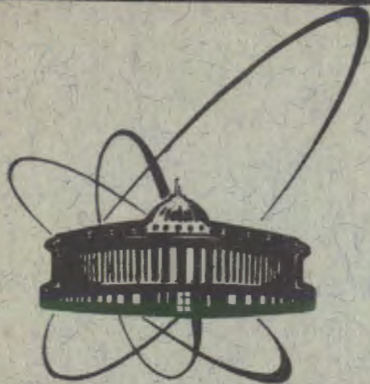


90-584



сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

P1-90-584

ПОЛНАЯ ДЕЗИНТЕГРАЦИЯ ЯДЕР ^3He И ^4He
ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ С ПРОТОНАМИ

Сотрудничество: Варшава - Дубна - Кошице -
Москва - Страсбург - Тбилиси

1990

1. ВВЕДЕНИЕ

В процессах взаимодействия легких ядер ^3H , ^3He , ^4He с протонами при энергиях несколько ГэВ наиболее часто идут каналы с малой степенью фрагментации. Например, в ^4He -взаимодействиях наиболее вероятными являются $^3\text{He}p$ и $^3\text{He}p$ конечные состояния. Это может свидетельствовать о том, что в волновой функции ^4He преобладают $^3\text{He}p$ - и $^3\text{He}p$ -состояния. Менее вероятным процессом является полный безмезонный развал ядер ^3He и ^4He . Однако изучение механизма полного развала помогает выделить вклад многократного рассеяния и ближе подойти к наблюдению экзотических явлений, соответствующих малым расстояниям между нуклонами.

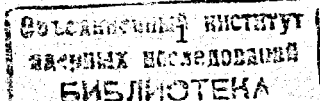
Известны работы ¹⁻⁸, где изучались явления полного разрушения ядер ^3H , ^3He , ^4He в водородной камере. Настоящая работа является продолжением исследований механизма безмезонного развала ядер ^3He и ^4He при взаимодействии их с протонами в 100-см жидководородной пузырьковой камере ОИЯИ ⁶⁻¹¹ с привлечением новых данных по ^4He -взаимодействиям при импульсе 13,6 ГэВ/с.

Исследуются импульсные и угловые распределения, а также корреляции вторичных частиц по относительным азимутальным углам.

2. ЭКСПЕРИМЕНТ

100-см жидководородная пузырьковая камера ОИЯИ экспонировалась в пучках ядер ^3He при 13,5 ГэВ/с и ^4He при 8,6; 13,6 ГэВ/с на синхрофазотроне ЛВЭ ОИЯИ. При взаимодействии ускоренных ядер с протонами продукты их фрагментации являются быстрыми, что приводит к существенно более высокой, чем в рА-экспериментах, эффективности регистрации этих фрагментов. Преимущество пузырьковой камеры для детектирования частиц в условиях 4π -геометрии дает возможность для эксклюзивного анализа явления полного разрушения ядер ^3He и ^4He .

Обработка снимков велась в лабораториях сотрудничества по стандартной процедуре. Пространственная реконструкция и кинематический анализ событий проводились с использованием адаптированной библиотеки программ CERN-HYDRA. При описании результатов все величины



приводятся в системе покоя ядер ^3He и ^4He . Ошибки в определении сечений — статистические.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

а. Оценка поперечных сечений реакций полного развала

Представленные результаты основаны на статистике:

- 3086 событий канала $^4\text{He} \rightarrow \text{ppr} +$ (нейтральные) при 8,6 ГэВ/с (1)
- 2352 события канала $^4\text{He} \rightarrow \text{ppr} +$ (нейтральные) при 13,6 ГэВ/с (2)
- 2729 событий канала $^3\text{He} \rightarrow \text{pprp}$ при 13,5 ГэВ/с. (3)

Канал полного разрушения наиболее чисто выделяется в ^3He -взаимодействиях, т.к. содержит только одну нейтральную частицу.

В ^4He -взаимодействиях эта реакция полностью кинематически не восстанавливается, и поэтому может содержать значительную примесь канала $^4\text{He} \rightarrow \text{pprp}\pi^0$. Возможна также примесь каналов с большим числом π^0 -мезонов, однако сечения их при этих энергиях незначительны.

На рис.1 представлены распределения при 8,6 ГэВ/с: а) по недостающей массе в реакции $^4\text{He} \rightarrow \text{ppr} +$ (нейтральные) — сплошная линия;

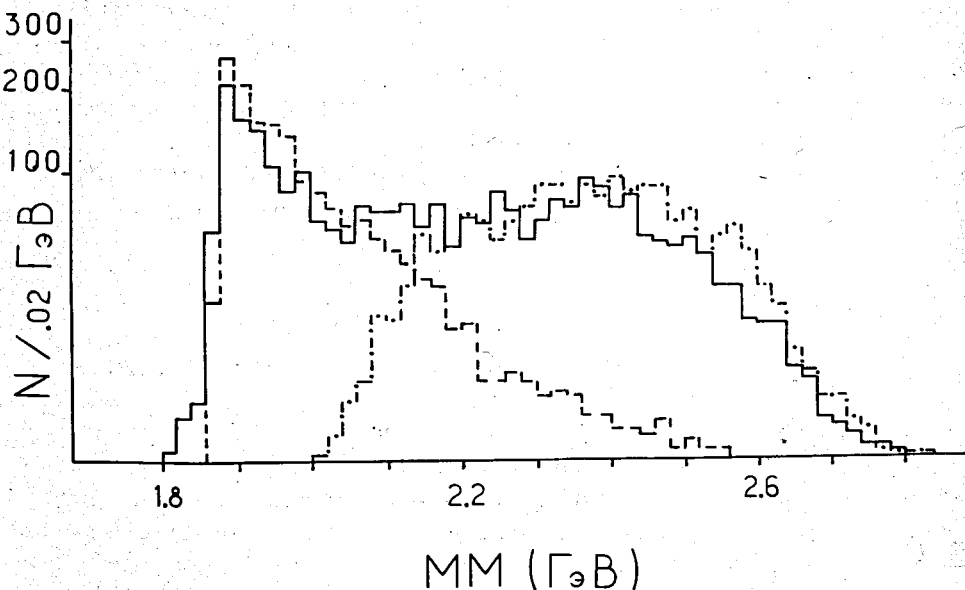


Рис.1. Распределение по недостающей массе при импульсе 8,6 ГэВ/с в реакции $^4\text{He} \rightarrow \text{ppr} +$ (нейтральные) — сплошная линия; распределение эффективной массы пр без лидирующего нуклона в канале $^4\text{He} \rightarrow \text{dppr}$ — пунктир; распределение эффективной массы $\text{ppr}\pi^-$ в реакции $^4\text{He} \rightarrow \text{pprp}\pi^-$ — штрихпунктир.

б) по эффективной массе пр-пары без лидирующего нуклона из канала $^4\text{He} \rightarrow \text{dppr}$ — пунктир, нормированное на первый максимум распределения (а); в) по эффективной массе $\text{ppr}\pi^-$ -комбинации из реакции $^4\text{He} \rightarrow \text{pprp}\pi^-$ — штрихпунктир, отнормированное на второй максимум распределения (а). Чтобы избежать в изучаемой реакции примеси канала $^4\text{He} \rightarrow \text{pprp}\pi^0$, для дальнейшего анализа мы использовали только события с $\text{MM} < 2,06 \text{ ГэВ}/c^2$. (Аналогичный анализ был проведен и для ^4He -взаимодействий при 13,6 ГэВ/с). При таком обрезании доля оставшихся событий канала $^4\text{He} \rightarrow \text{pprp}$ составила 49% и 33% от общего числа событий реакции $^4\text{He} \rightarrow \text{ppr} +$ (нейтральные) при 8,6 и 13,6 ГэВ/с соответственно. Если предположить, что распределения эффективных масс двух медленных нуклонов из каналов $^4\text{He} \rightarrow \text{dppr}$ и $^4\text{He} \rightarrow \text{pprp}$ ведут себя одинаковым образом и за пределами $\text{MM} = 2,06 \text{ ГэВ}/c^2$, то при расчете поперечных сечений реакций безмезонного развала ядер ^4He надо учесть также события из области перекрытия спектров реакций $^4\text{He} \rightarrow \text{dppr}$ и $^4\text{He} \rightarrow \text{pprp}\pi^-$, которые составили 21% и 22,5% от полного числа событий в канале $^4\text{He} \rightarrow \text{pprp}$ при 8,6 и 13,6 ГэВ/с соответственно.

Доля примеси от других конкурирующих каналов в исследуемых реакциях была значительно меньше и оценивалась на основе исследования импульсных и угловых характеристик протонов, дейтронов и π^+ -мезонов в однозначно и неоднозначно идентифицированных событиях. Количество событий, используемых при оценке сечений с учетом поправок на конкурирующие гипотезы, приведено в табл.1.

P_{in} ГэВ/с	Исследуемая реакция	Полное число событий	Вклад конкурирующих гипотез	Число событий в сечении
8,6	$^4\text{He} \rightarrow \text{pprp}$	$\text{MM} < 2,06 \text{ ГэВ}/c^2$ 1159	$^4\text{He} \rightarrow \text{dppr} +$ (нейтр.) $^4\text{He} \rightarrow \text{ppr}\pi^+ +$ (нейтр.)	63 14 1082 + +294(21%) = = 1376
13,6	$^4\text{He} \rightarrow \text{pprp}$	$\text{MM} < 2,06 \text{ ГэВ}/c^2$ 533	$^4\text{He} \rightarrow \text{dppr} +$ (нейтр.) $^4\text{He} \rightarrow \text{ppr}\pi^+ +$ (нейтр.)	1 26 506 + +139(22,5%) = = 645
13,5	$^3\text{He} \rightarrow \text{pprp}$	DST 2729	$^3\text{He} \rightarrow \text{dppr}\pi^0$	158 2571

Поперечные сечения реакций полного безмезонного развала ядер ^3He и ^4He определялись на основе поперечных сечений трехлучевых взаимодействий, полученных ранее в работах ^{9,10}:

$$P_{^4\text{He}} = 8,6 \text{ ГэВ/с} \quad \sigma_{\text{tot}}^{3x} = (72,3 + 2,7) \text{ мб}^{19'}$$

$$P_{^4\text{He}} = 13,6 \text{ ГэВ/с} \quad \sigma_{\text{tot}}^{3x} = (61,1 + 1,9) \text{ мб}^{19'}$$

$$P_{^3\text{He}} = 13,5 \text{ ГэВ/с} \quad \sigma_{\text{tot}}^{3x} = (62,5 + 1,0) \text{ мб}^{10'}$$

Поперечные сечения оказались равными:

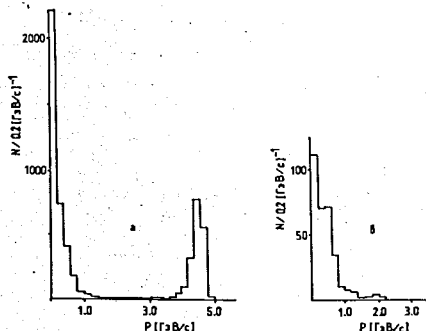
$$P_{\text{in}} = 8,6 \text{ ГэВ/с} \quad \sigma_{^4\text{He} \rightarrow \text{ppppn}}^{\text{dir}} = (4,82 + 0,13) \text{ мб},$$

$$P_{\text{in}} = 13,6 \text{ ГэВ/с} \quad \sigma_{^4\text{He} \rightarrow \text{ppppn}}^{\text{dir}} = (2,94 + 0,11) \text{ мб},$$

$$P_{\text{in}} = 13,5 \text{ ГэВ/с} \quad \sigma_{^3\text{He} \rightarrow \text{pprp}}^{\text{tot}} = (6,92 + 0,13) \text{ мб}.$$

Часть событий реакции $^3\text{He} \rightarrow \text{pprp}$, имеющих импульс нейтрона по величине больший, чем импульсы любого из трех протонов, мы отнесли к каналу с перезарядкой $\sigma_{^3\text{He} \rightarrow \text{pprp}}^{\text{ch-ex}} = (0,28 + 0,03) \text{ мб}$. Остальные события этой реакции составили прямой канал:

$$\sigma_{^3\text{He} \rightarrow \text{pprp}}^{\text{dir}} = (6,64 + 0,13) \text{ мб}.$$



На рис.2 приведены импульсные распределения протонов в прямом канале (а), и в канале с перезарядкой (б). Видно отсутствие лидирующих протонов в случае перезарядки.

Рис.2. Импульсные распределения протонов из прямого канала (а) и канала с перезарядкой (б) в реакции $^3\text{He} \rightarrow \text{pprp}$ при 13,5 ГэВ/с в системе покоя ядра ^3He .

Определить сечение с перезарядкой в реакции $^4\text{He} \rightarrow \text{ppppn}$ таким способом нельзя, т.к. невозможно выделить лидирующий нейтрон. Полученное сечение безмезонного развала ядер ^4He относится к прямому каналу этой реакции (в событиях с перезарядкой значения недостающей массы значительно больше 2,06 ГэВ/с²).

б. Общие характеристики прямого канала реакции $^4\text{He} \rightarrow \text{ppppn}$ при 8,6 и 13,6 ГэВ/с и реакции $^3\text{He} \rightarrow \text{pprp}$ при 13,5 ГэВ/с

Для рассмотрения общих характеристик указанных реакций проводилось упорядочение импульсов вторичных нуклонов, т.е. в каждом событии нуклонам присваивались индексы 1, 2, 3, 4 в порядке убывания их импульсов в реакции (3) и 1, 2, 3 — протонам в реакциях (1), (2). При этом следует заметить, что нет прямого соответствия между протонами с индексом (2,3) в реакции $^4\text{He} \rightarrow \text{ppppn}$ и нуклонами (2,3) из реакции $^3\text{He} \rightarrow \text{pprp}$. На рис.3 приводятся импульсные и угловые распределения для нуклонов каждого индекса упорядочения для реакции (3), а на рис.4 — для реакции (1), (2).

Из рис.3 видно, что импульсные распределения нуклонов с индексами 3, 4 имеют максимум при импульсе 100-120 МэВ/с, а в угловом распределении им соответствует изотропная часть. Эти характеристики близки к характеристикам спектаторных нуклонов. Наряду с этим мы наблюдаем лидирующие нуклоны (индекс 1) и нуклоны отдачи (индекс 2). Это позволяет нам изобразить основную часть протекающих процессов в этом канале в виде диаграммы, показанной на рис.5а, т.е. как квазиупругое рассеяние протона на одном из нуклонов ядра ^3He .

В реакциях (1) и (2) (см. рис.4а и б) эти группы нуклонов обозначены менее четко, т.е. существуют значительно большие области перекрытия в импульсных распределениях протонов с индексами 1, 2, 3.

Наиболее существенные различия наблюдаются (см. табл. 2) в значениях величин наклонов дифференциальных сечений $d\sigma/dt = e^{-bt}$ для реакции (1), (2) и реакции (3) (t — квадрат 4-импульса, переданного от падающего к лидирующему протону в реакциях (1), (2), (3)).

Из табл.2 видно, что величина наклона дифференциального сечения реакции $^3\text{He} \rightarrow \text{pprp}$ близка к величине наклона упругого pp-рассеяния ¹⁵, но значительно отличается от величин наклонов дифференциальных сечений $^4\text{He} \rightarrow \text{ppppn}$ при 8,6 и 13,6 ГэВ/с. Это подтверждает сделанное выше предположение о том, что полное разрушение ядра ^3He происходит в основном в результате квазиупругого рассеяния протона на одном из нуклонов ядра (рис.5а), тогда как в случае развала ядра ^4He мы наблюдаем двухкратное или многократное рассеяние падающего протона (рис.6а) на одном из нуклонов ядра ^4He .

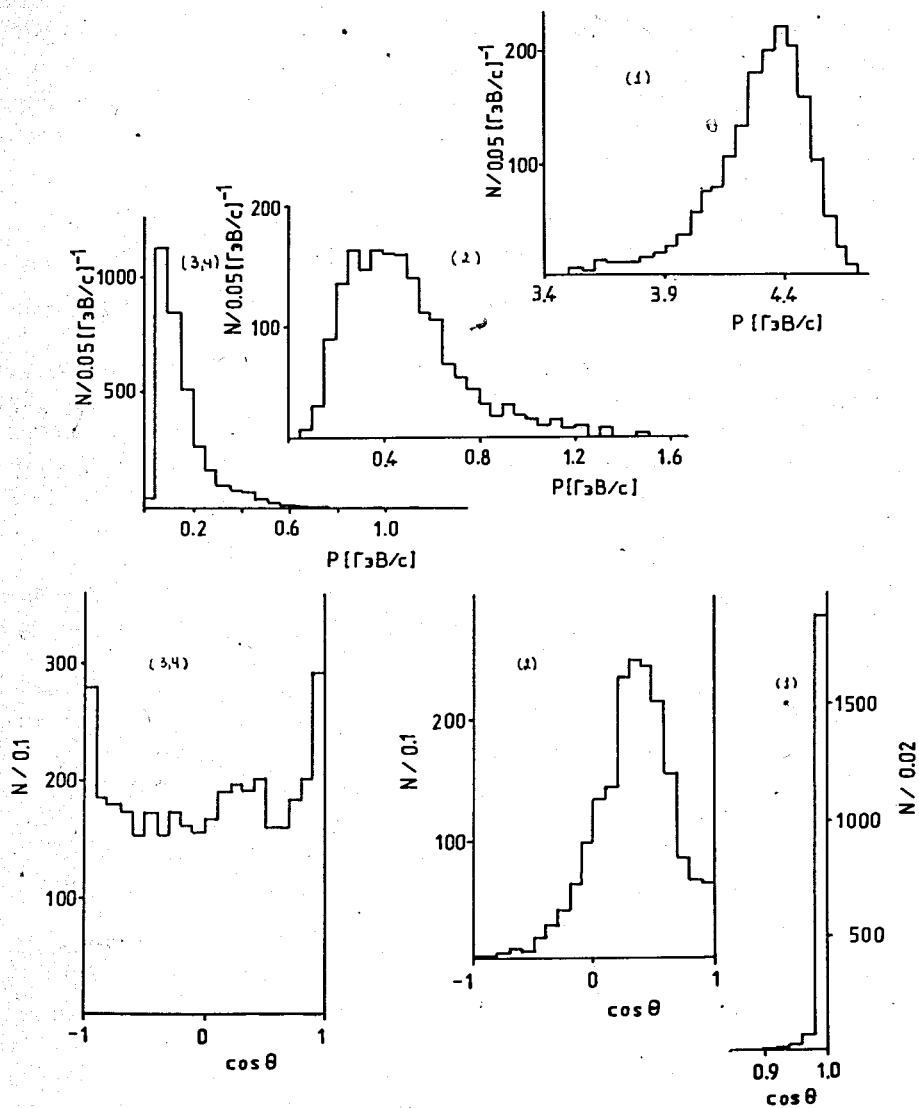


Рис.3. Импульсные и угловые распределения быстрых (1), средних (2) и медленных (3, 4) нуклонов из прямого канала реакции ${}^3\text{He} \rightarrow \text{pppp}$ при 13,5 ГэВ/с в системе покоя ядра ${}^3\text{He}$.

Следствием такого различия в механизмах может быть неодинаковый характер азимутальных корреляций пар нуклонов, принадлежащих одному из актов взаимодействия в реакциях ${}^3\text{He} \rightarrow \text{pppp}$ и ${}^4\text{He} \rightarrow \text{ppppp}$.

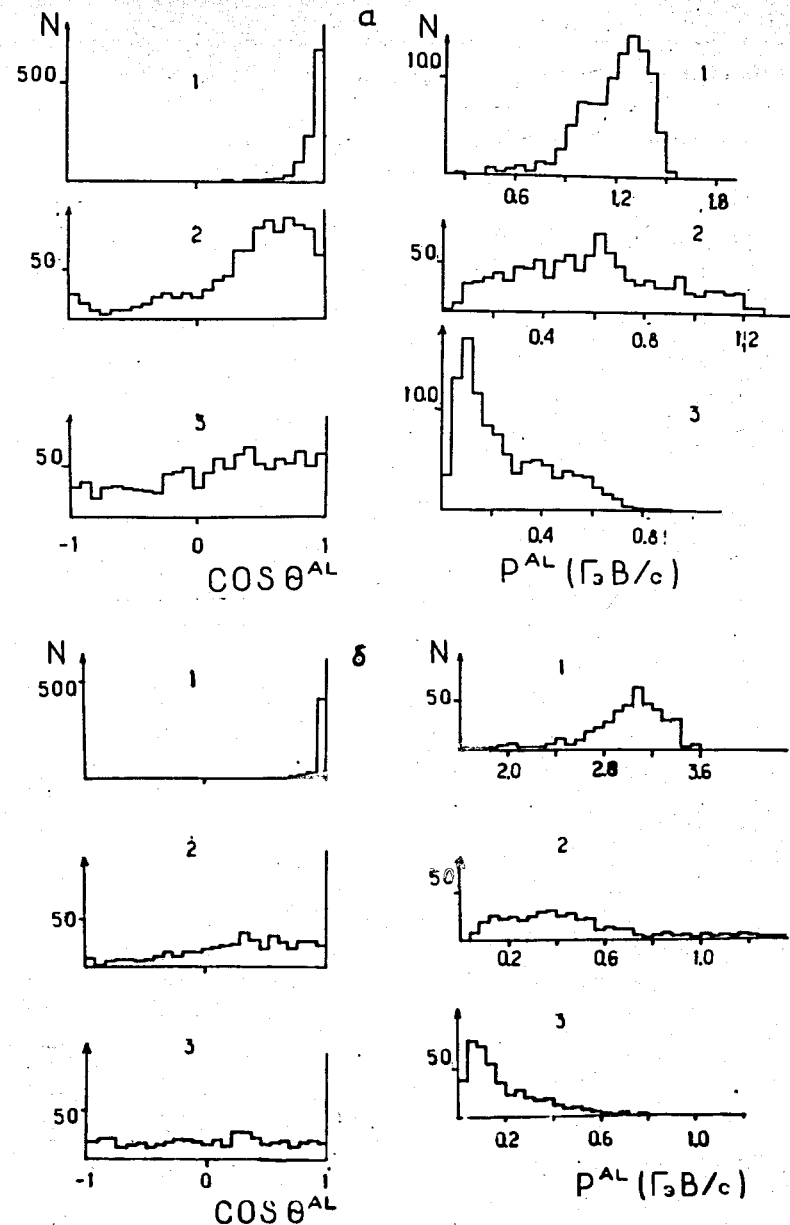


Рис.4. Импульсные и угловые распределения быстрых (1), средних (2) и медленных (3) протонов в прямом канале реакции ${}^4\text{He} \rightarrow \text{ppppp}$ при 8,6 ГэВ/с (а) и при 13,6 ГэВ/с (б) в системе покоя ядра ${}^4\text{He}$.

Таблица 2

	${}^4\text{He} \rightarrow \text{ppppnn}$	${}^4\text{He} \rightarrow \text{ppppnn}$	$\text{pp} \rightarrow \text{упругое}^{15/}$	${}^3\text{He} \rightarrow \text{pppp}$	$\text{pp} \rightarrow \text{упругое}^{15/}$
	8,6 ГэВ/с	13,6 ГэВ/с	2,8 ГэВ/с	13,5 ГэВ/с	4,8 ГэВ/с
Интервал t	0,15-1,85	0,05-1,05		0,07-0,87	
b					
ГэВ/с ⁻²	1,57±0,07	2,8±0,2	7,6±0,4	5,04±0,12	7,8±0,4
χ^2/N_d	4/18	6/11		15/17	

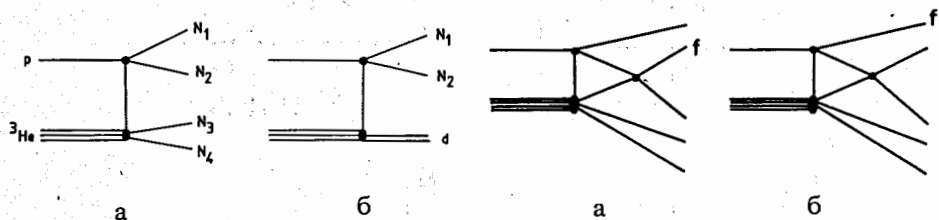


Рис.5. Диаграммы квазиупругого рассеяния: а — с полным развалом ядра ${}^3\text{He}$; б — с дейтроном в конечном состоянии для реакции ${}^3\text{He} \rightarrow \text{pppp}$ при 13,5 ГэВ/с.

Рис.6. Диаграммы, соответствующие двукратному рассеянию быстрого нуклона (а), рассеянию нуклона отдачи (б) для реакции ${}^4\text{He} \rightarrow \text{ppppnn}$.

Для проверки этого предположения были построены распределения по относительному азимутальному углу пар нуклонов (12,13,14,23, 24, 34) для реакции ${}^3\text{He} \rightarrow \text{pppp}$ и протонов (12, 13, 23) для реакции ${}^4\text{He} \rightarrow \text{ppppnn}$. Величина этого угла может меняться от 0, когда поперечные импульсы обоих нуклонов совпадают по направлению, до π рад, когда поперечные импульсы направлены в противоположные стороны. Величины асимметрий этих распределений, вычисленные как

$$A = \frac{N(\varphi > \pi/2) - N(\varphi < \pi/2)}{N(\varphi > \pi/2) + N(\varphi < \pi/2)},$$

представлены в табл.3, 4.

Видно, что в канале ${}^3\text{He} \rightarrow \text{pppp}$ самая сильная корреляция наблюдается для пары (1, 2). Это не противоречит нашему предположению о квазиупругом рассеянии.

Таблица 3

Пары нуклонов	${}^3\text{He} \rightarrow \text{pppp}$ 13,5 ГэВ/с		
	все t	t < 0,17	t > 0,17
1,2	0,94±0,03	0,93±0,03	0,96±0,03
1,3	0,25±0,02	0,21±0,03	0,27±0,03
1,4	0,08±0,02	0,18±0,03	0,09±0,03
2,3	-0,04±0,02	0,05±0,03	-0,12±0,03
2,4	-0,003±0,020	0,05±0,03	-0,05±0,03
3,4	0,12±0,02	0,07±0,03	0,17±0,03

Таблица 4

Пары нуклонов	${}^4\text{He} \rightarrow \text{ppppnn}$ 13,6 ГэВ/с			${}^4\text{He} \rightarrow \text{ppppnn}$ 8,6 ГэВ/с		
	все t	t < 0,25	t > 0,25	все t	t < 0,45	t > 0,45
1,2	0,58±0,06	0,49±0,08	0,65±0,08	0,64±0,03	0,49±0,04	0,79±0,05
1,3	0,25±0,05	0,10±0,07	0,39±0,07	0,20±0,03	0,13±0,04	0,27±0,04
2,3	0,06±0,05	0,25±0,07	-0,10±0,07	0,07±0,02	0,17±0,04	-0,03±0,04

В случае квазиупругого перерассеяния на ядре ${}^4\text{He}$ наиболее скоррелированными будут также протоны (1) и (2), получившие наибольший переданный импульс. Но в этом случае асимметрия для других пар, включающих протоны с индексом (1), имеет тенденцию возрастать с увеличением значения переданного импульса (см. табл.4), что не противоречит диаграмме рис.6а (граница разбиения по t выбрана из условия примерного равенства числа событий в каждой из областей прямого канала). В событиях с меньшими переданными импульсами должна возрастать роль вторичных процессов (например, взаимодействие нуклонов отдачи из первого акта с нуклонами ядра и т.д.). Именно такую картину мы наблюдаем в прямом канале ${}^4\text{He} \rightarrow \text{ppppnn}$ при 8,6 и 13,6 ГэВ/с, где отмечается увеличение асимметрии для пар нуклонов (2, 3), что не противоречит диаграмме рис.6б. Такой зависимости асимметрии от переданного импульса мы не видим в реакции ${}^3\text{He} \rightarrow \text{pppp}$ (см. табл.3).

Приведенные выше данные позволяют нам считать, что существенную роль в механизме разрушения ядер ${}^4\text{He}$ при импульсах 8,6 и 13,6 ГэВ/с играет двухкратное взаимодействие налетающего протона с нуклонами ядра, в то время как безмезонный развал ${}^3\text{He}$ происходит в основном в результате квазиупругого рассеяния на одном из нуклонов ядра.

Сказанное, однако, совсем не означает, что в процессе полного безмезонного разрушения легких ядер не могут участвовать и другие механизмы. В частности, в работе¹⁸ мы отмечали особенность в значениях асимметрий для скоррелированных пар нуклонов в канале с перезарядкой по сравнению с каналом прямого развала ядер ${}^3\text{He}$. А именно: в случае перезарядки азимутальные углы вылета пар нуклонов (23, 24, 34) оказались сильнее скоррелированы по сравнению с прямым каналом: $\langle A \rangle_{\text{dir}}(23, 24, 34) = 0,10 \pm 0,01$, тогда как $\langle A \rangle_{\text{ch-ex}}(23, 24, 34) = 0,22 \pm 0,05$. Наиболее естественным объяснением такого различия может быть уменьшение числа скоррелированных пар прямого канала в результате перехода их в конкурирующий канал ${}^3\text{He} \rightarrow \text{dpp}$. Такой механизм образования дейтронов исследовался нами ранее в работе¹¹, где показано, что в реакциях прямого развала ${}^4\text{He} \rightarrow \text{dpp}$ и $\text{dp} \rightarrow \text{pp}$ за счет взаимодействия нейтрона и протона с малыми относительными импульсами в конечном состоянии идет образование дейтронов и переход этих каналов в конкурирующие реакции ${}^4\text{He} \rightarrow \text{ddp}$ и $\text{dp} \rightarrow \text{dp}$ соответственно.

Оценка величины асимметрии для скоррелированных пар (23, 24, 34), полученная с помощью моделирования без учета взаимодействия в конечном состоянии, для канала с перезарядкой оказалась равной: $\langle A \rangle(23, 24, 34) = 0,20 \pm 0,01$, что хорошо согласуется с полученным нами значением $\langle A \rangle = 0,22 \pm 0,05$.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Определено поперечное сечение полного безмезонного разрушения ядер ${}^3\text{He}$ при 13,5 ГэВ/с: $\sigma({}^3\text{He} \rightarrow \text{pppn}) = (6,92 \pm 0,13)$ мб.

Оценены поперечные сечения прямого канала и канала с перезарядкой в ${}^3\text{He}$ -взаимодействиях:

$$\sigma_{\text{dir}}({}^3\text{He} \rightarrow \text{pppn}) 13,5 \text{ ГэВ/с} = (6,64 \pm 0,13) \text{ мб,}$$

$$\sigma_{\text{ch-ex}}({}^3\text{He} \rightarrow \text{pppn}) 13,5 \text{ ГэВ/с} = (0,28 \pm 0,03) \text{ мб}$$

и поперечные сечения прямого канала в ${}^4\text{He}$ -взаимодействиях:

$$\sigma_{\text{dir}}({}^4\text{He} \rightarrow \text{pppnn}) 13,6 \text{ ГэВ/с} = (2,94 \pm 0,11) \text{ мб,}$$

$$\sigma_{\text{dir}}({}^4\text{He} \rightarrow \text{pppnn}) 8,6 \text{ ГэВ/с} = (4,82 \pm 0,13) \text{ мб.}$$

Исследованы общие характеристики реакций ${}^3\text{He} \rightarrow \text{pppn}$ и ${}^4\text{He} \rightarrow \text{pppnn}$ и показано, что полный безмезонный развал ядер ${}^3\text{He}$ происходит в основном в результате квазиупругого рассеяния протона на одном из нуклонов ядра, тогда как полный развал ${}^4\text{He}$ — через двухкратное взаимодействие протона с нуклонами ядра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Блинов А.В. и др. — ЯФ, 1985, 41, с.719.
2. Абдуллин С.К. и др. — ЯФ, 1988, 47, с.152.
3. Зелински П. и др. — Сообщение ОИЯИ, 1-83-566, Дубна, 1983.
4. Зелински П. и др. — Препринт ОИЯИ, P1-83-565, Дубна, 1983; ЯФ, 1984, 40, с.482.
5. Banary O. et al. — NN- and ND-Interactions. UCRL 20000 NN, 1970.
6. Глаголев В.В. и др. — Сообщение ОИЯИ, 1-84-202, Дубна, 1984.
7. Dubna — Kosice — Moscow — Strasburg — Tbilisi — Warsaw — Collaboration, N.P. 1985, A.455, 572-578.
8. Глаголев В.В. и др. — Сообщение ОИЯИ, P1-88-592, Дубна, 1988.
9. Braun H. et al. — Czech. Journal of Physics, 1989, B39, p.1267.
10. Глаголев В.В. и др. — Сообщение ОИЯИ, P1-90-561, Дубна, 1990.
11. Glagolev V.V. et al. — JINR Preprint E1-86-78, Dubna, 1986; Глаголев В.В. и др. — Препринт ОИЯИ P1-87-61, Дубна, 1987.

Рукопись поступила в издательский отдел
27 декабря 1990 года.