

## Тестовый эксперимент по определению кластерной структуры высоковозбужденных состояний ${}^6\text{Li}$

М. В. Мордовской,<sup>1,\*</sup> А. А. Каспаров,<sup>1</sup> А. А. Афонин,<sup>1</sup>  
В. П. Заварзина,<sup>1</sup> А. С. Курлович,<sup>1</sup> В. В. Мицук,<sup>1</sup> И. В. Суркова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт ядерных исследований Российской академии наук  
Россия 117312, Москва, В-312, проспект 60-летия Октября, 7а

(Поступила в редакцию 07.06.2023; после доработки 08.06.2023; принята к публикации 09.06.2023)

В работе представлены результаты тестовых измерений по определению возможностей изучения кластерной структуры высоковозбужденных состояний ядра  ${}^6\text{Li}$  в реакции  ${}^6\text{Li}(n, {}^3\text{He}){}^3\text{H}$  на нейтронном канале РАДЭКС Института ядерных исследований РАН. В эксперименте, наряду с рассеянными нейтронами, регистрировались в совпадении продукты распада высоковозбужденных состояний (гелий-3). Получены первые на данной установке экспериментальные данные по энергии возбуждения ядра  ${}^6\text{Li}$ .

PACS: 21.90.+f, 29.90.+g. УДК: 539.1

Ключевые слова: кластерная структура, легкие ядра, квазимолекулярные состояния, возбужденные состояния, трехчастичные реакции, продукты распада, энергия возбуждения, заряженная частица, нейтрон.

DOI: [10.55959/MSU0579-9392.78.2340202](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.78.2340202)

### ВВЕДЕНИЕ

Исследование кластерной структуры ядер является одной из фундаментальных проблем ядерной физики. Существование  $\alpha$ -кластеров доказано как в легких, так и тяжелых ядрах, при этом другие кластеры также наблюдаются и играют заметную роль для адекватного описания механизмов ядерных реакций и структуры ядер [1, 2]. Для нейтронно-избыточных ядер имеются как теоретические [3], так и экспериментальные [4, 5] основания для предположения о существовании динейтронного кластера. Экзотические молекулярно-подобные кластерные структуры в легких ядрах  ${}^6\text{He}$  и  ${}^6\text{Li}$ , описываемые как двухфермионные системы ( ${}^3\text{H}-{}^3\text{H}$ ,  ${}^3\text{H}-{}^3\text{He}$ ), являются аналогом двухнуклонной системы, рассматриваются теоретически и наблюдаются экспериментально [6, 7]. Тем не менее физика таких трехнуклонных кластерных состояний остается неясной.

Высоковозбужденные состояния  ${}^6\text{He}$  и  ${}^6\text{Li}$  исследовались в ряде работ. Авторы работы [8] утверждают, что в реакции  ${}^6\text{Li}({}^7\text{Li}, {}^7\text{Be}, t)$  при  $E({}^7\text{Li}) = 455$  МэВ они сумели выделить широкий резонанс при  $E_x^* = 18.0 \pm 1$  МэВ. Напротив, в работе [9] в реакции  ${}^7\text{Li}({}^6\text{Li}, {}^7\text{Be}){}^6\text{He}$  при  $E({}^6\text{Li}) = 93$  МэВ были обнаружены два резонансных состояния для  ${}^6\text{He}$  при энергии  $E_x^* = 14.0$  МэВ и  $E_x^* = 25.0$  МэВ с ширинами  $\Gamma = 5$  МэВ и  $\Gamma = 10$  МэВ соответственно. В работе [10] кластерная структура  ${}^6\text{Li}$  исследовалась в реакции  ${}^3\text{H}(\alpha, {}^3\text{H}){}^3\text{He}n$  при энер-

гии  $E_\alpha = 67.2$  МэВ. Наблюдались два резонанса при  $E_x^* = 21.30$  и  $21.90$  МэВ. В то же время в работе [11] при исследовании реакции  ${}^7\text{Li}({}^3\text{He}, \alpha)$  с энергией пучка  $E({}^7\text{Li}) = 450$  МэВ были обнаружены два резонансных состояния  ${}^6\text{Li}$  со структурой  ${}^3\text{He}-t$  при энергии  $E_x^* = 18 \pm 0.5$  МэВ с шириной  $8 \pm 1$  МэВ и  $E_x^* = 22 \pm 1$  МэВ с шириной  $5 \pm 1$  МэВ. В работе [12] возбужденные состояния  ${}^6\text{Li}$  исследовались в реакции  ${}^3\text{He}({}^7\text{Li}, \alpha){}^6\text{Li}$  при  $E({}^7\text{Li}) = 31.2$  МэВ. Наблюдались состояния при 12.45, 15.31 и 17.29 МэВ. Последнее состояние обнаружено выше порога ( $t+{}^3\text{He}$ ) с шириной  $\sim 0.8$  МэВ.

Таким образом, видно, что данные об энергиях и структуре возбужденных уровней ядер  ${}^6\text{He}$  и  ${}^6\text{Li}$  достаточно противоречивы и требуют дальнейших исследований в различных реакциях и с применением различных методик.

### 1. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для изучения кластерной структуры высоковозбужденных состояний ядра  ${}^6\text{Li}$  на нейтронном канале РАДЭКС Института ядерных исследований РАН планируется исследовать реакцию  $n + {}^6\text{Li} \rightarrow n + {}^6\text{Li}^* \rightarrow n + {}^3\text{He} + t$  при энергии 30–50 МэВ. В эксперименте, наряду с рассеянными частицами (нейтронами), будут регистрироваться в совпадении продукты распада высоковозбужденных состояний (гелий-3). Хотя энергетический спектр пучка нейтронов, падающего на мишень, непрерывен и включает все энергии, вплоть до предельной, равной энергии пучка протонов ( $\sim 200$  МэВ), однако регистрация в совпадении этих частиц позволит восстановить энергию первичного

\* E-mail: [mvmordovsk@mail.ru](mailto:mvmordovsk@mail.ru)

нейтрона, вызвавшего реакцию, а также энергию и угол вылета тритона. Все зарегистрированные события могут быть отнесены к различным интервалам энергии первичного пучка, и накопление событий для интересующих нас энергий падающих нейтронов будет проходить одновременно.

Для исследования реакции  $n + {}^6\text{Li} \rightarrow n + {}^3\text{He} + t$  необходимы регистрация в совпадении вылетающих нейтронов и заряженных частиц, их идентификация и определение энергии. Кинематическое моделирование данной реакции проведено при помощи программы [13], в которой 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. В результате моделирования были определены возможные углы регистрации и диапазоны энергий заряженных частиц и нейтронов, наиболее соответствующие возможностям используемой аппаратуры, а также размерам экспериментального зала.

В работе [14] был описан прототип экспериментальной установки, проведены 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 на нейтронном пучке канала РАДЭКС. На основе этого прототипа была собрана экспериментальная установка, схема которой показана на рис. 1.

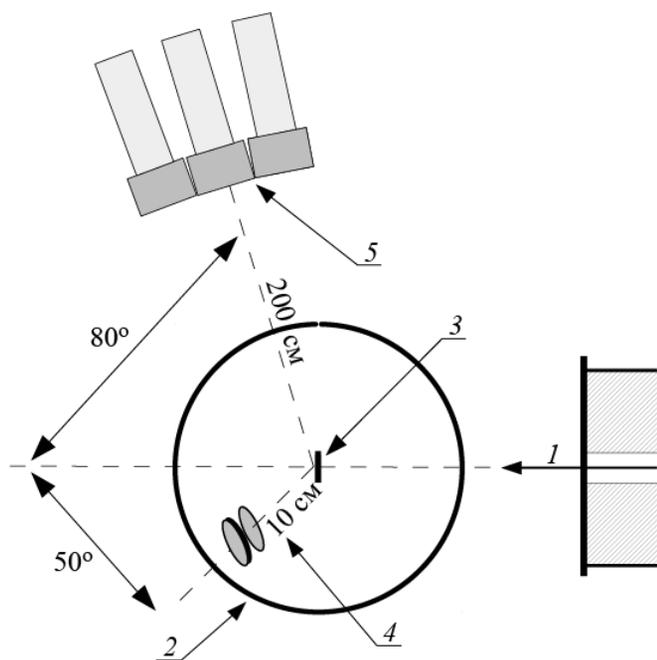


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования реакции  $n + {}^6\text{Li} \rightarrow n + {}^3\text{He} + t$ . Обозначения: 1 — пучок нейтронов канала РАДЭКС, 2 — большая вакуумная камера рассеяния, 3 — мишень  ${}^6\text{Li}_2\text{CO}_3$ , 4 — телескоп кремниевых  $\Delta E - E$  детекторов, 5 — годоскоп нейтронных сцинтилляционных детекторов

Идентификация заряженных частиц и измерение их энергии проводилась  $\Delta E - E$  телескопом кремниевых полупроводниковых детекторов с толщинами 25 и 150 мкм соответственно. Сигнал  $E$ -детектора служил стартовым для измерения времени пролета совпадающего нейтрона до одного из 3 сцинтилляционных детекторов ( $5 \times 5$  см) на основе жидкого сцинтиллятора EJ301. Углы установки детекторов и расстояния до мишени определялись из результатов моделирования с учетом параметров аппаратуры (эффективностей, временного и амплитудного разрешений). Расстояние до детекторов заряженных частиц обусловлено размерами камеры рассеяния и установки  $\Delta E - E$  телескопа как можно дальше от нейтронного пучка. Времяпролетная база до нейтронных детекторов также обусловлена ограничением в размерах экспериментального зала. Мишень  ${}^6\text{Li}_2\text{CO}_3$  толщиной в 20 мкм установлена в большой вакуумной камере рассеяния. Для оцифровки сигналов использовался цифровой сигнальный процессор DT5742 (CAEN S.p.A.) с шагом оцифровки по времени 0.2 нс. Из оцифрованных сигналов по времени пролета высчитывались энергии зарегистрированного нейтрона с учетом выделения нейтронов по форме импульса (PSD-метод), энергии заряженных частиц, выделенные в  $\Delta E$  и  $E$ -детекторах (по амплитудам сигналов) и длительности фронта и спада сигналов.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТ

На установке проведены измерения с целью оценки необходимого для получения достаточной статистики времени, оценки влияния гамма- и нейтронных потоков на стабильность работы кремниевых полупроводниковых детекторов, уровней фонов в интересующих нас энергетических диапазонах. Измерения проводились параллельно плановым экспериментам, на которые был настроен пучок нейтронов (частота 50 Гц, короткий импульс  $< 0.5$  мкс с большим пиковым током). Для наших измерений он был не оптимален. Тем не менее основная цель эксперимента была достигнута.

На рис. 2, а показаны двумерная диаграмма потерь энергии в  $\Delta E - E$  телескопе, полученная в результате моделирования для различных заряженных частиц, и экспериментальные данные, полученные при условии совпадения сигналов от телескопа и любого из нейтронных детекторов. Усиление на детекторах было подобрано таким образом, чтобы отчетливо наблюдать локусы двухзарядных частиц ( ${}^3\text{He}$  и  ${}^4\text{He}$ ).

В эксперименте использовались тестовые детекторы, поэтому появление локуса сквозного прохождения заряженных частиц, затрудняющего вычисление полной энергии частицы, связано с малой толщиной  $E$ -детектора. В дальнейшем предполагается увеличение его толщины до 1000 мкм.

Для разделения вкладов прямого и обратного локусов и построения энергетического спектра исследу-

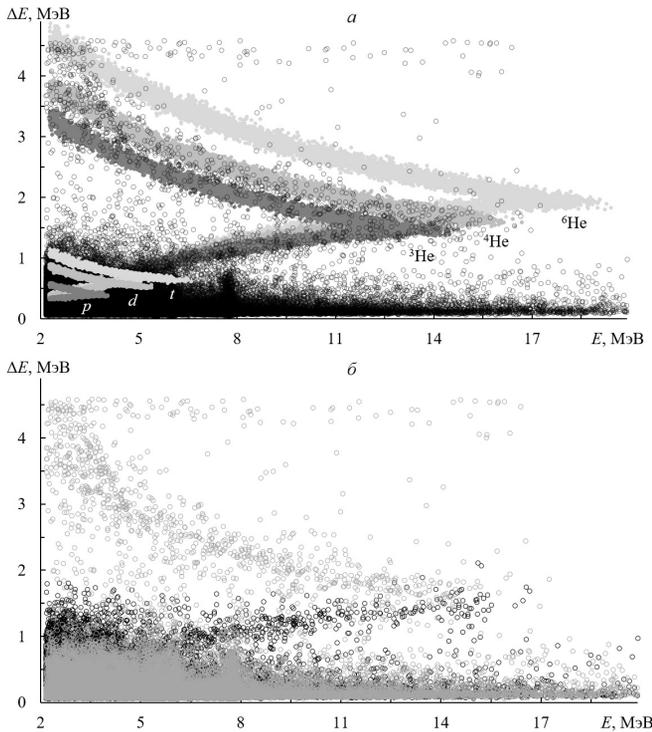


Рис. 2. Двумерная  $\Delta E - E$  диаграмма. Открытые круги — экспериментальные данные, закрытые круги — результаты моделирования с учетом возможных параметров детектирующей системы для однозарядных ( $p$ ,  $d$ ,  $t$ ) и двухзарядных ( ${}^3\text{He}$ ,  ${}^4\text{He}$ ,  ${}^6\text{He}$ ) частиц (а). Экспериментальные данные с разделением по методике [15] на локусы поглощения (серые открытые круги) и локусы обратного хода (черные открытые круги) (б)

двумых частиц применялся способ разделения по длительностям переднего и заднего фронтов сигналов [15]. На рис. 3 приведены спектры переднего и заднего фронтов сигналов, а на рис. 2, б после такого разделения экспериментальные точки обозначены как серые (для прямого хода локусов) и черные (для обратного хода локусов).

### 3. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Был проведен отбор событий, соответствующих регистрации  ${}^3\text{He}$  в совпадении с нейтронным сигналом. По энергиям и углам вылета  ${}^3\text{He}$  и  $n$  было проведено восстановление энергии первичных нейтронов, вызвавших реакцию  ${}^6\text{Li}(n, {}^3\text{He})t$ , а также определены энергия и угол вылета недетектируемой частицы ( $t$ ). При этом учитывались неопределенности, связанные с углами детектирования заряженных частиц и нейтронов, энергетическим разрешением детекторов заряженных частиц, временным разрешением сцинтилляционных детекторов и длиной времяпролетной базы.

В работе [16] было отмечено, что превышение энергии состояния ядра над порогом развала состояния на два кластера полностью определяется уг-

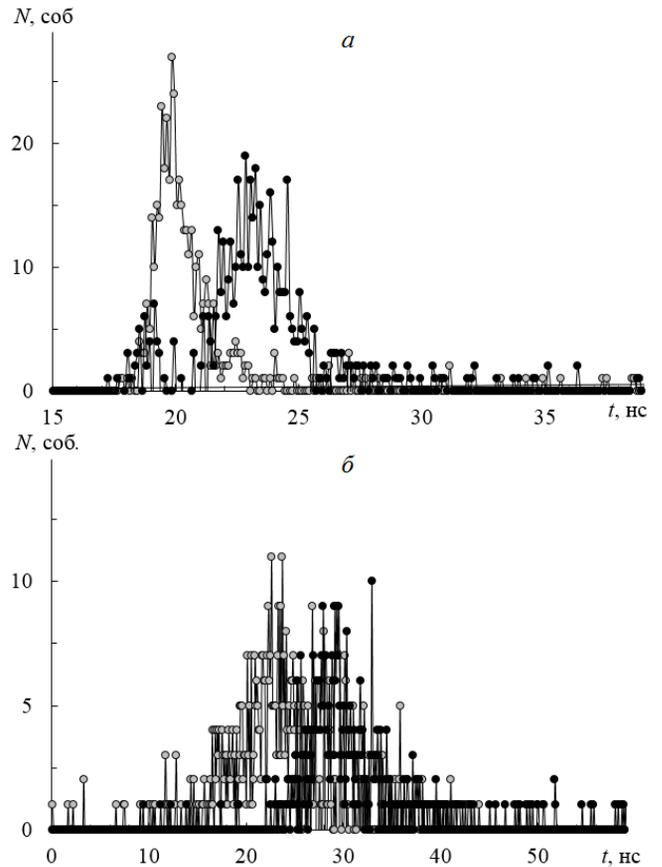


Рис. 3. Длительность фронта сигнала (а); длительность спада сигнала (б). Серые точки — события прямого хода локусов, черные точки — события обратного хода локусов.

лом их разлета и кинетическими энергиями в лабораторной системе. Регистрируя в совпадении частицы  ${}^3\text{He} + n$  и восстанавливая из кинематики параметры частицы  $t$ , мы получаем возможность напрямую изучать спектр возбуждений распадающегося состояния  ${}^6\text{Li}^*$ , фиксируя при этом его кластерные состояния через моду распада  ${}^3\text{He} + t$ .

Из экспериментальных событий были отобраны те, которые были вызваны первичными нейтронами с энергией  $45 \pm 5$  МэВ. По углам вылета и энергиям продуктов распада ( ${}^3\text{He}$  и  $t$ ) высоковозбужденных состояний  ${}^6\text{Li}$  была рассчитана энергия возбуждения  $E_x$  ядра  ${}^6\text{Li}$ , распадающегося по каналу  ${}^3\text{He} + t$ . На рис. 4 показана двумерная диаграмма  $E_x({}^6\text{Li}^*) - \Theta(t)$ . Черными точками показаны области экспериментальных событий, серыми точками — результат моделирования реакции  $n + {}^6\text{Li} \rightarrow n + {}^3\text{He} + t$  при следующих параметрах:  $E_0 = 45 \pm 5$  МэВ,  $\Theta(n) = -80^\circ \pm 1.5^\circ$ ,  $\Theta({}^3\text{He}) = 50^\circ \pm 2^\circ$  (знак минус означает вылет частицы по другую сторону от оси пучка).

На рис. 4 видно, что большая часть экспериментальных событий лежит в области энергии возбуждения ядра  $E_x({}^6\text{Li}^*) > 20$  МэВ. При достаточной статистике будет возможно получение спектра энергии возбуждения  ${}^6\text{Li}$ , а его анализ при одновремен-

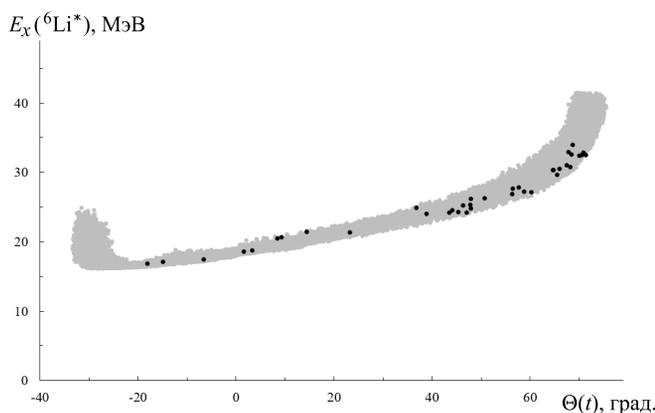


Рис. 4. Двумерная диаграмма  $E_x(^6\text{Li}^*) - \Theta(t)$  реакции  $n + ^6\text{Li} \rightarrow n + ^6\text{Li}^* \rightarrow n + ^3\text{He} + t$ . Параметры эксперимента:  $E_0 = 45 \pm 5$  МэВ,  $\Theta(n) = -80^\circ \pm 1.5^\circ$ ,  $\Theta(^3\text{He}) = 50^\circ \pm 2^\circ$ . Черные точки — экспериментальные события, серая область — моделированные события

ном определении продуктов распада позволит однозначно определить как энергии, так и структуру высоковозбужденных состояний ядер  $^6\text{Li}$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На нейтронном канале РАДЭКС Института ядерных исследований РАН проведен тестовый экспе-

римент по определению возможностей изучения кластерной структуры высоковозбужденных состояний ядра  $^6\text{Li}$  в реакции  $^6\text{Li}(n, ^3\text{He}, n)^3\text{H}$ . В эксперименте регистрировались рассеянные нейтроны в совпадении с продуктами распада высоковозбужденных состояний ( $^3\text{He}$ ). По энергиям и углам вылета  $^3\text{He}$  и  $n$  было проведено восстановление энергии первичных нейтронов, вызвавших реакцию, а также определены энергия и угол вылета недетектируемой частицы ( $t$ ). Отобраны события при энергии первичных нейтронов  $45 \pm 5$  МэВ, для которых рассчитана энергия возбуждения  $E_x$  ядра  $^6\text{Li}$ , распадающегося по каналу  $^3\text{He} + t$ . Данные получены с недостаточной статистикой, для того чтобы на данном этапе использовать их для определения энергии и структуры высоковозбужденных состояний ядра  $^6\text{Li}$ , однако эффективность предложенной методики измерения кажется весьма обоснованной. В дальнейших измерениях мы планируем увеличить толщину  $E$ -детектора до 1000 мкм и продолжить это исследование для набора статистически обеспеченных данных.

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 6 «Ядерная и радиационная физика».

- [1] Rose H.J., Jones G.A. // *Nature*. **307**, N 5948. 245. (1984).
- [2] Freer M., Angeliqne J.C., Axelsson L. et al. // *Phys. Rev. Lett.* **82**, N 7. 1383. (1999).
- [3] Zhukov M.V., Danilin B.V., Fedorov D.V. et al. // *Phys. Rep.* **231**, N 4. 151. (1993).
- [4] Oganessian Yu.Ts., Zagrebaev V.I., Vaagen J.S. // *Phys. Rev. C*. **60**, N 4. 044605. (1999).
- [5] Belovitsky G., Konobeevski E., Stepanov A. et al. // *Int. J. Mod. Phys. E*. **17**, N 10. 2331. (2008).
- [6] Nakayama S., Yamagata T., Akimune H. et al. // *Phys. Rev. Lett.* **87**, N 12. 122502. (2001).
- [7] Akimune H., Yamagata T., Nakayama S. et al. // *Phys. Rev. C*. **67**, N 5. 051302. (2003).
- [8] Yamagata T., Akimune H., Nakayama S. et al. // *Phys. Rev. C*. **71**, N 6. 064316. (2005).
- [9] Сакута С.Б., Новацкий Б.Г., Степанов Д.Н. и др. // *ЯФ*. **65**, № 10. 1819 (2002). (Sakuta S.B., Novatsky B.G., Stepanov D.N. et al. // *Phys. Atom. Nucl.* **65**, N 10. 1771. (2002)).
- [10] Povoroznyuk O., Gorpnich O.K., Jachmenjov O.O. et al // *J. Phys. Soc. Jpn.* **80**. Art. 094204. (2011).
- [11] Nakayama S., Yamagata T., Akimune H. et al. // *Phys. Rev. C*. **69**, N 4. 041304. (2004).
- [12] Kuramoto R., Lichtenthaler R., Lepine-Szily A. et al. // *Braz. J. Phys.* **34**, N 3A. 933. (2004).
- [13] Зуев С.В., Каспаров А.А., Конобеевский Е.С. // *Изв. РАН. Сер. физ.* **81**, № 6. 753 (2017). (Zuyev S.V., Kasparov A.A., Konobeevski E.S. // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* **81**, N 6. 679. (2017)).
- [14] Каспаров А.А., Мордовской М.В., Афонин А.А. и др. // *Изв. РАН. Сер. физ.* **86**, № 8. 1077 (2022). (Kasparov A.A., Mordovskoy M.V., Afonin A.A. et al. // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* **86**, N 8. 889. (2022)).
- [15] Мордовской М.В., Суркова И.В. // *Изв. РАН. Сер. физ.* **86**, № 4. 583 (2022). (Mordovskoy M.V., Surkova I.V. // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* **86**, N 4. 484. (2022)).
- [16] Robson D. // *Nucl. Phys. A*. **204**, N 3. 523. (1973).

## Test experiment on determining the cluster structure of highly excited states of $^6\text{Li}$

M.V. Mordovskoy<sup>a</sup>, A.A. Kasparov, A.A. Afonin, V.P. Zavarzina, A.S. Kurlovich, V.V. Mitcuk, I.V. Surkova

*Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences. Moscow, 117312 Russia*  
E-mail: <sup>a</sup>mvmordovsk@mail.ru

The paper presents the results of test measurements to determine the possibilities of studying the cluster structure of highly excited states of the  ${}^6\text{Li}$  nucleus in the  ${}^6\text{Li}(n, {}^3\text{He } n){}^3\text{H}$  reaction on the RADEX neutron channel of the Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences. In the experiment, scattered neutrons were detected in coincidence with the decay products of highly excited states (helium-3). The first experimental data on the excitation energy of the  ${}^6\text{Li}$  nucleus have been obtained.

PACS: 21.90.+f, 29.90.+r.

*Keywords:* cluster structure, light nuclei, quasimolecular states, excited states, three-body reactions, decay products, excitation energy, charged particle, neutron.

*Received 07 June 2023.*

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2023. 78, No. 4. Pp. 460-464.

#### Сведения об авторах

1. Мордовской Михаил Вадимович — канд. физ.-мат. наук, вед. научн. сотр.; тел.: (499) 135-40-28; e-mail: [mvmordovsk@mail.ru](mailto:mvmordovsk@mail.ru).
2. Каспаров Александр Александрович — канд. физ.-мат. наук, научн. сотр., заведующий Лабораторией атомного ядра; e-mail: [kasparov200191@gmail.com](mailto:kasparov200191@gmail.com).
3. Афонин Алексей Алексеевич — стажер-исследователь; e-mail: [afonin@inr.ru](mailto:afonin@inr.ru).
4. Заварзина Валентина Павловна — канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотр.; e-mail: [zavarzin@inr.ru](mailto:zavarzin@inr.ru).
5. Курлович Александра Сергеевна — стажер-исследователь; e-mail: [kurlovich-alex@yandex.ru](mailto:kurlovich-alex@yandex.ru).
6. Мицук Вячеслав Владимирович — стажер-исследователь; e-mail: [vyacheslav.mitsuk@phystech.edu](mailto:vyacheslav.mitsuk@phystech.edu).
7. Суркова Инна Владимировна — канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотр.; e-mail: [ivsurkova@list.ru](mailto:ivsurkova@list.ru).