

P13-2008-137

М. П. Иванов, Р. А. Астабатьян, Г. Г. Гульбежян,
Н. А. Демехина, А. А. Кулько, С. М. Лукьянов,
Ю. Э. Пенионжкевич, Р. В. Ревенко, Н. К. Скобелев,
В. И. Смирнов, Ю. Г. Соболев, Д. А. Тестов

ПОЛУЧЕНИЕ МОНОХРОМАТИЧЕСКИХ ПУЧКОВ
УСКОРЕННЫХ ИОНОВ ${}^6\text{He}$ С ЭНЕРГИЕЙ
ВБЛИЗИ КУЛОНОВСКОГО БАРЬЕРА РЕАКЦИЙ
НА УСКОРИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ **DRIBs ОИЯИ**

Направлено в журнал «Приборы и техника эксперимента»

Иванов М. П. и др.

P13-2008-137

Получение монохроматических пучков ускоренных ионов ${}^6\text{He}$ с энергией вблизи кулоновского барьера реакций на ускорительном комплексе DRIBs ОИЯИ

Описываются два метода получения монохроматических пучков ускоренных ионов ${}^6\text{He}$ с энергией вблизи кулоновского барьера реакций на ускорительном комплексе DRIBs ОИЯИ. В первом методе магнитный спектрометр МСП-144 использовался в качестве монохроматора пучка частиц ${}^6\text{He}$ низкой энергии, полученного после прохождения поглотителя энергии. Линейный размер мишени вдоль фокальной плоскости (18 мм) определял разрешение пучка ${}^6\text{He}$ по энергии, которое составляло 500 кэВ. Во втором методе для исследования ядерных реакций с ускоренными пучками частиц ${}^6\text{He}$ без потери интенсивности использовался специально разработанный зонд, позволяющий проводить эксперименты на внутреннем пучке постускорителя (циклотрона У-400) комплекса DRIBs. Это позволило получать на мишени пучок ${}^6\text{He}$ требуемой энергии с разрешением пучка не хуже 150 кэВ.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2008

Ivanov M. P. et al.

P13-2008-137

Obtaining of Monochromatic Beams of Accelerated ${}^6\text{He}$ Ions with Energies Close to Coulomb Barrier at the Accelerator Complex DRIBs (JINR)

Two methods for obtaining monochromatic beams of accelerated ${}^6\text{He}$ ions with energies close to Coulomb barrier at the accelerator complex DRIBs (JINR) are described. In the first method the magnetic spectrometer MSP-144 was used as monochromator of ${}^6\text{He}$ particles beam after energy degrader. The energy resolution (500 keV) was determined from linear size (18 mm) of the target along the focal plane. In the second method the especially designed probe was used for investigation of nuclear reactions with accelerated ${}^6\text{He}$ ions without intensity loss on internal beam of postaccelerator (U400 cyclotron) of DRIBs (JINR) complex. The ${}^6\text{He}$ particle beam of required energy with an energy resolution not worse than 150 keV on the target was obtained.

The investigation has been performed at the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2008

ВВЕДЕНИЕ

Все возрастающий интерес к реакциям с экзотическими ядрами стимулирует создание новых ускорительных комплексов радиоактивных пучков. В настоящее время в основном используются два метода получения пучков радиоактивных ядер [1]. Первый метод (т. н. метод фрагмент-сепаратора) состоит в том, что пучок тяжелых ионов бомбардирует мишень, в результате чего образуются ядра в широком диапазоне зарядов и масс, вылетающие преимущественно под передними углами. Фрагмент-сепаратор позволяет разделять продукты реакций фрагментации с последующим формированием с помощью магнитной оптики пучка из определенного выделенного изотопа. Преимуществом этого метода является то, что он позволяет получить пучок радиоактивных ядер с импульсом, равным импульсу первичного пучка. В этом случае пучок радиоактивных ядер может быть использован без последующего ускорения. Кроме этого, таким методом можно получать пучки довольно короткоживущих ядер (до нескольких сотен микросекунд). Однако интенсивность пучков, получаемых методом фрагмент-сепаратора, составляет величину не более 10^6 с^{-1} вследствие невозможности использования производящих мишеней большой толщины (более 500 мг/см^2). Другой метод (т. н. ISOL-метод) основан на использовании максимально возможной толщины производящей мишени (до нескольких сотен г/см^2), в результате чего образующиеся радиоактивные ядра остаются в веществе мишени, и их необходимо извлечь, а затем ускорить до нужных энергий. Производящая мишень, как правило, совмещена с ионным источником масс-сепаратора, который позволяет выделять нужные продукты ядерной реакции и в комплексе с системой транспорта ионов транспортировать их в постускоритель для достижения необходимых энергий. Преимуществом этого метода является возможность получения довольно интенсивных пучков радиоактивных ядер (до 10^{11} с^{-1}). Существует некоторое ограничение на минимальное время жизни ядер, получаемых ISOL-методом радиоактивных пучков, которое определяется временем их диффузии из мишени и, как правило, составляет величину не менее 0,5 с.

Комплексы радиоактивных пучков, основанные на ISOL-методе, получили большое распространение во всем мире. К ним относятся, например, комплекс SPIRAL (Кан, Франция), ALTO (Орсе, Франция) ARENA (Лувен-

ля-Нев, Бельгия), ORIB ORNL (Ок-Ридж, США) и др. Введенный в эксплуатацию в 2005 г. в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ ускорительный комплекс DRIBs (Dubna Radioactive Ion Beams) [2] к настоящему моменту позволяет получать пучки радиоактивных ядер ${}^6\text{He}$ с энергией ~ 10 МэВ/А и рекордной интенсивностью $\sim 2 \times 10^7$ с $^{-1}$.

На большинстве современных комплексов пучков радиоактивных ядер, в том числе и на комплексе DRIBs, энергия ускоренных ионов легких радиоактивных ядер значительно выше кулоновского барьера реакций. Между тем наиболее интересные результаты при исследовании реакций с легкими экзотическими слабосвязанными ядрами, в том числе и ядер с т. н. нейтронным гало, были получены при энергиях вблизи кулоновского барьера [3–5]. В частности, нами наблюдалось усиление сечения реакций полного слияния и реакций передачи нейтронов при взаимодействии ${}^6\text{He}$ с тяжелыми ядрами: ${}^{206}\text{Pb}$ и ${}^{197}\text{Au}$ — в подбарьерной области энергий [4]. Кулоновский барьер для этих реакций составляет величину ~ 20 МэВ, поэтому в процессе проведения экспериментов возникла необходимость снижения начальной энергии пучка ${}^6\text{He}$ (~ 60 МэВ) до требуемой величины без существенного ухудшения его энергетического разрешения. Пучки радиоактивных ядер имеют относительно низкую по сравнению со стабильными пучками интенсивность, поэтому для исследования реакций с пучками таких ядер необходимо использование методик и установок, обладающих высокой эффективностью. С этой точки зрения представляет интерес активационная методика [3, 4]. В этом случае под действием пучков радиоактивных ядер происходит длительное накопление продуктов ядерных реакций в исследуемой мишени, а затем производится off-line-измерение наведенной активности. Данная методика позволяет измерять выходы различных продуктов ядерных реакций с относительно низкими сечениями образования.

Для лучшего понимания механизма ядерной реакции большой интерес представляет измерение зависимости сечения образования продуктов этой реакции от энергии (функции возбуждения). Однако чтобы измерить функцию возбуждения, приходится последовательно изменять энергию падающего на мишень пучка, по возможности не ухудшая его энергетического разрешения. Снижение энергии непосредственно с помощью толстыхборок из мишеней и пассивных поглотителей приводит к существенному ухудшению его энергетического разрешения на мишенях, где происходит значительный сброс энергии пучка, за счет страгглинга. Так, если выведенный и сформированный пучок ${}^6\text{He}$ на ускорительном комплексе DRIBs имел энергию 60,9 МэВ и энергетическое разрешение $\Delta E = 0,8$ МэВ, то снижение энергии борокой мишеней до 40 МэВ приводило к ухудшению разрешения до $\Delta E \approx 1,2$ МэВ, при снижении до 25 МэВ оно увеличивалось до $\Delta E \approx 4$ МэВ, а при снижении энергии до 10 МэВ энергетическое разрешение ΔE достигало значения 6 МэВ [3].

В настоящей работе рассмотрены два метода получения пучков ${}^6\text{He}$ низкой энергии с высоким энергетическим разрешением на ускорительном комплексе DRIBs. Эти методы могут быть успешно использованы для пучков других ядер на различных ускорительных комплексах.

ПОЛУЧЕНИЕ МОНОХРОМАТИЧЕСКИХ ПУЧКОВ ИОНОВ ${}^6\text{He}$ С ЭНЕРГИЕЙ ВБЛИЗИ КУЛОНОВСКОГО БАРЬЕРА РЕАКЦИЙ С ПОМОЩЬЮ МАГНИТНОГО АНАЛИЗАТОРА

В этом методе монохроматизация пучка ${}^6\text{He}$ низкой энергии осуществлялась с использованием магнитного анализатора МСП-144 [6, 7]. Собственное энергетическое разрешение этого анализатора составляет величину $\Delta E/E \sim 5 \cdot 10^{-4}$ в диапазоне энергий $E_{\text{max}}/E_{\text{min}} = 5,2$. Максимальный угол отклонения частиц — 110° . Частицы фокусируются в зависимости от их жесткости в определенном месте фокальной плоскости протяженностью 1,5 м и попадают на нее под углом 41° .

На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки. В камере рассеяния перед магнитным спектрометром устанавливался набор поглотителей, необходимый для снижения энергии частиц. Энергия и пространственное распределение пучка в фокальной плоскости магнитного анализатора измерялись при изменении магнитного поля двумя независимыми детекторными системами — фокальным детектором спектрометра (ионизационной камерой) и двумя полупроводниковыми PIN-детекторами, расположенными в двух различных позициях на фокальной плоскости. После измерения энергии и пространственного распределения в максимуме интенсивности пучка располагались сборки из 3–5 мишеней. Энергетический разброс пучка, падающего на мишени, определялся протяженностью мишеней вдоль фокальной плоскости. В нашем случае, после снижения начальной энергии с 60,9 МэВ до 23,3 МэВ, энергетический разброс пучка, падающего на мишени размерами 18×18 мм, равнялся ± 250 кэВ. Поток частиц, прошедших через мишени, измерялся с помощью мониторинговых детекторов на основе сцинтилляторов из пластика и фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) (см. рис. 1). Пороги мониторинговых сцинтилляционных детекторов были настроены таким образом, чтобы с вероятностью, близкой к 100 %, регистрировать ядра ${}^6\text{He}$ с кинетической энергией до 10 МэВ и исключать регистрацию событий продуктов их распада. Настройка порогов дискриминаторов производилась с помощью источника альфа-частиц ${}^{226}\text{Ra}$, пороги фиксировались постоянными резисторами, и дальнейшая оптимизация напряжения высоковольтного питания ФЭУ осуществлялась удаленно с помощью источника напряжения с цифровым управлением. Во время облучения мишеней с мониторинговых детекторов периодически считывалась информация об интенсивности пучка и записывалась в память

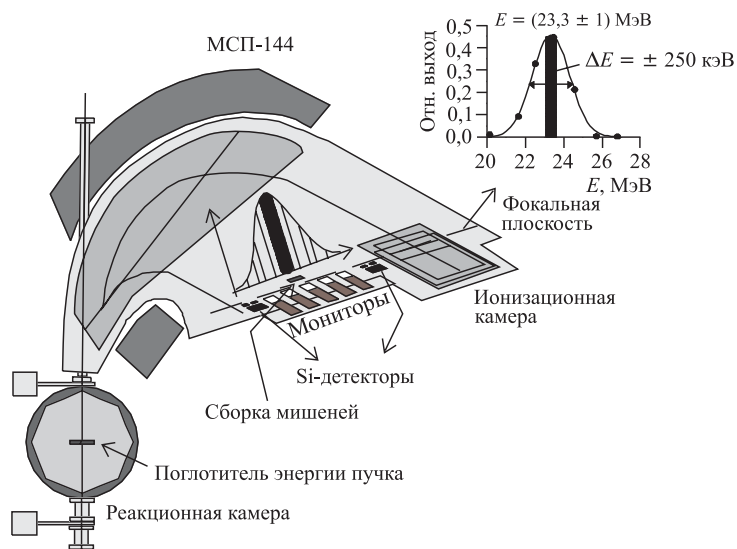


Рис. 1. Схема эксперимента с использованием магнитного анализатора МСР-144. На вставке в верхней части рисунка показано энергетическое распределение пучка ионов ${}^6\text{He}$ на фокальной плоскости

ПК. Информация об интенсивности передавалась также на пульт управления комплекса DRIBs для оперативного контроля за пучком. Последующий анализ файлов данных позволял получать полную информацию о процессе облучения каждой из исследуемыхборок мишеней.

Как было сказано выше, сборки мишеней располагались в максимуме интенсивности пучка. Вследствие фиксированных размеров мишеней интенсивность проходящего через них пучка определяется шириной его энергетического распределения на фокальной плоскости магнитного анализатора, зависящей от энергетического разброса попадающих в него частиц. Из этого следует, что необходимо выбирать такие поглотители, которые наименее ухудшают первоначальный энергетический разброс пучка частиц. Для выбора оптимального поглотителя нами было измерено энергетическое разрешение пучка ${}^6\text{He}$ после прохождения им поглотителей из различных материалов. Пучок трассировался в реакционную камеру МСР-144, где устанавливались поглотители из золота, алюминия и плексигласа. Пучок ${}^6\text{He}$, трассируемый в МСР-144 без поглотителей и с поглотителями, регистрировался ионизационной камерой, установленной в фокальной плоскости анализатора (см. рис. 1). На рис. 2 представлены измеренные значения ширины энергетического распределения ${}^6\text{He}$ после снижения энергии частиц с $(60,9 \pm 0,4)$ МэВ

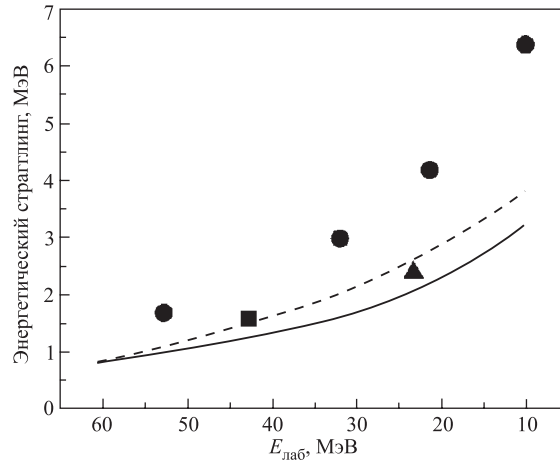


Рис. 2. Энергетический страгглинг пучка ${}^6\text{He}$ после прохождения им различных поглотителей: ● — Au, ■ — Al, ▲ — плексиглас. Пунктирная и сплошная кривые — расчеты с использованием кода SRIM-2008 [8] для поглотителей из Au и из Al или плексигласа соответственно

до указанных на графике значений энергии. Из рисунка видно, что энергетический страгглинг в легких поглотителях (алюминии и плексигласе) значительно ниже, чем в более тяжелом поглотителе (Au). Исходя из этого использование легких поглотителей для снижения первоначальной энергии пучка более предпочтительно. На рис. 2 представлены также расчеты энергетического страгглинга по коду SRIM-2008 [8]. Видно, что для легких поглотителей (Al и плексиглас) расчеты хорошо согласуются с экспериментом, тогда как для тяжелого поглотителя (Au) наблюдаются существенные отличия.

Еще одним фактором, снижающим интенсивность пучка, падающего на мишени, является его угловой разброс после прохождения поглотителей и как следствие — неполный захват частиц магнитным анализатором. С этой точки зрения, использование легких поглотителей также более предпочтительно.

Сочетание двух факторов, описанных выше, приводило к потерям интенсивности пучка на мишенях по сравнению с интенсивностью первоначального пучка приблизительно в 10 раз. Однако в рамках данной методики было получено гораздо лучшее энергетическое разрешение пучка, чем при использовании мишенных сборок с пассивными поглотителями, что позволило значительно улучшить точность экспериментов. Так, в эксперименте по измерению функции возбуждения реакций передачи нейтронов при взаимодействии ${}^6\text{He}$ с ${}^{197}\text{Au}$ при глубокоподбарьерных энергиях в рамках этой методики удалось уменьшить погрешности полученных данных по энергии

более чем в два раза [4]. При этом чувствительность описанной методики по величине измеряемых сечений составляла 10 мб, что бывает вполне достаточным для целого круга задач.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВНУТРЕННЕГО ПУЧКА ЦИКЛОТРОНА У-400 ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С УСКОРЕННЫМИ ИОНАМИ ${}^6\text{He}$ С ЭНЕРГИЕЙ ВБЛИЗИ КУЛОНОВСКОГО БАРЬЕРА РЕАКЦИЙ

Монохроматические пучки ионов ${}^6\text{He}$ образуются при ускорении внутри циклотрона У-400 — постускорителя комплекса DRIBs. Устанавливая мишени на различных радиусах траектории внутреннего пучка, можно менять его энергию в широком диапазоне. Интенсивность внутреннего пучка в несколько раз выше выведенного, а при вариации энергии нет необходимости использования поглотителей для снижения энергии пучка. Чтобы получить требуемую энергию пучка на мишени, достаточно установить сборку мишеней на расчетном радиусе и скорректировать ее значение после контрольного измерения.

Для пучка ускоряемых ионов ${}^6\text{He}^{+1}$ внутри циклотрона У-400 полная энергия определяется соотношением

$$E = 33,004R^{1,9943} \text{ (МэВ)},$$

где R — радиус орбиты в метрах.

Однако при проведении экспериментов на внутреннем пучке возникают следующие технические трудности:

1) Пучок ускоряемых ионов ${}^6\text{He}^{+1}$ может сопровождаться, особенно на малых радиусах траектории ускорения, потоком паразитных частиц ${}^{12}\text{C}^{+2}$ со сравнимой интенсивностью, ускоряемых на кратных гармониках циклотрона и имеющих такое же соотношение A/Z .

2) Измерение потока ионов, попадающих на мишень, необходимо проводить при наличии фона и наводок от высокочастотного электромагнитного поля и жесткого рентгеновского излучения, возникающего вследствие торможения паразитного пучка и случайных пробоев электрического поля на дуантах циклотрона.

3) Мишенный узел и устройства для мониторинга пучка и измерения его энергии должны быть достаточно компактными, чтобы поместиться в малом пространстве в долине между полюсами циклотрона.

В работе [9] была показана возможность разделения в циклотронных системах ускоряемых ионов с близким отношением массы к заряду с использованием разницы в дефектах масс при обеспечении необходимой стабильности токов питания основной обмотки и корректирующих катушек. Полностью

устранить поток фоновых частиц на мишень при работе на внутреннем пучке не представляется возможным, поэтому при разработке зонда для работы на внутреннем пучке необходимо было предусмотреть возможность контроля интенсивности и энергии частиц паразитного пучка.

Для работы на внутреннем пучке циклотрона был сконструирован и изготовлен специальный зонд. Головная часть зонда схематически показана на рис. 3. Она состоит из: корпуса с отверстием для пучка, которое закрывалось входной золотой рассеивающей фольгой, мишенного узла, коллектора тока, полупроводникового Si(Au)-детектора. Во время облучения внутри камеры циклотрона полупроводниковый детектор в головной части зонда находится в дополнительном экране с коллиматором для снижения наводок.

В экспериментах обычно использовалась сборка из нескольких тонких мишеней с пассивными поглотителями из алюминия для последовательного снижения энергии перед каждой из мишеней. Энергия пучка ${}^6\text{He}$ определялась из положения зонда (см. формулу), а также измерялась по упругому рассеянию ионов на входной золотой фольге с помощью полупроводникового Si(Au)-детектора (рис. 3). Наличие паразитного пучка ${}^{12}\text{C}$ также контролировалось по упругому рассеянию.

На рис. 4 представлены энергетические спектры рассеянных частиц пучка. При установке зонда на радиус 85 см (рис. 4, *а*) ($E({}^6\text{He}) = 25$ МэВ, $E({}^{12}\text{C}) = 50$ МэВ) вклад от примеси пучка ${}^{12}\text{C}$ составлял $\sim 1/10$ от основного пучка ${}^6\text{He}$. На больших радиусах он был несуществен (рис. 4, *б*).

Как видно из рисунка, измеренное энергетическое разрешение пучка ${}^6\text{He}$ составляло приблизительно 400–500 кэВ, что превосходило расчетную величину (150 кэВ). Это связано с большим телесным углом рассеяния ввиду близкого расположения рассеивающей фольги и детектора (~ 37 мм), а также с потерей энергии частицами, рассеянными на краях коллиматора и попадающими в полупроводниковый детектор.

Распределение по интенсивности внутреннего пучка на мишенях определялось методами активационного анализа. Золотая рассеивающая фольга после облучения разрезалась на вертикальные полоски одинаковой ширины (1 мм), после чего наведенная радиоактивность на каждой полоске измерялась на гамма-спектрометре. Распределение наведенной гамма-активности на мишени в зависимости от радиуса траектории пучка показано на рис. 5. По оси абсцисс отложено приращение L (мм) к зафиксированному в данной экспозиции радиусу $R = 85$ см траектории внутреннего пучка.

Из рис. 5 видно, что максимум распределения наведенной активности, а следовательно, и распределения плотности пучка на исследуемых мишенях соответствует минимальному радиусу (на краю мишени).

Непосредственное измерение тока пучка, прошедшего через мишень, осуществлялось по собранному на коллектор заряду частиц. Изолированный коллектор устанавливался за мишенной сборкой и имел выступы сверху и снизу

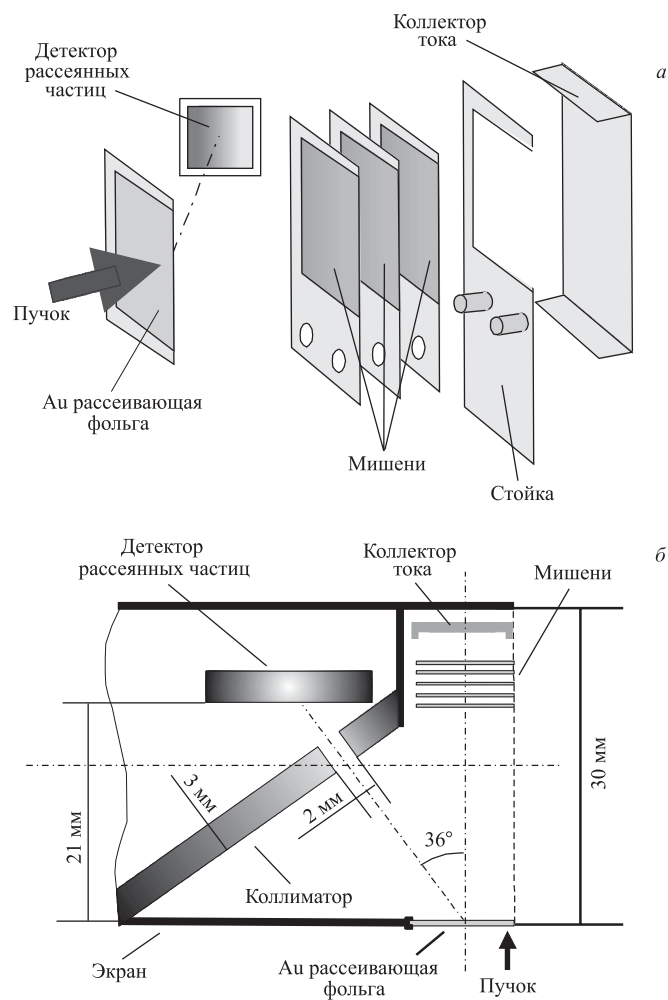


Рис. 3. Схематическое изображение головной части зонда: а) вид сбоку; б) вид сверху

для сбора вторичных электронов, выбиваемых тормозящимися в нем частицами. Измерение тока с коллектора проводилось пикоамперметром Кейтли-6485 (производство компании KEITHLEY Instruments, Inc) с разрешением 20 фА и цифровыми фильтрами со временами интегрирования, лежащими в диапазоне 0,2–100 мс. Пикоамперметр был дополнен входными аналоговыми LC-фильтрами с использованием паразитных емкостей кабеля. Информация с пикоамперметра периодически оцифровывалась системой набора информа-

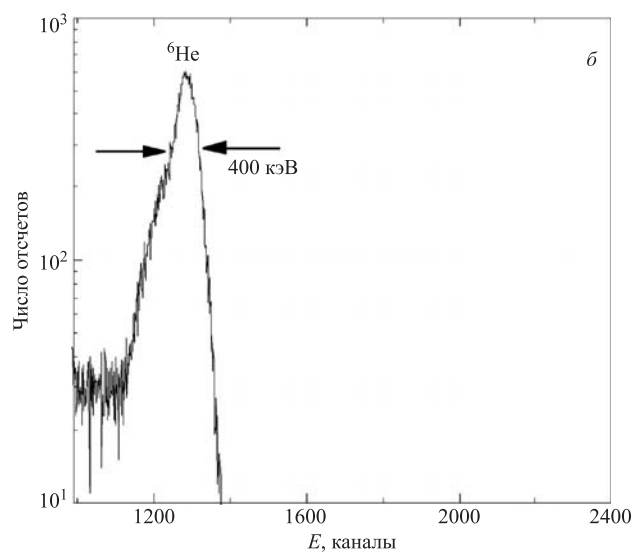
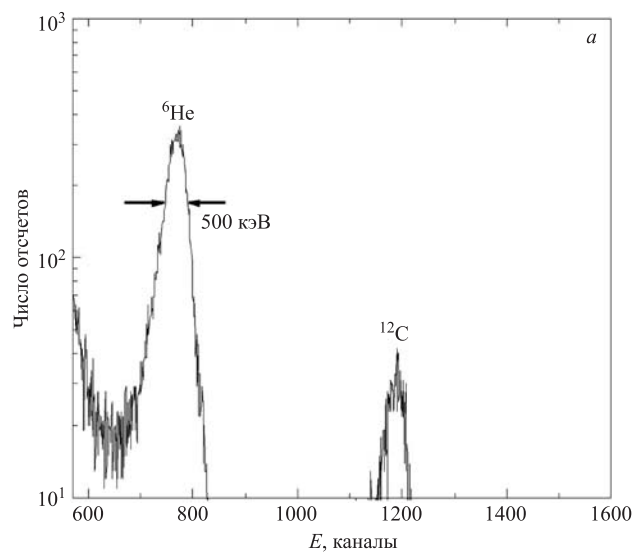


Рис. 4. Энергетические спектры частиц пучка ${}^6\text{He}$, рассеянного на золотой фольге. *a* — Спектр с мониторингового детектора, $R = 85$ см, $E({}^6\text{He}) = (25 \pm 0,25)$ МэВ, $E({}^{12}\text{C}) = (50 \pm 0,2)$ МэВ; *б* — спектр с мониторингового детектора, $R = 101$ см, $E({}^6\text{He}) = (35 \pm 0,2)$ МэВ

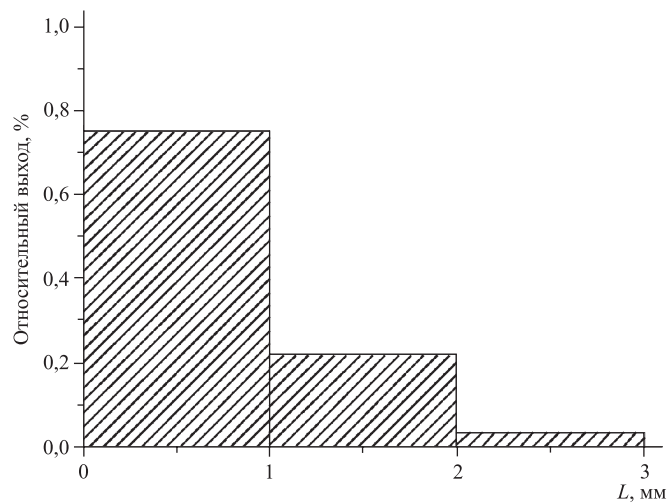


Рис. 5. Гистограмма распределения наведенной активности на мишени, облученной пучком ${}^6\text{He}$ ($R = 85$ см, $E({}^6\text{He}) = 25$ МэВ)

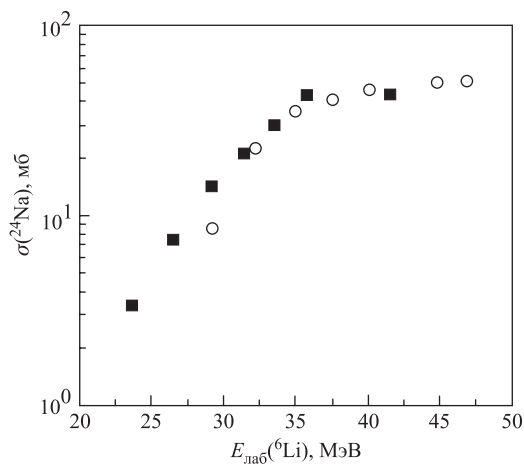


Рис. 6. Функция возбуждения реакции ${}^{27}\text{Al}({}^6\text{Li},\text{X}){}^{24}\text{Na}$: \circ — результаты настоящей работы, \blacksquare — данные работы [10]

ции, записывалась в память персонального компьютера, а также параллельно посылалась на пульт постускорителя DRIBs для оперативного контроля за интенсивностью пучка.

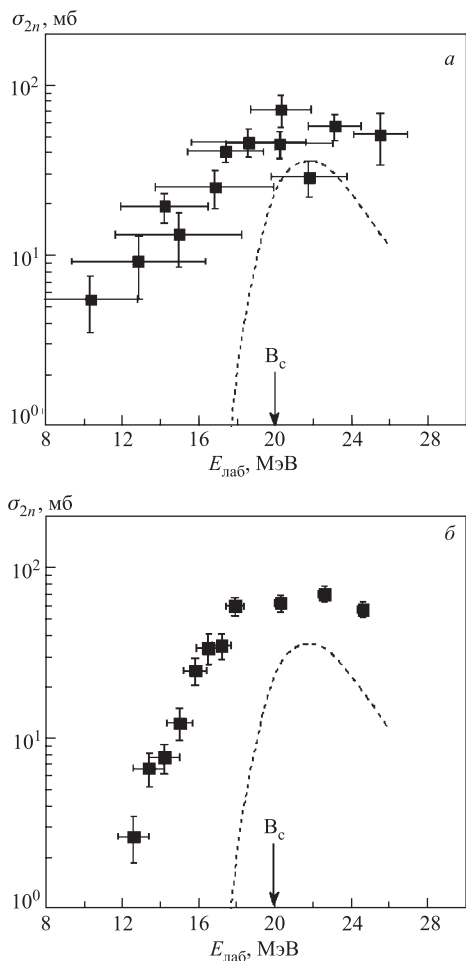


Рис. 7. Функции возбуждения для реакции $^{206}\text{Pb}(^6\text{He},2n)^{210}\text{Po}$. *a* — результаты, полученные на выведенном пучке ^6He с начальной энергией 60,5 МэВ после снижения энергии толстыми поглотителями (2006 г.); *б* — результаты, полученные с использованием внутреннего пучка постускорителя комплекса DRIBs — циклотрона У-400 (март 2008 г.)

Проверка и дополнительная калибровка прямого измерения тока пучка осуществлялись с использованием активационной методики. Для этого на внутреннем пучке ускоренных ионов ^6Li с интенсивностью 10^8 част./с облучались сборки мишеней из алюминия. После облучения была измерена

наведенная в алюминиевых фольгах гамма-активность и определены выходы изотопов ^{24}Na , образующихся в реакции $^{27}\text{Al}+^6\text{Li}$.

Из рис. 6 видно, что полученные нами значения сечения для тестовой реакции находятся в хорошем согласии с литературными данными [10]. Этот факт подтверждает правильность измерения интенсивности ускоренных ионов нашим коллектором тока.

Следует заметить, что в исследуемом нами диапазоне энергий пучка ^6He паразитный пучок ^{12}C имеет энергию существенно ниже кулоновского барьера реакции и не может внести заметного вклада в образование исследуемых нами продуктов ядерных реакций.

Кроме этого, в эксперименте толщина самих мишеней и их подложек выбиралась таким образом, чтобы полностью поглотить пучок ионов ^{12}C и измерять коллектором только ток пучка ^6He .

На рис. 7 приведены экспериментальные значения сечений образования ^{210}Po в зависимости от энергии ионов ^6He (функция возбуждения), измеренные в реакции $^{206}\text{Pb}(^6\text{He}, 2n)$ в двух экспериментах. Рис. 7, *a* соответствует результатам, полученным на выведенном пучке ^6He с начальной энергией 60,5 МэВ с использованием толстых поглотителей для сброса энергии. На рис. 7, *б* показана функция возбуждения, полученная при облучении мишеней ^{206}Pb на внутреннем пучке ^6He . Как видно из рисунка, энергетическое разрешение в данном эксперименте было не хуже 800 кэВ. Этот результат с высокой достоверностью (высоким энергетическим разрешением) подтверждает ранее сделанное в работе [3] заключение о сильном увеличении сечения реакции $^{206}\text{Pb}(^6\text{He}, 2n)^{210}\text{Po}$ в подбарьерной области энергий. Даже при энергии частиц ^6He на 7 МэВ ниже кулоновского барьера сечение реакции полного слияния составляет заметное значение около 10 мб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для проведения экспериментов с ускоренными пучками частиц ^6He с энергиями вблизи кулоновского барьера ядерных реакций разработаны и применены две методики.

В первой методике [3] широкодиапазонный магнитный спектрометр МСП-144 [4] использовался в качестве монохроматора пучка частиц ^6He низкой энергии, полученного после прохождения им водородосодержащего поглотителя соответствующей толщины. Линейный размер мишени вдоль фокальной плоскости (18 мм) определял разрешение пучка ^6He по энергии, которое составляло 500 кэВ.

Во второй методике для исследования ядерных реакций с ускоренными пучками частиц ^6He без потери интенсивности использовался зонд, позволяющий проводить эксперименты на внутреннем пучке постускорителя (цикло-

трона У-400) комплекса DRIBs. Это позволило получать на мишени пучок ${}^6\text{He}$ требуемой энергии с разрешением пучка 150 кэВ.

Авторы выражают благодарность Ю.Ц.Оганесяну и С.Н.Дмитриеву за плодотворное обсуждение настоящей работы и ценные предложения в процессе ее выполнения. Мы благодарны также коллективу отдела ускорителей за обеспечение работы комплекса DRIBs, а также конструкторам В.В.Бехтереву, И.А.Харитоновой и В.В.Щетинкиной — за разработку узлов зонда и детекторных систем фокальной плоскости спектрометра, Г.Ф.Исаеву — за помощь в работе.

Настоящая работа была выполнена при поддержке гранта РФФИ 07-02-00251а, а также гранта полномочного представителя Чешской Республики в ОИЯИ.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Пенионжжевич Ю. Э.* // ЭЧАЯ. 1994. Т. 25. С. 930.
2. *Oganessian Yu. Ts., Gulbekian G. G.* // Proc. of the Int. Conf. «Nuclear Shells — 50 Years», Dubna, Russia, 1999 / Eds. Oganessian Yu. Ts., von Oertzen W. and Kalpakchieva R. Singapore: World Scientific. 2000. P. 61–75.
3. *Penionzhkevich Yu. E. et al.* // Письма в ЭЧАЯ. 2006. Т. 3, № 6, С. 38; JINR Preprint E7-2005-106, Dubna, 2005.
4. *Penionzhkevich Yu. E. et al.* // Eur. Phys. J. A., 2007. V. 31. P. 185; JINR Preprint E7-2006-75, Dubna, 2006.
5. *Di Pietro A. et al.* // Phys. Rev. C. 2004. V. 69. P. 044613.
6. *Skobelev N. K. et al.* // Nucl. Instr. Meth. B. 2005. V. 227. P. 471.
7. *Belozarov A. V. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1998. V. 411. P. 343.
8. <http://www.srim.org/>
9. *Гульбекян Г. Г., Гикал Б. Н.* Сообщение ОИЯИ Р9-87-92. Дубна, 1992.
10. *Ladenbauer I.-M. et al.* // Phys. Rev. 1961. V. 123. P. 1368.

Получено 13 октября 2008 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 12.11.2008.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,0. Уч.-изд. л. 1,22. Тираж 325 экз. Заказ № 56391.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/