ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, 2021, том 85, № 5, с. 690–693

УДК 539.172.16

ВОЗМОЖНОСТЬ ИССЛЕДОВАНИЯ КЛАСТЕРНОЙ СТРУКТУРЫ ВОЗБУЖДЕННЫХ СОСТОЯНИЙ ^{6}Li В РЕАКЦИИ НЕУПРУГОГО РАССЕЯНИЯ α-ЧАСТИЦ

© 2021 г. А. А. Каспаров[1, *], Е. С. Конобеевский[1], С. В. Зуев[1], А. А. Афонин[1], М. В. Мордовской[1], В. В. Мицук[1], В. П. Заварзина[1], А. С. Курлович[1]

[1]Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: kasparov200191@gmail.com

Поступила в редакцию 20.11.2020 г.
После доработки 28.12.2020 г.
Принята к публикации 27.01.2021 г.

Для определения вкладов различных конфигураций в структуру возбужденных состояний ^{6}Li предложено исследование реакции неупругого рассеяния альфа-частиц на ядрах ^{6}Li с регистрацией в совпадении рассеянной альфа-частицы и различных частиц от развала возбужденных состояний. Результаты проведенного моделирования показывают, что существуют кинематические области развальных частиц, соответствующие определенным каналам развала (кластерным конфигурациям) возбужденных состояний ^{6}Li.

DOI: 10.31857/S0367676521050112

ВВЕДЕНИЕ

Исследование кластерной структуры легких ядер является важной проблемой ядерной физики, так как способствует более глубокому пониманию структуры ядерной материи и механизма ядерных реакций на этих ядрах. Отдельный интерес представляет исследование кластерной структуры возбужденных состояний ядер и вероятностей их развала по определенным каналам. В статье рассматривается возможность исследования кластерной структуры низколежащих состояний ядра ^{6}Li, являющегося одним из самых легких ядер, имеющим ярко выраженную кластерную структуру. Этому ядру посвящено большое число теоретических и экспериментальных работ [1–6]. Вариантами кластерной структуры возбужденных состояний ядра ^{6}Li являются: $\alpha + p + n$; $\alpha + d$; $t + {}^3$He; ^{5}Li $+ n$; ^{5}He $+ p$.

Для исследования кластерной структуры возбужденных состояний ^{6}Li предлагается реакция неупругого рассеяния альфа-частиц на ядрах ^{6}Li. Из-за малых порогов развала через каналы $\alpha + p + n$ ($E_{пор}$ = 3.6989 МэВ), $\alpha + d$ ($E_{пор}$ = 1.4743 МэВ), ^{5}Li $+ n$ ($E_{пор}$ = 5.39 МэВ) и ^{5}He $+ p$ ($E_{пор}$ = 4.497 МэВ) многие низколежащие состояния ^{6}Li могут разваливаться с испусканием нейтронов, протонов и альфа-частиц. Основная идея исследования состоит в регистрации неупруго рассеянных альфа-частиц на ядрах ^{6}Li в совпадении с частицами от развала возбужденного состояния, в результате чего выделяются кинематические области вторичных (развальных) частиц, соответствующие развалу по определенному каналу.

Исследуемые реакции являются двухстадийными, с образованием и последующим развалом возбужденного состояния ^{6}Li по различным каналам

$$\alpha + {}^6\mathrm{Li} \to \alpha' + {}^6\mathrm{Li}^* \to \alpha' + \alpha + p + n, \quad (1)$$

$$\alpha + {}^6\mathrm{Li} \to \alpha' + {}^6\mathrm{Li}^* \to \alpha' + {}^5\mathrm{Li} + n \to \to \alpha' + \alpha + p + n, \quad (2)$$

$$\alpha + {}^6\mathrm{Li} \to \alpha' + {}^6\mathrm{Li}^* \to \alpha' + {}^5\mathrm{He} + p \to \to \alpha' + \alpha + n + p, \quad (3)$$

$$\alpha + {}^6\mathrm{Li} \to \alpha' + {}^6\mathrm{Li}^* \to \alpha' + \alpha + d. \quad (4)$$

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ВОЗМОЖНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Моделирование реакций (1)–(4) проводилось с помощью программ кинематического моделирования [7], в которых из множества событий с произвольными или частично-заданными параметрами (энергия пучка, углы вылета и энергии вторичных частиц), отбираются только те события, которые удовлетворяют законам сохране-

ния энергии и импульса с заданной заранее точностью.

Моделирование проводилось в два этапа. На первом этапе рассматривалась двухчастичная реакция $\alpha + {}^6$Li с возбуждением определенного уровня ^{6}Li. Энергия падающих альфа-частиц в расчетах бралась $E_\alpha = 30 \pm 0.1$ МэВ. Рассмотрим подробнее моделирование для возбужденного состояния ^{6}Li*(5.65 МэВ). Выбор угла регистрации рассеянной альфа-частицы $\Theta_{\alpha'} = -60° \pm 1°$ фиксирует ее энергию $E_{\alpha'} = 9.25 \pm 1.75$ МэВ (положительные и отрицательные углы соответствует левой и правой полуплоскостям относительно оси пучка). В табл. 1 показаны энергии альфа-частицы, рассеянной под углом $\Theta_{\alpha'} = -60° \pm 1°$, для различных уровней ядра ^{6}Li.

На втором этапе моделируются реакций с тремя или четырьмя частицами в конечном состоянии. При этом угол вылета и энергия рассеянной альфа-частицы выбираются в соответствии с кинематикой двухчастичной реакции, рассчитанной на первом этапе.

В результате моделирования были получены различные двумерные диаграммы для развальных частиц. На рис. 1*а* представлено двумерное распределение E_α–Θ_α вторичных альфа-частиц. Для каналов развала ^{5}He + p и ^{5}Li + n вторичные альфа-частицы образуются после развала нестабильных ядер ^{5}He и ^{5}Li.

Из рис. 1*а* видно, что кинематические области, соответствующие каналу реакции $\alpha + d$ отличаются от областей, соответствующих каналам $\alpha + p + n$, ^{5}Li + n и ^{5}He + p. Так, регистрация вторичных альфа-частиц, например, под углом $\Theta_\alpha = 48° \pm 2°$, приводит к энергетическим спектрам вторичных альфа-частиц, показанным на рис. 1*б*. Таким образом, при данных кинематических условиях можно однозначно наблюдать развал возбужденного состояния по каналу $\alpha + d$. Однако кинематические области, соответствующие развалу возбужденного состояния ^{6}Li через каналы $\alpha + p + n$, ^{5}Li + n и ^{5}He + p, практически полностью перекрываются, и их разделение не представляется возможным.

На рис. 2*а* показана двумерная диаграмма развальных нейтронов E_n–Θ_n. Видно, что область, соответствующая трехкластерной конфигурации $\alpha + p + n$, может наблюдаться в эксперименте при регистрации вторичных нейтронов под углами $\Theta_n > 90°$ или $\Theta_n < -25°$. Однако при других углах нейтронов, области, соответствующие двухкластерным конфигурациям ^{5}Li + n и ^{5}He + p, перекрываются и накладываются на область, соответствующую трехкластерной конфигурации $\alpha + p + n$.

Тем не менее, кинематическое моделирование показало возможность отделить процессы развала по каналам ^{5}Li + n и ^{5}He + p. Фиксируя угол вылета

Таблица 1. Энергия альфа-частиц, рассеянных под углом $\Theta_{\alpha'} = -60° \pm 1°$, для различных возбужденных уровней ядра ^{6}Li

E_x (МэВ)	Г (МэВ)	$E_{\alpha'}$ (МэВ)
g.s.		14.25 ± 0.45
2.186	0.024	12.4 ± 0.5
3.5629	~0	11.15 ± 0.45
4.312	1.3	10.55 ± 1.55
5.366	0.541	9.55 ± 0.85
5.65	1.5	9.25 ± 1.75

вторичного нейтрона, например $\Theta_n = 80° \pm 2°$, двумерное распределение E_p–Θ_p принимает вид, показанный на рис. 2*б*. Процессы развала по каналам $\alpha + p + n$ и ^{5}Li + n разделяются, и на двумерной диаграмме события, отвечающие развалу возбужденного ядра ^{6}Li по каналу ^{5}Li + n группируются на границе локуса.

На рис. 3*а* показана двумерная диаграмма развальных протонов E_p–Θ_p. Фиксация угла вылета

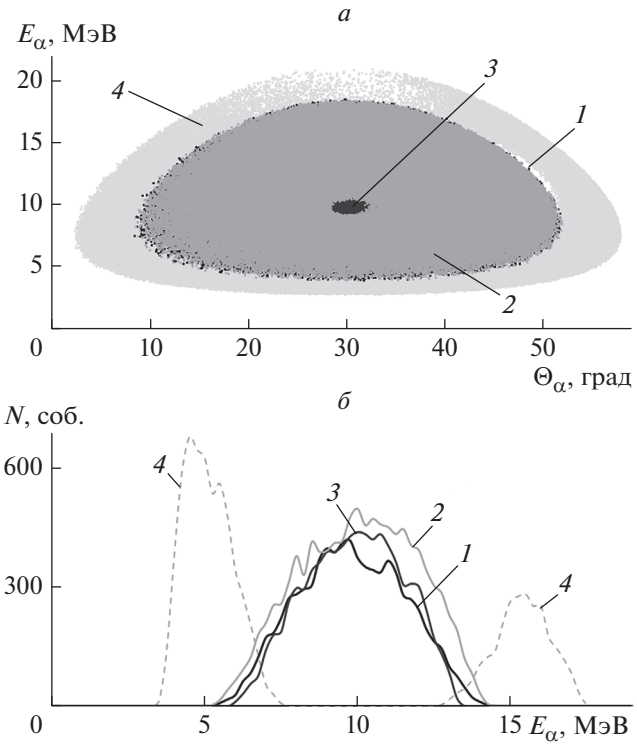

Рис. 1. *а* – Двумерная диаграмма E_α–Θ_α развальных альфа-частиц для уровня ^{6}Li*(5.65 МэВ); *б* – энергетические спектры развальных альфа-частиц для уровня ^{6}Li*(5.65 МэВ). Параметры моделирования: $E_\alpha = 30 \pm 0.1$ МэВ, $\Theta_{\alpha'} = -60° \pm 1°$. Нумерация энергетических спектров совпадает с номерами исследуемых реакций (1)–(4).

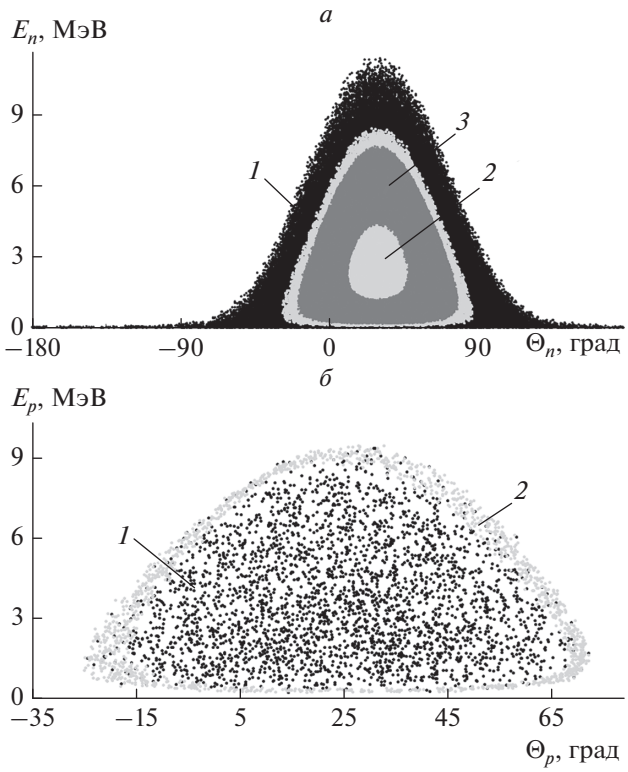

Рис. 2. *а* – Двумерная диаграмма $E_n - \Theta_n$ развальных нейтронов для уровня ^{6}Li*(5.65 МэВ). Параметры моделирования: $E_\alpha = 30 \pm 0.1$ МэВ, $\Theta_{\alpha'} = -60° \pm 1°$; *б* – двумерная диаграмма E_p–Θ_p развальных протонов для уровня ^{6}Li*(5.65 МэВ). Параметры моделирования: $E_\alpha = 30 \pm 0.1$ МэВ, $\Theta_{\alpha'} = -60° \pm 1°$, $\Theta_n = 80° \pm 2°$. Нумерация кинематических областей совпадает с номерами исследуемых реакций (1)–(4).

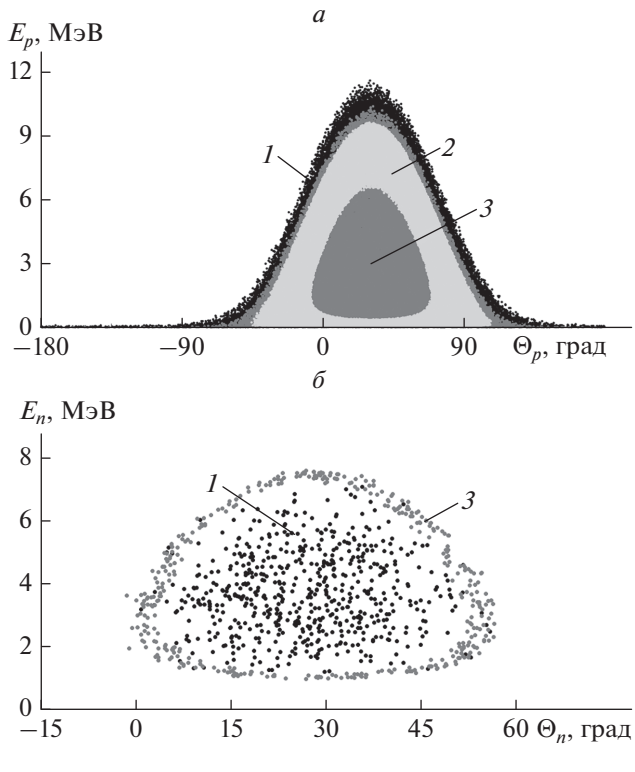

Рис. 3. *а* – Двумерная диаграмма E_p–Θ_p развальных протонов для уровня ^{6}Li*(5.65 МэВ). Параметры моделирования: $E_\alpha = 30 \pm 0.1$ МэВ, $\Theta_{\alpha'} = -60° \pm 1°$; *б* – двумерная диаграмма $E_n - \Theta_n$ развальных нейтронов для уровня ^{6}Li*(5.65 МэВ). Параметры моделирования: $E_\alpha = 30 \pm 0.1$ МэВ, $\Theta_{\alpha'} = -60° \pm 1°$, $\Theta_p = 110° \pm 2°$. Нумерация кинематических областей совпадает с номерами исследуемых реакций (1)–(4).

вторичного протона, например $\Theta_p = 110° \pm 2°$, приводит к двумерному распределению развальных нейтронов E_n–Θ_n, показанному на рис. 3*б*. Процессы развала по каналам $\alpha + p + n$ и ^{5}He + p также разделяются, и на двумерной диаграмме E_n–Θ_n события, отвечающие развалу возбужденного ядра ^{6}Li по каналу ^{5}He + p также группируются на границе соответствующего локуса.

Таким образом, для наблюдения двухкластерных конфигураций ^{5}Li + n и ^{5}He + p, в качестве выходных данных для сравнения с экспериментом могут быть рассмотрены двумерные диаграммы, показанные на рис. 2*б* и 3*б*.

Кинематическое моделирование представленных реакций было проведено для различных возбужденных уровней ядра ^{6}Li и каналов развала. Развал через канал $t + {}^3$He ($E_{пор} = 15.7947$ МэВ) не представляется возможным наблюдать в эксперименте при энергии альфа-частиц $E_\alpha \leq 30$ МэВ из-за высокого порога развала.

Эксперимент по неупругому рассеянию альфа-частиц ядрах ^{6}Li может быть проведен на цик-

Таблица 2. Возможные исследуемые кластерные конфигурации возбужденного состояния ^{6}Li*(5.65 МэВ)

Регистрируемые частицы	Кластерные конфигурации
$\Theta_{\alpha'} = -60° \pm 1°$; $\Theta_\alpha > 50°$	$\alpha + d$
$\Theta_{\alpha'} = -60° \pm 1°$; $\Theta_n > 90°$ или $\Theta_{\alpha'} = -60° \pm 1°$; $\Theta_n < -25°$	$\alpha + p + n$
$\Theta_{\alpha'} = -60° \pm 1°$; $\Theta_p = 110° \pm 2°$; $\Theta_n = 0°$–$55°$	$\alpha + p + n$; ^{5}He + p
$\Theta_{\alpha'} = -60° \pm 1°$; $\Theta_n = 80° \pm 2°$; $\Theta_p = -25°$–$75°$	$\alpha + p + n$; ^{5}Li + n

лотроне У-120 НИИЯФ МГУ при энергии падающих альфа-частиц 30 МэВ. В эксперименте нужно регистрировать в совпадении как рассеянную альфа-частицу, так и одну (α или *n*) или две (*p* и *n*) вторичные частицы от развала возбужденного состояния ^{6}Li. Для примера, в таблице представлены возможные исследуемые кластерные конфигурации возбужденного состояния ^{6}Li*(5.65 МэВ) и параметры регистрируемых частиц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для исследования кластерной структуры возбужденных состояний ^{6}Li предлагается реакция неупругого рассеяния альфа-частиц на ядрах ^{6}Li. Проведено кинематическое моделирование реакции неупругого рассеяния альфа-частиц на ядрах ^{6}Li при энергии 30 МэВ для различных возбужденных состояний ^{6}Li. Наглядно показано, что существуют кинематические области развальных частиц, соответствующие определенным каналам развала возбужденных состояний ^{6}Li.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tilley D.R., Cheves C.M., Godwin J.L. et al.* // Nucl. Phys. A. 2002. V. 708. P. 3.
2. *Kukulin V.I., Pomerantsev V.N., Razikov Kh.D. et al.* // Nucl. Phys. A. 1995. V. 585. No. 1. P. 151.
3. *Hiyama E., Yamada T.* // Prog. Part. Nucl. Phys. 2009. V. 63. No. 2. P. 339.
4. *Буртебаев Н., Артемов С.В., Дуйсебаев Б.А. и др.* // Яд. физ. 2010. Т. 73. № 5. С. 776; *Burtebaev N., Artemov S.V., Duisebayev B.A. et al.* // Phys. Atom. Nucl. 2010. V. 73. No. 5. P. 746.
5. *Povoroznyk O.M., Gorpinich O.K., Jachmenjov O.O. et al.* // J. Phys. Soc. Japan. 2011. V. 80. Art. No. 094204.
6. *Науменко М.А., Самарин В.В.* // Яд. физ. 2017. Т. 80. № 5. С. 473; *Samarin V.V., Naumenko M.A.* // Phys. Atom. Nucl. 2017. V. 80. No. 5. P. 877.
7. *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.

A possibility of determining cluster structure of ^{6}Li excited states in inelastic scattering of α-particles

A. A. Kasparov[a, *], E. S. Konobeevski[a], S. V. Zuyev[a], A. A. Afonin[a], M. V. Mordovskoy[a], V. V. Mitcuk[a], V. P. Zavarzina[a], A. S. Kurlovich[a]

[a] *Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

**e-mail: kasparov200191@gmail.com*

To determine the contribution of various configurations to the structure of excited states, we propose the study of inelastic scattering of α-particles on the ^{6}Li nucleus, provided that the scattered α-particle coincides with the particles from the breakup of the excited state. The simulation results show that there are kinematic areas of breakup particles corresponding to certain breakup channels (cluster configurations) of excited ^{6}Li states.