УДК 539.172.4

МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕМАТИКИ КЛАСТЕРНОГО РАСПАДА ВОЗБУЖДЕННЫХ СОСТОЯНИЙ ¹²Ве НА КАСКАДНЫХ НЕЙТРОНАХ РАДЭКС

© 2022 г. А. А. Каспаров¹, М. В. Мордовской¹, В. М. Скоркин^{1, *}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Институт ядерных исследований Российской академии наук", Москва, Россия *E-mail: skorkin@inr.ru

> Поступила в редакцию 18.04.2022 г. После доработки 13.05.2022 г. Принята к публикации 23.05.2022 г.

Выполнено моделирование кинематики реакции ${}^{13}C(n, 2p){}^{12}Be*$ на каскадных нейтронах с энергией 30—150 МэВ. Рассмотрены корреляционные особенности распада возбужденных кластерных состояний ${}^{12}Be$ с квазимолекулярной структурой α -4*n*- α и ${}^{8}Be$ -4*n* при энергии возбуждения до 25 МэВ. Показана возможность измерения характеристик каналов распада, возбужденных состояний ${}^{12}Be$ с 4*n*-корреляцией при регистрации в совпадении 2*p*-пары и α -частиц на каскадных нейтронах импульсного источника РАДЭКС.

DOI: 10.31857/S0367676522090113

введение

Изучение характеристик каналов кластерного распала возбужленных состояний легких ялер чрезвычайно важно для исследования механизма ядерных реакций и структуры ядер. Развиты теоретические схемы и компьютерные коды расчетов для определения кластерной структуры и характеристик каналов кластерного распада высоковозбужденных состояний легких ядер [1]. Расчеты с использованием антисимметричной модели молекулярной динамики выявили кластерную структуру ядер с A = 12 (¹²Be, ¹²B, ¹²C) [2]. В возбужденных состояниях ¹²Ве обнаружены аналоговые состояния с изоспином T = 2 и квазимолекулярной структурой α -4*n*- α и ⁸Be-4*n* [3]. На рис. 1 показана схема возбужденных состояния ¹²Ве вплоть до энергии 25 МэВ с данными о спине и четности состояний. Параметры высоковозбужленных состояний ¹²Ве указывают на их кластерную структуру. Расчеты с учетом трехнуклонного ядерного взаимодействия предсказывает существование 4*n*-коррелированного кластера во внешнем ядерном поле свыше 3 МэВ и радиусом ~3 Фм или в виде резонанса в континууме с энергией около 2 МэВ [4]. Моделирование в феноменологическом подходе пяти тел прямого одновременного излучения четырех коррелированных нейтронов при распаде возбужденного состояния показывает, что удельная энергия и угловые корреляции фрагментов 4*n*-распада зависят от пространственных корреляций "валентных" нуклонов в кластерной ядерной структуре [5].

Целью работы является моделирование кинематики ${}^{13}C(n, 2p){}^{12}Be*$ с образованием кластерных



Рис. 1. Схема возбужденных состояний ¹²Ве, представленных в работе [3].

ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ том 86 № 9 2022

высоковозбужденных состояний ¹²Ве с 4*n*-корреляцией и разработка методов измерения их характеристик на каскадных нейтронах импульсного источника РАДЭКС ИЯИ РАН.

КИНЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Чтобы определить необходимые условия эксперимента и параметры экспериментальной установки, было проведено моделирование реакции квазиупругого выбивания нейтроном пары протонов в реакции ${}^{13}C(n, 2p){}^{12}Be^*$. Для этого были использованы программы кинематического моделирования реакций с тремя частицами в конечном состоянии [6]. Принцип работы программ заключается в следующем: из множества событий с произвольными или частично-заданными параметрами (энергия пучка, углы вылета и энергии вторичных частиц), отбираются только те события, которые удовлетворяют законам сохранения энергии и импульса с заданной заранее точностью.

Кинематическое моделирование проведено в два этапа при энергии первичных нейтронов $E_n = 60 \pm 1$ МэВ и $E_n = 80 \pm 1$ МэВ. На первом этапе рассматривалась квазибинарная реакция $n + {}^{13}C \rightarrow - {}^{2}p + {}^{12}Be^*$ с вылетом системы двух протонов и ядра ${}^{12}Be$ в основном или возбужденном состоянии. Рассчитывались углы вылета и кинетические энергии ядра ${}^{12}Be$ и центра масс протонной пары в лабораторной системе координат. Учитывая экспериментальные условия, угол вылета центра масс двух протонов был выбран $\Theta_{2n} \sim 75^\circ$.

На втором этапе рассматривался развал ${}^{2}p \rightarrow p + p$ и рассчитывались углы вылета и кинетические энергии двух протонов в лабораторной системе координат. Кинематическое моделирование показало, что протоны от развала 2*p*-пары вылетают в узком конусе углов ~10°. На рис. 2 показана двумерная диаграмма "угол вылета — энергия" одного из протонов при энергии первичных нейтронов $E_n = 60 \pm 1$ (рис. 1*a*) и 80 ± 1 МэВ (рис. 1*б*). На диаграмме показаны кинематические области, соответствующие образованию ядра ¹²Ве в основном состоянии (область *1*) и возбужденным состояниям с энергиями ~12 (область *2*) и ~24 МэВ (область *3*), соответственно.

Кинематическое моделирование позволило определить диапазон энергий и углов вылета протонов, необходимых для исследования альфакластерного распада высоковозбужденных состояний ядра ¹²Ве в реакции ¹³С(n, 2p)¹²Ве*.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА

На импульсном пучке нейтронов установки РАДЭКС ИЯИ РАН проводятся исследования

Рис. 2. Двумерная диаграмма $E_p - \Theta_p$ одного из протонов в реакции $n + {}^{13}\text{C} \rightarrow {}^2p + {}^{12}\text{Be}^* \rightarrow p + p + {}^{12}\text{Be}^*$: a при энергии первичных нейтронов $E_n = 60 \pm 1$ МэВ; $\delta -$ при $E_n = 80 \pm 1$ МэВ. Области: I - соответствует образованию ядра ${}^{12}\text{Be}$ в основном состоянии; 2 возбужденному состоянию ядра ${}^{12}\text{Be}$ с энергий ~12 МэВ; 3 - возбужденному состоянию ядра ${}^{12}\text{Be}$ с энергий ~24 МэВ.

ядерных реакций взаимодействия каскадных и испарительных нейтронов с энергией 1–300 МэВ. Установка РАДЭКС размещена на ловушке импульсного пучка протонов линейного ускорителя ионов водорода (длительность 1–200 мкс, частота 1–100 Гц, средний ток 1–100 мкА). Установка имеет вакуумный протонный канал (Ø20 см), вольфрамовую мишень для генерации каскадных и испарительных нейтронов и горизонтальные каналы (Ø20 см) для облучения экспериментальных мишеней на расстоянии 10–50 м от ловушки пучка протонов [7].

На рис. 3 показан спектр каскадных нейтронов на экспериментальной мишени (10 м) при среднем токе пучка протонов линейного ускорителя 50 мкА и различной энергии протонов: 45 (кривая *I*), 160 (кривая *2*) и 300 МэВ (кривая *3*). Выбирая первоначальную энергию пучка протонов можно определить оптимальные экспериментальные условия для исследования реакции ${}^{13}C(n, 2p){}^{12}Be*$ при различной энергии каскадных нейтронов.





Рис. 3. Плотность потока каскадных нейтронов на расстоянии 10 м от W мишени РАДЭКС при среднем токе пучка протонов линейного ускорителя 50 мкА для различной энергии протонов. *1* – поток нейтронов при энергии протонов 45 МэВ; *2* – поток нейтронов при энергии протонов 160 МэВ; *3* – поток нейтронов при энергии протонов 300 МэВ.

На рис. 4 показаны зависимости поперечных сечений образования ¹²Ве в основном состоянии в реакции ¹³С(*n*, 2*p*)¹²Ве (рис. 4*a*) и фоновой реакции ¹³С(*n*, *p*)Х (рис. 4*b*). Энергия каскадных нейтронов выше порога реакции (около 30 МэВ) определяет вероятность образования ¹²Ве в различных состояниях. При энергии нейтронов 40–50 МэВ возможны оптимальные условия для исследования основного состояния ¹²Ве, при энергии 60 МэВ – для возбужденного состояния ¹²Ве с энергией ≈12 МэВ, при энергии ≥80 МэВ – для энергии состояния ≈24 МэВ. Регистрация протонной пары с отбором по энергии и углу поможет подавить фон при регистрации высоковозбужденного кластерного состояния ¹²Ве.

Регистрация частиц распада возбужденного состояния следует вести в промежутках между импульсами нейтронного пучка при частоте 1—50 Гц, чтобы исключить мгновенный фон от каскадных нейтронов. Дополнительная режекция фона осуществима при совпадении выбитой мгновенно каскадным нейтроном протонной пары и заряженных частиц от распада ¹²Ве* в интервале между импульсами.

Образование ¹²Ве в основном состоянии приводит к его β^- -распаду с периодом $T_{1/2} = 21.5$ мс и образованием ¹²В, который также испытывает β^- -распад с $T_{1/2} = 20.2$ мс. Низколежащее возбужденное состояние ¹²Ве (≈4 МэВ) распадается с вылетом нейтрона и образованием ¹¹Ве, который также подвергается β^- -распаду.



Рис. 4. Поперечное сечение реакции ${}^{13}C(n, 2p){}^{12}Be$ с образованием ${}^{12}Be$ в основном состоянии (*a*) и фоновой реакции ${}^{13}C(n, p)X(\delta)$.

Регистрация вблизи порога реакции ${}^{13}C(n, 2p){}^{12}Be$ совпадения квазиупруго выбитой 2p-пары и β^- -частиц (и возможно *n*) распада основного и низколежащего возбужденного состояний ${}^{12}Be$ позволит провести калибровки системы детектирования и тестовые измерения для проверки возможности измерения параметров низколежащих возбужденных состояний.

Измерение характеристик высоковозбужденных кластерных состояний ¹²Ве необходимо вести по регистрации альфа-частиц и нейтронов от кластерного распада этих состояний со структурой α -4*n*- α и ⁸Ве-4*n* при энергии возбуждения в области 12 и 24 МэВ. Возможно восстановление энергетического спектра каскадных нейтронов, падающих на мишень ¹³С по измерению параметров *p* и α -частиц.

По результатам моделирования предполагается разработать методику эксперимента и провести тестовые измерения с использованием вакуумной камеры с мишенью ¹³С, телескопа $\Delta E - E$ кремниевых детекторов для регистрации заряженных частиц и детектора нейтронов с жидким сцинтиллятором EJ-301 [8]. Для получения временных и амплитудных характеристик сигналов может быть использованы цифровые сигнальные процессоры DT5742 и DT5720 фирмы CAEN.

Оценки показывают, что при потоке каскадных нейтронов около $5 \cdot 10^7$ см⁻² · с⁻¹ на экспериментальной мишени скорость счета событий образования и распада возбужденных состояний ¹²Ве составит ~ 10^{-2} с⁻¹, что позволяет надеяться на измерении характеристик α -кластерной структуры возбужденных состояний ¹²Ве с 4*n*-корреляцией.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Моделирование кинематики ядерной реакции ${}^{13}C(n, 2p){}^{12}Be*$ при энергии 30–150 МэВ показало возможность регистрации событий образования и распада высоковозбужденных кластерных состояний ${}^{12}Be$ на каскадных нейтронах РАДЭКС. Экспериментальные измерения с регистрацией в совпадении протонов, α -частиц и нейтронов позволят существенно подавить фон и исследовать квазимолекулярную структуру состояний ${}^{12}Be*$, а также корреляционные характеристики кластерных каналов распада.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

 Rodkin D.M., Tchuvil'sky Yu.M. // Phys. Lett. B. 2019. V. 788. P. 238.

- Kanada-En'yo Y., Ogata K. // Phys. Rev. C. 2019. V. 100. Art. No. 064616.
- Kelley J.H., Purcell J.E., Sheu C.G. // Nucl. Phys. A. 2017. V. 968. P. 71.
- 4. Pieper S.C. // ArXiv: nucl-th/0302048v2. 2003.
- Sharov P., Ismailova A., Grigorenko L. et al. // Proc. LXX Int. Conf. "NUCLEUS-2020". (Saint Petersburg, 2020). 324 p.
- 6. Зуев С.В., Каспаров А.А., Конобеевский Е.С. // Изв. РАН. Сер. физ. 2014. Т. 78. № 5. С. 527; Zuyev S.V., Kasparov A.A., Konobeevski E.S. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2014. V. 78. No. 5. P. 345.
- 7. Бенецкий Б.А., Вахетов Ф.З., Грачев М.И. и др. Программа экспериментальных исследований на установке РАДЭКС. Препринт ИЯИ-1058/2001. М.: ИЯИ РАН, 2001.
- Каспаров А.А., Конобеевский Е.С., Зуев С.В. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 5. С. 690; Kasparov А.А., Konobeevski E.S., Zuyev S.V. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 5. P. 534.

Modeling the kinematics of cluster decay of ¹²Be excited states from RADEX cascade neutrons

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

^a Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117312 Russia *e-mail: skorkin@inr.ru

The kinematics of the ${}^{13}C(n, 2p){}^{12}Be^*$ reaction on cascade neutrons with an energy of 30–150 MeV was simulated. The correlation features of the decay of excited ${}^{12}Be$ cluster states with quasi-molecular structures α -4*n*- α and ${}^{8}Be$ -4*n* at excitation energies up to 25 MeV are considered. It is shown that it is possible to measure the characteristics of decay channels of the excited ${}^{12}Be$ state with 4*n* correlation when registering in co-incidence of a 2*p*-pair and α -particles on cascade neutrons of the RADEX pulsed source.