

УДК 539.14

ВЫСОКОВОЗБУЖДЕННЫЕ СОСТОЯНИЯ НЕЙТРОННО-ИЗБЫТОЧНЫХ ИЗОТОПОВ ЛЕГКИХ ЯДЕР

© 2024 г. Ю. Б. Гуров^{1,2}, В. Г. Сандуковский², М. В. Телькушев², Б. А. Чернышев^{1,*}

¹ Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Россия, Москва

² Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований,
Дубна, Россия

*e-mail: chernyshev@mephi.ru

Поступила в редакцию 15.03.2024

После доработки 24.03.2024

Принята к публикации 29.04.2024

Образование высоковозбужденных состояний ($E_x > 8$ МэВ) нейтронно-избыточных изотопов гелия и лития исследовалось в реакциях поглощения остановившихся пионов ядрами ${}^9\text{Be}$, ${}^{10,11}\text{B}$ и ${}^{12,14}\text{C}$. Для большинства ядер результаты были получены сразу в нескольких каналах реакции. Обнаружены кандидаты на кластерные резонансы и изобар-аналоговые состояния.

Ключевые слова: поглощение остановившихся пионов, обогащенные нейтронами изотопы легких ядер, высоковозбужденные состояния

DOI: 10.31857/S0367676524080018, EDN: OSADNJ

ВВЕДЕНИЕ

Исследования экзотических ядерных состояний является одним из основных направлений развития фундаментальной ядерной физики [1, 2]. Особый интерес в этих исследованиях связан с изучением структуры легких нейтронно-избыточных ядер, находящихся вблизи границы нуклонной стабильности. Свойства этих ядерных состояний значительно отличаются от свойств ядер в долине стабильности. В частности, некоторые из этих ядер обладают аномально большими размерами, создаваемыми валентными нейтронами, образующими новый тип ядерной структуры — «нейтронное гало» [1]. Еще одной особенностью является изменение оболочечной структуры ядер при приближении к границе нуклонной стабильности — исчезновение традиционных магических чисел и возникновение новых [2]. Тяжелые изотопы гелия и лития, наряду со сверхтяжелыми изотопами водорода, характеризуются максимальным относительным превышением количества нейтронов над протонами. Для нуклонно-стабильных состояний всех ядер наибольший нейтронный избыток достигнут для ${}^8\text{He}$ ($N/Z = 3$).

Все возбужденные состояния тяжелых изотопов гелия, а также высоковозбужденные состояния изотопов лития являются нуклонно-нестабильными. Исследование их параметров (энергия связи, ширина, спин-четность), а также мод распада представляет

интерес с точки зрения поиска кластерных резонансов, а также изобар-аналоговых состояний.

Экспериментальная информация о высоковозбужденных состояниях изотопов гелия тяжелее ${}^6\text{He}$ и изотопов ${}^{10,11}\text{Li}$ весьма ограничена и противоречива [1–5]. Это обусловлено малым числом реакций, в которых могут образовываться такие состояния. При этом в реакциях на радиоактивных пучках ионов область доступных энергий возбуждений ограничена несколькими МэВ [1, 2]. В такой ситуации эффективным методом исследования высоковозбужденных состояний является поглощение остановившихся пионов легкими ядрами [6–7]. Этот метод позволяет получить данные с высокой статической обеспеченностью в широком диапазоне энергий возбуждения, вплоть до 40 МэВ. При этом информация о структуре уровней конкретного изотопа может быть получена сразу в нескольких каналах реакции поглощения. Например, изотоп ${}^7\text{He}$ образуются в следующих каналах реакции: $\pi^- {}^9\text{Be} \rightarrow d^7\text{He}$, $\pi^- {}^{10}\text{B} \rightarrow pd^7\text{He}$, $\pi^- {}^{11}\text{B} \rightarrow p^7\text{He}$, $\pi^- {}^{11}\text{B} \rightarrow dd^7\text{He}$, $\pi^- {}^{12}\text{C} \rightarrow p^4\text{He}^7\text{He}$, $\pi^- {}^{12}\text{C} \rightarrow d^3\text{He}^7\text{He}$ и $\pi^- {}^{14}\text{C} \rightarrow t^4\text{He}^7\text{He}$. Такое разнообразие реакций позволяет минимизировать систематические ошибки и улучшить достоверность полученных результатов.

В настоящей работе представлен обзор данных о высоковозбужденных ($E_x > 8$ МэВ) состояниях тяжелых изотопов гелия ${}^{6-9}\text{He}$ [7–10] и изотопов лития ${}^{6-11}\text{Li}$ [7, 11, 12], полученных нами в реакциях поглощения остановившихся пионов легкими ядрами.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Поиск ядерных состояний проводился в спектрах недостающих масс (*ММ*), полученных в инклюзивных и корреляционных измерениях заряженных частиц, образованных при поглощении остановившихся пионов ядрами ${}^9\text{Be}$, ${}^{10,11}\text{B}$, ${}^{12,14}\text{C}$.

Эксперимент был выполнен на пионном канале низких энергий ускорительного комплекса LANL с помощью двухплечевого многослойного полупроводникового спектрометра [13]. Заряженные частицы (*p*, *d*, *t*, ${}^3,4\text{He}$) регистрировались двумя телескопами, расположенными под углом 180° относительно друг друга. Полная толщина чувствительного слоя каждого телескопа ($\cong 43$ мм) превышала пробег всех заряженных частиц, образованных в реакции.

Энергетическое разрешение для однозарядных частиц (*p*, *d*, *t*) было лучше 0.5 МэВ, для двухзарядных (${}^3,4\text{He}$) не превышало 2 МэВ. В корреляционных измерениях для пар однозарядных частиц разрешение по недостающим массам $\Delta_{MM} \approx 1$ МэВ, для пар однозарядная и двухзарядная частицы — $\Delta_{MM} \approx 3$ МэВ. Точность привязки абсолютной шкалы в инклюзивных и корреляционных измерениях составила 100 кэВ при регистрации однозарядных частиц и 200 кэВ при регистрации двухзарядных частиц.

Более подробно спектрометр и экспериментальная методика описаны в работах [6, 13].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изотопы гелия

Высоковозбужденные уровни ${}^6\text{He}$ наблюдались нами в следующих каналах реакции: $\pi^{-11}\text{B} \rightarrow dt^6\text{He}$, $\pi^{-10}\text{B} \rightarrow pt^6\text{He}$ и $\pi^{-9}\text{Be} \rightarrow t({}^6\text{He} \rightarrow tt)$. Параметры наблюдаемых состояний представлены в табл. 1. Отметим, что в реакции $\pi^{-10}\text{B} \rightarrow dd^6\text{He}$ высоковозбужденные состояния не были обнаружены. В качестве иллюстрации предложенного метода поиска на рис. 1 представлены спектры недостающих масс, полученных в реакциях на изотопах бора [7].

В реакции $\pi^{-9}\text{Be} \rightarrow t({}^6\text{He} \rightarrow tt)$ удалось выделить канал с распадом ${}^6\text{He}$ на два тритона [8]. Спектр *ММ* построенный для событий реакции с тремя тритонами в конечном состоянии представлен на рис. 2. Таким образом в этих измерениях удалось выделить резонансы в системе двух тритонов.

Относительно узкие резонансы наблюдаемые в наших измерениях, указывает на то, что эти состояния могут являться кластерными резонансными состояниями. Как следует из правила Икеды [14], кластерные резонансы проявляются вблизи порогов распада ядер. В наших измерениях наблюдается несколько состояний лежащих выше порогов распада ${}^6\text{He} \rightarrow tt$ (12.3 МэВ), ${}^6\text{He} \rightarrow tdn$ (18.7 МэВ), ${}^6\text{He} \rightarrow tp2n$ (20.9 МэВ), ${}^6\text{He} \rightarrow dd2n$ (25.1 МэВ) и ${}^6\text{He} \rightarrow 2p4n$ (29.1 МэВ). Узкие резонансы наблюдались также

Таблица 1. Структура высоковозбужденных состояний изотопов ${}^{6-9}\text{He}$

${}^6\text{He}$		
E_x , МэВ	Γ , МэВ	Реакция
9.3(2)	1.0(4)	$\pi^{-11}\text{B} \rightarrow dt^6\text{He}, \pi^{-10}\text{B} \rightarrow pt^6\text{He}$
15.8(6)	1.1(6)	$\pi^{-9}\text{Be} \rightarrow t({}^6\text{He} \rightarrow tt)$
15.9(2)	3.2(7)	$\pi^{-11}\text{B} \rightarrow dt^6\text{He}$
20.9(3)	3.2(6)	$\pi^{-9}\text{Be} \rightarrow t({}^6\text{He} \rightarrow tt)$
22.1(1.0)	2.7(1.4)	$\pi^{-10}\text{B} \rightarrow pt^6\text{He}$
27.0(8)	2.5(1.1)	$\pi^{-10}\text{B} \rightarrow pt^6\text{He}$
31.1(1.0)	6.9(2.3)	$\pi^{-9}\text{Be} \rightarrow t({}^6\text{He} \rightarrow tt)$
${}^7\text{He}$		
E_x , МэВ	Γ , МэВ	Реакция
17 (1)	~ 1	$\pi^{-12}\text{C} \rightarrow p^4\text{He}^7\text{He}, \pi^{-11}\text{B} \rightarrow dd^7\text{He}$
21(1)	~ 2	$\pi^{-11}\text{B} \rightarrow dd^7\text{He}$
24.5(1.0)	~ 2	$\pi^{-11}\text{B} \rightarrow dd^7\text{He}$
${}^8\text{He}$		
E_x , МэВ	Γ , МэВ	Реакция
9.3(4)	1.7(3)	$\pi^{-11}\text{B} \rightarrow pd^8\text{He}$
11.5(4)	~ 1	$\pi^{-11}\text{B} \rightarrow pd^8\text{He}$
12.2(3)	0.8(3)	$\pi^{-10}\text{B} \rightarrow pp^8\text{He}$
${}^9\text{He}$		
E_x , МэВ	Γ , МэВ	Реакция
10.5(2)	1.5(5)	$\pi^{-11}\text{B} \rightarrow pp^9\text{He}$
≈ 12.5	≈ 1	$\pi^{-14}\text{C} \rightarrow p^4\text{He}^9\text{He}$

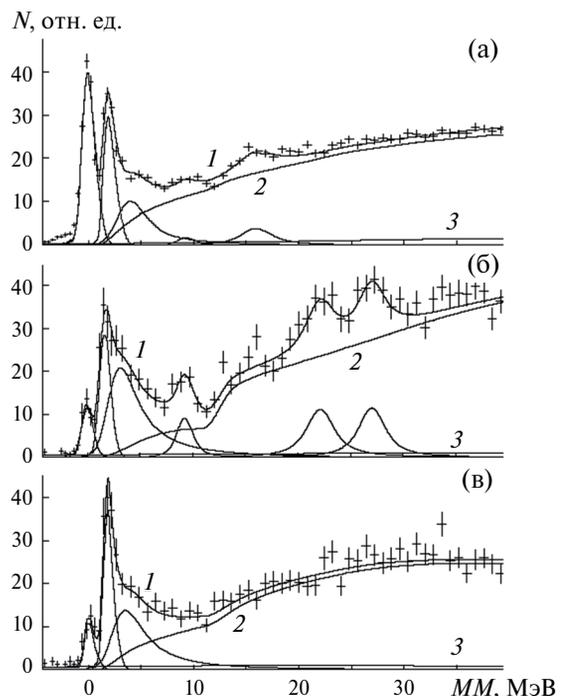


Рис. 1. Спектры *ММ* для реакций: а — $\pi^{-11}\text{B} dt^6\text{He}$; б — $\pi^{-10}\text{B} \rightarrow pt^6\text{He}$; в — $\pi^{-10}\text{B} \rightarrow dd^6\text{He}$. Точки с погрешностями — экспериментальные данные. Кривые представлены распределения Брейта—Вигнера; 1 — полное описание, 2 — суммарное распределение по фазовому объему, 3 — фон случайных совпадений.

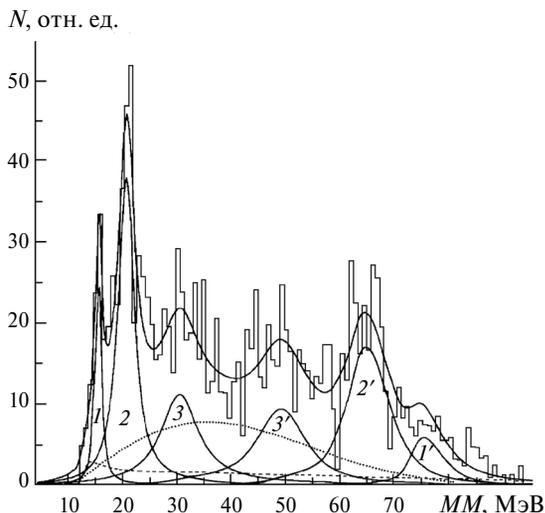


Рис. 2. Спектр MM , полученный из энергетического спектра тритонов из реакции $\pi^{-9}\text{Be} \rightarrow t(^6\text{He} \rightarrow tt)$. За начало отсчета принята масса основного состояния ^6He . Гистограмма — экспериментальные данные. Пунктирная линия — спектр, соответствующий квазисвободному поглощению пиона на внутриядерном кластере ^6Li . Сплошные линии — полное описание и распределения по Брейт—Вигнеру; 1, 2, 3 — вклады в спектр от тритонов, сопровождающих образование соответствующего состояния ^6He ; 1', 2', 3' — вклады в спектр от распадных тритонов для соответствующих состояний ^6He .

в двух ионных реакциях. В реакции $^3\text{H}(\alpha, t)^1\text{H}$ при энергии $E_\alpha = 67.2$ МэВ наблюдались два состояния со следующими резонансными параметрами (E_r, Γ): (16.1(4) МэВ, 0.8(4) МэВ) и (18.3(2) МэВ, 1.1(3) МэВ) [15]. Оба эти состояния представляют тритон-тринтонный резонанс, но приведенные резонансные параметры отличаются от наших данных. В работе [16] в реакции $^7\text{Li}(^3\text{He}, p^3\text{He})^6\text{He}$ при $E = 120$ МэВ наблюдались два узких резонанса лежащих выше порога распада ^6He на свободные нуклоны (32.0 МэВ, <2 МэВ) и (35.7 МэВ, <2 МэВ). Также в этой области нами наблюдается состояние с $E_x = 31.1(1.0)$, но значительно более широкое $\Gamma = 6.9(2.3)$ МэВ. Шестичастичный резонанс вряд ли может быть таким узким, поэтому следует предположить, что эти высоковозбужденные резонансы, по-видимому, связаны с образованием мультинейтронных кластеров 3n или 4n .

Высоковозбужденные уровни ^7He наблюдались нами в следующих каналах реакции: $\pi^{-12}\text{C} \rightarrow p^4\text{He}^7\text{He}$ и $\pi^{-11}\text{B} \rightarrow dd^7\text{He}$. Параметры этих состояний представлены в табл. 1. Отметим, что в каналах $p^{-9}\text{Be} \rightarrow dX$, $\pi^{-10}\text{B} \rightarrow pdX$, $\pi^{-11}\text{B} \rightarrow ptX$, $\pi^{-12}\text{C} \rightarrow p^4\text{HeX}$ и $\pi^{-12}\text{C} \rightarrow d^3\text{HeX}$ высоковозбужденные состояния ^7He не были обнаружены, что, по-видимому, свидетельствует о селективности исследованных реакций. Заметим, что высоковозбужденные состояния ^7He в реакции на изотопе ^{11}B наблюдаются в канале (dd) и отсутствуют

в канале (pt), в то время как для образования высоковозбужденных состояний ^6He на изотопе ^{10}B ситуация противоположна. Отметим, что в области возбуждений 15—25 МэВ наблюдаются некоторые корреляции в структуре уровней ^6He и ^7He . Для ^7He это указывает на возможность того, что эти возбужденные состояния являются резонансами в системе $t + ^4\text{H}$. Данные других экспериментальных работ о высоковозбужденных состояниях ^7He отсутствуют [3—5].

Высоковозбужденные уровни ^8He наблюдались нами в следующих каналах реакции: $\pi^{-10}\text{B} \rightarrow pp^8\text{He}$ и $\pi^{-11}\text{B} \rightarrow pd^8\text{He}$. Параметры наблюдаемых состояний представлены в табл. 1. Отметим, что в каналах $\pi^{-10}\text{B} \rightarrow dX$, $\pi^{-11}\text{B} \rightarrow tX$, $\pi^{-11}\text{B} \rightarrow ptX$, $\pi^{-14}\text{C} \rightarrow d^4\text{HeX}$ и $\pi^{-12}\text{C} \rightarrow t^3\text{HeX}$ высоковозбужденные состояния ^8He не наблюдались. Отсутствие таких состояний в инклюзивных измерениях может быть связано с большой величиной импульса ^7He (~ 500 МэВ/с), что приводит к подавлению образования слабосвязанных систем. Ошибки состояний с $E_x = 11.5(4)$ МэВ и $12.2(3)$ перекрываются, поэтому не исключено что в двух реакциях наблюдается одно и то же состояние. Заметим, что все состояния лежат ниже порога распада $^8\text{He} \rightarrow ^3\text{H} + ^3\text{H} + 2n$ (14.445 МэВ), поэтому их образование не может быть обусловлено возбуждением частичного кора. В других работах столь высокие возбуждения не наблюдались [3—5].

В структуре уровней ^9He высоковозбужденные состояния наблюдались нами в двух каналах реакции: $\pi^{-11}\text{B} \rightarrow pp^9\text{He}$ и $\pi^{-14}\text{C} \rightarrow p^4\text{He}^9\text{He}$. В канале $\pi^{-14}\text{C} \rightarrow d^3\text{HeX}$ высоковозбужденные состояния ^9He не были обнаружены, но следует отметить низкую статистическую обеспеченность данных в этих измерениях. Параметры наблюдаемых состояний представлены в табл. 1. Отметим, что как и для ^8He , возбужденные состояния ^9He , лежащие выше порога распада α -частицы отсутствуют. В других работах столь высокие возбуждения не наблюдались [3—5].

В реакции $\pi^{-14}\text{C} \rightarrow p^3\text{HeX}$ не было обнаружено указаний на существование высоковозбужденных состояний ^{10}He . Однако следует отметить низкую статистическую обеспеченность данных, полученных в измерениях этого канала реакции.

Изотопы лития

Интерес к высоковозбужденным состояниям изотопов лития обусловлен не только поиском кластерных резонансов, но и возможностью изучать изобар-аналоговые состояния тяжелых изотопов гелия.

В спектре недостающих масс реакции $\pi^{-12}\text{C} \rightarrow t^6\text{Li}$ наблюдалось два высоковозбужденных состояния с резонансными параметрами (E_x, Γ): (9.3(3) МэВ, 0.5(1) МэВ) и (18.1(2) МэВ, 3.0(5) МэВ). Первое из этих состояний возможно является изобар-аналогом ^6He с параметрами (5.3(3) МэВ, 2(1) МэВ) [4].

В инклюзивных измерениях реакции $p^{-10}\text{B} \rightarrow tX$ в спектре ${}^7\text{Li}$ найдено два высоковозбужденных состояния $E_x = 11.2(1)$ МэВ и $13.5(3)$ МэВ, которые совпадают с положением изобар-аналогов основного и первого возбужденного состояний ${}^7\text{He}$. В пределах погрешностей измерения эти энергии возбуждения совпадают с данными компиляции [4] и работы [17]. В корреляционных измерениях реакции $\pi^{-12}\text{C} \rightarrow dtX$ был обнаружен только один высоковозбужденный уровень с $E_x = 10.3(1)$ МэВ. Близкое значение энергии возбуждения (10.25 МэВ) наблюдалось в работе [18].

Высоковозбужденные уровни ${}^8\text{Li}$ наблюдались нами в следующих каналах реакции: $\pi^{-12}\text{C} \rightarrow dd^8\text{Li}$ и $\pi^{-12}\text{C} \rightarrow pt^8\text{Li}$. Параметры этих состояний представлены в табл. 2. Отметим, что в инклюзивных измерениях реакций $\pi^{-10}\text{B} \rightarrow dX$ и ${}^{-11}\text{B} \rightarrow tX$ высоковозбужденные состояния ${}^8\text{Li}$ не были обнаружены. Значения энергий возбуждения с $E_x \leq 10$ МэВ в пределах погрешностей измерений совпадают с данными мировой компиляции [3–5]. Более высокие возбуждения были найдены только в наших измерениях.

В силу изотопической инвариантности, все состояния, наблюдаемые в реакции $p^{12}\text{C} \rightarrow dd^8\text{Li}$, имеют изоспин $T = 1$, и поэтому не могут быть изобар-аналоговыми состояниями изотопа гелия ${}^8\text{He}$. В реакции $\pi^{-12}\text{C} \rightarrow pt^8\text{Li}$ допустимы два значения изоспина $T = 1$ и 2 , однако мы не наблюдали изобар-аналога ${}^8\text{He}$ с $E_x = 10.8$ МэВ [5]. Следует отметить, что состояния с $E_x = 11.2(2)$ МэВ и $13.5(1)$ МэВ лежат вблизи порогов распада ${}^8\text{Li}^* \rightarrow {}^4\text{He} + d + 2n$ (10.8 МэВ) и ${}^8\text{Li}^* \rightarrow {}^4\text{He} + p + 3n$ (13.0 МэВ). Это может служить указанием на то, что наблюдаемые состояния являются многочастичными кластерными резонансами.

Высоковозбужденные уровни ${}^9\text{Li}$ наблюдались нами в следующих каналах реакции: $\pi^{-11}\text{B} \rightarrow d^9\text{Li}$ и $\pi^{-12}\text{C} \rightarrow pd^9\text{Li}$. Параметры этих состояний представлены в табл. 2. В реакции $\pi^{-14}\text{C} \rightarrow dtX$ высоковозбужденные состояния не наблюдались. Отметим,

что состояние с $E_x = 9.1(2)$ МэВ лежит вблизи порога распада ${}^9\text{Li}^* \rightarrow {}^6\text{He} + t$ (7.59 МэВ), и поэтому может представлять собой кластерный резонанс. В наших измерениях не найдено указаний на существовании возбужденных состояний в диапазоне $16 \text{ МэВ} < E_x < 19 \text{ МэВ}$, наблюдаемых в работе [19].

Теоретическое рассмотрение кластерных резонансов в системе ${}^6\text{He} + t$ было выполнено в работе [20]. В области $8.6 \text{ МэВ} < E_x < 11.6 \text{ МэВ}$ предсказано существование четырех уровней со спин-четностями $J^P = 1/2^-, 3/2^-, 5/2^-$, и $7/2^-$ (к сожалению, значения энергий возбуждения были представлены только в графическом виде). Можно предположить, что обнаруженное состояние (9.1 МэВ) имеет $J^P = 1/2^-$ или $3/2^-$, а состояние (10.5 МэВ) имеет $J^P = 5/2^-$ или $7/2^-$.

Высоковозбужденные уровни ${}^{10}\text{Li}$ наблюдались нами в следующих каналах реакции: $\pi^{-11}\text{B} \rightarrow p^{10}\text{Li}$ и $\pi^{-12}\text{C} \rightarrow pp^{10}\text{Li}$. Параметры наблюдаемых состояний представлены в табл. 2. В реакциях $\pi^{-14}\text{C} \rightarrow ptX$ и $\pi^{-14}\text{C} \rightarrow ddX$ указаний на обнаружение высоковозбужденных состояний ${}^{10}\text{Li}$ не было найдено.

Порог распада ${}^{10}\text{Li}^* \rightarrow {}^6\text{He} + t + n$, равный 7.6 МэВ, лежит ниже наблюдаемых уровней в наших измерениях. В такой ситуации можно предположить, что эти состояния представляют собой резонансы в системах ${}^7\text{He} + t$ или ${}^6\text{He} + {}^4\text{He}$.

Высоковозбужденные состояния ${}^{11}\text{Li}$ и ${}^{12}\text{Li}$ в измерениях каналов $\pi^{-14}\text{C} \rightarrow pdX$ и $\pi^{-14}\text{C} \rightarrow ppX$, соответственно, не были обнаружены. Возможно, это связано с низкой статической обеспеченностью полученных данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Образование высоковозбужденных состояний ($E_x > 8$ МэВ) нейтронно-избыточных изотопов гелия и лития исследовалось в реакциях поглощения остановившихся пионов ядрами ${}^9\text{Be}$, ${}^{10,11}\text{B}$ и ${}^{12,14}\text{C}$. Для большинства ядер в этих измерениях получены рекордные, по сравнению с мировыми данными, энергии возбуждения. Несколько из наблюдаемых состояний изотопов лития идентифицированы, как изобар-аналоговые состояния изотопов гелия. В спектрах изотопов гелия и лития найдены кандидаты на кластерные резонансы.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект FSWU-2023-0073).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tanihata I., Savajols H., Kanungo R. // Progr. Part. Nucl. Phys. 2013. V. 68. P. 215.
2. Ленионжкевич Ю.Э., Калтакчиева Р.Г. Легкие ядра у границы нейтронной стабильности. Дубна: ОИЯИ, 2016. 393 с.

Таблица 2. Структура высоковозбужденных состояний изотопов ${}^{8-10}\text{Li}$

${}^8\text{Li}$		
E_x , МэВ	Γ , МэВ	Реакция
9.0(1)	1.5(1)	$\pi^{-12}\text{C} \rightarrow dd^8\text{Li}$
9.4(2)	0.5(1)	$\pi^{-12}\text{C} \rightarrow pt^8\text{Li}$
11.2(2)	0.4(2)	$\pi^{-12}\text{C} \rightarrow dd^8\text{Li}$
13.5(1)	1.5(1)	$\pi^{-12}\text{C} \rightarrow dd^8\text{Li}$
17.5(3)	0.8(3)	$\pi^{-12}\text{C} \rightarrow dd^8\text{Li}$
${}^9\text{Li}$		
E_x , МэВ	Γ , МэВ	Реакция
9.1(2)	0.5(1)	$\pi^{-11}\text{B} \rightarrow d^9\text{Li}$
≈ 10.5	≈ 0.6	$\pi^{-12}\text{C} \rightarrow pd^9\text{Li}$
${}^{10}\text{Li}$		
E_x , МэВ	Γ , МэВ	Реакция
7.8(2)	≈ 0.5	$\pi^{-11}\text{B} \rightarrow p^{10}\text{Li}, \pi^{-12}\text{C} \rightarrow pp^{10}\text{Li}$
$\approx 10.1(1)$	≈ 2	$\pi^{-11}\text{B} \rightarrow p^{10}\text{Li}$

3. *Tilley D.R., Cheves C.M., Godwin J.L. et al. // Nucl. Phys. A. 2002. V. 708. P. 86.*
4. *Tilley D.R., Kelley J.H., Godwin J.L. et al. // Nucl. Phys. A. 2004. V. 745. P. 155.*
5. *Гуров Ю.Б., Лапушкин С.В., Чернышев Б.А. и др. // ЭЧАЯ. 2009. Т. 40. С. 1063; Gurov Yu.B., Lapushkin S.V., Chernyshev B.A. et al. // Phys. Part. Nucl. 2009. V. 40. P. 558.*
6. *Гуров Ю.Б., Короткова Л.Ю., Лапушкин С.В. и др. // Ядерн. физика. 2016. Т. 79. № 4. С. 338; Gurov Yu.B., Korotkova L.Yu., Lapushkin S.V. et al. // Phys. Atom. Nucl. 2016. V. 79. No. 4. P. 525.*
7. *Гуров Ю.Б., Карпукhin В.С., Лапушкин С.В. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2006. Т. 84. № 1. С. 3; Gurov Yu.B., Karpukhin V.S., Lapushkin S.V. et al. // JETP Lett. 2006. V. 84. No. 1. P. 1.*
8. *Гуров Ю.Б., Лапушкин С.В., Леонова Т.И. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 4. С. 503; Gurov Yu.B., Lapushkin S.V., Leonova T.I. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83. No. 4. P. 479.*
9. *Chernyshev B.A., Gurov B.A., Leonova T.I. et al. // Phys. Atom. Nucl. 2023. V. 86. No. 4. P. 454.*
10. *Chernyshev B.A., Gurov B.A., Karpukhin V.S. et al. // Eur. Phys. J. A. 2013. V. 49. P. 68.*
11. *Chernyshev B.A., Gurov B.A., Karpukhin V.S. et al. // Eur. Phys. J. A. 2014. V. 50. P. 150.*
12. *Gornov M.G., Gurov Yu.B., Lapushkin S.V. et al. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 2000. V. 446. P. 461.*
13. *Ikeda K., Tagikawa N., Horiuchi H. // Progr. Theor. Phys. Suppl. 1968. V. E86. P. 464.*
14. *Povoroznyk O.M., Gorpinich O.K., Jachmenjov O.O. et al. // Phys. Rev. C. 2012. V. 85. Art. No. 064330.*
15. *Franke R., Kochskamper K., Steinheuer B. et al. // Nucl. Phys. A. 1985. V. 433. No. 3. P. 351.*
16. *Siddiqui S.A., Dytlewski N., Thies H.H. // Nucl. Phys. A. 1986. V. 458. P. 387.*
17. *Bassalleck B., Klotz W.-D., Takeuchi F. et al. // Phys. Rev. C. 1977. V. 16. P. 1526.*
18. *Rogachev G.V., Goldberg V.Z., Kolata J.J. et al. // Phys. Rev. C. 2003. V. 67. Art. No. 041603R.*
19. *Kanada-En'yo Y., Suhara T. // Phys. Rev. C. 2012. V. 85. Art. No. 024303.*

High-excited states of neutron-rich isotopes of light nuclei

Yu. B. Gurov^{1,2}, V. G. Sandukovsky², M. V. Tel'kushev¹, B. A. Chernyshev^{1, *}

¹*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

²*Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, 141980, Russia*

*e-mail: chernyshev@mephi.ru

The formation of high-excited states ($Ex > 8$ MeV) of neutron-rich isotopes of helium and lithium was studied in the absorption reactions of stopped pions by nuclei ^9Be , $^{10,11}\text{B}$ and $^{12,14}\text{C}$. For most nuclei, the results were obtained in several reaction channels at once. Candidates for cluster resonances and isobar-analog states have been observed.

Keywords: stopped pion absorption, neutron-rich isotopes of light nuclei, high-excited states