновениях n^{12}C и p^{12}C при 4.2 ГэВ/c.

Разница в средних импульсах протонов в n^{12}C и p^{12}C связана с различием вероятностей сохранения протона в первом случае и перезарядки первичного нейтрона на протон во втором. Совпадение инклюзивных сечений образования протонов в столкновениях n^{12}C и p^{12}C в нижней части области фрагментации мишени может быть связано с образованием кумулятивных протонов, тогда как их совпадение в области фрагментации снаряда связано с эффектом лидирующей частицы в адронах — ядерные столкновения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. R. N. Bekmirzaev *et al.*, ЯФ **40**, 1477 (1984).
2. R. N. Bekmirzaev *et al.*, ЯФ **39**, 1212 (1984).
3. R. N. Bekmirzaev *et al.*, ЯФ **44**, 406 (1986).
4. R. N. Bekmirzaev *et al.*, ЯФ **47**, 1284 (1988).
5. R. N. Bekmirzaev *et al.*, ЯФ **49**, 1030 (1989).
6. R. N. Bekmirzaev *et al.*, ЯФ **49**, 488 (1989).
7. R. N. Bekmirzaev *et al.*, JINR Preprint, P1-91-495 (Dubna, 1991).
8. K. Olimov *et al.*, Reports of Uzbek Academy of Sciences **4**, 29 (2011).
9. A. P. Gasparyan *et al.*, JINR Preprint, 1-80-778 (Dubna, 1980).
10. G. N. Agakishiev *et al.*, JINR Preprint, P1-84-235 (Dubna, 1984).
11. I. A. Ivanovskaya, JINR Preprint, P1-91-264 (Dubna, 1991).
12. A. I. Bondarenko *et al.*, JINR Preprint, P1-98-292 (Dubna, 1998).
13. K. Olimov *et al.*, ЯФ **72**, 604 (2009) [Phys. At. Nucl. **72**, 579 (2009)].

COMPARISON OF SOME KINEMATIC CHARACTERISTICS OF PROTONS IN n^{12}C AND p^{12}C AT 4.2 GeV/c

R. N. Bekmirzaev[1)], Kh. K. Olimov[2)]

[1)] *State Pedagogical University, 130100, Jizzakh, Uzbekistan*
[2)] *Physical-Technical Institute NGO "Physics-Sun", ASUz, Tashkent, Uzbekistan*

Results of comparative analysis of the mean values of various kinematical characteristics of protons in the n^{12}C and p^{12}C collisions are presented. The mean values of the total momentum of protons in these collisions are found to be different. It is also discovered that the inclusive rapidity spectra of protons coincide in the target fragmentation region.