УДК 539.172.13,539.171,539.142

# ИЗУЧЕНИЕ КЛАСТЕРНОЙ СТРУКТУРЫ ЛЕГКИХ ЯДЕР В *d*-9Be-B3AИMOДЕЙСТВИИ

# © 2019 г. Е. С. Конобеевский<sup>1, \*</sup>, А. А. Афонин<sup>1</sup>, С. В. Зуев<sup>1</sup>, А. А. Каспаров<sup>1</sup>, В. В. Мицук<sup>1, 2</sup>, М. В. Мордовской<sup>1, 2</sup>, В. М. Лебедев<sup>3</sup>, А. В. Спасский<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Московский физико-технический институт (государственный университет), Москва, Россия

<sup>3</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова",

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, Москва, Россия

\*E-mail: konobeev@inr.ru

Поступила в редакцию 01.10.2018 г. После доработки 15.10.2018 г. Принята к публикации 19.11.2018 г.

Для определения вклада различных кластерных конфигураций в структуру <sup>9</sup>Ве (<sup>8</sup>Ве + n,  $\alpha$  +  $\alpha$  + n,  $\alpha$  + <sup>5</sup>He) предлагается исследование квазисвободного рассеяния дейтрона на кластерах ядра <sup>9</sup>Ве. Проведено кинематическое моделирование реакций. Показано, что существуют выделенные области в угловых и энергетических распределениях вторичных частиц, которые соответствуют определенным кластерным конфигурациям ядра <sup>9</sup>Ве. Результаты проведенного моделирования показывают, что полученные данные об энергиях и углах вылета вторичных частиц (d + n и  $d + \alpha$ ) позволят выделить вклады различных каналов реакции и сделать выводы о кластерной структуре ядра <sup>9</sup>Ве. На пучке дейтронов в НИИЯФ МГУ начато исследование кластерной структуры <sup>9</sup>Ве в инклюзивном и эксклюзивном эксперименте.

DOI: 10.1134/S036767651904015X

# введение

Одной из фундаментальных проблем ядерной физики является исследование структуры легких ядер. Среди других легких ядер ядра бериллия привлекают внимание экспериментаторов и теоретиков из за своей ярко выраженной кластерной структуры [1]. Известно, что <sup>9</sup>Ве представляет собой так называемое бороминское (Borromean) ядро, состоящее из трех кластеров  $(\alpha + \alpha + n)$ , при этом выбивание одного кластера приводит к полному развалу ядра. Кроме конфигурации  $\alpha + \alpha + n$  в <sup>9</sup>Ве могут существовать также двухкластерные конфигурации <sup>8</sup>Be + n и  $\alpha$  + <sup>5</sup>He, состоящие из стабильной частицы ( $n, \alpha$ ) и нестабильного ядра (<sup>8</sup>Be, <sup>5</sup>He). Выбивание одного из элементов такой двухкластерной конфигурации приводит к развалу нестабильного ядра <sup>8</sup>Ве →  $\rightarrow \alpha + \alpha$  и <sup>5</sup>He  $\rightarrow \alpha + n$ . Для определения вклада различных конфигураций в структуру  ${}^{9}$ Be ( ${}^{8}$ Be + n,  $\alpha + \alpha + n$ ,  $\alpha + {}^{5}$ He) в работе предлагается исследование реакции квазисвободного рассеяния (КСР) дейтрона на кластерах ядра <sup>9</sup>Ве.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕАКЦИИ КВАЗИСВОБОДНОГО РАССЕЯНИЯ ДЕЙТРОНОВ НА КЛАСТЕРАХ ЯДРА <sup>9</sup>Ве

В предлагаемом эксперименте предполагается регистрировать как один рассеянный дейтрон (инклюзивная геометрия), так и в эксклюзивной геометрии дейтрон и вторую частицу (рассеянный кластер или частицу от развала этого кластера). При этом оставшиеся кластеры будут рассматриваться как спектаторы, имеющие в выходном канале практически нулевое распределение по импульсу. В таблице представлены варианты кластерной структуры ядра <sup>9</sup>Ве, для которых проводилось моделирование реакций КСР. Кинематическое моделирование указанных в таблице реакций проводилось с помощью программ [2, 3], где для заданных параметров эксперимента отбирались те события, для которых выполнялись уравнения сохранения энергии и импульса.

На рис. 1 представлена рассчитанная для реакций 1—6 из таблицы двумерная диаграмма зависимости энергии рассеянного дейтрона от угла его



**Рис. 1.** Моделированная двумерная диаграмма  $E_d - \Theta_d$  событий КСР дейтронов с энергией 15 МэВ на кластерах <sup>9</sup>Ве. 1-6 – события, соответствующие, реакциям 1-6 из таблицы.

вылета *E*<sub>d</sub>--  $\Theta_d$ . Моделирование проведено при энергии пучка налетающих дейтронов 15 МэВ. На диаграмме показаны кинематические области, разрешенные для различных вариантов КСР (области 1-6). Из рис. 1 видно, что области диаграммы 1 и 6, соответствующие рассеянию дейтрона на нейтроне, из конфигураций <sup>8</sup>Be + n и  $\alpha$  +  $\alpha$  + nпрактически неотделимы. Аналогично, области 3 и 4, соответствующие рассеянию дейтрона на α-кластере и <sup>5</sup>He-кластере для конфигурации  $\alpha$  + <sup>5</sup>He, и рассеяние на α-кластере для конфигурации  $\alpha + \alpha + n$  (область 5) почти совпадают. Для того чтобы различить события, принадлежащие рассеянию дейтрона на различных кластерах, предлагается эксклюзивный эксперимент с регистрацией дейтрона и второй частицы (нейтрона или α-частицы).

Рассмотрим эксперимент с регистрацией в совпадении дейтрона и нейтрона. Возможные варианты — рассеяние дейтрона на нейтроне из конфигураций <sup>8</sup>Ве + n и  $\alpha$  +  $\alpha$  + n и рассеяние



**Рис. 2.** Моделированная двумерная диаграмма  $E_d - E_n(a)$  и энергетический спектр нейтронов (*б*) при энергии первичных дейтронов 15 МэВ и угле регистрации рассеянного дейтрона 25°. События соответствующие конфигурациям:  $1 - {}^8\text{Be} + n$ ,  $6 - \alpha + \alpha + n$  и  $4 - \alpha + {}^5\text{He}$ .

дейтрона на кластере <sup>5</sup>Не с дальнейшим развалом <sup>5</sup>Не  $\rightarrow \alpha + n$ . На рис. 2 представлены двумерная диаграмма  $E_d - E_n$  (*a*) и энергетический спектр нейтронов ( $\delta$ ) при энергии первичных дейтронов

Таблица 1. КСР дейтронов и кластерная структура <sup>9</sup>Ве. Номера соответствуют рассеянию дейтронов на различных кластерах конфигураций

N⁰	Структура	КСР	Спектатор (sp)	Конечное состояние	Регистрируемые частицы
1	$^{8}$ Be + <i>n</i>	d-n	<sup>8</sup> Be	$D + n + {}^{8}\mathrm{Be}^{sp} \rightarrow d + n + \alpha^{sp} + \alpha^{sp}$	<i>d</i> или <i>d</i> + <i>n</i>
2	$^{8}$ Be + <i>n</i>	$d - {}^{8}\text{Be}$	n	$D + {}^{8}\text{Be} + n^{sp} \rightarrow d + \alpha + \alpha + n^{sp}$	$d$ или $d + \alpha$
3	$\alpha$ + <sup>5</sup> He	$d-\alpha$	<sup>5</sup> He	$D + \alpha + {}^{5}\text{He}^{sp} \rightarrow d + \alpha + \alpha^{sp} + n^{sp}$	$d$ или $d + \alpha$
4	$\alpha$ + <sup>5</sup> He	$d-{}^{5}\mathrm{He}$	α	$d + {}^{5}\text{He} + \alpha^{sp} \rightarrow d + n + \alpha + \alpha^{sp}$	<i>d</i> или <i>d</i> + <i>n</i> <i>d</i> или <i>d</i> + α
5	$\alpha + \alpha + n$	$d-\alpha$	$\alpha + n$	$d + \alpha + \alpha^{sp} + n^{sp}$	$d$ или $d + \alpha$
6	$\alpha + \alpha + n$	d-n	$\alpha + \alpha$	$d + n + \alpha^{sp} + \alpha^{sp}$	<i>d</i> или <i>d</i> + <i>n</i>



**Рис. 3.** Моделированная двумерная диаграмма  $E_d - E_\alpha$  (*a*) и энергетический спектр альфа-частиц (*б*) при энергии первичных дейтронов 15 МэВ и угле регистрации рассеянного дейтрона под углом 25° с регистрацией альфа-частицы в интервале углов 30°-80°. События соответствующие конфигурациям:  $3 - \alpha + {}^5\text{He}$ ,  $5 - \alpha + \alpha + n \mu 2 - {}^8\text{Be} + n$ .

15 МэВ и угле регистрации рассеянного дейтрона 25°. Из рисунка (*a*) видно, что области двумерной диаграммы 4 и 6, соответствующие конфигурациям  $\alpha$  + <sup>5</sup>He и  $\alpha$  +  $\alpha$  + *n*, разделяются, в то же время области 6 и 1, соответствующие конфигурациям  $\alpha$  +  $\alpha$  + *n* и <sup>8</sup>Be+*n*, в значительной степени перекрываются. Такая же картина наблюдается и для энергетических спектров нейтронов (рис. 2*б*).

Было проведено также моделирование реакции КСР с регистрацией в совпадении дейтрона и альфа-частицы. Рассматривалась регистрация дейтрона под углом 25° с регистрацией альфа-частицы в интервале углов 30°–80°. Варианты расчета включали рассеяние дейтрона на альфа-кластере конфигураций  $\alpha$  + <sup>5</sup>Не и  $\alpha$  +  $\alpha$  + n, рассеяние на кластере <sup>8</sup>Ве с дальнейшим развалом его на две альфа-частицы и рассеяние на <sup>5</sup>Не-кластере с развалом <sup>5</sup>Не  $\rightarrow \alpha$  + n.



**Рис. 4.** Схема экспериментальной установки для регистрации заряженных частиц и нейтронов: 1 – камера рассеяния, 2 – мишень, 3 – нейтронный детектор, 4 – кремниевый  $\Delta E$ -детектор, 5 – кремниевые E-детекторы, 6 – предусилители кремниевых детекторов с амплитудными (A) и временными (T) выходами, 7 – цифровые сигнальные процессоры ЦСП, 8 – компьютер.

На рис. 3 представлена двумерная диаграмма  $E_d - E_{\alpha}$  (рис. 3*a*) и энергетический спектр альфачастиц (рис. 3*b*). Видно, что области двумерной диаграммы, соответствующие конфигурациям  $\alpha + \alpha + n$  и  $\alpha + {}^{5}$ Не, не сильно разделены, в то же время область, соответствующая конфигурации  ${}^{8}$ Ве + *n*, заметно отличается по энергии альфа-частиц. Эта же картина отражается и в энергетическом спектре альфа-частиц (рис. 3*b*).

Таким образом, результаты моделирования реакции КСР дейтронов показали, что регистрация в совпадении дейтрона и нейтрона (альфачастицы) позволит более однозначно различить вклады от рассеяния на различных кластерах <sup>9</sup>Ве.

#### УСТАНОВКА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ И НЕЙТРОНОВ

Исходя из результатов моделирования была определена схема экспериментальной установки для исследования реакций, идущих на ядрах<sup>9</sup>Ве под действием дейтронов. На рис. 4 показан вариант установки для регистрации рассеянного дейтрона и вторичного нейтрона. В случае регистрации заряженной частицы в совпадении с дейтроном нейтронный детектор заменяется на кремниевый детектор, установленный в камере рассеяния под соответствующим углом.

В эксперименте использован пучок дейтронов циклотрона У-120 НИИЯФ МГУ, падающий на мишень <sup>9</sup>Ве. Мишень устанавливается в камере

рассеяния с выходным окном из лавсана толщиной ~20 мкм.

Установка содержит два плеча регистрации частиц. Для измерения энергии и определения типа заряженной частицы используется телескоп  $\Delta E$ –  $E_1-E_2$  кремниевых детекторов. Телескоп, находящийся вне камеры, может перемещаться по углу от 20° до 160°. Сигналы с детекторов подаются через соответствующие тракты усиления на цифровые сигнальные процессоры (ЦСП) САЕN DT5720 и DT5742.

В эксперименте с регистрацией двух частиц в совпадении используется второе плечо с детекторами нейтронов или заряженных частиц. Нейтроны детектируются жилким водородсодержащим сцинтилляционным детектором EJ-301. Энергия нейтронов определяется по времени пролета до детектора. В качестве стартового сигнала времяпролетной системы используется быстрый сигнал предусилителя  $\Delta E$  детектора заряженных частиц телескопа. ЦСП DT5720 используется для оцифровки медленных (амплитудных), а ЦСП DT5742, имеющий шаг оцифровки 0.2 нс, для оцифровки быстрых сигналов. Через буферную память ЦСП оцифрованные сигналы передаются в основной компьютер. Обработка информации ведется в режиме off-line. Она заключается в определении амплитуд и площадей импульсов, определении времен возникновения сигналов в детекторах, цифровом анализе формы импульсов для разделения событий от различных типов частиц, отборе совпадающих событий и получении энергетических и временных спектров.

# РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Для проверки работоспособности установки и системы сбора данных собрана установка (рис. 4) в инклюзивном варианте с одним плечом регистрации. Пучок дейтронов с энергией 15 МэВ и током 10-20 нА циклотрона У-120 НИИЯФ МГУ падал на самоподдерживающую мишень из бериллия толщиной 0.9 мг  $\cdot$  см<sup>-2</sup>. В качестве  $\Delta E$ -детектора использовался полностью обедненный поверхностно-барьерный кремниевый детектор фирмы ORTEC толщиной ~24 мкм, а в качестве *Е*-детекторов – кремниевые детекторы ORTEC толщиной 415 и 316 мкм. Сигналы с кремниевых детекторов подавались на предусилители Canberra 2003BT, а затем на ЦСП САЕМ DT5720. Оцифрованные сигналы из буферной памяти ЦСП передавались в основной компьютер в бинарном виде. При обработке данных в режиме off-line определялись амплитуды импульсов, времена возникновения сигналов в детекторах, отбирались совпадающие события и получали энергетические спектры регистрируемых частиц.



**Рис. 5.** Двумерный  $\Delta E - E_1$ -спектр однозарядных частиц. Локусы на диаграмме соответствуют протонам, дейтронам, тритонам. По осям — номера каналов амплитудно-цифровых преобразователей.



**Рис. 6.** Двумерный амплитудный  $E_2-E_1$ -спектр однозарядных частиц. Обозначения как на рис. 5. Левая ветвь локуса протонов связана с неполным поглощением протонов в  $E_2$ -детекторе.

Для измерения энергии и определения типа заряженной частицы использовался телескоп  $\Delta E - E_1 - E_2$  кремниевых детекторов. На рис. 5 показан двумерный амплитудный  $\Delta E - E_1$ -спектр однозарядных частиц, зарегистрированных  $\Delta E$ - и  $E_1$ -детекторами (угол установки телескопа – 110°). Локусы соответствуют протонам, дейтронам и тритонам, зарегистрированным телескопом заряженных частиц в  $\Delta E$ - и  $E_1$ -детекторах и не зарегистрированные в  $E_2$ -детекторе. Поэтому для протонного локуса не наблюдается обратный ход, соответствующий прострелу в  $E_1$ -детекторе.

На рис. 6 приведен двумерный амплитудный  $E_2-E_1$ -спектр однозарядных частиц, зарегистрированных  $\Delta E$ -,  $E_1$ - и  $E_2$ -детекторами, т.е. частиц прошедших в  $E_2$ -детектор. Локусы соответствуют протонам и дейтронам зарегистрированным в  $E_1$ - и  $E_2$ -детекторе.

В процессе обработки спектров, показанных на рис. 5 и 6, выделялись локусы, соответствующие одному сорту частиц, например, дейтронам. Используя проекции выделенных локусов на оси



**Рис.** 7. Энергетический спектр дейтронов: (*a*) из бериллиевой мишени, (*б*) из лавсана при угле регистрации  $60^{\circ}$ .



**Рис. 8.** Энергетический спектр дейтронов рис. 7*a* после вычитания спектра рис. 7*6*.

 $\Delta E$ ,  $E_1$  и  $E_2$ , строился спектр по полной энергии дейтронов в детекторах в  $\Delta E + E_1 + E_2$  с учетом калибровки по энергии. В предварительных измерениях использовалась достаточно старая бериллиевая мишень с некоторым количеством углерода (нагар), поэтому для сравнении спектров и отделения фоновых линий использовалась мишень из лавсана. На рис. 7 показаны спектры дейтронов из бериллиевой мишени (рис. 7*a*) и лавсана (рис. 7*б*) при угле регистрации 60°. На рис. 8 показан спектр дейтронов рис. 7*а* с вычтенным вкладом от углерода согласно спектру рис. 7*6*. Видны пики от рассеяния дейтронов на <sup>9</sup>Ве. Стрелками показаны участки спектров, в которых в инклюзивном эксперименте могут быть видны вклады от КСР дейтронов на кластерах <sup>9</sup>Ве. Можно сделать вывод о необходимости большей статистики и проведения совпадательного эксперимента. Следует отметить, что реакция КСР является квазибинарной, поэтому регистрация второй частицы при соответствующих углах рассеяния может не приводить к значительному уменьшению счетности по сравнению с инклюзивным экспериментом.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе рассмотрена возможность использования реакции квазисвободного рассеяния дейтронов для изучения кластерных структур ядра <sup>9</sup>Ве. Для разделения вкладов отдельных структур, области событий которых перекрываются на диаграммах угол—энергия рассеянной частицы, предложен эксклюзивный эксперимент с регистрацией двух рассеянных частиц. Результаты моделирования реакций КСР показали, что регистрация второй частицы позволит различить вклады реакций на разных кластерах <sup>9</sup>Ве.

Исходя из результатов моделирования, была определена схема экспериментальной установки для исследования реакции  $d + {}^9$ Ве в инклюзивном и эксклюзивном экспериментах. Для проверки работоспособности установки и отработки системы сбора данных собрана установка на пучке дейтронов циклотрона У-120 НИИЯФ МГУ в эксклюзивном варианте с одним плечом регистрации и проведены тестовые измерения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-00944.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Denikin A.S., Lukyanov S.M., Skobelev N.K. et al. // Phys. Part. Nucl. Lett. 2015. V. 12. № 5. P. 703.
- Зуев С.В., Каспаров А.А., Конобеевский Е.С. // Изв. РАН. Сер. физ. 2014. Т. 78. С. 527; Zuyev S.V., Kasparov A.A., Konobeevski E.S. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2014. V. 78. P. 345.
- Зуев С.В., Каспаров А.А., Конобеевский Е.С. // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81. С. 753; Zuyev S.V., Kasparov A.A., Konobeevski E.S. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2017. V. 81. P. 679.