

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕАКЦИИ НЕУПРУГОГО РАССЕЯНИЯ АЛЬФА-ЧАСТИЦ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КЛАСТЕРНОЙ СТРУКТУРЫ ВОЗБУЖДЕННЫХ СОСТОЯНИЙ ${}^9\text{Be}$

А. А. Каспаров *, *Е. С. Конобеевский*, *С. В. Зуев*,
М. В. Мордovской, *А. А. Афонин*, *В. В. Мицук*

Институт ядерных исследований РАН, Москва

Для определения вклада кластерных конфигураций (${}^8\text{Be} + n$, $\alpha + \alpha + n$, ${}^5\text{He} + \alpha$) в структуру ${}^9\text{Be}$ предлагается исследование неупругого рассеяния альфа-частиц на кластерах ядра ${}^9\text{Be}$. Результаты проведенного кинематического моделирования реакций ${}^9\text{Be}(\alpha, \alpha' n)X$ и ${}^9\text{Be}(\alpha, \alpha' \alpha)X$ показывают, что регистрация рассеянной альфа-частицы в совпадении с частицей от развала определенного возбужденного состояния ${}^9\text{Be}$ позволит определить вклад различных кластерных конфигураций в структуру этих состояний.

To determine the contribution of cluster configurations (${}^8\text{Be} + n$, $\alpha + \alpha + n$, ${}^5\text{He} + \alpha$) to the ${}^9\text{Be}$ structure we suggest studying the inelastic scattering of alpha particles on ${}^9\text{Be}$ nucleus clusters. The results of kinematic simulation of the ${}^9\text{Be}(\alpha, \alpha' n)X$ and ${}^9\text{Be}(\alpha, \alpha' \alpha)X$ reactions show that recording a scattered alpha particle in coincidence with a particle from the decay of a specific ${}^9\text{Be}$ excited state will make it possible to determine the contribution of various cluster configurations to the structure of these states.

PACS: 21.60.Gx; 25.45.De; 25.55.-e

ВВЕДЕНИЕ

Ядра бериллия привлекают внимание экспериментаторов и теоретиков из-за их кластерной структуры. Хорошо известно, что основное состояние ${}^8\text{Be}$ является несвязанным с энергией 92 кэВ и распадается на две альфа-частицы за время порядка 10^{-16} с [1]. Единственным стабильным изотопом бериллия является изотоп ${}^9\text{Be}$. Дополнительный нейтрон действует как ковалентная частица между центрами альфа-частиц, увеличивая стабильность структуры

*E-mail: kasparov200191@gmail.com

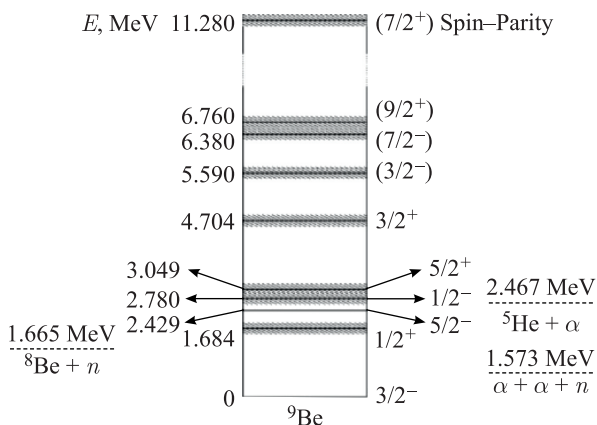


Рис. 1. Энергетические уровни и пороги развала ${}^9\text{Be}$

ядра ${}^9\text{Be}$. Вместе с трехчастичной структурой ${}^9\text{Be}$ рассматриваются также двухчастичные конфигурации ${}^8\text{Be} + n$ и ${}^5\text{He} + \alpha$, которые могут играть важную роль для возбужденных состояний ${}^9\text{Be}$.

Несмотря на то, что исследования кластерной структуры ${}^9\text{Be}$ велись в течение длительного времени, получение количественных данных о вероятности развала возбужденных состояний через различные кластерные каналы до сих пор актуально [1–3]. Для определения кластерной структуры возбужденных состояний ${}^9\text{Be}$ предлагается исследование неупругого рассеяния альфа-частиц на кластерах ядра ${}^9\text{Be}$ с регистрацией как рассеянной альфа-частицы, так и частицы от развала возбужденных состояний ${}^9\text{Be}$. Поскольку пороги развала через каналы ${}^8\text{Be} + n$, $\alpha + \alpha + n$ и ${}^5\text{He} + \alpha$ достаточно малы (рис. 1), многие возбужденные состояния ${}^9\text{Be}$ могут разваливаться с испусканием нейтронов и альфа-частиц.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТ

Для кинематического моделирования реакции неупругого рассеяния использована программа кинематического моделирования ядерных реакций [4], в которой события с произвольно выбранными или частично определенными параметрами (например углами или энергиями некоторых вторичных частиц) выбираются в соответствии с критерием соблюдения законов сохранения энергии и импульса. В результате работы программы получается массив выходных параметров (энергий и углов вылета), соответствующих определенной реакции.

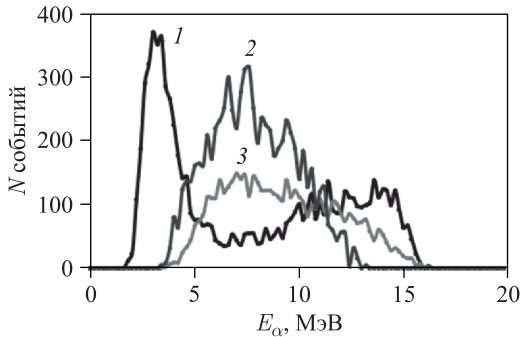
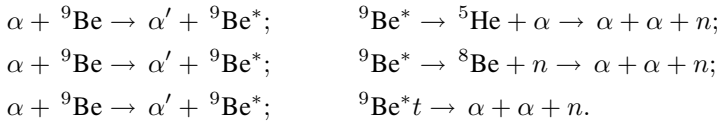


Рис. 2. Моделированные энергетические спектры вторичных альфа-частиц в реакции ${}^9\text{Be}(\alpha, \alpha')X$ для возбужденного уровня 4,704 МэВ ядра ${}^9\text{Be}$ и различных каналов развала: 1 — ${}^5\text{He} + \alpha$; 2 — ${}^8\text{He} + n$; 3 — $\alpha + \alpha + n$

На первом этапе моделируется двухчастичная реакция неупругого рассеяния альфа-частицы на ядре ${}^9\text{Be}$ с возбуждением определенного низколежащего уровня E^* . Выбирая угол регистрации альфа-частицы Θ_α , мы фиксируем энергию альфа-частицы E_α под этим углом. Это значение энергии вторичной альфа-частицы использовалось в качестве входного параметра при моделировании реакций с тремя и четырьмя частицами в конечном состоянии:



Было проведено кинематическое моделирование ${}^9\text{Be}(\alpha, \alpha')X$ для различных возбужденных уровней ${}^9\text{Be}$ и каналов развала. На рис. 2 показаны энергетические спектры вторичных альфа-частиц, вылетающих в интервале углов $(-40 \pm 10)^\circ$ (отрицательные углы соответствуют углу вылета слева от оси пучка) от развала ${}^9\text{Be}$ с уровнем 4,704 МэВ для различных каналов распада. Параметры моделирования: энергия пучка $E_\alpha = 30$ МэВ, углы регистрации вторичных частиц $\Theta_{\alpha'} = 90^\circ$ и $\Theta_\alpha = (-40 \pm 10)^\circ$. Видно, что поведение моделированного энергетического спектра вторичных альфа-частиц для конфигурации ${}^5\text{He} + \alpha$ существенно отличается от поведения спектров для конфигураций ${}^8\text{He} + n$ и $\alpha + \alpha + n$. Однако развал через последние две конфигурации приводит к почти одинаковым энергетическим спектрам.

Также было выполнено моделирование неупругого рассеяния альфа-частиц с регистрацией рассеянных альфа-частиц и нейтронов. На рис. 3 показан моделированный энергетический спектр нейтронов, вылетающих в интервале углов $\Theta_\alpha = (-40 \pm 10)^\circ$, от развала ядра ${}^9\text{Be}$ с возбужденным уровнем 4,704 МэВ для различных каналов распада. Угол регистрации рассеянной

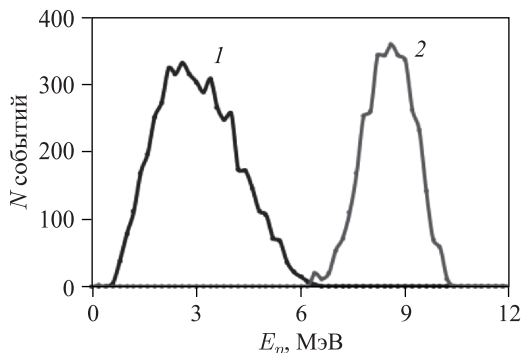


Рис. 3. Моделированные энергетические спектры нейтронов в реакции ${}^9\text{Be}(\alpha, \alpha'n)X$ для возбужденного уровня 4,704 МэВ ядра ${}^9\text{Be}$ и каналов развала: 1 — $\alpha + \alpha + n$; 2 — ${}^8\text{He} + n$

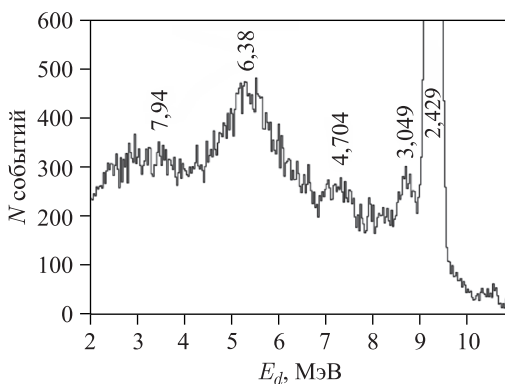


Рис. 4. Энергетический спектр дейтронов, рассеянных на ядре ${}^9\text{Be}$ при $\Theta_d = 60^\circ$

альфа-частицы $\Theta_{\alpha'} = (80 \pm 1)^\circ$, энергия пучка $E_\alpha = 30$ МэВ. Видно, что регистрация нейтронов дает возможность различить развал ${}^9\text{Be}$ через каналы ${}^8\text{He} + n$ и $\alpha + \alpha + n$.

Предварительные измерения проводились в инклюзивном и эксклюзивном вариантах эксперимента по квазисвободному рассеянию дейтронов на кластерах ядра ${}^9\text{Be}$. В экспериментах использовался пучок дейтронов с энергией 15 МэВ НИИЯФ МГУ. Для инклюзивного эксперимента ${}^9\text{Be}(d, d)X$ (с регистрацией одного дейтрона) получен энергетический спектр дейтронов, рассеянных от ${}^9\text{Be}$ при $\Theta_d = 60^\circ$ (рис. 4). Энергии возбужденных уровней ${}^9\text{Be}$ указаны на рис. 4.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено кинематическое моделирование реакций ${}^9\text{Be}(\alpha, \alpha')X$ и ${}^9\text{Be}(\alpha, \alpha'n)X$ для различных возбужденных уровней и различных каналов развала ядра ${}^9\text{Be}$. Результаты моделирования показывают, что регистрация рассеянной альфа-частицы в совпадении с частицей от развала определенного возбужденного состояния ${}^9\text{Be}$ позволит определить вклад различных кластерных конфигураций в структуру этих состояний. Начато исследование кластерной структуры ${}^9\text{Be}$ в инклюзивном и эксклюзивном экспериментах на пучке дейтронов НИИЯФ МГУ. Получены предварительные данные об энергетических спектрах и дифференциальных сечениях рассеяния $d-{}^9\text{Be}$ для некоторых возбужденных состояний.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Brown T. A. D., Papka P., Fulton B. R., Watson D. L., Fox S. P., Groombridge D., Freer M., Clarke N. M., Ashwood N. I., Curtis N., Ziman V., McEwan P., Ahmed S., Catford W. N., Mahboub D., Timis C. N., Baldwin T. D., Weisser D. C. Decay Studies for States in ${}^9\text{Be}$ up to 11 MeV: Insights into the $n + {}^8\text{Be}$ and $\alpha + {}^5\text{He}$ Cluster Structure // Phys. Rev. C. 2007. V. 76. P. 054605(1–8).
2. Hirayama Y., Shimoda T., Miyatake H., Izumi H., Hatakeyama A., Jackson K. P., Levy C. D. P., Pearson M., Yagi M., Yano H. Unexpected Spin-Parity Assignments of the Excited States in ${}^9\text{Be}$ // Phys. Rev. C. 2015. V. 91. P. 024328(1–14).
3. Denikin A. S., Lukyanov S. M., Skobelev N. K., Sobolev Yu. G., Voskoboynik E. I., Penionzhkevich Yu. E., Trzaska W. H., Tyurin G. P., Burjan V., Kroha V., Mrazek J., Piskor S., Glagolev V., Yi Xue, Khlebnikov S. V., Harakeh M. N., Kuterbekov K. A., Tuleushev Yu. Inelastic Scattering and Clusters Transfer in ${}^3,4\text{He} + {}^9\text{Be}$ Reactions // Phys. Part. Nucl. Lett. 2015. V. 12. P. 703–712.
4. Зуев С. В., Каспаров А. А., Конобеевский Е. С. Математическое моделирование малонуклонных экспериментов с тремя и более частицами в конечном состоянии // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81. С. 753–757.