

ИМПУЛЬСНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СПЕКТРАТОРОВ В ПРОЦЕССАХ ФРАГМЕНТАЦИИ ЯДРА ${}^4\text{He}$

ВАРШАВА — ДУБНА — КОШИЦЕ — МОСКВА — СТРАСБУРГ — ТБИЛИСИ.
СОТРУДНИЧЕСТВО¹⁾

(Поступила в редакцию 15 марта 1985 г.)

Исследовались характеристики ядер остатков ${}^2\text{H}$, ${}^3\text{H}$, ${}^3\text{He}$ в ${}^4\text{He}$ -взаимодействиях при импульсе 8,6 ГэВ/с. Для описания импульсных спектров ядер-остатков, а также асимметрии распределений по углу Треймана — Янга предложен основанный на методе Монте-Карло численный способ получения волновой функции относительного движения нуклонов или групп нуклонов в ядре. Получено удовлетворительное согласие расчетов с экспериментальными данными при учете энергии связи ядра и ошибок измерений.

1. Введение

В последнее время значительно возрос интерес к исследованию адрон-ядерных взаимодействий при высоких энергиях [1, 2]. В связи с этим возникла необходимость предсказания поведения фрагментов ядер.

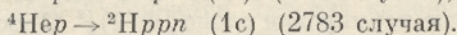
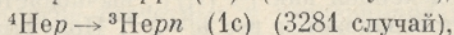
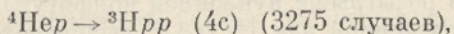
Известные аналитические методы получения волновых функций фрагментов обычно ограничиваются случаем квазиупругого выбивания нуклона, т. е. описанием фрагментов с атомным номером, отличающимся от атомного номера исходного ядра всего лишь на единицу [3].

В настоящей работе предложен основанный на методе Монте-Карло численный способ получения волновой функции относительного движения групп с произвольным числом нуклонов в ядре. Способ апробируется на примере ядра ${}^4\text{He}$, фрагментирующего при взаимодействии с протоном с вылетом ядер-остатков ${}^2\text{H}$, ${}^3\text{H}$ или ${}^3\text{He}$. Проводится его сравнение с аналитическим методом и с экспериментальными результатами. Применимость этого способа продемонстрирована на примере описания импульсного распределения фрагмента ${}^2\text{H}$.

2. Эксперимент

Экспериментальная часть работы выполнена с помощью 100-см водородной пузырьковой камеры, экспонированной на синхрофазотроне ЛВЭ ОИЯИ в пучке ядер ${}^4\text{He}$ с импульсом $P_0=8,6$ ГэВ/с.

Применялась стандартная процедура обработки फिल्मовой информации. Расчеты геометрии и кинематики событий проводились в лабораториях сотрудничества с использованием адаптированной библиотеки программ CERN HYDRA. На магнитных лентах суммарных результатов было накоплено 38 732 события. Анализ импульсных распределений ядер-остатков (спектаторов) проводился для реакций



¹⁾ Зелински П., Собчак Т., Стэпаняк И.— Институт ядерных проблем, Варшава, ПНР; Глаголев В. В., Лебедев Р. М., Стрельцов В. Н., Урбан Й.— Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, СССР; Бано М., Семан М., Футо А., Шандор Л.— Институт экспериментальной физики САН, Кошице, ЧССР; Мартинска Г., Паточка Й., Хлавачова Й.— Университет им. П. Й. Шафарика, Кошице, ЧССР; Хайретдинов К. У.— Физический институт АН СССР, Москва; Браун Т., Жербер Ж.-П., Жюйо П., Мипалон А.— Центр ядерных исследований, Страсбург, Франция; Ментешавили З. Р., Мирианавили Д. Г., Ниорадзе М. С.— Тбилисский государственный университет, Тбилиси, СССР.

Работа в пучке ускоренных ядер ${}^4\text{He}$ [4, 5], когда все фрагменты быстрые, позволяет практически без потерь получить данные о реакциях с одной нейтральной частицей (1с). При этом все заряженные фрагменты ядра хорошо измеряются и идентифицируются, так как их импульсы группируются вблизи средних значений $p_j = p_0(m_j/m_{{}^4\text{He}})$ соответственно для $f = {}^2\text{H}, {}^3\text{H}, {}^3\text{He}$.

Все экспериментальные величины приводятся далее в системе покоя ядра ${}^4\text{He}$, спектатором считается фрагмент с наименьшим импульсом в этой системе.

3. Метод вычисления волновых функций

Исходя из формулы для импульсного распределения спектаторов [6, 7] в однополюсном приближении (рис. 1) и учитывая, что сечение реакции $i+x \rightarrow y+z$ в изучаемом энергетическом интервале линейно зависит от s , получаем следующее выражение для импульсного спектра:

$$d\sigma/dp' \sim p'^2 |\Phi(p')|^2, \quad (1)$$

где p' — импульс спектатора в системе покоя ядра, $\Phi(p')$ — волновая функция относительного движения частиц i и B в ядре A в импульсном представлении.

Отметим, что выражение (1) получено в работах [8, 9] разными методами.

Из этого выражения следует, что форму импульсного распределения спектаторов определяет волновая функция ядра. В литературе известно несколько аналитических одночастичных волновых функций ядра ${}^4\text{He}$ в координатном представлении, таких, как, например, функции Басселя — Вилкина [10], Лесняка [11]. Для расчета спектров фрагментов дейтрона, трития или гелия-3 необходимо составить их волновую функцию из одночастичных волновых функций, используя относительные координаты нуклонов или группы нуклонов ядра. Переход от системы центра масс к относительным координатам (к координатам Якоби) аналитически можно осуществить лишь в некотором приближении.

В качестве примера можно сослаться на работу [3], где переход к координатам Якоби нуклона и трехнуклонной системы сделан для случая волновой функции Басселя — Вилкина.

Поэтому в настоящей работе для перехода от одночастичной волновой функции к волновой функции относительного движения нуклонов или групп нуклонов в ядре применяется метод Монте-Карло. Основная идея предлагаемого подхода заключается в следующем. Вероятность найти систему нуклонов в элементе объема dV конфигурационного пространства равна $|\Psi(\mathbf{r}_i)|^2 dV$. Здесь \mathbf{r}_i — координаты отдельных нуклонов. Если разделить нуклоны на две группы — систему спектатора B и систему i , то вероятность найти расстояние ξ между их центрами в интервале $(\xi', \xi' + d\xi')$ равна $4\pi \xi'^2 |\Phi(\xi')|^2 d\xi'$, где $\Phi(\xi')$ — волновая функция относительного движения. При розыгрыше нуклонной конфигурации с вероятностью распределения, определенной как $|\Psi(\mathbf{r}_i)|^2$, вычисляется ξ и этой конфигурации нуклонов присваивается вес $w = \xi^{-2}$. Полученное таким образом распределение ξ после нормировки равно $|\Phi(\xi)|^2$. Отсюда и видно преимущество численного метода замены координат. Он применим в случае, когда одночастичная волновая функция ядра известна аналитически (например, Басселя и Вилкина [10], Лесняка [11]) и когда распределение точечных нуклонов в ядре известно из эксперимента либо представлено в виде чисел.

Проверка использованного подхода проведена сравнением сгенерированных волновых функций ${}^4\text{He}$ в импульсном представлении для систем протон+третий или нейтрон+ ${}^3\text{He}$ с результатами, полученными при ана-

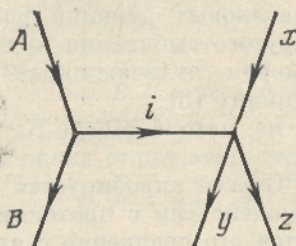


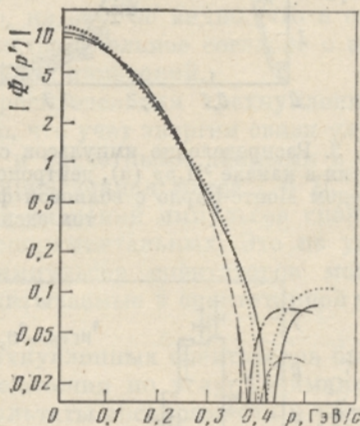
Рис. 1. Диаграмма однополюсного обмена

литическом переходе [3]. В качестве распределения точечных нуклонов в ядре ${}^4\text{He}$ использовались волновые функции Басселя и Вилкина [10], Лесняка [11] и экспериментальные данные [12, 13]. Применялись координаты Якоби:

$$\xi = \frac{1}{3}(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_\alpha), \quad (2)$$

где \mathbf{r}_α — координата центра тяжести ядра ${}^4\text{He}$, а $|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_\alpha|$ — расстояние нуклона от центра тяжести ядра ${}^4\text{He}$. Переход к волновым функциям в относительных импульсах выполнен численно. Результаты приведены на рис. 2. Видно, что в области импульсов до 300 МэВ/с сгенерированные

Рис. 2. Сравнение волновых функций ядра ${}^4\text{He}$ в относительных импульсах нуклона и трехнуклонной системы. Расчет методом Монте-Карло для волновых функций: Басселя — Вилкина [10] (штриховая кривая), Лесняка [11] (точечная), Сика [12, 13] (сплошная). Штрихпунктир — аналитический расчет для волновой функции Басселя — Вилкина согласно работе [3]



численным путем волновые функции совпадают с аналитической [3]. В последующем анализе экспериментальных данных использована только волновая функция Сика [13].

Волновая функция относительного движения дейтрона и двух оставшихся нуклонов была рассчитана по методу Монте-Карло в нестандартных координатах Якоби [14]:

$$\eta = \mathbf{r}_1 + \mathbf{r}_2 - 2\mathbf{r}_\alpha. \quad (3)$$

Для описания импульсного спектра дейтронов из канала ${}^4\text{He}p \rightarrow {}^2\text{H}ppn$ диаграмма, приведенная на рис. 1, неприменима, так как имеются экспериментальные указания на то, что обмена виртуальным дейтроном не происходит, а протон взаимодействует с остатком как с двумя нуклонами [15, 16]. Однако предполагая, что механизм взаимодействия не искажает волновую функцию спектатора, применим численный метод получения волновой функции дейтрона.

4. Сравнение с экспериментальными данными

На рис. 3а, б вместе с измеренными спектрами импульсов приведены распределения, рассчитанные по формуле (1): сплошная кривая без учета ошибок измерения, штрихпунктирная кривая с учетом ошибок при розыгрыше по методу Монте-Карло. Кривые нормированы на экспериментальные распределения в интервале 0–300 МэВ/с. Видно, что учет экспериментальных ошибок изменяет форму расчетных спектров импульсов. В случае трития согласие расчетных и экспериментальных импульсных распределений несколько ухудшается, так как измерительные ошибки в импульсах трития больше, чем в импульсах ${}^2\text{H}$.

Сгенерированная волновая функция не дает также удовлетворительного описания наблюдаемой на опыте асимметрии в распределении по углам Треймана — Янга [4–6]. Дальнейшая модификация классической спектаторной модели проведена с учетом влияния энергии связи ядра ${}^4\text{He}$ (см. также [17]). При этом в методе Монте-Карло ядро рассматривалось как система двух квазисвободных частиц: трехнуклонного спектатора B и нуклона i . Их импульс определялся из волновой функции относитель-

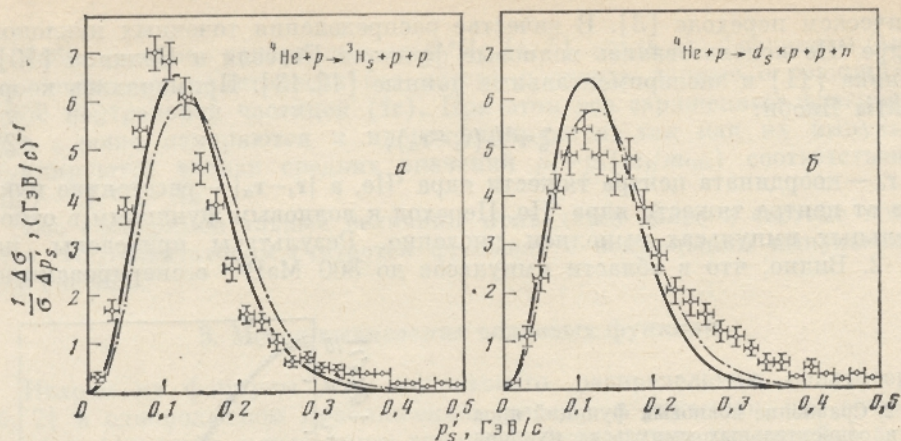


Рис. 3. Распределение импульсов спекторов в системе покоя ядра ${}^4\text{He}$, для: ядер трития в канале ${}^3\text{H}_spp$ (а), дейтронов в канале ${}^2\text{H}_sppn$ (б). Сплошная кривая — расчет волновой функцией Сика; штрихпунктир — то же, но с учетом экспериментальных ошибок

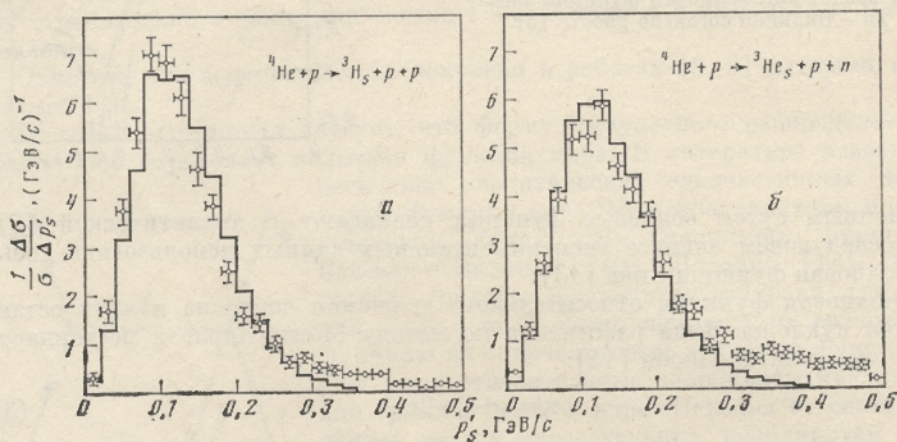


Рис. 4. Распределение импульсов спекторов в системе покоя ядра ${}^4\text{He}$ для ядер трития в канале ${}^3\text{H}_spp$ (а), для ядер ${}^3\text{He}$ в канале ${}^3\text{He}_sppn$ (б). Гистограммы — расчет методом Монте-Карло с учетом энергии связи

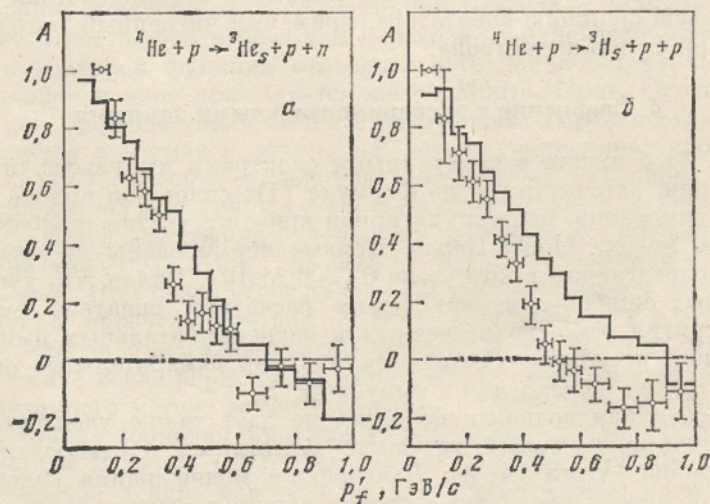


Рис. 5. Асимметрия распределений по углам Треймана — Янга в зависимости от импульса нуклона отдачи в каналах ${}^3\text{He}_sppn$ (а), ${}^3\text{H}_spp$ (б)

ного движения. Предполагалось, что как спектатор B , так и нуклон i находятся вне массовой поверхности. Их эффективная масса в момент соударения определялась из закона сохранения полной энергии ${}^4\text{He}$, эффективная масса трехнуклонного спектатора считалась равной утроенной массе нуклона i , который упруго взаимодействовал с протоном. При этих условиях переход к процессам на массовой поверхности осуществлялся при неизменной полной энергии и неизменных направлениях импульсов обоих фрагментов в системе покоя ядра ${}^4\text{He}$.

В случае дейтрона-спектатора влияние энергии связи не учитывалось, поскольку соответствующие расчеты для трех частиц в конечном состоянии существенно усложняются. Кроме того, из рис. 3б видно, что в случае дейтрона-спектатора наблюдается удовлетворительное согласие с экспериментальными данными, если учесть ошибки измерений.

На рис. 4а, б показаны импульсные распределения трехнуклонных спектаторов из каналов ${}^3\text{Hpp}$ и ${}^3\text{Hepp}$. Видно, что учет энергии связи улучшает согласие между экспериментальными и расчетными данными в области $p' \leq (2m_{iB}\epsilon)^{1/2} \approx 250 \text{ МэВ}/c$, где m_{iB} — приведенная масса i и B , ϵ — энергия связи ядра ${}^4\text{He}$. В области больших значений импульсов спектаторов расчетные значения лежат ниже экспериментальных. Это не удивительно, поскольку в области больших импульсов спектаторов могут иметь место более сложные процессы, не учитываемые в спектаторной модели.

В рамках обсуждаемого подхода для трехнуклонных спектаторов была рассчитана зависимость асимметрии распределения по углу Треймана — Янга [3] от импульса нуклона отдачи. Результаты эксперимента и расчета приведены на рис. 5, из которого видно, что модель качественно описывает эту зависимость.

Была проверена справедливость критерия выделения спектаторов как самых медленных частиц в системе покоя ядра ${}^4\text{He}$. Этот критерий в случае трехнуклонных спектаторов не искажает наблюдаемые характеристики выделенных каналов.

5. Выводы

Разработан метод численного перехода от распределения координат точечных нуклонов к волновой функции относительного движения нуклонов или групп нуклонов в ядре по методу Монте-Карло. Результаты сравнены с аналитическим переходом [7].

Из сравнения рассчитанных импульсных распределений двух- и трехнуклонных спектаторов с экспериментальными данными по взаимодействиям ядер ${}^4\text{He}$ с протонами при 8,6 ГэВ/с следует:

1) простая модель однополюсного обмена с волновой функцией Сика позволяет удовлетворительно описать импульсные распределения спектаторов вплоть до $\approx 300 \text{ МэВ}/c$;

2) учет влияния энергии связи ядра ${}^4\text{He}$ улучшает согласие расчетных данных с экспериментальными и позволяет качественно описать поведение асимметрии распределений по углу Треймана — Янга.

Авторы признательны И. Ловашу и Б. З. Копелиовичу за плодотворные дискуссии и критические замечания. Один из авторов благодарен И. Сикку.

Литература

1. Балдин А. М. ЭЧАЯ, 1977, 8, 429.
2. Нагамия Ш. ЭЧАЯ, 1983, 14, 578.
3. Копелиович Б. З., Поташникова И. К. ЯФ, 1971, 13, 1032.
4. Glagolev V. V. et al. Phys. Rev., 1978, C18, 1382.
5. Aladashvili B. S. et al. JINR Report, E1-12943, Dubna, 1979.
6. Колыбасов В. М., Лексин Г. А., Шапиро И. С. УФН, 1974, 113, 238.
7. Шапиро И. С. Теория прямых ядерных реакций. М.: Атомиздат, 1963.
8. Chew G. F. Phys. Rev., 1950, 80, 196. Chew G. F., Law F. E. Phys. Rev., 1959, 113, 1640.
9. Fleury B. Methods in Subnuclear Physics. V. 2/Ed. by Gordon and Breach, 1968 (M. Nikolic, Editor). Dean N. Phys. Rev. Lett., 1971, 27, 276.
10. Bassel R. H., Wilkin C. Phys. Rev., 1968, 174, 1179.

11. Lesniak H., Lesniak L., Tekou A. Nucl. Phys., 1976, A267, 503.
12. Sick I. et al. Phys. Lett., 1976, 64B, 33.
13. McCarthy J. S., Sick I., Whitney R. R. Phys. Rev., 1977, C15, 1396. Sick I. Lepton Scattering (presented), Conf. on Few Body Syst. and Nucl. Forces, Gratz, 1978.
14. Неудачин В. Г., Смирнов Ю. Ф. Нуклонные ассоциации в легких ядрах. М.: Наука, 1969.
15. Aladashvili B. S. et al. Acta Phys. Slov., 1981, 31, 29.
16. Зелински П. и др. ЯФ, 1984, 40, 482.
17. Аладашвили Б. С. и др. ЯФ, 1976, 24, 129.

MOMENTUM CHARACTERISTICS OF SPECTATORS IN ${}^4\text{He}$ -NUCLEUS FRAGMENTATION PROCESSES

WARSAW — DUBNA — KOSICE — MOSCOW —
STRASSBURG — TBILISI.
COLLABORATION

Characteristics of ${}^2\text{H}$, ${}^3\text{H}$, ${}^3\text{He}$ fragments from the ${}^4\text{He}p$ interaction at an initial momentum of 8.6 GeV/c have been studied. A numerical procedure, based upon the Monte-Carlo method, for getting the wave function of relative motion of nucleons or nucleon groups is proposed to describe the fragment momentum spectra and the asymmetry in the Treiman — Yang angle distribution. The agreement obtained between the calculations and the experimental results is satisfactory provided one takes into account the experimental errors and the nucleus binding energy.