

Обнаружение новых состояний изотопа гелия ${}^7\text{He}$

Ю. Б. Гуров, Л. Ю. Короткова, С. В. Лапушкин, Р. В. Притула, В. Г. Сандуковский, М. В. Телькушев,
Б. А. Чернышев¹⁾

Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, 115409 Москва, Россия

Поступила в редакцию 13 октября 2014 г.

После переработки 28 ноября 2014 г.

Образование тяжелого изотопа ${}^7\text{He}$ исследовалось в реакциях поглощения остановившихся π^- -мезонов ${}^{11}\text{B}(\pi^-, \text{pt}){}^7\text{He}$, ${}^{11}\text{B}(\pi^-, \text{dd}){}^7\text{He}$ и ${}^{10}\text{B}(\pi^-, \text{pd}){}^7\text{He}$. Во всех трех реакциях не было получено указаний на существование низколежащего уровня с $E_x \sim 1$ МэВ. В области промежуточных энергий возбуждения доказано существование трех узких состояний с энергиями возбуждения $E_x = 3.1(1)$, $4.90(15)$ и $6.65(15)$ МэВ. Обнаружены высоковозбужденные состояния с $E_x = 16.9(5)$ МэВ, $\Gamma = 1.0(3)$ МэВ, $E_x = 19.8(3)$ МэВ, $\Gamma = 1.5(3)$ МэВ и $E_x = 24.8(4)$ МэВ, $\Gamma = 4.6(7)$ МэВ.

DOI: 10.7868/S0370274X15020010

1. Введение. Исследование нейтронно-избыточных изотопов гелия является областью повышенной экспериментальной активности [1]. Определение характеристик этих экзотических состояний обеспечивает информацию о свойствах ядерной материи при аномально высоком отношении N/Z и дает возможность тестировать ядерные модели и нуклон-нуклонные потенциалы.

Основное состояние ${}^7\text{He}$ ($J^\pi = 3/2^-$) является несвязанным относительно распада на ${}^6\text{He}$ и нейтрон и согласно компиляции [2] имеет следующие резонансные параметры: $E_r = 0.410(8)$ МэВ, $\Gamma = 0.15(2)$ МэВ. Заметим, что результаты последних экспериментальных работ [3–5] указывают на меньшую величину резонансной энергии, $E_r = (0.35–0.40)$ МэВ).

Существование возбужденных состояний в ${}^7\text{He}$ впервые было обнаружено в работе [6]. В реакции $\text{p}({}^8\text{He}, \text{d}){}^7\text{He}$ при энергии пучка 50 МэВ наблюдался уровень с энергией возбуждения $E_x = 2.9(3)$ МэВ и шириной $\Gamma = 2.2(3)$ МэВ, распадающийся на ${}^4\text{He}$ и три нейтрона. Авторы интерпретировали наблюдаемый уровень как состояние с $J^\pi = 5/2^-$, представляющее собой систему из ${}^6\text{He}$, находящегося в первом возбужденном состоянии ($J^\pi = 2^+$), и нейтрона из $1p_{1/2}$ -оболочки. В реакции ${}^7\text{Be}({}^{15}\text{N}, {}^{17}\text{F}){}^7\text{He}$ при энергиях пучка 240 и 318.5 МэВ были найдены два состояния с $E_x = 2.95(10)$ МэВ, $\Gamma = 1.9(3)$ МэВ и $E_x = 5.8(3)$ МэВ, $\Gamma = 4(1)$ МэВ [7]. В работах [8, 9] поиск ${}^7\text{He}$ проводился в двухчастичных каналах реакции с регистрацией продуктов распада. В

реакции $\text{d}({}^6\text{He}, \text{p}){}^7\text{He}$ при энергии пучка 69 МэВ преимущественно заселяются основное и $1/2^-$ -состояние с $E_x \approx 2.6$ МэВ, $\Gamma \approx 2.0$ МэВ, распадающиеся на ${}^6\text{He} + \text{n}$ [8]. В реакции $\text{d}({}^8\text{Li}, {}^3\text{He}){}^7\text{He}$ при энергии пучка 76 МэВ наблюдаются основное состояние и $5/2^-$ -состояние с $E_x \approx 3.0$ МэВ, которое распадается на ${}^4\text{He} + 3\text{n}$ [9].

Открытым является вопрос о существовании уровня ${}^7\text{He}$ при $E_x \approx 1$ МэВ. В реакции выбивания ${}^{12}\text{C}({}^8\text{He}, \text{n}{}^6\text{He})\text{X}$ при энергии 227А МэВ было обнаружено, что пик вблизи нуля в спектре относительной энергии $\text{n} + {}^6\text{He}$ не удается описать с помощью одного основного состояния ${}^7\text{He}$ [10]. Авторы интерпретировали этот результат как проявление первого возбужденного состояния ${}^7\text{He}$ с $E_x = 0.6(1)$ МэВ, $\Gamma = 0.75(8)$ МэВ. Однако в выполненных авторами работы [10] аналогичных измерениях на водородной мишени реакции ${}^1\text{H}({}^8\text{He}, \text{n}{}^6\text{He})\text{X}$ низколежащий возбужденный уровень ${}^7\text{He}$ обнаружен не был [3].

Указания на существование низколежащего состояния ${}^7\text{He}$ были получены также в реакциях $\text{p}({}^8\text{He}, \text{d})\text{X}$ при $E = 15.7$ МэВ ($E_x = 0.9(5)$ МэВ, $\Gamma = 1.0(9)$ МэВ) [11] и ${}^7\text{Li}(\text{d}, {}^2\text{He})\text{X}$ при $E = 171$ МэВ ($E_x \approx 1.45$ МэВ, $\Gamma \approx 2$ МэВ) [12]. Однако результаты этих работ допускают неоднозначную интерпретацию [1].

В области высоких энергий возбуждений широкие ($\Gamma \sim 10$ МэВ) резонансные состояния ${}^7\text{He}$ были обнаружены только вблизи $E_x \sim 20$ МэВ [13–15].

Таким образом, экспериментальная информация по структуре уровней ${}^7\text{He}$ является разрозненной и достаточно противоречивой. Для разрешения этой ситуации мы использовали реакцию поглощения

¹⁾e-mail: chernyshev@mephi.ru

остановившихся пионов ядрами, которая является эффективным инструментом исследования легких нейтронно-избыточных ядерных состояний [16–18]. В настоящей работе спектр возбуждения ${}^7\text{He}$ изучается в реакциях на изотопах бора: ${}^{10}\text{B}(\pi^-, \text{pd})\text{X}$, ${}^{11}\text{B}(\pi^-, \text{pt})\text{X}$ и ${}^{11}\text{B}(\pi^-, \text{dd})\text{X}$.

2. Эксперимент. Эксперимент был выполнен на канале пионов низкой энергии (LEP) мезонной фабрики LAMPF с помощью двухплечевого полупроводникового спектрометра [19]. Пучок отрицательных пионов с энергией 30 МэВ проходил через бериллиевый замедлитель и останавливался в тонкой мишени. Скорость остановок пионов в мишени составила $\sim 6 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$. Мишени из ${}^{10}\text{B}$ и ${}^{11}\text{B}$ представляли собой диски диаметром 26 мм и толщиной $\sim 25 \text{ мг/см}^2$. Отметим, что в этом же экспериментальном сеансе были выполнены измерения на мишенях ${}^9\text{Be}$, ${}^{12}\text{C}$ и ${}^{14}\text{C}$.

Заряженные частицы (p, d, t, ${}^{3,4}\text{He}$), образующиеся при поглощении остановившихся пионов ядрами мишени, регистрировались двумя полупроводниковыми телескопами, расположенными под углом 180° друг к другу. Каждый телескоп состоял из двух Si(Au)-пзд с толщинами 100 и 450 мкм и 14 Si(Li)-пзд с толщинами $\sim 3 \text{ мм}$. Пороги идентификации составляли 3.5 МэВ для протонов, 4 МэВ для дейтронов, 4.5 МэВ для тритонов.

Суммарная толщина чувствительных слоев каждого телескопа составляла $\cong 43 \text{ мм}$. Эта величина обеспечивала остановку всех образующихся заряженных частиц внутри чувствительного объема телескопов. В результате высокое энергетическое разрешение достигалось во всем диапазоне измерений энергий регистрируемых частиц.

Величина энергетического разрешения ΔE определялась по ширине пиков, измеренных в двухчастичных каналах реакции поглощения, ${}^9\text{Be}(\pi^-, \text{p}){}^8\text{He}$, ${}^{12}\text{C}(\pi^-, \text{d}){}^{10}\text{Be}$ и ${}^{12}\text{C}(\pi^-, \text{t}){}^9\text{Be}$. Для однозарядных частиц $\Delta E \approx 0.450 \text{ МэВ}$ [16].

Поиск образования ${}^7\text{He}$ проводился в спектрах недостающих масс (MM), полученных в корреляционных измерениях реакций ${}^{11}\text{B}(\pi^-, \text{pt})\text{X}$, ${}^{11}\text{B}(\pi^-, \text{dd})\text{X}$ и ${}^{10}\text{B}(\pi^-, \text{pd})\text{X}$. Величина разрешения по MM (ΔMM) определяется тремя факторами: неопределенностями в измерении энергии каждой частицы и неопределенностями в угле разлета частиц, обусловленными конечным угловым захватом телескопов. Анализ результатов измерений трехчастичных каналов с образованием нуклонно-стабильных ядер в конечном состоянии показал, что при регистрации пар однозарядных частиц ΔMM слабо зависит от конкретного канала реакции и

составляет $\approx 1 \text{ МэВ}$ [16]. Ошибка в абсолютной привязке шкалы не превышает 0.1 МэВ [16].

Количественное определение примесей в мишенях выполнялось с помощью выделения пиков, соответствующих трехчастичным реакциям на ядрах примеси. Для мишени ${}^{11}\text{B}$ основной примесью является ${}^{12}\text{C}$ (8%), для мишени ${}^{10}\text{B}$ – ${}^{11}\text{B}$ (15%). Вклад неконтролируемых примесей был меньше 1%.

Более подробно спектрометр и экспериментальная методика описаны в работах [16, 19].

3. Результаты. На рис. 1 представлены спектры MM , измеренные в реакциях ${}^{11}\text{B}(\pi^-, \text{pt})\text{X}$,

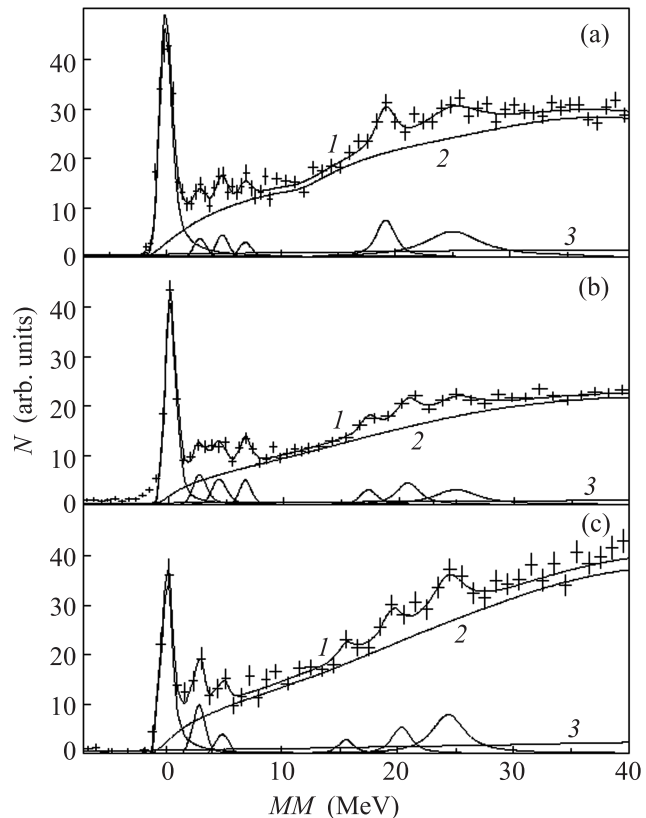


Рис. 1. Спектры MM для реакций ${}^{11}\text{B}(\pi^-, \text{pt})\text{X}$ (a), ${}^{11}\text{B}(\pi^-, \text{dd})\text{X}$ (b) и ${}^{10}\text{B}(\pi^-, \text{pd})\text{X}$ (c). Точки с ошибками – эксперимент. Сплошные тонкие линии – распределения по Брейт–Вигнеру; 1 – полное описание; 2 – суммарное распределение по фазовому объему; 3 – фон случайных совпадений

${}^{11}\text{B}(\pi^-, \text{dd})\text{X}$ и ${}^{10}\text{B}(\pi^-, \text{pd})\text{X}$, после вычитания вклада от основных примесей. За начало отсчета принята сумма масс основного состояния ${}^6\text{He}$ и нейтрона. В спектрах отчетливо проявляются структуры, обусловленные трехчастичными каналами с образованием основного и возбужденных состояний ${}^7\text{He}$. Для выделения этих состояний и определения их пара-

метров был использован метод наименьших квадратов при описании экспериментальных спектров суммой n -частичных распределений по фазовому объему ($n \geq 4$) и брейт-вигнеровских распределений.

Описание многочастичного фона с помощью суперпозиции распределений по фазовым объемам вызвано отсутствием надежных теоретических моделей, описывающих исследуемые реакции. Обоснованность такого подхода доказана результатами определения структуры уровней сверхтяжелых изотопов ${}^4\text{-}^6\text{H}$ [16] и ${}^7\text{-}^{12}\text{Li}$ [17, 18]. На рис. 2 в качестве иллюстрации

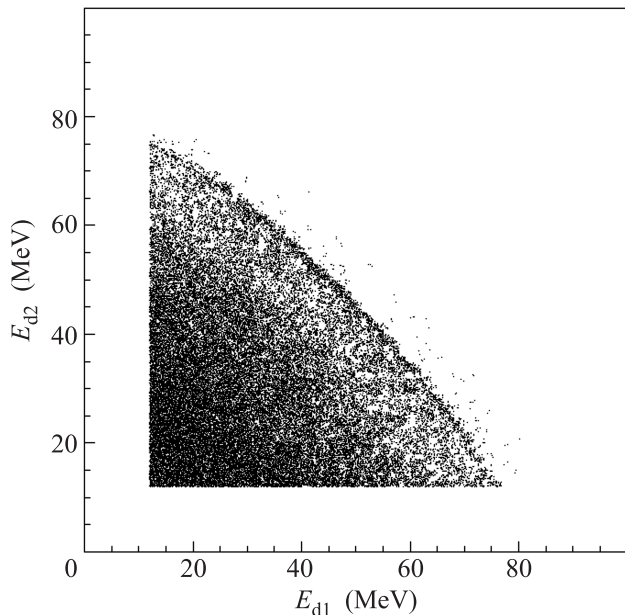


Рис. 2. Двухмерное распределение (диаграмма Далица) кинетических энергий дейтронов, образующихся в реакции ${}^{11}\text{B}(\pi^-, \text{dd})\text{X}$

представлено двухмерное распределение (диаграмма Далица) кинетических энергий дейтронов, образующихся в реакции ${}^{11}\text{B}(\pi^-, \text{dd})\text{X}$. Заметной структурной особенностью здесь является усиление вблизи кинематической границы реакции, соответствующей трехчастичному каналу реакции с образованием ${}^7\text{He}$ в основном состоянии. Проявлений каких-либо особенностей, обусловленных многочастичными процессами, заметно отличающихся от распределений по фазовому объему, на рис. 2 не обнаружено.

Канал реакции ${}^{11}\text{B}(\pi^-, \text{pt})\text{X}$ имеет самую высокую статистическую обеспеченность. С целью подавления фона от многочастичных каналов реакции представленный на рис. 1а спектр был получен для энергий тритона, превышающих 26 МэВ. В области низких энергий возбуждения ($E_x < 7$ МэВ) в

спектре выделяются три узких возбужденных состояния с энергиями возбуждения $E_x = 3.3(2)$, $5.0(2)$ и $7.0(3)$ МэВ. Энергетическое разрешение измерений позволяет определить только верхнюю границу для ширин найденных уровней, которая составляет 0.5 МэВ. В области высоких энергий возбуждения отчетливо проявляются два состояния со следующими параметрами: $(E_x, \Gamma) = (19.3(4)$ МэВ, $1.6(5)$ МэВ) и $(25.4(8)$ МэВ, $5.2(1.2)$ МэВ).

В реакции ${}^{11}\text{B}(\pi^-, \text{dd})\text{X}$ для описания структуры в области $MM \approx 4$ МэВ (рис. 1b) использовались две гипотезы: одного и двух состояний ${}^7\text{He}$. В первом случае значения резонансных параметров $E_x \approx 3.1$ МэВ, $\Gamma \approx 2.0$ МэВ. Во втором случае $(E_x, \Gamma) = (2.9(2)$ МэВ, ≤ 0.5 МэВ) и $(4.6(3)$ МэВ, ≤ 0.5 МэВ). Критерий χ^2 не позволяет отбросить ни одну из гипотез. Выбор предположения о двух состояниях был обусловлен тем, что параметры двух возбужденных уровней, найденные в реакциях ${}^{11}\text{B}(\pi^-, \text{pt}){}^7\text{He}$ и ${}^{11}\text{B}(\pi^-, \text{dd}){}^7\text{He}$, в пределах погрешности измерений совпадают. Параметры третьего возбужденного уровня, наблюдаемого в реакции ${}^{11}\text{B}(\pi^-, \text{dd}){}^7\text{He}$, $(E_x, \Gamma) = (6.6(2)$ МэВ, ≤ 0.5 МэВ), также совпадают с результатами измерений реакции ${}^{11}\text{B}(\pi^-, \text{pt}){}^7\text{He}$.

Для описания спектра в области высоких энергий возбуждений были включены три состояния со следующими значениями резонансных параметров: $(E_x, \Gamma) = (17.2(6)$ МэВ, $1.0(4)$ МэВ), $(20.7(7)$ МэВ, $1.8(7)$ МэВ) и $(25(1)$ МэВ, $4.2(1.5)$ МэВ). Параметры двух последних уровней в пределах погрешности совпадают с результатами, полученными в реакции ${}^{11}\text{B}(\pi^-, \text{pt}){}^7\text{He}$.

Спектр MM , измеренный в реакции ${}^{10}\text{B}(\pi^-, \text{pd})\text{X}$ (рис. 1с), имеет наименьшую статистическую обеспеченность. Для описания спектра MM в области промежуточных энергий возбуждений были введены два узких ($\Gamma \leq 0.5$ МэВ) состояния с $E_x = 2.9(3)$ и $4.9(3)$ МэВ. Эти результаты хорошо согласуются с данными, полученными в двух других каналах реакции. Указаний на уровень при $E_x \sim 7$ МэВ в этом канале не обнаружено, что может быть обусловлено недостаточной статистической обеспеченностью данных.

При более высоких энергиях возбуждения проявляются структуры, которые описывались с введением трех состояний ${}^7\text{He}$ с параметрами $(E_x, \Gamma) = (16(1)$ МэВ, $1.0(6)$ МэВ), $(20.7(1.0)$ МэВ, $1.3(6)$ МэВ) и $(24.4(6)$ МэВ, $4.3(1.0)$ МэВ). Эти параметры в пределах погрешностей совпадают с данными двух других каналов.

4. Обсуждение. Средневзвешенные значения параметров возбужденных состояний, получен-

ные в реакциях $^{11}\text{B}(\pi^-, \text{pt})^7\text{He}$, $^{11}\text{B}(\pi^-, \text{dd})^7\text{He}$, и $^{10}\text{B}(\pi^-, \text{pd})^7\text{He}$, вместе с экспериментальными данными других работ представлены в таблице. Средневзвешенное значение резонансной энергии основного состояния составляет $E_{r0} = 0.37(10)$ МэВ. Полученное значение согласуется с результатами недавних работ [2–4].

Энергии и ширины возбужденных уровней $^7\text{He}^*$

E_x , МэВ	Γ , МэВ	Наши данные**)	Работа
0.6(1)	0.75(8)		[10]
0.9(5)	1.0(9)		[11]
≈ 1.45	≈ 2		[12]
≈ 2.6	≈ 2		[8]
2.9^a	2.0^a		[6, 7, 9]
$3.1(1)^a$	≤ 0.5	1, 2, 3	
$4.9(2)^a$	≤ 0.5	1, 2, 3	
≈ 5.3	~ 5		[15]
$5.8(3)$	$4(1)$		[7]
$6.7(2)^a$	≤ 0.5	1, 2	
≈ 8.0	~ 7		[15]
$16.9(5)$	$1.0(3)$	2, 3	
$\approx 18^a$	$\sim 8^a$		[14, 15]
$18.0(1.5)$	~ 10		[9]
$19.8(3)^a$	$1.5(3)^a$	1, 2, 3	
$20(1)$	$9(2)$		[13]
$24.8(4)^a$	$4.6(7)^a$	1, 2, 3	

*) индекс a означает усредненное значение.

** $1 - ^{11}\text{B}(\pi^-, \text{pt})^7\text{He}$, $2 - ^{11}\text{B}(\pi^-, \text{dd})^7\text{He}$, $3 - ^{10}\text{B}(\pi^-, \text{pd})^7\text{He}$.

Ни в одном из исследованных каналов реакции мы не получили указаний на существование низколежащего возбужденного состояния ^7He с $E_x \approx 1$ МэВ. Тем не менее для проверки гипотезы о существовании состояния с аномально низкой энергией возбуждения было выполнено альтернативное описание экспериментальных спектров, включающее уровень $E_x = 0.55$ МэВ, $\Gamma = 0.75$ МэВ, найденный в работе [10]. Верхняя граница для вклада этого состояния в измеренный пик при $MM \approx 0$ МэВ (рис. 1) составляет 15 % для реакции $^{11}\text{B}(\pi^-, \text{pt})^7\text{He}$, 10 % для реакции $^{10}\text{B}(\pi^-, \text{pd})^7\text{He}$ и 5 % для реакции $^{11}\text{B}(\pi^-, \text{dd})^7\text{He}$. Отсутствие низколежащего уровня ^7He согласуется с экспериментальными результатами работ [3, 6–9] и теоретическими расчетами работ [20–25].

В области энергий возбуждения $2.5 \text{ МэВ} \leq E_x \leq 8 \text{ МэВ}$ мы наблюдаем три узких состояния ^7He . Достоверность полученных результатов подтверждается совпадением в пределах экспериментальных ошибок значений резонансных энергий во всех трех каналах реакции.

Существование трех возбужденных состояний в этой области со следующим порядком уровней: $J^\pi = 3/2^-$ (основное состояние), $1/2^-$, $5/2^-$, $3/2^-$, предсказывается в нескольких теоретических работах [20–24]. Теоретические предсказания энергий возбуждения и ширин в указанных работах заметно различаются. Наши данные наиболее близки к результатам работы [24]: $(E_x, \Gamma) = (3.27 \text{ МэВ}, 2.7 \text{ МэВ})$, $(3.9 \text{ МэВ}, 0.94 \text{ МэВ})$ и $(5.2 \text{ МэВ}, 1.2 \text{ МэВ})$. Как видно из таблицы, в этой области энергий возбуждения три состояния ^7He наблюдались только в работе [8]. Однако их ширины значительно превышали наши данные. Величина E_x первого возбужденного состояния близка к значениям, полученным другими авторами. Параметры двух других уровней, наблюдаемых нами в этой области энергий возбуждений, заметно отличаются от результатов работ [7, 8].

В области высоких энергий возбуждения, лежащих выше порога распада $^7\text{He} \rightarrow t + t + n$ ($E_x = 11.9$ МэВ), в наших измерениях впервые были обнаружены относительно узкие состояния ^7He . В других экспериментах в этой области энергий наблюдались только широкие состояния ^7He при $E_x \sim 20$ МэВ [13–15]. Природа наблюдаемых состояний неясна. Можно только отметить, что уровень с $E_x = 19.8(3)$ МэВ лежит вблизи порога распада $^7\text{He} \rightarrow t + p + 3n$ (18.56 МэВ). Однако это состояние не является изобар-аналогом сверхтяжелого изотопа водорода ^7H , так как в реакции $^{11}\text{B}(\pi^-, \text{dd})^7\text{He}$ изоспин конечного состояния может принимать только одно значение, $T = 3/2$.

5. Заключение. В настоящей работе впервые в рамках одного эксперимента в трех каналах реакции поглощения остановившихся пионов, $^{11}\text{B}(\pi^-, \text{pt})^7\text{He}$, $^{11}\text{B}(\pi^-, \text{dd})^7\text{He}$ и $^{10}\text{B}(\pi^-, \text{pd})^7\text{He}$, обнаружены три узких низколежащих возбужденных состояния ^7He , причем результаты, полученные в трех каналах реакции, не противоречат друг другу. Энергии возбуждения этих узких состояний равны $3.1(1)$, $4.9(2)$ и $6.2(2)$ МэВ соответственно.

В области высоких энергий возбуждений впервые обнаружены состояния с $E_x = 16(1)$, $19.8(3)$ и $24.8(4)$ МэВ.

Работа частично поддержана грантом Российского научного фонда # 14-12-00079.

1. I. Tanihata, H. Savajols, and R. Kanungo, Prog. Part. Nucl. Phys. **68**, 215 (2013).
2. M. Wang, G. Audi, A. H. Wapstra, F. G. Kondev, M. MacCormick, X. Xu, and B. Pfeiffer, CPC(HEP & NP) **36**, 1603 (2012).

3. Yu. Aksyutina, H.T. Johansson, T. Aumann, K. Boretzky, M.J.G. Borge, A. Chatillon, L.V. Chulkov, D. Cortina-Gil, U. Datta Pramanik, H. Emling, C. Forssen, H.O.U. Fynbo, H. Geissel, G. Ickert, B. Jonson, R. Kulesa, C. Langer, M. Lantz, T. LeBlais, A.O. Lindahl, K. Mahata, M. Meister, G. Munzenberg, T. Nilsson, G. Nyman, R. Palit, S. Paschalis, W. Prokopowicz, R. Reifarth, A. Richter, K. Riisager, G. Schrieder, H. Simon, K. Summerer, O. Tengblad, H. Weick, and M.V. Zhukov, *Phys. Lett. B* **679**, 191 (2009).
4. D.H. Denby, P.A. DeYoung, T. Baumann, D. Bazin, E. Breitbach, J. Brown, N. Frank, A. Gade, C.C. Hall, J. Hinfefeld, C.R. Hoffman, R. Howes, R.A. Jenson, B. Luther, S.M. Mosby, C.W. Olson, W.A. Peters, A. Schiller, A. Spyrou, and M. Thoennessen, *Phys. Rev. C* **78**, 044303 (2008).
5. Z.X. Cao, Y.L. Ye, J. Xiao, L.H. Lv, D.X. Jiang, T. Zheng, H. Hua, Z.H. Li, X.Q. Li, Y.C. Ge, J.L. Lou, R. Qiao, Q.T. Li, H.B. You, R.J. Chen, D.Y. Pang, H. Sakurai, H. Otsu, M. Nishimura, S. Sakaguchi, H. Baba, Y. Togano, K. Yoneda, C. Li, S. Wang, H. Wang, K.A. Li, T. Nakamura, Y. Nakayama, Y. Kondo, S. Deguchi, Y. Satou, and K. Tshoo, *Phys. Lett. B* **707**, 46 (2012).
6. A.A. Korshennikov, M.S. Golovkov, A. Ozawa, E.A. Kuzmin, E.Yu. Nikolskii, K. Yoshida, B.G. Novatskii, A.A. Ogloblin, I. Tanihata, Z. Fulop, K. Kusaka, K. Morimoto, H. Otsu, H. Petrascu, and F. Tokanai, *Phys. Rev. Lett.* **82**, 3581 (1999).
7. H.G. Bohlen, R. Kalpakchieva, A. Blazević, B. Gebauer, T.N. Massey, W. von Oertzen, and S. Thummerer, *Phys. Rev. C* **64**, 024312 (2001).
8. A.H. Wuosmaa, K.E. Rehm, J.P. Greene, D.J. Henderson, R.V.F. Janssens, C.L. Jiang, L. Jisonna, E.F. Moore, R.C. Pardo, M. Paul, D. Peterson, S.C. Pieper, G. Savard, J.P. Schiffer, R.E. Segel, S. Sinha, X. Tang, and R.B. Wiringa, *Phys. Rev. C* **72**, 061301(R) (2005).
9. A.H. Wuosmaa, J.P. Schiffer, K.E. Rehm, J.P. Greene, D.J. Henderson, R.V.F. Janssens, C.L. Jiang, L. Jisonna, J.C. Lighthall, S.T. Marley, E.F. Moore, R.C. Pardo, N. Patel, M. Paul, D. Peterson, S.C. Pieper, G. Savard, R.E. Segel, R.H. Siemssen, X.D. Tang, and R.B. Wiringa, *Phys. Rev. C* **78**, 041302(R) (2008).
10. M. Meister, K. Markenroth, D. Aleksandrov, T. Aumann, L. Axelsson, T. Baumann, M.J.G. Borge, L.V. Chulkov, W. Dostal, B. Eberlein, Th.W. Elze, H. Emling, C. Forssén, H. Geissel, M. Hellström, R. Holzmann, B. Jonson, J.V. Kratz, R. Kulesa, Y. Leifels, A. Leistenschneider, I. Mukha, G. Münzenberg, F. Nickel, T. Nilsson, G. Nyman, A. Richter, K. Riisager, C. Scheidenberger, G. Schrieder, H. Simon, O. Tengblad, and M.V. Zhukov, *Phys. Rev. Lett.* **88**, 102501 (2002).
11. F. Skaza, V. Lapoux, N. Keeley, N. Alamanos, E.C. Pollacco, F. Auger, A. Drouart, A. Gillibert, D. Beaumel, E. Becheva, Y. Blumenfeld, F. Delaunay, L. Giot, K.W. Kemper, L. Nalpas, A. Obertelli, A. Pakou, R. Raabe, P. Roussel-Chomaz, J.-L. Sida, J.-A. Scarpaci, S. Stepantsov, and R. Wolski, *Phys. Rev. C* **73**, 044301 (2006).
12. N. Ryezayeva, C. Bäumer, A.M. van den Berg, L.V. Chulkov, D. Frekers, D. De Frenne, E.-W. Grewe, P. Haefne, E. Jacobs, H. Johanson, Y. Kalmykov, A. Negret, P. von Neumann-Cosel, L. Popescuf, S. Rakers, A. Richter, G. Schrieder, A. Shevchenko, H. Simond, and H.J. Wörtche, *Phys. Lett. B* **639**, 623 (2006).
13. F. Brady, G.A. Needham, J.L. Romero, C.M. Kastaneda, T.D. Ford, J.L. Ullmann, and M.L. Webb, *Phys. Rev. Lett.* **51**, 1320 (1983).
14. T. Yamagata, S. Nakayama, H. Akimune, M. Fujiwara, K. Fushimi, M.B. Greenfield, K. Hara, K.Y. Hara, H. Hashimoto, K. Ichihara, K. Kawase, M. Kinoshita, Y. Matsui, K. Nakanishi, M. Tanaka, H. Utsunomiya, and M. Yosoi, *Phys. Rev. C* **69**, 044313 (2004).
15. D. Frekers, *Nucl. Phys. A* **731**, 76 (2004).
16. Ю.Б. Гуров, С.В. Лапушкин, В.Г. Сандуковский, Б.А. Чернышев, *ЭЧАЯ* **40**, 1063 (2009).
17. B.A. Chernyshev, Yu.B. Gurov, V.S. Karpukhin, L.Yu. Korotkova, S.V. Lapushkin, R.V. Pritula, and V.G. Sandukovsky, *Eur. Phys. J. A* **49**, 68 (2013).
18. B.A. Chernyshev, Yu.B. Gurov, V.S. Karpukhin, L.Yu. Korotkova, S.V. Lapushkin, R.V. Pritula, and V.G. Sandukovsky, *Eur. Phys. J. A* **50**, 150 (2014).
19. M.G. Gornov, Yu.B. Gurov, P.V. Morokhov, S.V. Lapushkin, V.A. Pechkurov, B.A. Chernyshov, V.G. Sandukovsky, and E.A. Pasyuk, *NIM in Phys. Res. A* **446**, 461 (2000).
20. A.A. Wolters, A.G.M. van Hees, and P.W.M. Glaudemans, *Phys. Rev. C* **42**, 2062 (1990).
21. J. Wurzer and H.M. Hofmann, *Phys. Rev. C* **55**, 688 (1997).
22. P. Navratil and B.R. Barrett, *Phys. Rev. C* **57**, 3119 (1998).
23. S.C. Pieper, R.B. Wiringa, and J. Carlson, *Phys. Rev. C* **70**, 054325 (2004).
24. A. Volya and V. Zelevinsky, *Phys. Rev. Lett.* **94**, 052501 (2005).
25. S. Baroni, P. Navrátil, and S. Quaglioni, *Phys. Rev. Lett.* **110**, 022505 (2013).