

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

P1-87-61

АЗИМУТАЛЬНЫЕ КОРРЕЛЯЦИИ
И ОБРАЗОВАНИЕ ДЕЙТРОНОВ
ВО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ ПРОТОНОВ
С ЛЕГКИМИ ЯДРАМИ

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

Направлено в журнал "Ядерная физика"

1987

В.В.Глаголев, Р.М.Лебедев, Г.Д.Пестова, Й.Урбан
Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

П.Зелински, Т.Собчак, И.Стэпаняк
Институт ядерных проблем, Варшава

М.Бано, М.Семан, Л.Шандор
Институт экспериментальной физики САН, Кошице, ЧССР

А.Дирнер, Г.Мартинска, Й.Паточка, Й.Хлавачова
Университет им. П.Й.Шафарика, Кошице, ЧССР

К.У.Хайретдинов
Физический институт АН СССР, Москва

Г.Браун, Ж.-П.Жербер, П.Жюйо, А.Мишалон
Центр ядерных исследований, Страсбург, Франция

А.К.Качарава, М.С.Ниорадзе, З.Р.Салуквадзе
Институт физики высоких энергий ТГУ, Тбилиси

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы во многих экспериментальных исследованиях для аргументации в пользу тех или иных механизмов реакции привлекаются распределения по относительному азимутальному углу $/I-5/$.

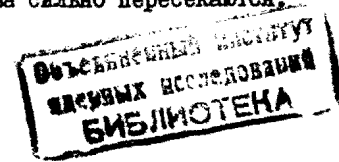
В настоящей работе на основе сравнения экспериментальных данных реакции ${}^4\text{He}p \rightarrow dppn$ с расчетами по модели кратных столкновений показана зависимость азимутальных корреляций от типа выборки событий. Введено инвариантное представление результатов корреляционного анализа для эксклюзивных экспериментов. Получены новые результаты по взаимодействию пар нуклонов в конечном состоянии с образованием дейтрона.

2. ЭКСПЕРИМЕНТ

Работа выполнена с помощью 100-см водородной пузырьковой камеры, экспонированной в пучках ядер ${}^4\text{He}$ с импульсами 8,6 и 13,5 ГэВ/с на синхрофазотроне ОИЯИ.

После стандартной процедуры обработки были отобраны случаи реакции ${}^4\text{He}p \rightarrow dppn$: 2783 события при 8,6 ГэВ/с и 619 событий при 13,5 ГэВ/с. Каждый из наборов в свою очередь был разделен на события с перезарядкой и без неё (прямой канал). Под перезарядкой подразумевались случаи, в которых после взаимодействия самой быстрой частицей в системе покоя ядра ${}^4\text{He}$ был нейтрон.

В опубликованных ранее работах $/2,6/$ было показано, что обсуждаемая реакция идет главным образом через двукратное рассеяние протона, а дейтрон получает небольшой импульс ($p \lesssim 0,7$ ГэВ/с) и имеет характеристики спектатора. При дальнейшем анализе мы будем использовать события с импульсом дейтрона до 0,7 ГэВ/с, либо события, где дейтрон является самой медленной частицей в системе покоя ядра ${}^4\text{He}$. Указанные два множества сильно пересекаются.



3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Мы будем далее рассматривать корреляции нуклонов. В качестве меры корреляции примем асимметрию распределений по относительному азимутальному углу пары нуклонов $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$:

$$A = \frac{n(\varphi > 90^\circ) - n(\varphi < 90^\circ)}{n(\varphi > 90^\circ) + n(\varphi < 90^\circ)}.$$

При таком определении нуклоны, вылетающие в противоположные стороны, имеют $A > 0$. В случае малого числа вторичных частиц очевидно сильное влияние кинематики процесса. Так, в упругом рассеянии частиц угол разлёта по азимуту равен 180° и асимметрия $A = 1$.

Для трех частиц в конечном состоянии из условия $\varphi_{12} + \varphi_{13} + \varphi_{23} = 360^\circ$ и закона сохранения поперечного импульса $\sum \vec{P}_{\perp i} = 0$ следует, что $\varphi_{ik} + \varphi_{jk} \geq 180^\circ$, то есть на диаграмме $(\varphi_{ik}, \varphi_{jk})$ все события располагаются выше диагонали^{/3/}.

В рассматриваемой реакции 4 частицы и связи относительных азимутальных углов не столь очевидны.

Для удобства анализа выберем новые переменные. Ранее мы использовали инвариантное представление данных на диаграмме: асимметрия в зависимости от суммы средних быстрот нуклонов пары^{/2/}.

При этом нуклоны упорядочивались по скорости и им присваивались индексы 1, 2, 3, начиная с самого быстрого (лидера). Пары группировались по индексам (1,2), (1,3), (2,3). Неудобством такого представления является растяжение шкалы быстрот с ростом энергии падающего ядра. Это неудобство снимается использованием зависимости асимметрии от суммы индексов нуклонов пары (3, 4 и 5).

В качестве примера приведем результаты для прямого канала и перезарядки реакции ${}^4\text{He} \rightarrow dppn$ при двух энергиях (рис. 1 и табл. 1). Взяты события с $p_d < 0,7$ ГэВ/с в системе покоя ядра ${}^4\text{He}$. Видно хорошее совпадение данных, что свидетельствует о неизменности характера реакции. Одновременно заметно различие в поведении асимметрии для прямого канала и перезарядки. Это разли-

чие усугубляется при разбиении событий на группы с малыми и большими переданными импульсами: $|t| < 0,2$ (ГэВ/с)² и $|t| > 0,2$ (ГэВ/с)².

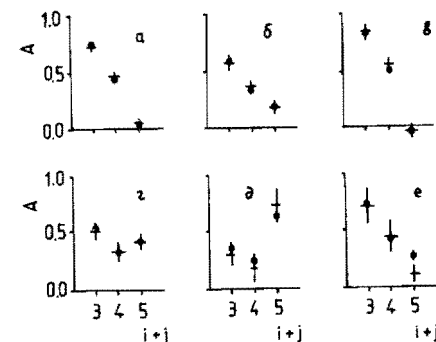


Рис. 1. Зависимость асимметрии распределений по относительному азимутальному углу от суммы индексов нуклонов для реакции ${}^4\text{He} \rightarrow dppn$ (импульс дейтрона меньше 0,7 ГэВ/с).

• - импульс ${}^4\text{He}$ - 8,6 ГэВ/с; + - импульс ${}^4\text{He}$ - 13,5 ГэВ/с;
а), б) и в) - прямой канал; г), д) и е) - перезарядка;
а) и г) - без обрезаний; б) и д) - $|t| < 0,2$ (ГэВ/с)²;
в) и е) - $|t| > 0,2$ (ГэВ/с)².

Таблица 1. Асимметрии распределений по относительному азимутальному углу для реакции ${}^4\text{He} \rightarrow dppn$ при 8,6 и 13,5 ГэВ/с ($p_d < 0,7$ ГэВ/с)

Индексы нуклонов	Импульс ядра ${}^4\text{He}$ (ГэВ/с)	Прямой канал	Перезарядка
1,2	8,6	$0,74 \pm 0,02$	$0,56 \pm 0,04$
	13,5	$0,71 \pm 0,05$	$0,51 \pm 0,11$
1,3	8,6	$0,44 \pm 0,02$	$0,35 \pm 0,04$
	13,5	$0,46 \pm 0,05$	$0,33 \pm 0,10$
2,3	8,6	$0,05 \pm 0,03$	$0,44 \pm 0,04$
	13,5	$0,06 \pm 0,04$	$0,42 \pm 0,10$

Здесь $|t|$ - величина квадрата четырехимпульса, переданного от падающего протона к лидирующему нуклону в системе покоя ядра ${}^4\text{He}$. Результаты для событий, в которых дейтрон имеет наименьший среди вторичных частиц импульс для 8,6 ГэВ/с, приведены на рис. 2. Видно, что для пары с индексами 2 и 3, то есть с суммарным индексом 5 (это - пара самых медленных в системе ядра ${}^4\text{He}$ нуклонов), различие для прямого канала и перезарядки при $|t| < 0,2$ (ГэВ/с)² возросло.

Мы попытались сравнить полученные результаты с расчетами по простой модели кратного рассеяния, проведенными методом Монте-Карло. Генерация событий проводилась следующим образом. Импульсы Ферми-движения двух нуклонов в ядре ${}^4\text{He}$ генерировались независимо с использованием волновой функции Басселя-Вилкина^{/7/} в предположении изотропии. Остатку-дейтрону приписывался импульс

$$\vec{P}_d = -(\vec{P}_1 + \vec{P}_2).$$

Накладывалось энергетическое условие $E_1 + E_2 + E_d = m_{\text{He}}$. Бралась масса реального дейтрона, а сход с массовой поверхности

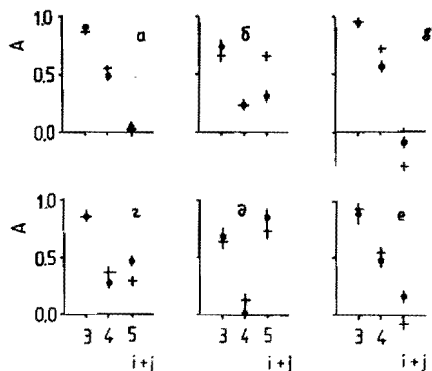


Рис. 2. Зависимость асимметрии распределений по относительному азимутальному углу от суммы индексов нуклонов для реакции ${}^4\text{He}p \rightarrow dppn$ в случае, когда дейтрон является самой медленной частицей в системе покоя ядра ${}^4\text{He}$. * - эксперимент при 8,6 ГэВ/с; + - расчет по модели Монте-Карло. Остальные обозначения те же, что и на рис.1.

предполагался одинаковым для обоих нуклонов:

$$\sqrt{m_{\text{off}} + p_1^2} + \sqrt{m_{\text{off}} + p_2^2} + E_d = m_{\text{He}}.$$

Разыгрывались два последовательных рассеяния падающего протона на нуклонах массы m_{off} с использованием дифференциального сечения упругого рассеяния, параметризованного к экспериментальным данным:

$$\frac{d\sigma}{dt} \sim e^{-b|t|}, \quad b = 5,8 \text{ (ГэВ/с)}^{-2/8/}$$

Для канала с перезарядкой в одном из актов рассеяния использовалось сечение элементарной $np \rightarrow pn$ перезарядки

$$\frac{d\sigma}{dt} = a_1 e^{-b_1|t|} + a_2 e^{-b_2|t|}, \quad a_1 = 5,54 \quad v_1 = 26,6^{/9/}$$

$$a_2 = 4,12 \quad v_2 = 2,64$$

Последнее было оправдано общим видом зависимости полного сечения перезарядки от энергии для легких ядер и элементарного акта (рис. 3).

Вывод каждого из нуклонов после рассеяния ($P_0 + P_{\text{off}} \rightarrow P_1 + P_2$) на массовую поверхность обеспечивался выполнением условия

$$|t| > |t|_{\text{порога}}, \text{ где}$$

$$t_{\text{порога}} = (P_0 - P_1)^2 = (P_{\text{off}} - P_2)^2 = m^2 + m_{\text{off}}^2 - 2mE_{\text{off}}.$$

В конце процедуры зависимость дифференциального сечения реакции от t приводилась к экспериментальной.

Полученные асимметрии распределений по относительному азимутальному углу двух нуклонов приведены в таблицах 2, 3, 4 вместе с экспериментальными результатами и показаны на рис.2.

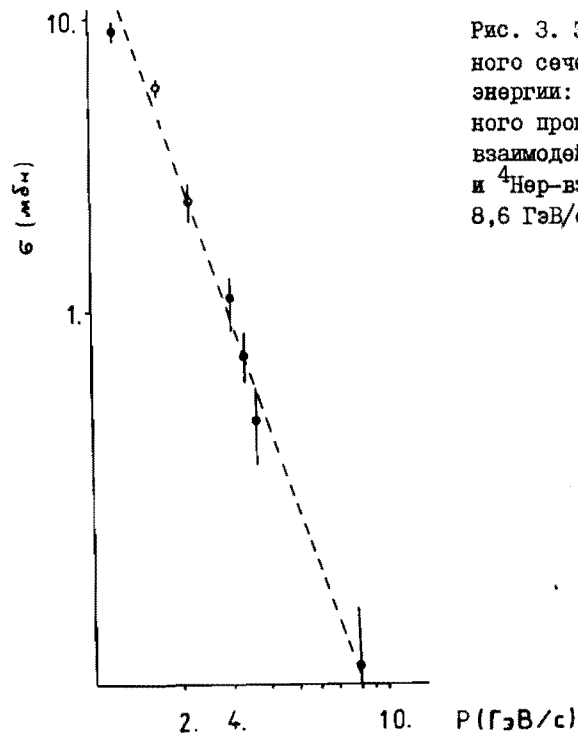


Рис. 3. Зависимость поперечного сечения перезарядки от энергии: ● - для элементарного процесса; ○ - для dp -взаимодействий при 3,33 ГэВ/с и ${}^4\text{He}$ -взаимодействий при 8,6 ГэВ/с и 13,5 ГэВ/с.

Таблица 2. Асимметрии распределений по относительному азимутальному углу для прямого канала реакции ${}^4\text{He} \rightarrow dppn$ (8,6 ГэВ/с) (дейтрон самый медленный в системе ${}^4\text{He}$)

Индекс нуклонов		Все $ t $	$ t < 0,2(\text{ГэВ/с})^2$	$ t > 0,2(\text{ГэВ/с})^2$
			1,2	Эксперимент
	Расчет Монте-Карло	$0,86 \pm 0,03$	$0,65 \pm 0,05$	$0,97 \pm 0,04$
1,3	Эксперимент	$0,45 \pm 0,03$	$0,22 \pm 0,05$	$0,55 \pm 0,04$
	Расчет Монте-Карло	$0,54 \pm 0,03$	$0,22 \pm 0,04$	$0,71 \pm 0,04$
2,3	Эксперимент	$0,03 \pm 0,03$	$0,31 \pm 0,06$	$-0,09 \pm 0,04$
	Расчет Монте-Карло	$0,02 \pm 0,02$	$0,64 \pm 0,05$	$-0,31 \pm 0,03$

Таблица 3. Асимметрии распределений по относительному азимутальному углу для канала перезарядки реакции ${}^4\text{He} \rightarrow dppn$ (8,6 ГэВ/с)

Индекс нуклонов		Все $ t $	$ t < 0,2 \text{ ГэВ/с}$	$ t > 0,2 \text{ ГэВ/с}$
			1,2	Эксперимент
	Расчет Монте-Карло	$0,75 \pm 0,06$	$0,53 \pm 0,08$	$0,93 \pm 0,09$
1,3	Эксперимент	$0,27 \pm 0,06$	$0,00 \pm 0,08$	$0,48 \pm 0,08$
	Расчет Монте-Карло	$0,36 \pm 0,05$	$0,13 \pm 0,07$	$0,55 \pm 0,07$
2,3	Эксперимент	$0,46 \pm 0,06$	$0,86 \pm 0,11$	$0,17 \pm 0,07$
	Расчет Монте-Карло	$0,29 \pm 0,05$	$0,74 \pm 0,09$	$-0,09 \pm 0,06$

Видно хорошее качественное и неплохое количественное согласие результатов с расчетом. Обращает на себя внимание различие расчета и эксперимента для событий прямого канала с $|t| < 0,2 (\text{ГэВ/с})^2$, которое составляет около 5 стандартных отклонений. Наиболее естественным объяснением этого различия нам представляется уменьшение числа скоррелированных np -пар (а в прямом канале два медленных нуклона - это нейтрон и протон) за счет взаимодействия в конечном состоянии. Этот результат прямо связан с полученными ранее данными об образовании дейтронов в реакциях ${}^4\text{He} \rightarrow ddp$ и ${}^4\text{He} \rightarrow dppn$ /10/. Имеются веские аргументы против квазиупругого выбивания дейтронов из ядра ${}^4\text{He}$. Это малая вероятность кластеризации типа ${}^4\text{He} \rightarrow dd$, что следует из теоретических оценок /11/ и экспериментальных данных /12/. Наклон дифференциального сечения реакции ${}^4\text{He} \rightarrow ddp$ $\delta = 7,0 \pm 0,7 (\text{ГэВ/с})^{-2}$ слишком мал по сравнению с наклоном дифференциального сечения упругого pd -рассеяния $\delta = 22,4 \pm 0,1 (\text{ГэВ/с})^{-2}$ и близок к наклону, характерному для нуклон-нуклонного рассеяния.

Таблица 4. Асимметрия распределений по относительноному азимутальному углу пар нуклонов для прямого канала реакции ${}^4\text{He} \rightarrow dppn$ при 8,6 ГэВ/с при различных ограничениях на вылет самого медленного из нуклонов

Индекс нуклонов	Назад		Назад и $ P_z > 0,3$ ГэВ/с		Вперед		Вперед и $ P_z > 0,3$ ГэВ/с	
	Назад	Назад и $ P_z > 0,3$ ГэВ/с	Назад и $ P_z > 0,3$ ГэВ/с	Вперед	Вперед и $ P_z > 0,3$ ГэВ/с	Вперед и $ P_z > 0,3$ ГэВ/с	Вперед и $ P_z > 0,3$ ГэВ/с	
1,2	Эксперимент	0,74±0,06	0,98±0,11	0,57±0,08	0,95±0,05	0,99±0,09	0,98±0,06	
	Расчет Монте-Карло	0,84±0,07	0,91±0,09	0,70±0,11	0,86±0,03	0,96±0,06	0,82±0,04	
1,3	Эксперимент	0,44±0,06	0,33±0,08	0,52±0,08	0,46±0,04	0,44±0,07	0,47±0,05	
	Расчет Монте-Карло	0,38±0,06	0,38±0,07	0,40±0,10	0,58±0,03	0,43±0,05	0,65±0,04	
2,3	Эксперимент	0,13±0,05	-0,09±0,08	0,31±0,07	-0,02±0,04	-0,03±0,07	0,11±0,04	
	Расчет Монте-Карло	0,17±0,05	0,05±0,06	0,41±0,10	-0,01±0,03	-0,07±0,05	0,01±0,03	

Поэтому разумно представить образование неспекторного дейтрона в реакции ${}^4\text{He} \rightarrow ddp$ как коалесценцию нуклонов отдачи из ближайшего конкурирующего процесса ${}^4\text{He} \rightarrow dppn$ (диаграммы а и б на рис. 4).

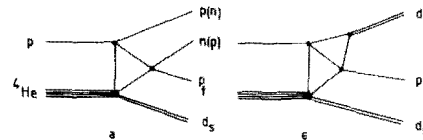


Рис. 4. Диаграммы двукратного рассеяния без образования (а) и с образованием (б) дейтрона.

Приведем простую оценку. В предположении, что при малых значениях $|t|$ в канал ddp переходят np -пары с большими относительными азимутальными углами ($A = 1$), а при больших — с малыми ($A = -1$), можно оценить уменьшение асимметрии в реакции ${}^4\text{He} \rightarrow dppn$:
$$\Delta A = \frac{N_{ddp}}{N_{dppn} + N_{ddp}} (A - A_{dppn}).$$
 Здесь N означает число событий в соответствующем интервале $|t|$. Оценка дана для области $|t| < 0,2$ (ГэВ/с)² $\Delta A = 0,28 \pm 0,05$ ($\Delta A_{\text{эксп.}} = 0,33 \pm 0,08$) и для $|t| > 0,2$ (ГэВ/с)² $\Delta A = -0,15 \pm 0,02$ ($\Delta A_{\text{эксп.}} = -0,22 \pm 0,05$). Видно неплохое согласие результатов.

Другой вид отклонения от общего хода азимутальных корреляций связан с отмеченным ранее^{2/} проявлением дибарионных состояний.

Как проявляется эффект двукратного рассеяния в азимутальных корреляциях, можно видеть из таблицы 4. В этой таблице приведены данные для прямого канала реакции ${}^4\text{He} \rightarrow dppn$ при 8,6 ГэВ/с с различными ограничениями, накладываемыми на самый медленный из нуклонов в системе покоя ${}^4\text{He}$. Видна, например, значительная корреляция для случая, когда самый медленный из нуклонов вылетает назад и имеет импульс более 0,3 ГэВ/с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе введено новое представление данных по азимутальным корреляциям в эксклюзивном анализе и показано, что характер реакции ${}^4\text{He}p \rightarrow dppn$ одинаков при импульсах 8,6 ГэВ/с и 13,5 ГэВ/с. Проведенные расчеты по модели кратного рассеяния дают удовлетворительное объяснение общего характера азимутальных корреляций. В то же время наблюдаются отклонения, связанные с образованием дейтронов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Басова Е.С. и др. ЯФ, 1983, 37, с. 123.
2. Зелински П. и др. ЯФ, 1984, 40, с. 482.
3. Aladashvili B.S. et al., JINR Preprint E1-12550, Dubna, 1979.
4. Agakishiev N.N. et al., JINR, E1-84-448, Dubna, 1984;
JINR, E1-84-551, Dubna, 1984.
5. Агакишиев Г.Н. и др. ОИЯИ, PI-84-551, Дубна, 1984.
6. Aladashvili B.S. et al., Acta Phys.Slov., 1981, 31, p.29.
7. Bassel R.H., Wilkin C. Phys.Rev., 1968, v.174, p.1179.
8. Banary O. et al., UCRL-20000NN, 1970.
9. Aladashvili B.S. et al., Nucl.Phys., 1975, B86, p.461.
10. Glagolev V.V. et al., JINR, E1-86-78, Dubna, 1986;
Acta Phys.Slov., 1986, 36, p.218.
11. Rörke G. et al., Nucl.Phys., 1982, A379, p.536;
Nucl.Phys., 1983, A399, p.587.
12. Глаголев В.В. и др. Сообщение ОИЯИ I-80-242, Дубна, 1980;
ЯФ, 1986, 43, с. 791.

Рукопись поступила в издательский отдел
5 февраля 1987 года.

Глаголев В.В. и др.
Азимутальные корреляции и образование дейтронов
во взаимодействиях протонов с легкими ядрами

P1-87-61

Анализируются азимутальные корреляции в реакции ${}^4\text{He}p \rightarrow dppn$. Эксперимент выполнен на 100-см водородной пузырьковой камере ЛВЗ ОИЯИ. Введено новое инвариантное представление данных по азимутальным корреляциям в эксклюзивном анализе. Показано, что характер реакции ${}^4\text{He}$ одинаков при импульсах 8,6 ГэВ/с и 13,5 ГэВ/с. Расчеты, проведенные по модели двукратного рассеяния методом Монте-Карло, дают удовлетворительное объяснение поведения азимутальных корреляций. Вместе с тем наблюдается ослабление корреляции для np -пар, связанное с образованием дейтрона из скоррелированных нуклонов отдачи.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1987

Перевод О.С.Виноградовой

Glagolev V.V. et al.
Azimuthal Correlations and Deuteron Production
in Proton Interactions with Light Nuclei

P1-87-61

Azimuthal correlations in ${}^4\text{He}p \rightarrow dppn$ reaction are analysed. The experiment has been performed on the 1m HBC of the LHE, JINR. A new invariant representation of the azimuthal correlation data is introduced in inclusive approach. It is shown that the characteristics of the reaction are the same at 8.6 GeV/c and 13.5 GeV/c values of ${}^4\text{He}$ momenta. The behaviour of the azimuthal correlations is satisfactorily explained in the framework of the double scattering model realized by Monte-Carlo calculations. At the same time observed depletion of correlations for np pairs is connected with deuteron formation from the correlated recoil nucleons.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1987