

P1-2008-148

В. В. Глаголев, Г. Мартинска<sup>1</sup>, Я. Мушински<sup>1</sup>

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ КОРРЕЛЯЦИИ  
В БЕЗМЕЗОННЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ  
ЛЕГКИХ ЯДЕР С ПРОТОНАМИ

---

<sup>1</sup>Университет им. П. Й. Шафарика, Кошице, Словакия

Глаголев В. В., Мартинска Г., Мушински Я. P1-2008-148  
Пространственные корреляции в безмезонных взаимодействиях  
легких ядер с протонами

Рассматриваются реакции разрушения ядер дейтерия и гелия без рождения  $\pi$ -мезонов. Экспериментально изучены характерные пространственные корреляции вторичных частиц и их связь с упругим рассеянием. В связи с этим обсуждается «обратная задача» — синтез легких ядер.

Работа выполнена в Лаборатории физики высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2008

Glagolev V. V., Martinska G., Musinski J. P1-2008-148  
Space Correlations in Pionless Interactions  
of Light Nuclei with Protons

In the present paper pionless break-up reactions of deuterium and helium nuclei are considered. Space correlations of secondary particles and their connection to elastic scattering are experimentally investigated. Therefore «the inverse problem» — synthesis of light nuclei is discussed.

The investigation has been performed at the Veksler and Baldin Laboratory of High Energy Physics, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2008

## 1. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ЛЕГКИХ ЯДЕР С ПРОТОНАМИ

Легкие ядра являются малонуклонными системами, на которых удобно проверять теоретические модели ядерных сил. Импульсные распределения ядер-остатков позволяют делать выбор среди применяемых волновых функций. Поляризованные ядра используются при постановке исследований с целью восстановления амплитуд нуклон-нуклонного рассеяния, оценки вклада  $D$ -волны в волновую функцию дейтрона и решения других классических задач. Относительно малые и значительно различающиеся значения энергии связи, приходящейся на один нуклон, позволяют осуществлять реакции управляемого термоядерного синтеза с большим выделением энергии, что представляет интерес для решения мировых энергетических проблем.

Исследования взаимодействий легких ядер с протонами в течение 30 лет проводились на 100-см водородной пузырьковой камере ЛВЭ ОИЯИ в пучках синхрофазотрона.

Использование уникального сочетания пучков ускоренных ядер с чисто протонной мишенью и одновременно детектором  $4\pi$ -геометрии позволило впервые изучить целый ряд физических явлений, а также сформулировать новые задачи для решения их с использованием электронной методики.

В данной работе мы остановимся только на одном исследовании, а именно на изучении характерных пространственных корреляций в безмезонных процессах.

В табл. 1 и 2 приводятся сведения об изучавшихся реакциях.

В табл. 1 даны поперечные сечения реакций упругого рассеяния и безмезонного развала дейтрона в  $dp$ -взаимодействиях при импульсе дейтронов 3,34 ГэВ/с. Полное число обработанных событий составило 237 413. По-

Таблица 1. Поперечные сечения безмезонных  $dp$ -реакций

Реакция	Число событий	Поперечное сечение, мб
$dp \rightarrow dp$	16 184*	$10,0 \pm 0,7$
$dp \rightarrow ppn$	102 778	$37,2 \pm 1,4$
Всего	118 962	

Таблица 2. Поперечные сечения безмезонных  ${}^4\text{He}p$ -реакций

Реакция	Число событий	Поперечное сечение, мб
${}^4\text{He}p \rightarrow {}^4\text{He}p$	2587*	$36,00 \pm 3,00$
$\rightarrow {}^3\text{He}pn$	3765	$12,60 \pm 0,22$
$\rightarrow {}^3\text{He}pp$	3249	$12,28 \pm 0,22$
$\rightarrow dppn$	2997	$9,91 \pm 0,19$
$\rightarrow pppn$	3074	$11,39 \pm 0,21$
$\rightarrow ddp$	411	$1,53 \pm 0,08$
$\rightarrow {}^3\text{He}d$	54	$0,20 \pm 0,14$
Всего	16137	

перечные сечения получены после введения поправок на потери в упругом рассеянии на основе полного сечения  $\sigma_{\text{tot}} = 82,889 \pm 0,063$  мб из работы [1].

В табл. 2 приведены данные для безмезонных  ${}^4\text{He}p$ -взаимодействий при импульсе 8,6 ГэВ/с. Число обработанных событий здесь гораздо меньше (38 625), чем в случае  $dp$ -взаимодействий. Также введены поправки на потери в упругом рассеянии. Полное сечение определено как  $\sigma_{\text{tot}} = 149,5 \pm 1,9$  мб.

Звездочкой в обеих таблицах помечено число событий без учета потерь.

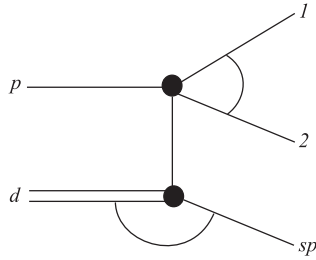


Рис. 1. Диаграмма Фейнмана для случая развала дейтрона

В 1950-е г. рядом исследователей (Колыбасов В. М., Лексин Г. А., Шапиро И. С.; см., например, их обзор в УФН [2]) рассматривалась справедливость полюсного подхода для реакций развала, а именно возможность факторизации амплитуд в двух вершинах простейшей диаграммы Фейнмана (рис. 1).

При этом область импульсов спектатора, в которой наблюдалась изотропия по углу Треймана–Янга, считалась областью применимости полюсного приближения.

Угол Треймана–Янга определен в лабораторной системе как

$$\Phi_{\text{TY}} = \arccos \left( \frac{[-p_d \ p_{sp}] [p_{\text{быстр}} \ p_{\text{медл}}]}{(|[-p_d \ p_{sp}]| | [p_{\text{быстр}} \ p_{\text{медл}}]|)} \right),$$

а асимметрия как

$$A_{\text{TY}} = [N(\Phi_{\text{TY}} < 90^\circ) - N(\Phi_{\text{TY}} > 90^\circ)] / [N(\Phi_{\text{TY}} < 90^\circ) + N(\Phi_{\text{TY}} > 90^\circ)].$$

Здесь  $p_d$  — импульс падающего дейтрона,  $p_{sp}$  — импульс спектатора,  $p_{\text{быстр}}$  — и  $p_{\text{медл}}$  — импульсы быстрой 1 и медленной 2, не считая спектатора, частиц в системе покоя дейтрона.

## 2. РАЗВАЛ ЯДЕР, ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В КОНЕЧНОМ СОСТОЯНИИ И УПРУГОЕ РАССЕЯНИЕ

В работе [3] нами было показано, что в случае реакции  $dp \rightarrow ppn$  асимметрия систематически растет с ростом импульса нуклона-спектатора.

Этот рост был объяснен в рамках модели Глаубера [4] в предположении, что амплитуды  $np$ - и  $pp$ -рассеяния равны и чисто мнимы. Одновременно было показано, что такое поведение асимметрии прямо связано с конкуренцией прямого разрушения ядра дейтерия и упругого  $dp$ -рассеяния при малых переданных импульсах. Этот вывод подкреплялся и поведением распределения по поперечным импульсам нуклонов в канале развала в области их малых значений. В более поздних работах [5, 6] был использован угол, введенный К. Вилкиным для изучения пространственных корреляций:

$$\alpha_{CW} = \arccos [(p_{sp}q)/(|p_{sp}| |q|)],$$

где  $q$  — трехмерный импульс, переданный от протона-мишени к рассеянному протону.

Такое представление не изменило характера и величины наблюдаемых корреляций. Соответствующую асимметрию будем теперь обозначать как  $A_{CW}$ .

Благодаря созданию базы данных по взаимодействиям легких ядер с протонами в водородной камере стало возможным проведение сравнительного анализа корреляций в безмезонных реакциях с участием ускоренных ядер дейтерия и  ${}^4\text{He}$  с протонами.

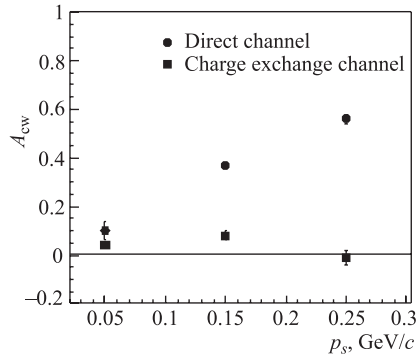


Рис. 2. Зависимость асимметрии распределений по углу  $\alpha_{CW}$  для реакции  $dp \rightarrow ppn$

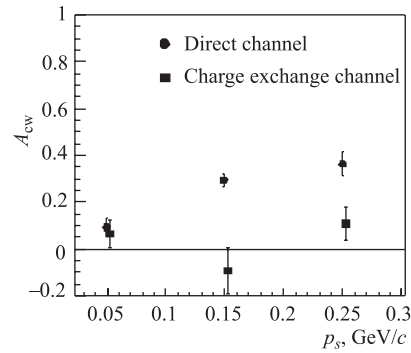


Рис. 3. Зависимость асимметрии распределений по углу  $\alpha_{CW}$  для реакции  ${}^4\text{He} p \rightarrow {}^3\text{He} pn$

Остановимся на реакциях  $dp \rightarrow ppn$  и  ${}^4\text{He}p \rightarrow {}^3\text{He}pn$ , которые можно подразделить на прямой развал и перезарядку. Перезарядкой будем называть события, в которых нейтрон является самой быстрой из вторичных частиц в системе покоя ядра. Сравним поведение зависимости асимметрии в распределениях по углу Вилкина от импульса ядра-остатка (спектатора) для прямого канала и перезарядки. На рис. 2 приведены данные для реакции  $dp \rightarrow ppn$ , а на рис. 3 — для реакции  ${}^4\text{He}p \rightarrow {}^3\text{He}pn$ .

Видна существенная разница между поведением асимметрии в прямом развале и перезарядке. Наблюдается систематический рост асимметрии в реакциях прямого развала и практическое ее отсутствие в случае перезарядки.

Заметим, что в изучаемых реакциях основная масса событий сосредоточена в области сравнительно небольших импульсов спектаторов. Это видно из рис. 4, на котором приведены импульсные распределения спектаторов (ядер-остатков) основных безмезонных реакций. В области импульсов 0,15–0,20 ГэВ/с величина асимметрии по углу Вилкина для реакций прямого развала достигает 0,3.

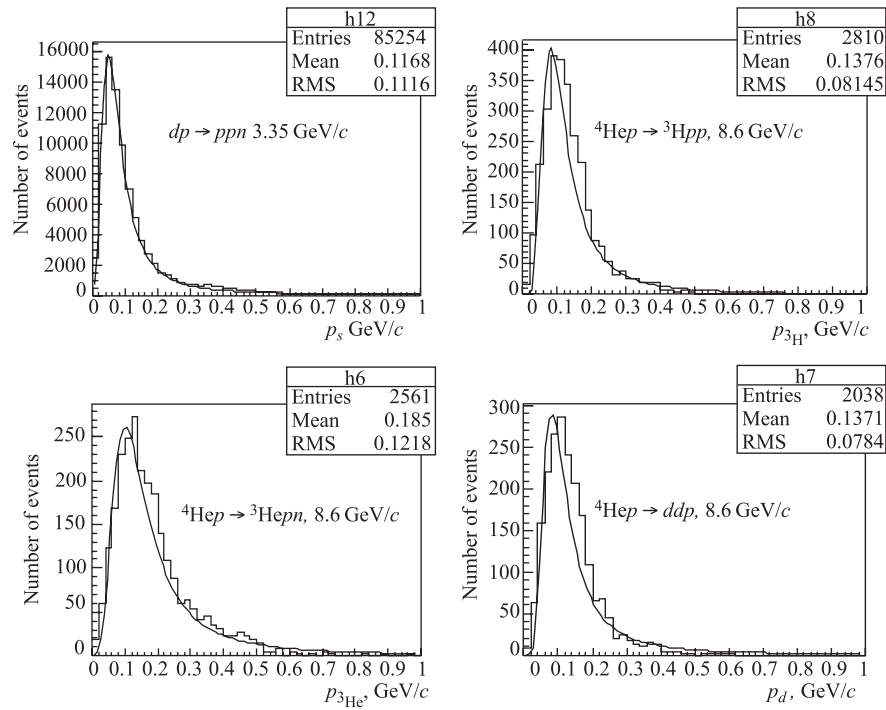


Рис. 4. Импульсные распределения спектаторов

На рис. 5 приведено суммарное распределение по поперечным импульсам нуклонов для реакций  ${}^4\text{He}p \rightarrow {}^3\text{He}pn$  и  ${}^4\text{He}p \rightarrow {}^3\text{He}pp$ . Наблюдается характерная «недостача» событий в области малых значений импульсов.

Трудно предположить, что недостаток событий с малыми поперечными импульсами мог бы быть связан с методическими потерями, как в случае  ${}^4\text{He}p$ -упругого рассеяния. В подтверждение на рис. 6 приводим распределения по азимутальному углу для упругого рассеяния и ядер-остатков  ${}^3\text{He}$  из реакции  ${}^4\text{He}p \rightarrow {}^3\text{He}pn$ . Ясно видимый провал в районе  $90^\circ$  в упругом рассеянии объясняется потерями событий с малыми переданными импульсами протону отдачи. Для азимутальных углов вылета ядер  ${}^3\text{He}$  такого рода потерь нет.

Если мы добавим к распределению на рис. 5 распределение по поперечным импульсам из упругого  ${}^4\text{He}$ -рассеяния, то получим по аналогии с работой [3] регулярное распределение, представленное на рис. 8.

Распределение для упругого  ${}^4\text{He}$ -рассеяния, показанное на рис. 7, получено методом Монте-Карло с использованием наклона экспоненты  $b = 29,3 \pm 1,2 \text{ (ГэВ/с)}^{-2}$  [7].

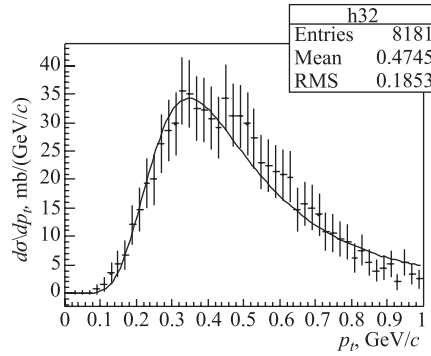


Рис. 5. Суммарное распределение поперечных импульсов для реакций  ${}^4\text{He}p \rightarrow {}^3\text{He}pn$  и  ${}^4\text{He}p \rightarrow {}^3\text{He}pp$ . Сплошная линия — описание полиномом 7-й степени

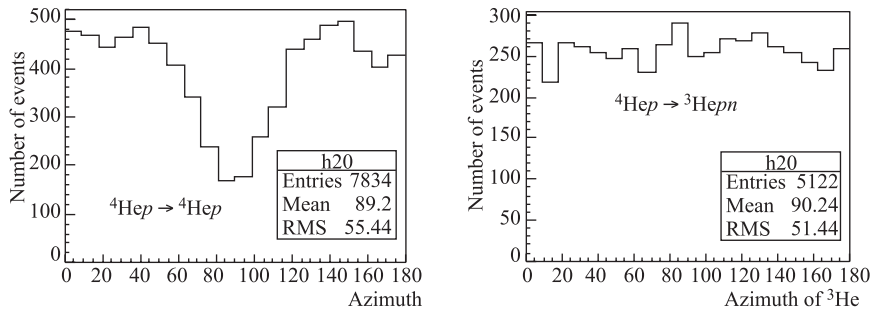


Рис. 6. Азимутальные распределения протонов из упругого  ${}^4\text{He}p$ -рассеяния (слева) и ядер  ${}^3\text{He}$  из реакции  ${}^4\text{He}p \rightarrow {}^3\text{He}pn$  (справа)

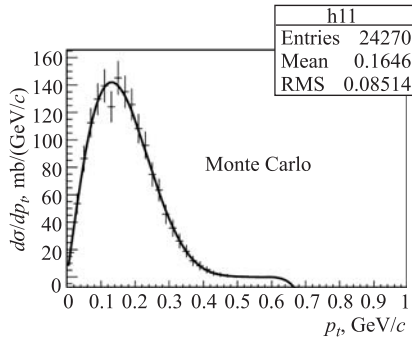


Рис. 7. Распределение поперечных импульсов для упругого  $^4\text{He}$ -рассеяния. Кривая — описание полиномом 7-й степени

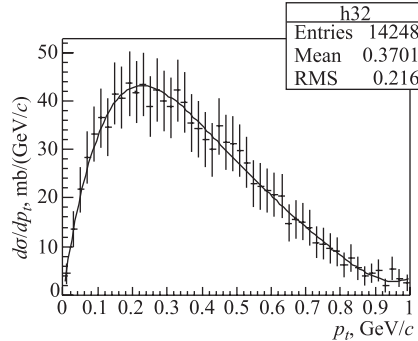


Рис. 8. Суммарное распределение поперечных импульсов для реакций  $^4\text{He} \rightarrow ^3\text{He}n$  и  $^4\text{He} \rightarrow ^3\text{He}p$  с добавлением распределения для упругого рассеяния. Кривая — описание полиномом степени 5

### 3. ОСОБЕННОСТИ РЕАКЦИЙ С ПЕРЕЗАРЯДКОЙ

Обратим внимание на различие характера распределений по квадрату четырехмерного переданного импульса для прямого развала (direct channel) и перезарядки (charge exchange) в исследуемых реакциях.

Эти распределения представлены на рис. 9. Ясно виден спад дифференциальных сечений для прямого развала ядер дейтерия и гелия при нулевых переданных импульсах, тогда как в реакциях перезарядки такого спада нет.

Поясним причину этого различия, а также различия в асимметриях по углу Вилкина через взаимодействие в конечном состоянии (ВКС) с помощью соответствующих диаграмм Фейнмана (рис. 10, 11). Принимаем, что «верхняя» из выходящих на диаграммах частиц является быстрой.

Как видно из рисунков, в обоих случаях при перезарядке две близких по импульсам частицы не образуют (или образуют с весьма малой вероятностью) ядра  $^2\text{He}$  или  $^4\text{Li}$ .

Таким образом, по совокупности фактов мы убеждаемся в том, что наблюдаемые эффекты в поведении асимметрий, дифференциальных сечений или распределений поперечных импульсов связаны с взаимодействием в конечном состоянии, приводящим к восстановлению исходного ядра (переход в канал упругого рассеяния).



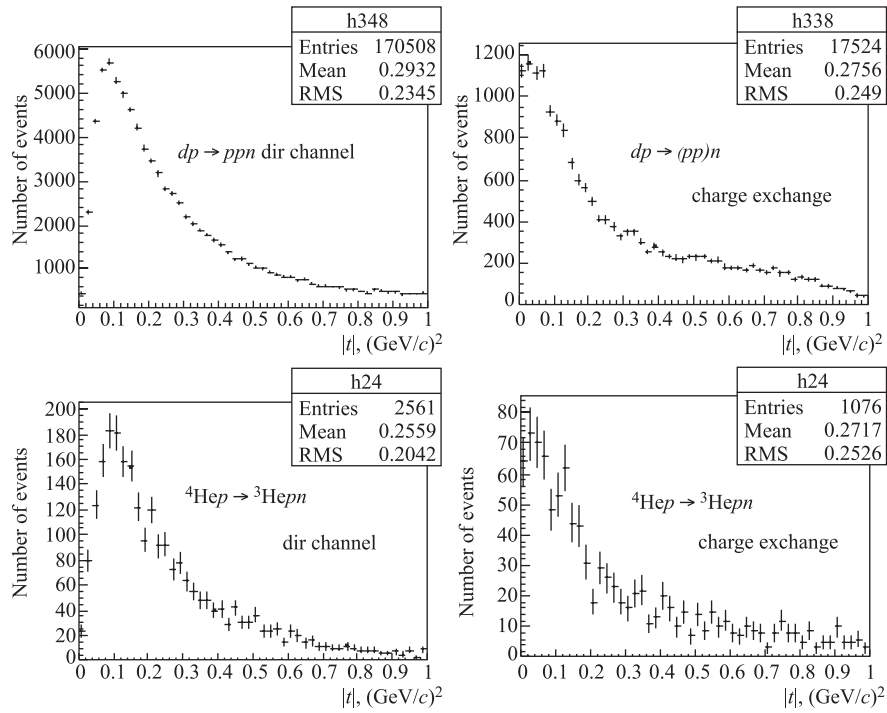


Рис. 9. Дифференциальные сечения прямого развала (слева) и перезарядки (справа) для реакции  $dp \rightarrow ppn$  (вверху) и  ${}^4\text{He}p \rightarrow {}^3\text{He}pn$  (внизу)

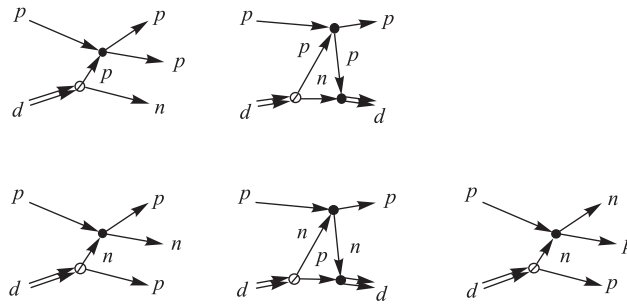


Рис. 10. Диаграммы Фейнмана для  $dp$ -взаимодействия

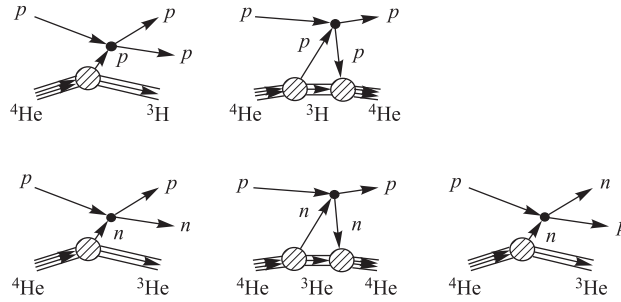


Рис. 11. Диаграммы Фейнмана для  ${}^4\text{He}p$ -взаимодействия

#### 4. НЕСКОЛЬКО СЛОВ О ТЕРМОЯДЕРНОМ СИНТЕЗЕ

Поведение асимметрии в углах Вилкина показывает, что в событиях прямого развала уменьшена доля случаев, когда импульсы составлявших начальное ядро частиц после взаимодействия направлены в системе покоя ядра преимущественно в противоположные полусферы. Это можно качественно проиллюстрировать схематическим рис. 12 для малых  $\alpha < 90^\circ$  (А) и больших углов  $\alpha > 90^\circ$  (В) между ядром-остатком (спектатором) и ядром-отдачей. Напомним формулу для асимметрии:

$$A_{CW} = \frac{N(\alpha_{CW} < 90^\circ) - N(\alpha_{CW} > 90^\circ)}{N(\alpha_{CW} < 90^\circ) + N(\alpha_{CW} > 90^\circ)}.$$

Положительные значения асимметрии  $A_{CW}$  означают преобладание случаев с углом  $\alpha$ , меньшим  $90^\circ$ , и относительное обеднение набора с  $\alpha > 90^\circ$  за счет ухода в упругий канал из-за ВКС.

На рис. 12 частицы 1 и 2 — падающая и рассеянная, а 3 и 4 — спектатор и частица отдачи.

Случай А соответствует углу  $\alpha < 90^\circ$ , случай В —  $\alpha > 90^\circ$ . Таким образом, для стимулирования перехода в упругий канал (синтез) желательно организовать конфигурацию типа В. Это соответствует картине столкновения встречных пучков.

Некоторые из изучаемых нами реакций по сути являются обратными реакциям управляемого термоядерного синтеза (УТС), как видно из табл. 3, взятой из обзора Велихова и Путвинского [8]. Например, реакция  ${}^4\text{He}p \rightarrow ddp$ ,

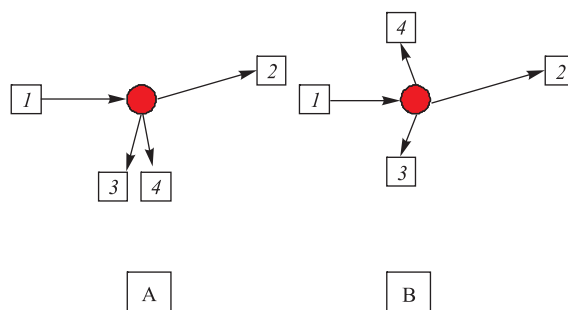


Рис. 12. Схематическое представление двух крайних случаев вылета спектатора и нуклона отдачи  $\alpha < 90^\circ$  (А) и  $\alpha > 90^\circ$  (В)

ход асимметрии для которой показан на рис. 13. Поведение асимметрии для этой реакции имеет тот же характер, что и для других безмезонных реакций.

Таблица 3. Ядерные реакции, представляющие интерес для управляемого термоядерного синтеза

Реакция	Энергетический выход $q$ , МэВ
$D+T \rightarrow {}^4\text{He}+n$	17,60
$D+D \rightarrow {}^3\text{He}+n$	3,27
$D+D \rightarrow T+p$	4,03
$D+{}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He}+p$	18,40
$p+{}^{11}\text{B} \rightarrow 3{}^4\text{He}$	8,70
${}^6\text{Li}+n \rightarrow {}^4\text{He}+T$	4,80
${}^7\text{Li}+n \rightarrow {}^4\text{He}+T+n$	- 2,47

В том же обзоре говорится, что, казалось бы, реакцию УТС легко осуществить, бросая ионы трития на твердую или газовую дейтериевую мишень. Однако инжектируемые ионы слишком быстро замедляются, сталкиваясь с холодными электронами мишени.

Один из возможных выходов может заключаться в том, чтобы, используя высказанные соображения о существующих пространственных корреляциях, попытаться инициировать реакцию термоядерного синтеза в столкновениях встречных сильнооточных пучков ионов. Поперечные сечения этих реакций достигают величин порядка 1 б в области энергий 100–500 кэВ. Конечно, потребуется сделать оценки такой возможности и экономической эффективности.

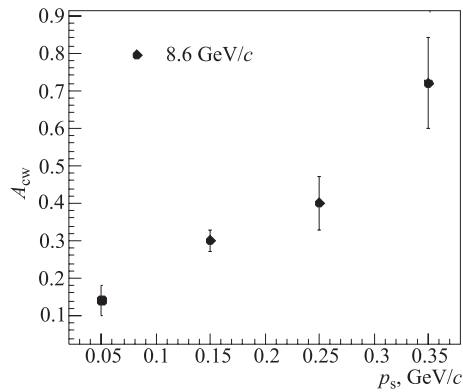


Рис. 13. Зависимость асимметрии распределений по углу  $\alpha_{CW}$  для реакции  ${}^4\text{He}p \rightarrow ddp$

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показано, что при развале легких ядер существует связь между каналами безмезонного разрушения и упругим рассеянием, обусловленная взаимодействием в конечном состоянии. Наблюдаемые пространственные корреляции указывают на возможность их использования для стимулирования процессов управляемого термоядерного синтеза.

Полезным было бы провести следующие исследования:

- спустившись по энергии ниже порога мезообразования, изучить те же корреляции во взаимодействиях легких ядер;
- изучить возможность работы во встречных пучках ионов дейтерия или других легких ядер в диапазоне энергий 100 кэВ – 1 МэВ с целью поиска возможного усиления выхода ядер гелия («горячий» катализ);
- провести оценки баланса затрат и энергетического выхода.

Работа выполнена при поддержке гранта Словакии № 1/4010/07.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Bugg D. V. et al.* // Phys. Rev. 1966. V. 146. P. 980.
2. *Колыбасов В. М., Лексин Г. А., Шапиро И. С.* // УФН. 1974. Т. 113. С. 239.
3. *Аладашвили Б. С. и др.* // ЯФ. 1976. Т. 24. С. 129.
4. *Franko V., Glauber R. J.* // Phys. Rev. 1966. V. 142. P. 1195.

5. *Aladashvili B. S. et al.* // J. Phys. G. 1977. V. 3. P. 7.
6. *Глаголев В. В. и др.* // Краткие сообщения ОИЯИ. 1995. № 5[73]. С. 51–56.
7. *Glagolev V. V. et al.* // Z. Phys. C. 1993. V. 60. P. 421–425.
8. *Velikhov E. P., Putvinskiy S. V.* The report in Energy Center of the World Federation of Scientists. 22.10.1999.

Получено 29 октября 2008 г.

Редактор *Е. В. Сабеева*

Подписано в печать 25.11.2008.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,87. Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 365 экз. Заказ № 56412.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: [publish@jinr.ru](mailto:publish@jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)