

ОБРАЗОВАНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ПРИ ПОГЛОЩЕНИИ ОСТАНОВИВШИХСЯ ПИОНОВ ЯДРАМИ

© 2019 г. Ю. Б. Гуров¹⁾, В. С. Карпухин¹⁾, С. В. Лапушкин¹⁾,
Т. И. Леонова¹⁾, Р. В. Притула¹⁾, Б. А. Чернышев^{1)*}, В. Г. Сандуковский¹⁾

Поступила в редакцию 25.12.2018 г.; после доработки 25.12.2018 г.; принята к публикации 25.12.2018 г.

Спектры заряженных частиц ${}^{3,4}\text{He}$, образованных при поглощении остановившихся пионов ядрами, были измерены на 17 ядрах в области массовых чисел $6 \leq A \leq 209$ с помощью полупроводникового спектрометра. Данные анализировались в рамках феноменологической модели, рассматривающей три стадии реакции поглощения: первичное поглощение на внутриядерных кластерах, предравновесную стадию и испарение. Показано, что доминирующий вклад в образование изотопов гелия с энергиями ≥ 20 МэВ вносит предравновесная стадия. Оценен вклад механизмов выбивания и подхвата в образование ${}^{3,4}\text{He}$.

DOI: 10.1134/S0044002719030073

1. ВВЕДЕНИЕ

Поглощение пионов ядрами — многочастичная задача. В силу законов сохранения энергии и импульса поглощение пионов на свободном нуклоне запрещено, а на нуклоне внутри ядра сильно подавлено. В связи с этим поглощение происходит на внутриядерных кластерах. Энергия остановившегося пиона — $m_\pi c^2$ — динамически распределяется по нуклонам, составляющим кластер, а остальные нуклоны воспринимают импульс отдачи в качестве остаточного ядра. Для остановившихся отрицательных пионов доминирующим механизмом является поглощение на внутриядерной pn -паре с квантовыми числами дейтрона: $J^P = 1^+$, $l_{np} = 0$, $I = 0$. Но в этом процессе ($\pi^- + d \rightarrow n + n$) заряженные частицы не образуются. Поэтому для определения природы образования заряженных частиц необходимо рассматривать вторичные взаимодействия первичных нейтронов, либо менее вероятные процессы — поглощение на внутриядерных pp -парах и более тяжелых кластерах.

До настоящего времени вопрос о количественном описании выходов и спектров заряженных частиц остается открытым, за исключением легчайших ядер ${}^{3,4}\text{He}$ [1–3].

Теоретические модели, учитывающие кластерное поглощение и вторичные взаимодействия, обеспечивают только качественное описание экспериментальных данных, во многих случаях

различия могут достигать десятков процентов [2, 4, 5]. В то же время, как было показано в наших работах [6–11], некоторые количественные выводы о процессе поглощения пионов можно сделать, основываясь на феноменологическом анализе экспериментальных данных. В рамках предложенной феноменологической модели удовлетворительно описываются выходы частиц (p , d , t) на средних и тяжелых ядрах [6–10]. В недавней работе [11] было показано, что эта модель удовлетворительно описывает спектры однозарядных частиц и на легких ядрах с $6 \leq A \leq 12$. В настоящей работе эта модель применена к описанию спектров и выходов изотопов гелия ${}^{3,4}\text{He}$, образованных на ядрах в широком диапазоне массовых чисел A .

2. ЭКСПЕРИМЕНТ

Эксперимент был выполнен на синхротронном ПИЯФ РАН с помощью полупроводникового спектрометра заряженных частиц [12]. Схема эксперимента представлена на рис. 1. Пионный пучок с импульсом 100 МэВ/с тормозился графитовым замедлителем, после чего проходил через мониторную систему, представляющую собой два тонких детектора (МД1 и МД2) толщиной ~ 400 мкм, и останавливался в тонкой мишени (M). Мишень располагалась под углом 45° к пучку и представляла собой пластинку исследуемого материала, по величине эквивалентную эталонной мишени из кремния толщиной 440 мкм. В эксперименте использовались 17 мишеней: ${}^6,{}^7\text{Li}$, ${}^9\text{Be}$, ${}^{10,11}\text{B}$, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{28}\text{Si}$, ${}^{40}\text{Ca}$, ${}^{59}\text{Co}$, ${}^{93}\text{Nb}$, ${}^{114,117,120,124}\text{Sn}$, ${}^{169}\text{Tm}$, ${}^{181}\text{Ta}$, ${}^{209}\text{Bi}$.

¹⁾Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, Россия.

*E-mail: chernyshev@mephi.ru

Точность абсолютной нормировки выходов частиц определяется измерением числа пионов, остающихся в мишени. Так как энергетическое разрешение измерений улучшается с уменьшением толщины мишени, в эксперименте используются тонкие мишени. Как следствие, доля пионов, остающихся в мишенях, составляла несколько процентов от входного пучка. Для определения факта остановки использовалась мониторинговая система. В измерениях с активной мишенью, которая представляла собой два кремниевых полупроводниковых детектора, были определены пороговые энергосодержания пролетающих пионов, которые соответствовали их остановкам. Эти остановки в активной мишени определялись по энергосодержанию в детекторе. Полученные пороги использовались в измерениях и на других мишенях, так как их толщины были одинаковы. Применение мониторинговой системы позволило достичь точности абсолютной нормировки 7%, при этом относительная погрешность измерений на разных мишенях не превысила 3.5%. Подробное описание принципов работы мониторинговой системы представлено в [13].

Заряженные частицы регистрировались двумя многослойными полупроводниковыми телескопами ($T1$ и $T2$) с суммарными толщинами около 40 мм. Пороговые энергии идентификации протонов — 5 МэВ, дейтронов и тритонов — 10 МэВ, изотопов гелия ^3He — 15 МэВ, ^4He — 20 МэВ. Измерения спектров были выполнены вплоть до кинематических границ реакции. Энергетическое разрешение (FWHM) спектрометра при регистрации однозарядных частиц составило 0.6 МэВ, для двухзарядных частиц — 2 МэВ. Ухудшение разрешения при регистрации изотопов гелия обусловлено в основном увеличением неопределенностей в потерях энергии двухзарядных ионов в мишенях.

Более подробно спектрометр и экспериментальная методика описаны в работе [12].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты измерения инклюзивных спектров однозарядных частиц на всех ядрах представлены в работах [6, 9] (p), [7, 9] (d), [8, 9] (t). На рис. 2 и 3 в качестве иллюстрации представлены спектры изотопов $^3,4\text{He}$, образованные при поглощении остановившихся пионов на четырех из исследованных ядер. Отметим качественное подобие спектров, форма которых слабо зависит от образующегося изотопа гелия и мишени, несмотря на широкий диапазон массовых чисел. Заметные различия наблюдаются только в высокоэнергетической области спектра на мишени ^6Li , на которой быстрое уменьшение спектра в области высоких энергий обусловлено кинематическими причинами.

Форма спектров на остальных исследованных ядрах аналогична спектрам на рис. 2 и 3.

На рис. 4 представлены A -зависимости выходов заряженных частиц с энергиями выше порогов регистрации, образованных при поглощении оставившихся пионов. Видно, что за исключением областей легких ядер и изотопов олова зависимости имеют близкую форму. В то же время следует отметить, что выходы ^3He подавлены по сравнению с другими частицами.

Для описания энергетических спектров заряженных частиц в работах [6–11] была разработана феноменологическая модель, в которой рассматриваются три стадии реакции поглощения: первичное поглощение на внутриядерных кластерах, предравновесная и испарительная стадии. Спектры образующихся частиц представляют собой сумму вкладов всех трех стадий:

$$\left(\frac{dY}{dE}\right) = \left(\frac{dY}{dE}\right)_{pr} + \left(\frac{dY}{dE}\right)_{nq} + \left(\frac{dY}{dE}\right)_{eq}, \quad (1)$$

где $\left(\frac{dY}{dE}\right)_{pr}$ — спектр первичных частиц, $\left(\frac{dY}{dE}\right)_{nq}$ — спектр предравновесных частиц, $\left(\frac{dY}{dE}\right)_{eq}$ — спектр испарительных частиц.

Под первичными частицами понимаются частицы, образующиеся в двухчастичных каналах реакции поглощения пиона на внутриядерном кластере и вылетающие из остаточного ядра без вторичных взаимодействий. При таком подходе первичные ядра $^3,4\text{He}$ могут образовываться при поглощении только на экзотических кластерах: $\pi^- + ^4\text{Li} (^4\text{Be}) \rightarrow n(p) + ^3\text{He}$ и $\pi^- + ^5\text{Li} (^5\text{Be}) \rightarrow n(p) + ^4\text{He}$. В приближении гармонического осциллятора для импульсного распределения внутриядерных кластеров спектр “первичных” частиц может быть описан следующим выражением:

$$\left(\frac{dY}{dE}\right)_{pr} = C_{pr} \cdot \sinh\left(\frac{2m}{\gamma^2} \sqrt{E(E_{\max} - E)}\right), \quad (2)$$

где C_{pr} — нормировочная постоянная, m — масса заряженной частицы, γ — ширина импульсного распределения внутриядерного кластера, E_{\max} — кинематическая граница реакции.

После вылета из ядра “первичных” частиц образуется высоковозбужденное состояние остаточного ядра, релаксация которого сопровождается вылетом каскадных частиц. Частицы, образующиеся на этой предравновесной стадии реакции, описываются модифицированной формулой для кумулятивных частиц [6]:

$$\begin{aligned} \left(\frac{dY}{dE}\right)_{nq} &= \\ &= C_{nq} \sqrt{E(E_0 - E)} \exp\left(-\frac{E}{T_{nq}}\right), \end{aligned} \quad (3)$$

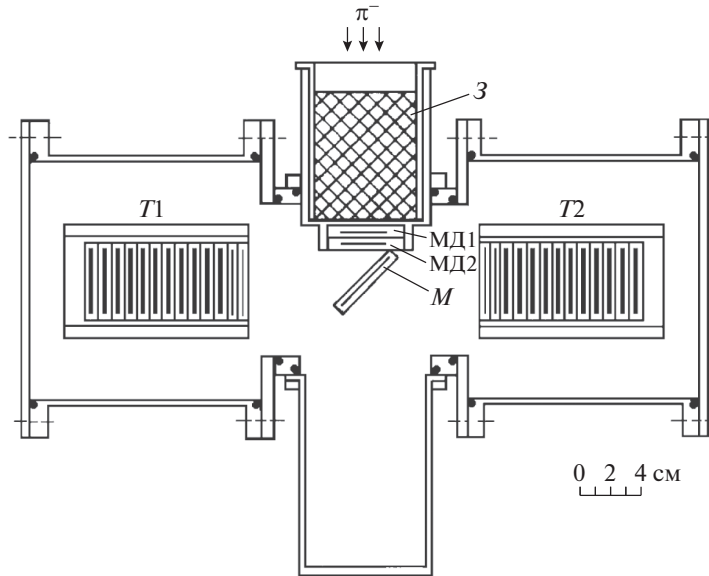


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

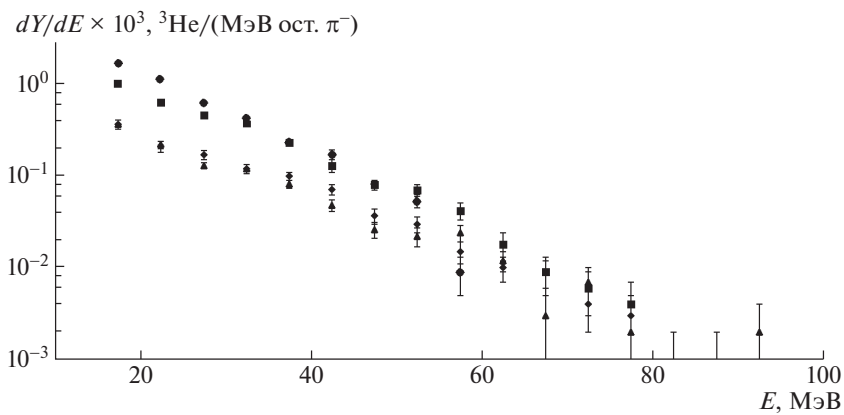


Рис. 2. Энергетические спектры изотопов ^3He , образованных при поглощении остановившихся пионов ядрами: ^6Li — \bullet ; ^{40}Ca — \blacksquare ; ^{117}Sn — \blacklozenge ; ^{181}Ta — \blacktriangle .

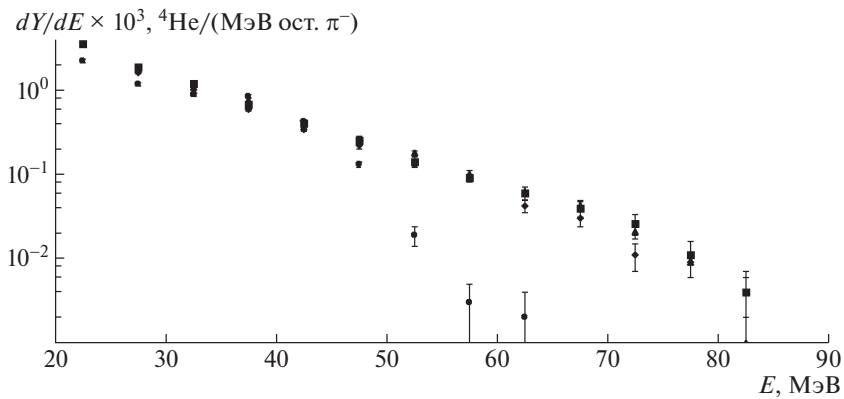


Рис. 3. То же, что и на рис. 2, но для изотопов ^4He .

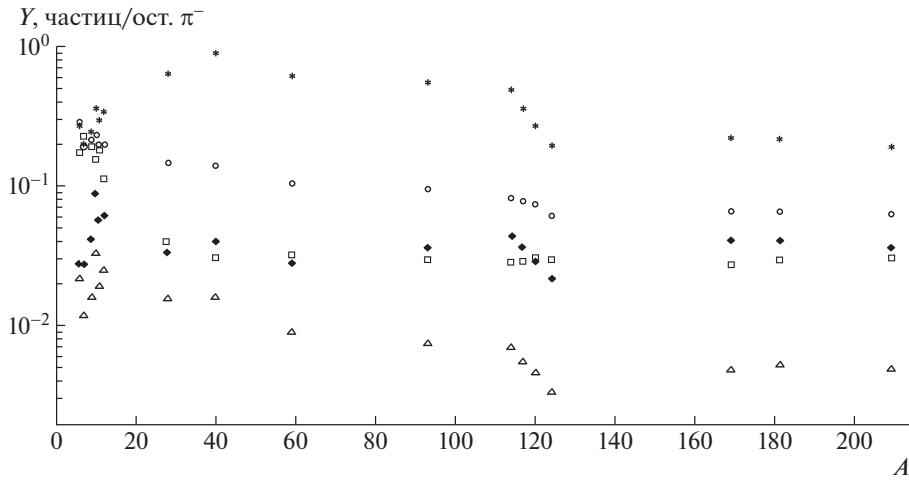


Рис. 4. A -зависимости выходов заряженных частиц, образованных при поглощении остановившихся пионов ядрами: p — *, d — \circ , t — \square , ${}^3\text{He}$ — \triangle , ${}^4\text{He}$ — \blacklozenge .

где C_{nq} — нормировочная константа, E_0 — подгоночный параметр, T_{nq} — инвариантный наклон спектра.

После установления термодинамического равновесия в ядре остаточное возбуждение снимается испарением частиц, спектр которых описывается приближенной формулой

$$\left(\frac{dY}{dE}\right)_{eq} = C_{eq} \exp\left(-\frac{E}{T_{eq}}\right), \quad (4)$$

где C_{eq} — нормировочная постоянная, T_{eq} — равновесная температура ядра.

Параметры описания спектров C_{pr} , γ , C_{nq} , T_{nq} , C_{eq} и T_{eq} определялись методом наименьших квадратов. Предложенная модель позволила описать инклюзивные спектры p , d , t на легких ядрах с точностью $\approx 20\%$ [11], на средних и тяжелых ядрах с точностью $\approx 15\%$ [6–10].

В настоящей работе предложенная модель была использована для описания спектров ${}^{3,4}\text{He}$. Результаты описания спектров на всех исследованных ядрах ($6 \leq A \leq 209$) показали, что вклад испарительных и первичных частиц пренебрежимо мал. Для испарительных частиц этот результат обусловлен достаточно высоким порогом измерения спектров (15 и 20 МэВ). Подавление выхода первичных ${}^{3,4}\text{He}$, по-видимому, указывает на низкую вероятность образования экзотических кластеров (${}^4\text{Li}$, ${}^4\text{Be}$, ${}^5\text{Li}$, ${}^5\text{Be}$) в ядрах.

Использование формулы (3) для описания спектров ${}^{3,4}\text{He}$ не привело к улучшению согласия с экспериментальными данными, особенно в области высоких энергий. Одним из возможных механизмов, приводящих к образованию энергичных сложных частиц, является их выбивание с поверхно-

сти ядра первичными нуклонами. Для моделирования этого процесса мы использовали классическое приближение, в котором спектр первичных нуклонов, образованных при двухнуклонном поглощении ($\pi^- + pn(p) \rightarrow n + n(p)$) описывался формулой (2), а выбиваемые ядра ${}^{3,4}\text{He}$ предполагались покоящимися, так как процесс поглощения остановившихся пионов носит поверхностный характер. Полученные в результате спектры нормировались на высокоэнергичную часть экспериментальных данных. В качестве примера на рис. 5 и 6 представлены результаты моделирования поглощения на изотопе ${}^{117}\text{Sn}$.

Для дальнейшего анализа из экспериментальных спектров был вычтен вклад процессов выбивания. Пример полученных таким образом спектров для ${}^{117}\text{Sn}$ представлен на рис. 7 и 8.

Описание полученных спектров проводилось с помощью выражения (3). Для представленных на рис. 7 и 8 спектров удовлетворительное описание достигается при следующих значениях инвариантных наклонов спектров: $T_{nq} = 15.0 \pm 0.5$ МэВ (для ${}^3\text{He}$) и $T_{nq} = 8.4 \pm 0.5$ МэВ (для ${}^4\text{He}$). Столь же удовлетворительное описание было достигнуто и на остальных средних и тяжелых ядрах при значениях инвариантных наклонов спектров, лежащих для ${}^3\text{He}$ в интервале 12–15 МэВ и для ${}^4\text{He}$ в интервале 8–10 МэВ. Меньшая величина T_{nq} для ${}^4\text{He}$ может указывать на более позднюю стадию их образования. Для легких ядер, лежащих в диапазоне $6 \leq A \leq 12$, достичь удовлетворительного описания экспериментальных спектров не удалось. Это может быть обусловлено ярко выраженной кластерной структурой этих ядер.

С целью выяснения механизмов, ответственных за образование частиц на рис. 7 и 8 мы рассмотрели

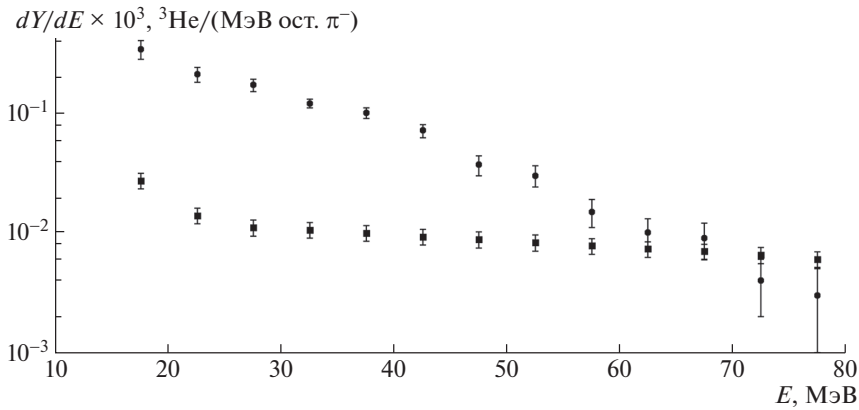


Рис. 5. Энергетические спектры ${}^3\text{He}$, образованных при поглощении остановившихся пионов ядрами ${}^{117}\text{Sn}$. Точки: ● — экспериментальные данные, ■ — результаты моделирования процесса выбивания.

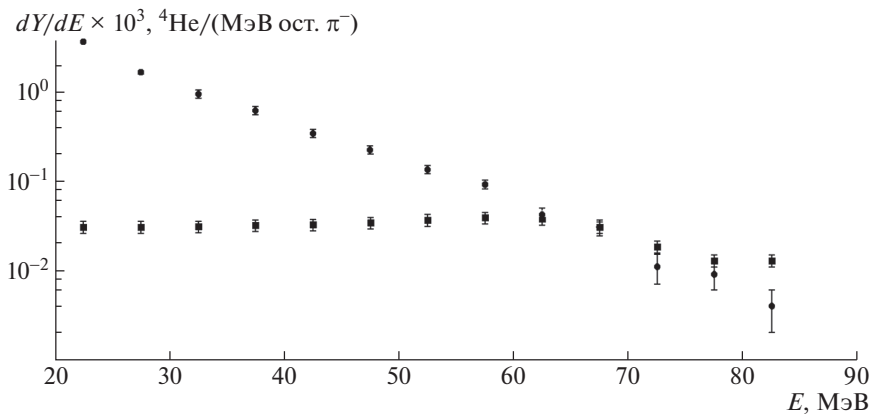


Рис. 6. То же, что и на рис. 5, но для ${}^4\text{He}$.

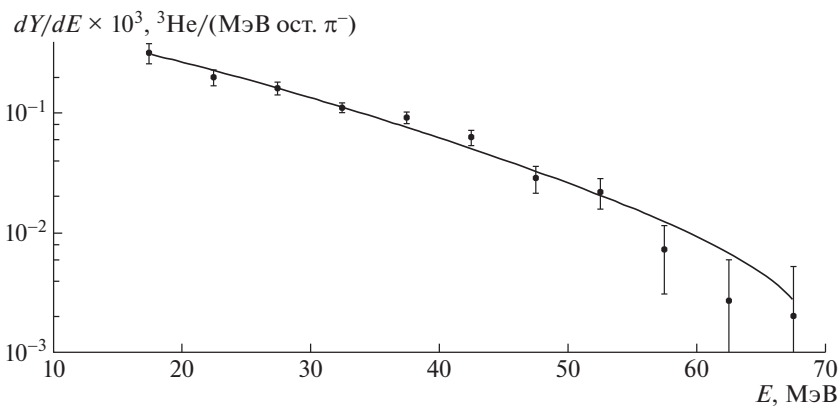
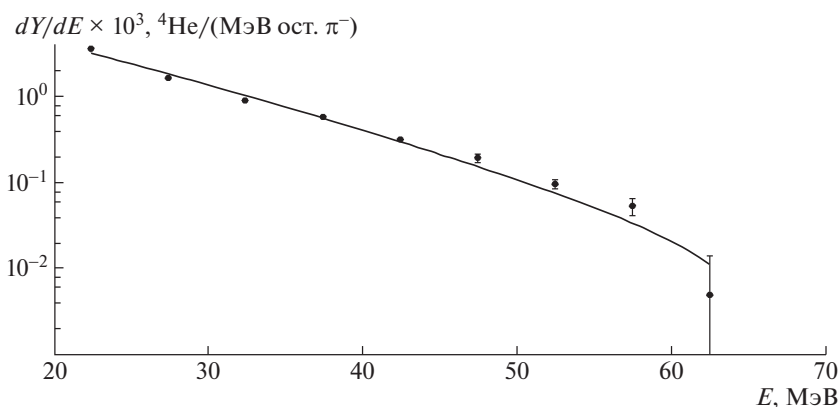
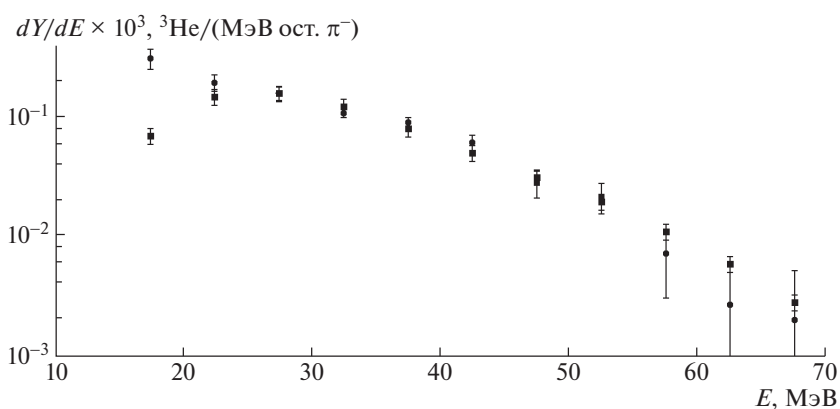
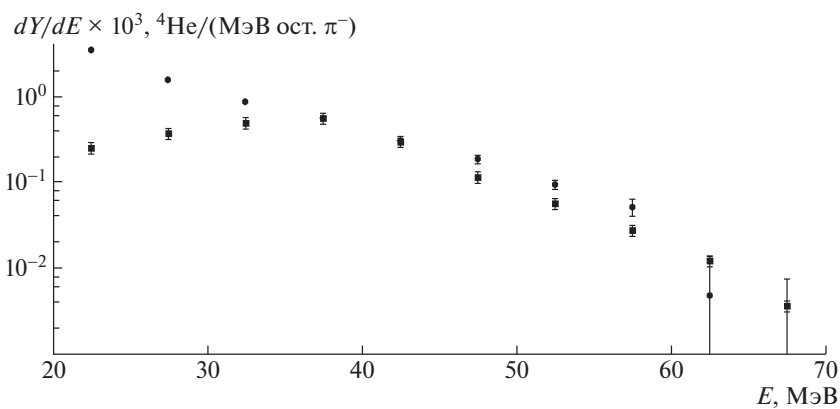


Рис. 7. Энергетические спектры ${}^3\text{He}$, образованных при поглощении остановившихся пионов ядрами ${}^{117}\text{Sn}$ после вычета вклада от подхвата. Точки — экспериментальные данные, кривая — результаты описания формулой (3).

возможность образования ${}^3,4\text{He}$ в результате подхвата на поверхности ядра. Рассматривались каскадные реакции следующего вида: $\pi^- + pp \rightarrow n + p$, $p + d(t) \rightarrow {}^3,4\text{He}$. Реакции рассматривались в классическом приближении с учетом импульсных

распределений кластеров (pp), d и t . Ширины импульсных распределений внутриядерного движения определялись из выражения (2) при описании спектров первичных частиц, при этом предполагалось, что эти ширины для (pp) и d совпадают.

Рис. 8. То же, что и на рис. 7, но для ${}^4\text{He}$.Рис. 9. Энергетические спектры ${}^3\text{He}$, образованных при поглощении остановившихся пионов ядрами ${}^{117}\text{Sn}$ после вычета вклада от подхвата. Точки: ● — экспериментальные данные, ■ — результаты моделирования реакции подхвата.Рис. 10. То же, что и на рис. 9, но для ${}^4\text{He}$.

Сравнение экспериментальных данных и результатов моделирования представлено на рис. 9 и 10. Расчетные спектры нормировались при энергиях 27.5 МэВ для ${}^3\text{He}$ и 37.5 МэВ для ${}^4\text{He}$.

Видно, что при энергиях выше 30 МэВ наблюдается удовлетворительное согласие между экспе-

риментом и результатами моделирования. Анализ данных, полученных на других средних и тяжелых ядрах, показывает, что механизмы выбивания и подхвата дают значительный вклад в выходы изотопов гелия. В среднем для ${}^3\text{He}$ подхват составляет 60% от полного выхода, выбивание — 10%. Для

^4He подхват составляет 40% от полного выхода, выбивание — 5%. При этом для энергий выше 30 МэВ сумма этих механизмов дает доминирующий вклад в выходы $^3,^4\text{He}$.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследованы выходы изотопов гелия $^3,^4\text{He}$, образованных в реакции поглощения оставшихся пионов атомными легкими ядрами. В рамках разработанной ранее феноменологической модели было показано, что эти заряженные частицы при энергиях, больших 20 МэВ, образуются только на предравновесной стадии реакции. Показано, что при энергиях выше 30 МэВ доминирующий вклад в выходы $^3,^4\text{He}$ вносят процессы подхвата и выбивания на поверхности поглощающих ядер.

Работа была поддержана Российским министерством образования и науки, грант № 3.4911.2017/ВУ, и программой повышения конкурентоспособности Национального исследовательского университета “МИФИ” (соглашение с Российским министерством образования и науки от 27 августа 2013 г., проект № 02.a03.21.0005).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. D. Gotta, M. Dörr, W. Fetscher, G. Schmidt, H. Ullrich, G. Backenstoss, W. Kowald, I. Schwanner, and H.-J. Weyer, Phys. Lett. B **112**, 129 (1982).
2. В. С. Бутцев, А. С. Ильинов, С. Е. Чигринов, ЭЧАЯ **11**, 900 (1980).
3. H. G. Weyer, Phys. Rept. **195**, 295 (1990).
4. М. Г. Горнов, Ю. Б. Гуров, А. И. Ильин, С. Г. Машник, П. В. Морохов, В. А. Печуров, М. А. Поликарпов, В. И. Савельев, Ф. М. Сергеев, С. А. Смирнов, А. А. Хомутов, Б. А. Чернышев, Р. Р. Шафигуллин, А. В. Шишков, ЯФ **47**, 959 (1988) [Sov. J. Nucl. Phys. **47**, 612 (1988)].
5. С. Г. Машник, в сб.: *Материалы XX зимней школы ЛИЯФ* (Ленинград, 1985).
6. Л. Ю. Короткова, Ю. Б. Гуров, Е. М. Калинин, В. С. Карпухин, С. В. Лапушкин, Р. В. Притула, В. Г. Сандуковский, И. А. Толстухин, Б. А. Чернышев, Изв. РАН. Сер. физ. **76**, 460 (2012) [Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. **76**, 404 (2012)].
7. Ю. Б. Гуров, Л. Ю. Короткова, С. В. Лапушкин, Р. В. Притула, В. Г. Сандуковский, Б. А. Чернышев, Т. Д. Щуренкова, Изв. РАН. Сер. физ. **77**, 415 (2013) [Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. **77**, 370 (2013)].
8. Ю. Б. Гуров, Л. Ю. Короткова, С. В. Лапушкин, Р. В. Притула, Б. А. Чернышев, Т. Д. Щуренкова, Изв. РАН. Сер. физ. **78**, 1375 (2014) [Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. **78**, 1112 (2014)].
9. Ю. Б. Гуров, В. С. Карпухин, Л. Ю. Короткова, С. В. Лапушкин, Т. И. Леонова, Р. В. Притула, Б. А. Чернышев, Т. Д. Щуренкова, Изв. РАН. Сер. физ. **79**, 520 (2015) [Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. **79**, 478 (2015)].
10. Ю. Б. Гуров, Л. Ю. Короткова, С. В. Лапушкин, Т. И. Леонова, Р. В. Притула, Б. А. Чернышев, Т. Д. Щуренкова, Изв. РАН. Сер. физ. **80**, 241 (2016) [Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. **80**, 215 (2016)].
11. Ю. Б. Гуров, В. С. Карпухин, Л. Ю. Короткова, С. В. Лапушкин, Т. И. Леонова, Р. В. Притула, Б. А. Чернышев, Т. Д. Щуренкова, ЯФ **80**, 441 (2017) [Phys. At. Nucl. **80**, 844 (2017)].
12. M. G. Gornov, Yu. B. Gurov, A. S. Lukin, P. V. Morokhov, V. A. Pechukov, A. P. Pichugin, V. I. Saveliev, R. R. Shafigullin, F. M. Sergeev, A. A. Khomutov, K. O. Oganessian, B. P. Osipenko, and V. G. Sandukovsky, Nucl. Instrum. Methods A **225**, 42 (1984).
13. Ю. Б. Гуров, С. В. Лапушкин, Р. В. Притула, Б. А. Чернышев, Вестн. НИЯУ МИФИ **5**, 391 (2016).

CHARGED PARTICLE FORMATION IN STOPPED PION ABSORPTION BY NUCLEI

Yu. B. Gurov¹⁾, V. S. Karpukhin¹⁾, S. V. Lapishkin¹⁾, T. I. Leonova¹⁾, R. V. Pritula¹⁾, V. G. Sandukovsky¹⁾, B. A. Chernyshev¹⁾

¹⁾National Nuclear Research University MEPhI, Moscow, Russia

The spectra of charged particles $^3,^4\text{He}$, formed in stopped pion absorption by nuclei, were measured on 17 nuclei in the region of mass numbers $6 \leq A \leq 209$ using a semiconductor spectrometer. The data were analyzed in the framework of the phenomenological model considering three stages of the absorption reaction: primary absorption on the intra-nuclear clusters, pre-equilibrium stage and evaporation. It is shown that the pre-equilibrium stage makes the dominant contribution to the formation of helium isotopes with energies ≥ 20 MeV. The contributions of pick-up and knock-out mechanisms to the $^3,^4\text{He}$ formation were estimated.