

Выбивание дейтронов и тритонов с большими поперечными импульсами в pA -взаимодействиях при энергии протонов 50 ГэВ

Н. Н. Антонов⁺, А. А. Балдин^{*}, В. А. Викторов⁺, В. А. Гапиенко⁺¹⁾, Г. С. Гапиенко⁺, В. Н. Гресь⁺, М. А. Илюшин⁺, В. А. Коротков⁺, А. И. Мыслик⁺, А. Ф. Прудкогляд⁺, А. А. Семак⁺, В. И. Терехов⁺, В. Я. Углеков⁺, М. Н. Уханов⁺, Б. В. Чуйко⁺, С. С. Шиманский^{*}

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

^{*}Объединенный Институт Ядерных Исследований, 141980 Дубна, Россия

Поступила в редакцию 4 октября 2016 г.

После переработки 11 октября 2016 г.

Приведены данные по образованию кумулятивных легких ядерных фрагментов d и t , вылетающих из ядра с большим поперечным импульсом под углом 35° (лаб. сист.). Эксперимент выполняется на установке СПИН при взаимодействии выведенного из ускорителя У-70 ИФВЭ (Протвино) пучка протонов с энергией 50 ГэВ с ядрами С, Al, Cu и W. Полученные результаты указывают, что в образование ядерных фрагментов основной вклад дает локальный процесс – прямое выбивание из ядер.

DOI: 10.7868/S0370274X16220021

Наблюдение [1] прямого выбивания дейтронов из легких ядер с передачей энергии около 500 МэВ потребовало введения [2] в рассмотрение квантовых состояний в ядрах, когда несколько нуклонов могут находиться в объеме, сравнимом с размерами нуклона. Трудность теоретического описания наблюдавшихся процессов вызвана малостью энергии связи нуклонов в дейтроне по сравнению с передаваемой энергией. Энергия связи 2.22 МэВ определяет средние размеры дейтрона, которые намного превосходят расстояния, на которых возможна передача энергии в сотни МэВ. Исследования кинематической области, где во взаимодействиях участвует более одного нуклона ядра, позволяют получить уникальные данные о необычных свойствах этих многонуклонных систем. Процессы, наблюдаемые в столкновениях с участием ядер и идущие вне кинематики нуклон-нуклонного взаимодействия, принято называть кумулятивными [3, 4].

Настоящая работа содержит новые экспериментальные данные по образованию в pA -взаимодействиях кумулятивных ядерных фрагментов, d и t , под углом 35° (в лабораторной системе – лаб. сист.) с импульсами до 6.4 ГэВ/с. Данные получены установкой СПИН (ИФВЭ, Протвино) на протонном пучке ускорителя У70 с интенсивностью $\sim 5 \times 10^{12}$ /сек при импульсе 50 ГэВ/с. Установка СПИН представляет собой узкоапертурный одноплечевой спектрометр, состоящий

из мишенной станции, семи элементов магнитной оптики, проволочных камер, времяпролетной системы и порогового черенковского детектора. Изменяя расположение магнитных элементов, можно отбирать в спектрометр заряженные частицы, вылетающие из мишени под углами в диапазоне $22\text{--}55^\circ$ (лаб. сист.). Система проволочных камер, находящихся до и после анализирующего магнита, позволяет измерить импульс частиц с разрешением $\Delta p/p \approx 3 \times 10^{-3}$. Угловой аксептанс установки составляет $\Delta\varphi \approx 100$ мрад по азимуту и $\Delta\theta \approx 40$ мрад по полярному углу. Захват установки по импульсу меняется от 5.5 % при 1 ГэВ/с до 3.5 % при 6 ГэВ/с. Токи в магнитах спектрометра каждый раз настраиваются на требуемый импульс заряженной частицы, вылетающей из мишени. Идентификация частиц осуществляется с помощью времяпролетной методики и черенковского счетчика. На установке СПИН возможна регистрация частиц с импульсами, как удовлетворяющими кинематике нуклон-нуклонных взаимодействий, так и за ее пределами, т.е. в области кумулятивных процессов. Схему установки и другие детали эксперимента можно найти в [5].

В предыдущих работах эксперимента СПИН [5, 6] впервые были получены импульсные спектры кумулятивных заряженных частиц в области больших p_T (вплоть до 3.5 ГэВ/с) в реакции $pA \rightarrow h^\pm + X$. Сильная зависимость инклюзивных сечений от атомного номера ядра и указание на локальный механизм процессов рождения h^\pm частиц [6] позволили сделать вывод, что данные СПИН свидетельствуют о суще-

¹⁾e-mail: Vladimir.Gapienko@ihep.ru

ственном вкладе процессов взаимодействия налетающего протона с плотным многонуклонным (многокварковым) состоянием в ядерной материи. В работе [7] было показано, что измеренный выход барионных систем (p, d, t) в кумулятивной области не соответствует предсказаниям модели короткодействующих корреляций (SRC) [8].

На рис. 1 представлены инвариантные сечения рождения d и t на четырех ядерных мишенях: C, Al, Cu и W.

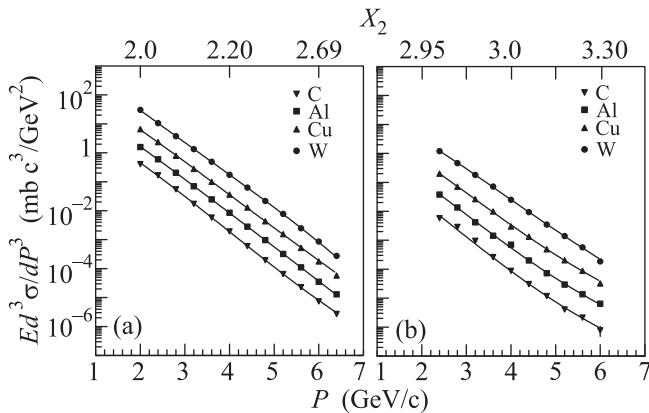


Рис. 1. Сечения рождения дейтронов (а) и тритонов (б) в зависимости от импульса частицы, измеренные для четырех разных мишеней. На горизонтальных осях сверху приведены значения переменной X_2 [8]. Кривые, проходящие через точки, приведены для лучшего восприятия данных

Al, Cu и W – в зависимости от импульса фрагмента. Значения импульса приведены на нижней горизонтальной шкале. Для исследований области с выделенной бинарной кинематикой (кумулятивные процессы и процессы с большими поперечными импульсами) В.С. Ставинский предложил [10] использовать переменные X_1 и X_2 . Эти переменные указывают на доли четырех импульсов (налетающей частицы и мишени), которые участвуют во взаимодействии. Однозначно определить значения переменных X_1 и X_2 становится возможным [10] при выполнении закона сохранения барионного числа и требования минимальности инвариантной энергии для процесса образования инклюзивной частицы. На верхней горизонтальной шкале рис. 1 приведена величина X_2 , имеющая в нашем случае смысл минимальной массы мишени (измеряемой в единицах массы нуклона), необходимой для рождения фрагмента с данным импульсом под углом 35° (лаб. сист.). Как следует из рис. 1, в исследуемой нами кинематической области минимальная масса мишени при образовании дейтрона (тритона) больше/равна 2-м (3-м) массам нуклона. Таким образом, рождение фрагментов идет с участи-

ем многонуклонной (многокварковой) системы внутри ядра.

На рис. 2 для тех же самых четырех мишеней показаны отношения сечений выходов дейтронов и тритонов к сечению выхода протонов при одинаковых

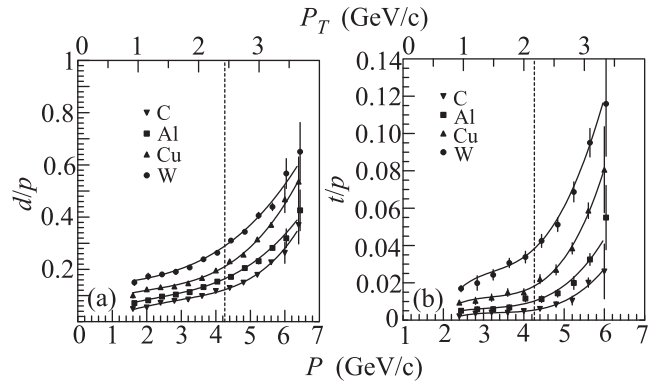


Рис. 2. Отношение выхода дейтрона (а) и тритона (б) по отношению к выходу протонов как функция импульса частицы. На верхней горизонтальной оси приведены значения поперечного импульса. Вертикальные пунктирные линии соответствуют кинематическому пределу для упругого нуклон-нуклонного рассеяния. Кривые, проходящие через точки, приведены для лучшего восприятия данных

регистрируемых импульсах частиц. Величины соответствующего поперечного импульса (p_T) приведены на верхней горизонтальной оси этого рисунка. Из рис. 2 видно, что для всех мишеней наблюдается рост d/p и t/p отношений с ростом импульса. На установке ФОДС (ИФВЭ, Протвино) в pA -взаимодействиях при 70 ГэВ/с измерялось [9] отношение d/p для разных ядер в области значений p_T (1–4 ГэВ/с), близких к наблюдаемым на установке СПИН. Величины d/p , измеренные в эксперименте ФОДС, не зависят от p_T и составляют величину меньше 0.02 для всех мишеней, включая свинцовую. Различие в значениях наблюдаемых отношений и в поведении d/p в экспериментах ФОДС и СПИН говорит о разных механизмах рождения дейтронов, регистрируемых в этих экспериментах. Следует подчеркнуть и отличие в исследуемых кинематических областях установки СПИН и ФОДС. Данные установки ФОДС получены в кинематической области, не выходящей за кинематику нуклон-нуклонных взаимодействий.

Как было показано на рис. 1, в наблюдаемых процессах участвуют два и более (для дейтронов) или три и более (для тритонов) нуклонов мишени. Однако участие двух и более нуклонов может быть не результатом локального процесса, а следствием цепочки последовательных взаимодействий с несколькими

Таблица 1. Средние значения параметра B_2

Мишень	C	Al	Cu	W
$B_2 \cdot 10^2 \text{ ГэВ}^2/c^3$	1.41 ± 0.10	1.56 ± 0.08	1.51 ± 0.07	1.41 ± 0.06

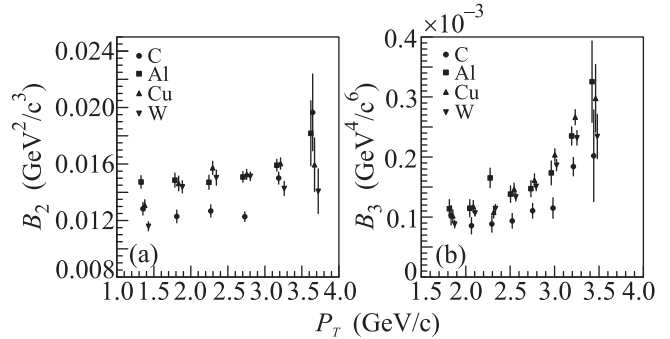
нуклонами ядра в результате многократного рассеяния с образованием двух (трех) нуклонов с близкими импульсами и углами и с последующим их слиянием в один ядерный фрагмент. Многократное взаимодействие с образованием двух протонов с близкими импульсами, в том числе и в кумулятивной области, наблюдалось в процессах $pA \rightarrow ppX$ [11] и $eA \rightarrow ppX$ [12]. НВТ-анализ (Hanbury–Brown–Twiss) в этих работах показал, что область образования двух протонов имеет сильную A -зависимость, т.е. прямо связана с размером ядра. Так, значения радиуса области образования пары протонов на С и РЬ мишенях отличаются [12] больше, чем в 1.5 раза. Поэтому, если будет обнаружена сильная A -зависимость для области рождения дейтронов и тритонов в настоящем эксперименте, то это будет указанием на доминирование механизма многократного рассеяния и последующего слияния нуклонов.

Модель слияния (коалесценции) позволяет оценить объем области образования ядерных фрагментов (V) через коэффициенты слияния B_A [13]. Если образуется фрагмент с атомным номером A , то коэффициент слияния B_A связан с размером области образования фрагмента соотношением $B_A \sim V^{-(A-1)}$ (для дейтронов $B_2 \sim V^{-1}$, для трития $B_3 \sim V^{-2}$). В идеале, для изучения эффекта слияния необходимо иметь данные о спектрах протонов и нейтронов. В реальности же коэффициент коалесценции (B_A) определяют, используя сечения образования A -фрагмента и протона в предположении, что $n/p \approx 1$:

$$\frac{E_d}{\sigma_{\text{inel}}} \frac{d^3\sigma_A}{dp_A^3} = B_A \times \left(\frac{E_p}{\sigma_{\text{inel}}} \frac{d^3\sigma_p}{dp_p^3} \right)^A. \quad (1)$$

Здесь сечения образования протона и A -фрагмента, σ_p и σ_A , берутся для одинаковых импульсов, приходящихся на один нуклон, т.е. полный импульс A -фрагмента, p_A , в A раз больше импульса протона p_p . Под σ_{inel} подразумевается сечение неупругого pA -взаимодействия.

Увеличение области образования дейтрона (тритона) при многократном рассеянии в ядре должно приводить к уменьшению величин B_2 (B_3) при увеличении размера ядра. В табл. 1 приведены величины параметра B_2 , усредненные по всему интервалу доступных значений p_T . В пределах точности измерений зависимость от размера ядра не наблюдается.

Рис. 3. Параметры коалесценции B_2 (а) и B_3 (б) в зависимости от поперечного импульса фрагмента

Найденные значения B_2 и B_3 приведены на рис. 3 как функция p_T . Оба коэффициента (B_2 и B_3) демонстрируют рост с ростом p_T , что означает уменьшение размера источника фрагментов с увеличением поперечного импульса. Среднее значение B_3 является близким для Al, Cu, W и несколько меньшим для углеродной мишени. Данные рис. 3 указывают на отсутствие роста размера источника фрагментов d и t с ростом размера ядра.

Закключение. В работе представлены данные по образованию легчайших ядерных фрагментов d и t , рождающихся с большими поперечными импульсами в pA -взаимодействиях вне кинематики нуклон-нуклонного рассеяния. Анализ коэффициентов коалесценции B_2 и B_3 позволяет сделать вывод, что основным механизмом их образования является прямое выбивание. Большие передачи энергии фрагментам, при энергии связи в несколько МэВ, являются прямым указанием на существование в ядрах холодной плотной многонуклонной (многокварковой) компоненты, которую можно исследовать в процессах прямого выбивания

Авторы признательны руководству ГНЦ ИФВЭ за поддержку данного исследования, персоналу отделения ускорителя и отделения пучков за эффективную работу У70 и 8-го канала. А.А.Б. и С.С.Ш. благодарят РФФИ за частичную поддержку работы в рамках гранта # 14-02-00896 "а".

1. Л. С. Ажгирей, И. К. Взорев, В. П. Зрелов, М. Г. Мещеряков, Б. С. Неганов, А. Ф. Шабудин, ЖЭТФ **33**, 1185 (1957).
2. Д. И. Блохинцев, ЖЭТФ **33**, 1295 (1957).
3. В. С. Ставинский, ЭЧАЯ **10**(5), 949 (1979).
4. Г. А. Лексин, ЯФ **65**, 2042 (2002).

5. В. В. Аммосов, Н. Н. Антонов, В. А. Викторов, В. А. Гапиенко, Г. С. Гапиенко, А. А. Головин, В. Н. Гресь, А. А. Иванилов, В. И. Корешев, В. А. Коротков, А. И. Мысник, А. Ф. Прудкогляд, Ю. М. Свиридов, А. А. Семак, В. И. Терехов, В. Я. Углеков, М. Н. Уханов, Б. В. Чуйко, *ЯФ* **76**(10), 1275 (2013).
6. В. В. Аммосов, Н. Н. Антонов, В. А. Викторов, В. А. Гапиенко, Г. С. Гапиенко, В. Н. Гресь, В. А. Коротков, А. И. Мысник, А. Ф. Прудкогляд, Ю. М. Свиридов, А. А. Семак, В. И. Терехов, В. Я. Углеков, М. Н. Уханов, Б. В. Чуйко, А. А. Балдин, С. С. Шиманский, *ЯФ и Инж.* **4**(9–10), 773 (2013); arXiv:1410.5582v2 [nucl-ex].
7. Н. Н. Антонов, В. А. Викторов, В. А. Гапиенко, Г. С. Гапиенко, В. Н. Гресь, М. А. Илюшин, В. А. Коротков, А. И. Мысник, А. Ф. Прудкогляд, А. А. Семак, В. И. Терехов, В. Я. Углеков, М. Н. Уханов, Б. В. Чуйко, С. С. Шиманский, *Письма ЖЭТФ* **101**(10), 746 (2015).
8. М. И. Стрикман, Л. Л. Франкфурт, *ЭЧАЯ* **11**, 571 (1980).
9. V. V. Abramov, V. Yu. Baldin, A. F. Buzulutskov, V. G. Vasilchenko, A. A. Volkov, V. Yu. Glebov, A. S. Dyshkant, A. O. Efimov, V. N. Evdokimov, A. N. Krinitsin, V. I. Kryshkin, M. I. Mutafyan, V. M. Podstavkov, A. I. Ronzhin, R. M. Sulyaev, L. K. Turchinovich, and V. V. Zmushko, *Sov. J. Nucl. Phys.* **45**, 845 (1987).
10. В. С. Ставинский, *JINR Rapid Comm.* **18–86**, 5 (1986).
11. Ю. Д. Баюков, А. В. Власов, Л. С. Воробьев, В. Б. Гаврилов, Н. А. Горяинов, Ю. Г. Гришук, П. В. Дегтяренко, Е. А. Дорошкевич, Ю. В. Ефременко, М. В. Косов, С. Г. Кузнецов, С. В. Кулешов, Г. А. Лексин, А. В. Смирнитский, А. В. Ставинский, В. П. Сурич, В. Б. Федоров, Б. Б. Шварцман, *ЯФ* **50**, 1023 (1989).
12. A. V. Stavinsky et al. (CLAS collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **93**, 192301 (2004).
13. J. Bartke, *Relativistic Heavy Ion Physics*, World Scientific, New Jersey, London, Singapore (2009), p. 121.