

УДК 539.172.4

ТЕСТОВАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ СОВПАДАЮЩИХ СИГНАЛОВ ИЗ РЕАКЦИЙ С ВЫЛЕТОМ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ И НЕЙТРОНОВ НА НЕЙТРОННОМ КАНАЛЕ РАДЭКС

© 2022 г. А. А. Каспаров¹, *, М. В. Мордовской¹, А. А. Афонин¹, В. В. Мицук¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
“Институт ядерных исследований Российской академии наук”, Москва, Россия

*E-mail: kasparov200191@gmail.com

Поступила в редакцию 14.03.2022 г.

После доработки 08.04.2022 г.

Принята к публикации 22.04.2022 г.

Описан прототип экспериментальной установки для проверки возможности регистрации в совпадении заряженных частиц и нейтронов на нейтронном канале РАДЭКС ИЯИ РАН. Выполнены тестовые измерения реакции $n + {}^6\text{Li} \rightarrow \alpha + d + n$ и показана возможность регистрации в совпадении заряженных частиц и нейтронов, а также возможность идентификации типа заряженной частицы.

DOI: 10.31857/S0367676522080105

ВВЕДЕНИЕ

Одной из фундаментальных проблем ядерной физики является исследование структуры легких ядер. Легкие ядра с $A = 6$ (${}^6\text{He}$, ${}^6\text{Li}$, ${}^6\text{Be}$) привлекают внимание экспериментаторов и теоретиков из-за своей ярко выраженной кластерной структуры.

Как известно, явление кластеризации является результатом строгой корреляции между нуклонами в атомных ядрах. Ядерные кластеры, отличающиеся от альфа-кластеров, играют заметную роль как для адекватного описания механизмов ядерных реакций, так и структуры ядер [1, 2].

Целью данной работы является изучение кластерной структуры ядра ${}^6\text{Li}$, представляющее значительный экспериментальный и теоретический интерес из-за кластерной структуры низколежащих состояний, рассматриваемых как ${}^4\text{He} + d$. В то же время, при высоких энергиях возбуждения возможно трехнуклонное квазимолекулярное состояние. Существование трехнуклонного кластерного состояния в изобарах с $A = 6$ было теоретически предсказано более полувека назад [3]. Такое состояние в ${}^6\text{Li}$ описывается как двухфермионная система $t + {}^3\text{He}$ и аналогично двухнуклонной системе.

Спектроскопическая информация о нижних уровнях ядра ${}^6\text{Li}$ известна с достаточной точностью, в то время как данные о структуре возбужденных состояний, тем более данные о структуре, энергиях и ширинах высоковозбужденных состояний по-прежнему довольно противоречивы. На рис. 1 показано сравнение энергетических уров-

ней ${}^6\text{Li}$, представленных в работах [4] и [5]. Существенное расхождение наблюдается при энергиях возбуждения выше 15.79 МэВ (пороговая энергия развала по каналу ${}^6\text{Li} \rightarrow t + {}^3\text{He}$). Кроме того, расхождения в данной области демонстрируют результаты теоретических [3, 6] и последних экспериментальных работ [7–10]. Следовательно, требуется дальнейшее изучение структуры возбужденных состояний ${}^6\text{Li}$ в различных реакциях и с использованием различных методов.

МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для определения вкладов различных конфигураций в структуру возбужденных состояний ${}^6\text{Li}$ нами предложено исследование реакции неупругого рассеяния нейтронов на ядрах ${}^6\text{Li}$ с регистрацией в совпадении как рассеянного нейтрона, так и вторичных частиц. Предполагаемый метод исследования достаточно подробно описан в работе [11], где в качестве налетающих частиц предлагается использовать альфа-частицы с энергией 30 МэВ. Однако исследовать область возбуждения ${}^6\text{Li}$ выше порога развала по каналу ${}^6\text{Li} \rightarrow t + {}^3\text{He}$ при такой энергии не представляется возможным.

С помощью программы [12] было проведено кинематическое моделирование реакции $n + {}^6\text{Li}$. В программе из множества событий с произвольными или частично-заданными параметрами (энергия пучка, углы вылета и энергии вторичных частиц), отбираются только те события, которые

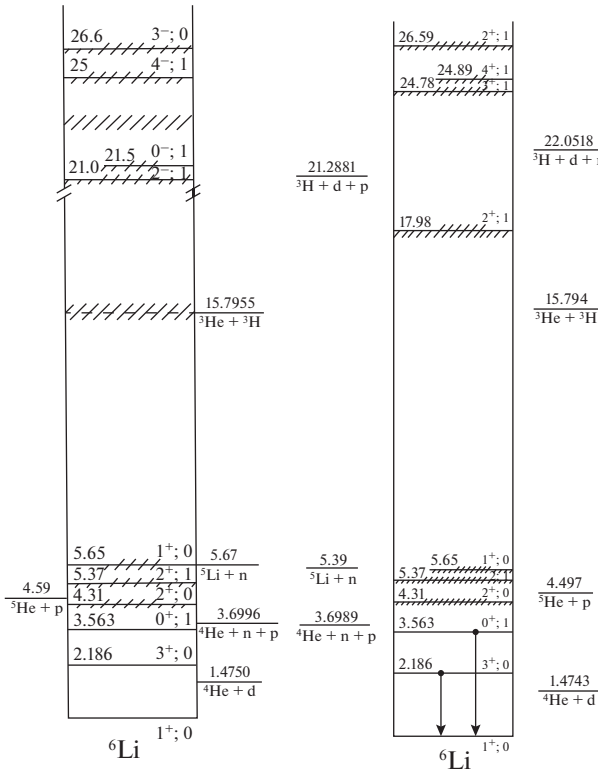


Рис. 1. Сравнение энергетических уровней ${}^6\text{Li}$, представленных в работах [4] (левая панель) и [5] (правая панель).

удовлетворяют законам сохранения энергии и импульса с заданной заранее точностью.

Результаты проведенного кинематического моделирования показывают, что в случае регистрации неупруго-рассеянного нейтрона под углом, определенным в двухчастичной реакции $n + {}^6\text{Li} \rightarrow n' + {}^6\text{Li}^*$ с возбуждением определенного уровня ${}^6\text{Li}$, в совпадении с вторичными (развальными) частицами существуют кинематические области развалных частиц, соответствующие определенным каналам развала этого возбужденного состояния ${}^6\text{Li}$. Например, на рис. 2а представлено двумерное распределение $E_\alpha - \Theta_\alpha$ вторичных альфа-частиц для различных каналов развала возбужденного состояния ${}^6\text{Li}^*(5.65 \text{ МэВ})$. Параметры моделирования указаны в подписи к рисунку. Видно, что кинематические области, соответствующие каналу реакции $\alpha + d$ отличаются от тех, которые соответствуют каналам $\alpha + n + p$, ${}^5\text{Li} + n$, ${}^5\text{He} + p$ и практически полностью перекрываются. Однако, регистрация в совпадении неупруго-рассеянного нейтрона, вторичных альфа-частиц и нейтронов при определенных кинематических условиях дает возможность разделить кинематические области, соответствующие каналам $\alpha + p + n$ и ${}^5\text{Li} + n$ (рис. 2б).

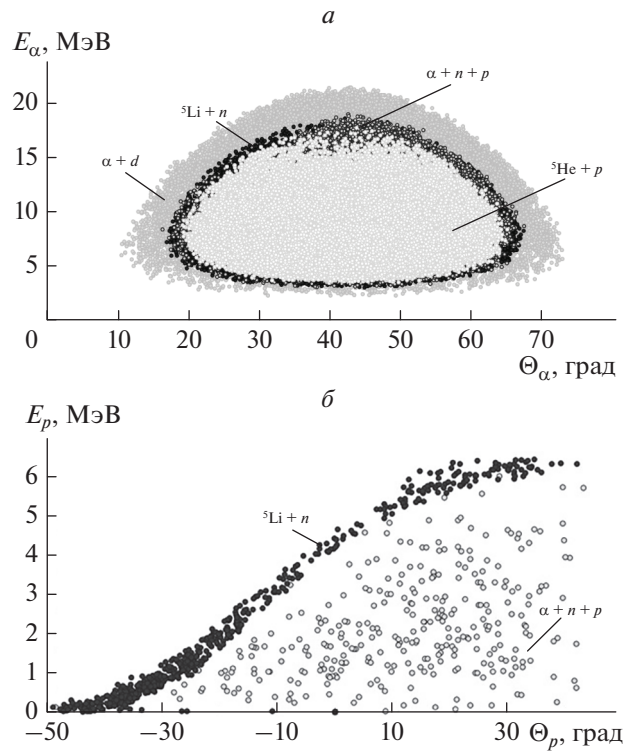


Рис. 2. Двумерная диаграмма $E_\alpha - \Theta_\alpha$ развалных альфа-частиц для уровня ${}^6\text{Li}^*(5.65 \text{ МэВ})$. Параметры моделирования: $E_0 = 60 \pm 1 \text{ МэВ}$, $\Theta_n = -80^\circ \pm 1^\circ$, $E_n = 40.06 \pm 2.14 \text{ МэВ}$ (а). Двумерная диаграмма $E_p - \Theta_p$ развалных протонов для уровня ${}^6\text{Li}^*(5.65 \text{ МэВ})$. Параметры моделирования: $E_0 = 60 \pm 1 \text{ МэВ}$, $\Theta_n = -80^\circ \pm 1^\circ$, $E_n = 40.06 \pm 2.14 \text{ МэВ}$, $\Theta_\alpha = 45^\circ \pm 2^\circ$, $\Theta_n = 55^\circ \pm 2^\circ$, $E_n > 8 \text{ МэВ}$ (б).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

На нейтронном пучке канала РАДЭКС ИЯИ РАН проводятся исследования реакций с малонуклонными системами, вызванных нейтронами с энергией 10–100 МэВ. Для исследования таких реакций необходимы регистрация в совпадении нейтронов и заряженных частиц, их идентификация и определение энергии. Сложностью для такого типа работ являются условия канала РАДЭКС: широкий пучок нейтронов с диаметром $\sim 50 \text{ мм}$, наличие большого γ -фона, а также ограничения в работе полупроводниковых кремниевых детекторов при облучении нейтронами.

Для проверки возможности регистрации в совпадении заряженных частиц и нейтронов на нейтронном канале РАДЭКС в качестве предварительных тестовых измерений была выбрана реакция $n + {}^6\text{Li} \rightarrow n + \alpha + d$, с регистрацией рассеянных нейтронов и вторичных альфа-частиц. При этом тестовые измерения могут считаться успешными в случае наличия пиков в энергетическом спектре

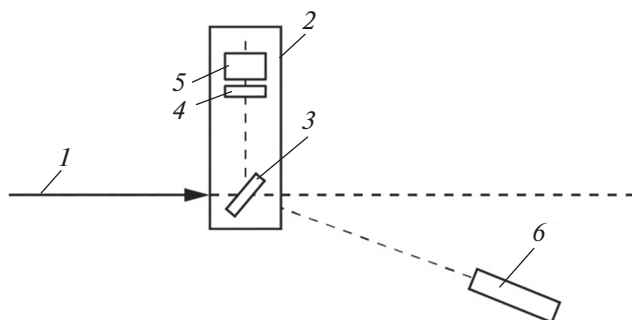


Рис. 3. Схема экспериментальной установки для исследования реакции $n + {}^6\text{Li} \rightarrow \alpha + d + n$: 1 – поток нейтронов канала РАДЭКС; 2 – малая вакуумная камера рассеяния; 3 – ${}^6\text{Li}_2\text{CO}_3$ -мишень; 4 – ΔE -детектор; 5 – E -детектор; 6 – нейтронный детектор.

зарегистрированных альфа-частиц, соответствующих развалу основного и возбужденных состояний ядра ${}^6\text{Li}$, в совпадении с нейтронным сигналом.

Ввиду широкого энергетического спектра нейтронов канала РАДЭКС, падающих на мишень, регистрация вторичных альфа-частиц и нейтронов позволит восстановить первоначальную энергию нейтрона для каждого зарегистрированного события.

По результатам моделирования был создан прототип экспериментальной установки (рис. 3), включающий как малую вакуумную камеру рассеяния с установленной мишенью ${}^6\text{Li}_2\text{CO}_3$ и телескопом ΔE – E кремниевых детекторов для регистрации заряженных частиц с толщинами 40 и 300 мкм, соответственно, так и нейтронный детектор на основе жидкого сцинтиллятора EJ-301 для регистрации нейтронов, позволяющий при необходимости измерять энергию нейтронов по методу времени пролета. Углы установки детекторов для регистрации заряженных частиц и нейтронов были выбраны $\sim 90^\circ$ и $\sim 30^\circ$, соответственно, по разные стороны от оси пучка.

Для получения временных и амплитудных характеристик сигналов использовалась система сбора информации на основе цифровых сигнальных процессоров DT5742 и DT5720 фирмы CAEN. Блок DT5742 предназначен для временного анализа сигналов и имеет следующие характеристики: количество детекторных входов 16, максимальная частота оцифровки $5 \cdot 10^9$ выборок $\cdot \text{с}^{-1}$ (шаг временной развертки 0.2 нс, 1024 канала), амплитудное разрешение 12 бит. Блок 5720 предназначен для амплитудного анализа и, соответственно, имеет характеристики: 4 детекторных входа, $250 \cdot 10^6$ выборок $\cdot \text{с}^{-1}$ (шаг 4 нс, 16000 каналов), разрешение 12 бит. Сочетание этих дигитайзеров позволяет получать с хорошим разрешени-

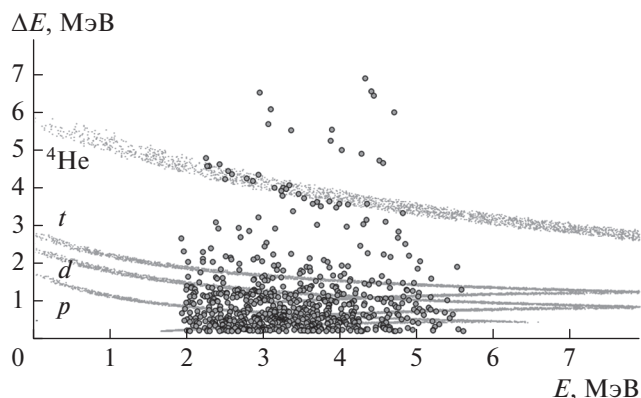


Рис. 4. Двумерная ΔE – E диаграмма, полученная при условии совпадения сигналов от ΔE -, E - и нейтронного детектора. На диаграмме нанесены расчетные локусы, соответствующие однозарядным частицам (p , d , t) и ${}^4\text{He}$.

ем как временную, так и амплитудную информацию со всех детекторов системы регистрации.

В системе сбора данных быстрый сигнал от ΔE -детектора запускал блок DT5742, на который также поступали временные сигналы от E -детектора и нейтронного детектора. Блок DT5742 в свою очередь запускал блок DT5720, на который поступали амплитудные сигналы со всех детекторов. Реальному событию соответствовал случай, когда на оба блока поступали сигналы от трех детекторов (ΔE -, E - и нейтронного детектора). Обработка информации в офлайн режиме состояла из определения амплитуд и площадей импульсов, получения времен возникновения сигналов в детекторах, определении энергии нейтрона по времени пролета и цифрового анализа формы импульсов для дискриминации нейтронных событий от событий, вызванных γ -квантами.

На рис. 4 показана экспериментальная двумерная ΔE – E диаграмма, полученная при условии совпадения сигналов от ΔE -, E - и нейтронного детектора.

Усиление на детекторах было подобрано таким образом, чтобы отчетливо наблюдать альфа-частичный локус. В связи с этим однозначное разделение однозарядных частиц не предоставляется возможным. Для наглядности на диаграмме нанесены моделированные ΔE – E спектры ионизационных потерь протонов, дейтронов, тритонов и альфа-частиц.

К сожалению, недостаточная статистика проведенных измерений не позволяет получить энергетический спектр альфа-частиц, однако, возможность регистрации в совпадении заряженных частиц и нейтронов (“полезных” событий), а также возможность идентификации типа заря-

женной частицы кажется достаточно основательными.

Тестовые измерения проводились в течение ~30 мин при потоке нейтронов $\sim 10^7 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ на измерительной мишени канала РАДЭКС. При телесных углах заряженных частиц и нейтронов $\sim 6 \cdot 10^{-3}$ и $\sim 2 \cdot 10^{-3}$ ср, соответственно, число “полезных” событий составило $\sim 1.8 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$. Это дает надежду, что при стабильном пучке нейтронов за достаточно приемлемое время можно исследовать кластерную структуру возбужденных состояний ${}^6\text{Li}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описана тестовая установка для проверки возможности регистрации в совпадении заряженных частиц и нейтронов на нейтронном канале РАДЭКС ИЯИ РАН. Проведены тестовые измерения реакции $n + {}^6\text{Li} \rightarrow \alpha + d + n$ с регистрацией в совпадении нейтронов и заряженных частиц.

Предполагается, что применение второго плеча для регистрации заряженных частиц и тонкой мишени даст возможность значительно расширить программу исследуемых реакций с малонуклонными системами на нейтронном пучке канала РАДЭКС, с восстановлением их полной кинематики, с разделением фоновых и исследуемых реакций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rose H.J., Jones G.A.* // Nature. 1984. V. 307. No. 5948. P. 245.
2. *Freer M., Angelique J.C., Axelsson L. et al.* // Phys. Rev. Lett. 1999. V. 82. No. 7. P. 1383.
3. *Tompson D.R., Tang Y.C.* // Nucl. Phys. A. 1968. V. 106. No. 3. P. 591.
4. *Ajzenberg-Selove F.* // Nucl. Phys. A. 1984. V. 413. No. 1. P. 1.
5. *Tilley D.R., Cheves C.M., Godwin J.L. et al.* // Nucl. Phys. A. 2002. V. 708. No. 1–2. P. 3.
6. *Okhura H., Yamada T., Ikeda K.* // Prog. Theor. Exp. Phys. 1995. V. 94. No. 1. P. 47.
7. *Kuramoto R., Lichtenthaler R., Lepine-Szily A. et al.* // Braz. J. Phys. 2004. V. 34. No. 3A. P. 933.
8. *Nakayama S., Yamagata T., Akimune H. et al.* // Phys. Rev. C. 2004. V. 69. No. 4. Art. No. 041304.
9. *Povoroznyk O., Gorpinich O.K., Jachmenjov O.O. et al.* // J. Phys. Soc. Japan. 2011. V. 80. Art. No. 094204.
10. *Гуров Ю.Б., Короткова Л.Ю., Карпукхин В.С. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81. № 6. С. 714; *Gurov Yu.B., Korotkova L.Yu., Karpukhin V.S. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2017. V. 81. No. 6. P. 641.
11. *Каспаров А.А., Конобеевский Е.С., Зуев С.В. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 5. С. 690; *Kasparov A.A., Konobeevski E.S., Zuyev S.V. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 5. P. 534.
12. *Зуев С.В., Каспаров А.А., Конобеевский Е.С.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81. № 6. С. 753; *Zuyev S.V., Kasparov A.A., Konobeevski E.S.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2017. V. 81. No. 6. P. 679.

Test setup for registration of coincident signals from reactions with the emission of charged particles and neutrons on the RADEX channel

A. A. Kasparov^{a,*}, M. V. Mordovskoy^a, A. A. Afonin^a, V. V. Mitcuk^a

^a Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*e-mail: kasparov200191@gmail.com

A prototype of experimental setup for testing the registration possibility in the coincidence of charged particles and neutrons on the RADEX neutron channel of INR RAS is described. Test measurements of the $n + {}^6\text{Li} \rightarrow \alpha + d + n$ reaction were carried out, and the registration possibility in the coincidence of charged particles and neutrons, as well as the identification possibility of the charged particle type was shown.