

УДК 539.17.01, 539.142, 539.143

ПЕРВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА НОВОМ ФРАГМЕНТ-СЕПАРАТОРЕ АКУЛИНА-2

© 2019 г. А. С. Фомичев^{1,2,*}, А. А. Безбах^{1,3}, С. Г. Белогуров^{1,5}, Р. Вольски¹, Э. М. Газеева¹,
А. В. Горшков¹, Л. В. Григоренко^{1,4,5}, Б. Залевски^{1,6}, Г. Каминьски^{1,6}, С. А. Крупко¹,
И. А. Музалевский^{1,3}, Е. Ю. Никольский^{1,4}, Ю. Л. Парфенова¹, С. И. Сидорчук¹,
Р. С. Слепнев¹, Г. М. Тер-Акопян^{1,2}, В. Худоба^{1,3}, П. Г. Шаров¹

¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

²Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
Московской области Университет “Дубна”, Дубна, Россия

³Силезский Университет в Опаве, Опава, Чешская Республика

⁴Национальный исследовательский центр “Курчатовский Институт”, Москва, Россия

⁵Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования
“Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, Россия

⁶Лаборатория тяжелых ионов Варшавского университета, Варшава, Польша

*E-mail: fomichev@jinr.ru

Поступила в редакцию 01.10.2018 г.

После доработки 15.10.2018 г.

Принята к публикации 19.11.2018 г.

Описаны основные характеристики нового фрагмент-сепаратора радиоактивных ядер, недавно введенного в эксплуатацию в Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н. Флёрова ОИЯИ и работающего при ускорителе тяжелых ионов У-400М в энергетическом диапазоне для радиоактивных пучков 10–50 МэВ/нуклон. Приводятся предварительные результаты первых экспериментов, выполненных в 2018 году на этой установке, а также обсуждается научная программа исследований на среднесрочную перспективу.

DOI: 10.1134/S0367676519040100

ВВЕДЕНИЕ

Исследования с пучками радиоактивных изотопов (РИ) при энергиях от нескольких А · МэВ вплоть до ~1 А · ГэВ составляют наиболее интенсивно развивающуюся область современной ядерной физики. Лишь для самых легких нуклидов границы ядерной стабильности достигнуты и в некоторой степени изучены [1, 2]. Уже для изотопов с $Z > 5$ экспериментальная информация о структуре ядер, находящихся вблизи и за границами протонной/нейтронной стабильности, оказывается весьма скудной и противоречивой [3]. Следовательно, области как теоретических, так и экспериментальных исследований в этом направлении далеко не исчерпаны [4–6]. Для этих целей в крупных мировых центрах (FAIR – Германия, FRIB – США, RIBF – Япония, SPIRAL2 – Франция, ISOLDE – Швейцария, HIAF – Китай, и др.) создаются или уже функционируют фабрики по производству интенсивных пучков РИ, оборудованные мощной детектирующей аппаратурой [7–12]. Единственным научным центром на постсоветском пространстве, где ведутся подобные ис-

следования, является Лаборатория ядерных реакций им. Г.Н. Флёрова ОИЯИ, где на первичных пучках тяжелых ионов циклотрона У-400М работает комплекс установок АКУЛИНА и АКУЛИНА-2 [5, 6]. В данной работе описаны основные характеристики пучков РИ нового фрагмент-сепаратора АКУЛИНА-2, недавно проверенные экспериментально, приводятся предварительные результаты первых экспериментов на этой установке, а также сообщается о программе исследований на ближайшие несколько лет.

ФРАГМЕНТ-СЕПАРАТОР АКУЛИНА-2

Фрагмент-сепаратор АКУЛИНА-2, действующий на базе циклотрона У-400М, детально описан в обзоре [6] в сравнении с другими установками, представляющими источники пучков РИ, действующими и сооружаемыми в ряде лабораторий мира. В обзоре приведены базовые характеристики сепаратора АКУЛИНА-2 и дополнительного оборудования, необходимого для проведения экспериментов на качественно новом уровне

(дипольный магнит для отклонения заряженных частиц под передними углами и радиочастотный фильтр для очистки требуемого пучка РИ). В период до 2023 г. в ЛЯР ОИЯИ будет проведена модернизация комплекса РИ, включающая повышение энергии и интенсивности первичных пучков на ускорителе У-400М, формирование ISOL-метода получения пучков РИ высокого качества, газо-вакуумную систему для работы с криогенными мишенями изотопов гелия и водорода, включая тритий. Авторами [6] также представлена мотивация нескольких первоочередных экспериментов на установке АКУЛИНА-2, а именно, изучение таких изотопов как ${}^7\text{H}$, ${}^{17}\text{Ne}$, ${}^{26}\text{O}$, ${}^{26}\text{S}$.

В период 2015–2016 гг. фрагмент-сепаратор работал в тестовом режиме. Проводилась отладка систем управления и контроля вакуума, питания магнитов, мониторингования первичного и вторичного пучков, узла производящей мишени, системы подвижных щелей и некоторых других устройств. Результатом этой работы явилось получение первых пучков РИ и измерение их основных характеристик: интенсивности, поперечных размеров в фокальных плоскостях, очистки от примесей, импульсного захвата, разброса по энергии и углу траекторий радиоактивных ядер. Так, в реакции фрагментации первичного пучка ${}^{15}\text{N}$ (49.7 МэВ/нуклон) на бериллиевой мишени толщиной 2 мм были измерены указанные параметры для целого ряда радиоактивных пучков: ${}^{6,8}\text{He}$, ${}^{9,11}\text{Li}$, ${}^{11,12}\text{Be}$, ${}^{14,15}\text{B}$ и др. Полученные интенсивности радиоактивных пучков в среднем в 15 раз превышают значения, получаемые на сепараторе АКУЛИНА, что хорошо согласуется с расчетами. Другие характеристики также хорошо согласуются с ожидаемыми значениями, полученными с использованием кодов TRANSPORT, INTENSITY и LISE++ (см. детали в работе [6]).

ПЕРВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ: ${}^5\text{H}$ И ${}^7\text{H}$

В 2017 году стало возможным проведение первых экспериментов на комплексе У-400М + АКУЛИНА-2, что позволило получить реалистичные оценки условий реализации амбициозной научной программы, предложенной авторами [6]. Специальный интерес представляет оптимизация постановки экспериментов, направленных на определение энергии и ширины основного состояния ядерной системы ${}^7\text{H}$. Специфический интерес к проблеме ${}^7\text{H}$ обусловлен предсказанием ${}^7\text{H}$ в качестве истинного $4n$ излучателя [13], т.е. ядра, испытывающего радиоактивный $4n$ -распад. Попытки получения данных о свойствах основного состояния ядра ${}^7\text{H}$ предпринимались ранее неоднократно, см. [5, 14, 15] и ссылки внутри. Так, авторы работы [15] для пучка ${}^8\text{He}$ с энергией 42 МэВ/нуклон, бомбардирующего газовую

мишень дейтерия, получили верхний предел $30 \text{ мкб} \cdot \text{ср}^{-1}$ для сечения реакции ${}^2\text{H}({}^8\text{He}, {}^3\text{He}){}^7\text{H}$, приводящей к заселению основного состояния ${}^7\text{H}$. Энергия распада этого состояния, распадающегося с испусканием пяти тел, ${}^7\text{H} \rightarrow t + 4n$, грубо оценена в этой работе значением ~ 2 МэВ.

Более точное определение энергии основного состояния может быть достигнуто при условии одновременного измерения импульсов ядер отдачи ${}^3\text{He}$ и продуктов распада ядра ${}^7\text{H}$. Для подготовки методической базы такого эксперимента нами исследовалась реакция передачи одного протона от снаряда ${}^6\text{He}$ ($E \sim 25$ МэВ/нуклон) на ядро дейтерия (мишень из дейтерированного полиэтилена CD_2 , 20 мкм). Целью эксперимента было определение сечений заселения основного и возбужденных состояний тяжелого изотопа водорода ${}^5\text{H}$ в реакции ${}^2\text{H}({}^6\text{He}, {}^3\text{He}){}^5\text{H}$. Ранее такая реакция была изучена нами на установке АКУЛИНА [16] при энергии пучка ${}^6\text{He}$ 22 МэВ/нуклон. Недавно эту реакцию исследовали в MSU на сепараторе A1900 при энергии ${}^6\text{He}$ 55 МэВ/нуклон [17]. Основное методическое отличие работы, проведенной на сепараторе АКУЛИНА-2, заключалось в использовании в ΔE - E -телескопе более тонкого кремниевого ΔE -детектора толщиной 22 мкм. Это позволило идентифицировать короткопробежные ядра отдачи ${}^3\text{He}$ в диапазоне углов $\theta_{\text{лаб}} \sim 4^\circ$ – 20° (см. рис. 1), что соответствовало полной энергии ядер ${}^3\text{He}$, испущенных из мишени в реакции ${}^2\text{H}({}^6\text{He}, {}^3\text{He}){}^5\text{H}_{\text{г.с.}}$, от 8.5 до 11 МэВ (для передних углов в системе центра масс).

Детектирующая система эксперимента данной работы включала два ΔE - E -телескопа, предназначенных для регистрации двух продуктов реакции – ${}^3\text{He}$ и тритонов, летящих под передними углами в лабораторной системе координат. Телескоп для регистрации ${}^3\text{He}$ состоял из двух кремниевых детекторов, ΔE -детектора толщиной 22 мкм (площадь $50 \times 50 \text{ мм}^2$, сегментация на 16 стрипов) и E -детектора толщиной 1000 мкм (площадь $60 \times 60 \text{ мм}^2$, сегментация 32 стрипа по горизонтали и 16 стрипов по вертикали). За вторым слоем находился массив из 16 сцинтилляционных детекторов для регистрации длиннопробежных заряженных частиц, который также использовался как вето-детектор для очистки ΔE - E -спектра от фоновых событий, образующихся в результате прострела первых двух слоев кремния. Сцинтилляционные детекторы представляли собой идентичные кристаллы CsI(Tl) размерами $16.5 \times 16.5 \times 50 \text{ мм}$, оптически соединенными с фотомножителями R9880U-20 Hamamatsu. Этот телескоп, установленный на расстоянии 230 мм от мишени (расстояние до второго 1000 мкм кремниевого детектора), обеспечивал регистрацию ${}^3\text{He}$ в угловом диапазоне от 4.6° до 19.4° . Второй телескоп, со-

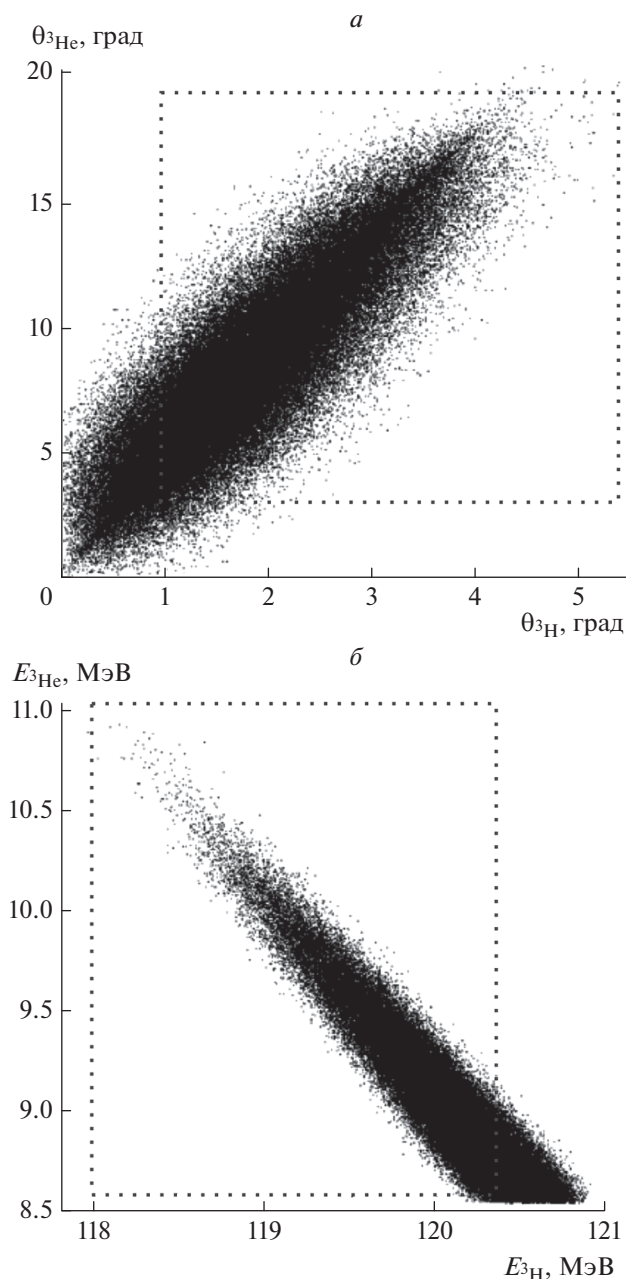


Рис. 1. Результаты моделирования методом Монте-Карло событий для реакции ${}^6\text{He}(d, {}^3\text{He}){}^5\text{H}$ при энергии ${}^6\text{He}$ 25 МэВ/нуклон в представлении $\theta_{3\text{He}} - \theta_{3\text{H}}$ (а) и $E_{3\text{He}} - E_{3\text{H}}$ в лабораторной системе (б). Пунктиром обозначены зоны, которые обуславливались двухплечевой геометрией эксперимента; эффективность регистрации ${}^3\text{He}-t$ -совпадений составляла порядка 60%.

стоящий из аналогичных элементов (1000 мкм кремниевый детектор площадью 60×60 мм², сегментацией на 32 стрипа по горизонтали и 16 стрипов по вертикали, и массив CsI(Tl)/ФЭУ), был установлен на противоположной стороне в

плоскости реакции на расстоянии 290 мм от мишени и обеспечивал регистрацию высокоэнергичных тритонов, испущенных в угловом диапазоне $\theta_{\text{лаб}} = 1.0^\circ - 12.8^\circ$. На рис. 1 представлены результаты моделирования методом Монте-Карло ожидаемых событий эксперимента, выполненных с учетом основных определяющих факторов: кинематика реакции, толщина мишени, энергия пучка и его профиль на мишени, угловое и энергетическое разрешение телескопов. Пунктирной линией выделены зоны, в пределах которых около 60% от полного числа событий исследуемой реакции были доступны для регистрации двумя телескопами в режиме совпадений.

В этом эксперименте были решены несколько принципиальных методических вопросов. Во-первых, на фрагмент-сепараторе АКУЛИНА-2 удалось получить интенсивный пучок ${}^6\text{He}$ ($I \sim 10^5 \text{ с}^{-1}$) с энергией 25 МэВ/нуклон высокого качества: доля ядер ${}^6\text{He}$ в пучке составляла более 90%, поперечный размер пучка на мишени не превышал 17 мм (полная ширина на половине высоты (ПШПВ)), см. рис. 2. Во-вторых, для такого пучка была отлажена работа телескопов, регистрировавших в течение недели продукты реакций, испущенные под передними углами в условиях предельной загрузки (до $8 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$). В-третьих, был отработан механизм учета неоднородности толщины 22 мкм кремниевое детектора, карта толщины которого была измерена отдельно с помощью альфа-частиц от источника ${}^{226}\text{Ra}$ (измеренная толщина детектора в зависимости от позиции варьировалась от 19 до 26 мкм). Коррекция толщины тонкого кремниевое детектора в зависимости от места попадания частиц позволила провести идентификацию ядер отдачи ${}^3\text{He}$ низкой энергии в спектре $\Delta E - E$. Энергетическое разрешение кремниевых ΔE , E -детекторов телескопа составляло 250 и 50 кэВ (ПШПВ), соответственно. В результате, после завершения обработки данных, будет определено количество совпадений ${}^3\text{He}-t$, отвечающих кинематике реакции ${}^2\text{H}({}^6\text{He}, {}^3\text{He}){}^5\text{H}$, и сделано сравнение с оценками моделирования методом Монте-Карло.

Отлаженная методика регистрации ${}^3\text{He}-t$ -совпадений позволяет планировать эксперимент по изучению сверхтяжелого изотопа водорода ${}^7\text{H}$ при его получении в реакции передачи протона из ядра-снаряда ${}^8\text{He}$. Постановка такого эксперимента запланирована на период 2018–19 гг. В этом эксперименте будет применена газовая криогенная дейтериевая мишень толщиной $3 \cdot 10^{20} \text{ ат.} \cdot \text{см}^{-2}$ вместо CD_2 , что существенно улучшает энергетическое разрешение в методе недостающей массы при том же количестве ядер дейтерия. Второе отличие будет заключаться в детектирующей системе: планируется установить два идентичных телескопа для

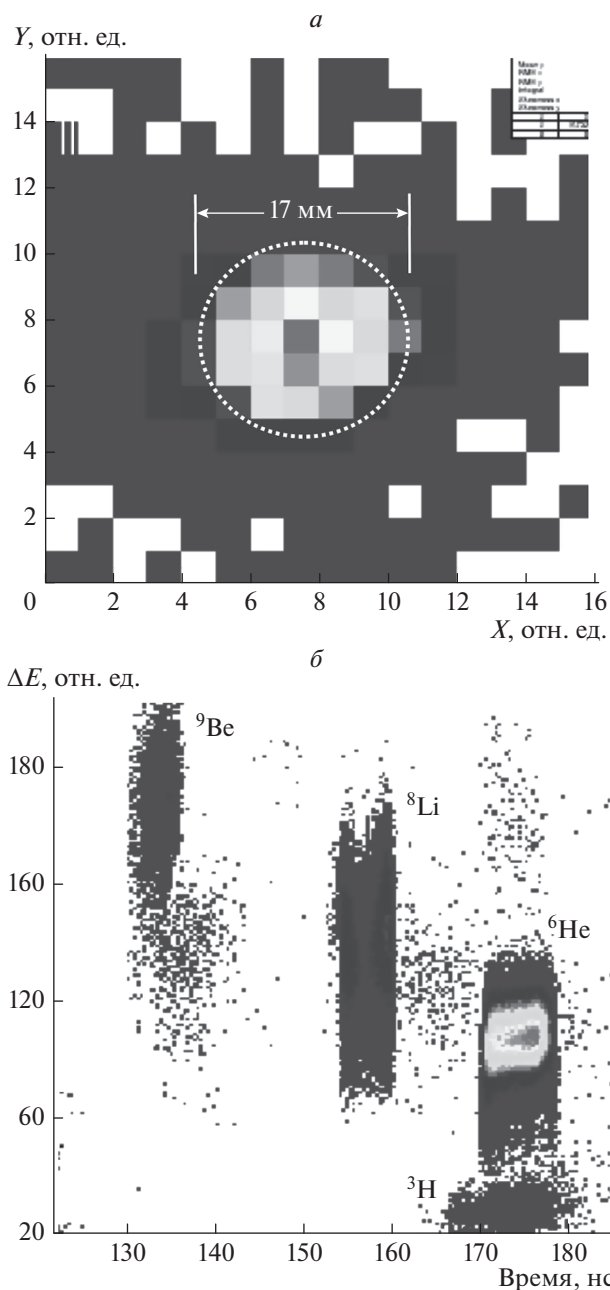


Рис. 2. Качество радиоактивного пучка ${}^6\text{He}$ (25 МэВ/нуклон) в финальной фокальной плоскости сепаратора АКУЛИНА-2. Поперечный размер, измеренный с помощью многопроволочной пропорциональной камеры (а), и состав пучка РИ, определенный по потерям в пластике толщиной 200 мкм и времени пролета частиц на базе 12.35 м (б). Количество примесей ${}^3\text{H}$, ${}^8\text{Li}$ и ${}^9\text{Be}$ не превышало 10% при работе с бериллиевым клином 3 мм и импульсным захватом $\pm 3\%$ в дисперсионной фокальной плоскости сепаратора.

регистрации ядер ${}^3\text{He}$, испущенных из мишени в угловых диапазонах $\theta_{\text{лаб}} = \pm(5^\circ-20^\circ)$ по отношению к оси пучка, и один телескоп на оси пучка для регистрации тритонов, вылетевших в перед-

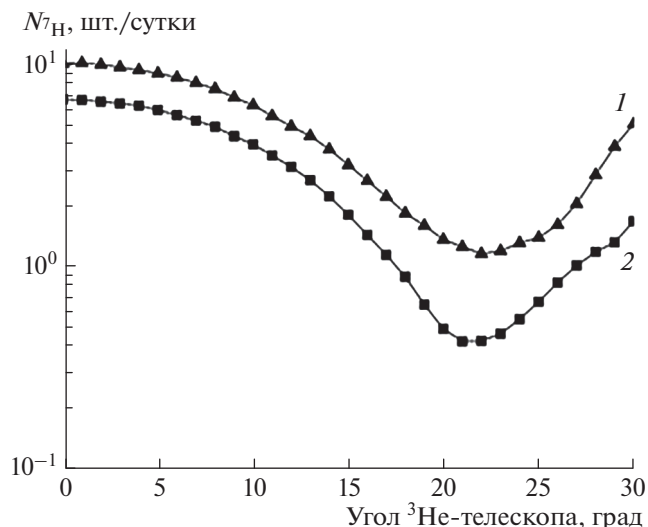


Рис. 3. Оценка скорости набора событий регистрации ядер ${}^7\text{H}$ ($E^* = 0.5$ МэВ), полученных в реакции ${}^2\text{H}({}^8\text{He}, {}^3\text{He}){}^7\text{H}$. Предполагается, что регистрация ядер ${}^3\text{He}$ и ${}^3\text{H}$ проводится двумя телескопами, отстоящими от мишени на расстоянии 20 (1) и 30 см (2). Скорость счета искомым событий показана в зависимости от установленного угла ${}^3\text{He}$ -телескопа (с учетом телесного угла) при интенсивности пучка ${}^8\text{He}$ $5 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ и толщине D_2 -мишени $3 \cdot 10^{20} \text{ ат.} \cdot \text{см}^{-2}$. Расчеты по коду DWBA нормализованы на экспериментально измеренное значение $d\sigma/d\Omega = 30 \text{ мкб} \cdot \text{ср}^{-1}$ для угла 10° в системе центра масс [15]. Ожидаемое энергетическое разрешение ΔE при установке ${}^3\text{He}$ -телескопа под углом $\theta_{\text{лаб}} = 20^\circ$ на расстоянии 20/30 см от мишени составит 1.19/1.15 МэВ соответственно.

нем направлении в угловом диапазоне $\leq 6^\circ$. В такой постановке эксперимента эффективность регистрации ${}^3\text{He}$ - t -совпадений для $E_{7\text{H}} \leq 2$ МэВ составит более 95%.

На рис. 3 приведены оценки скорости счета событий ${}^7\text{H}$ двумя телескопами за один день экспозиции, получаемой при изучении реакции ${}^2\text{H}({}^8\text{He}, {}^3\text{He}){}^7\text{H}_{\text{г.с.}}$ ($E^* = 0.5$ МэВ). Расчеты сечения реакции сделаны при помощи кода DWBA с нормировкой на значение $d\sigma/d\Omega = 30 \text{ мкб} \cdot \text{ср}^{-1}$ для $\theta_{\text{ц.м.}} = 10^\circ$, согласно экспериментальным данным работы [15]. Так, принимая во внимание реальные условия эксперимента для установленных углов вылета ядер ${}^3\text{He} \pm (5^\circ-20^\circ)$ и расстояния 20 см от мишени до ${}^3\text{He}$ -телескопов, ожидается регистрация порядка пяти событий ${}^7\text{H}$ в день в спектре недостающей массы, который будет измерен с энергетическим разрешением около 1.2 МэВ. Расчеты сделаны для интенсивности пучка ${}^8\text{He}$ $5 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ и для толщины мишени $3 \cdot 10^{20} \text{ ат.} \cdot \text{см}^{-2}$, что соответствует толщине газовой ячейки 6 мм,

наполненной дейтерием при давлении 1 атм и охлажденной до температуры 30 К. Основной вклад в энергетическое разрешение эксперимента вносит толщина газовой мишени и процессы многократного рассеяния для низкоэнергетических частиц, что приводит к значительному искажению их траекторий и тем самым к потере углового разрешения для ${}^3\text{He}$. Зависимость разрешения от давления газа почти линейная, и при уменьшении давления дейтерия в газовой ячейке в 2 раза итоговое разрешение эксперимента будет составлять 0.8 МэВ. Следует заметить, что в работе [15] разрешение было на уровне 2 МэВ, следовательно, можно рассчитывать на заметное улучшение качества данных в планируемом эксперименте на установке АКУЛИНА-2.

РЕАКЦИИ РАССЕЙНИЯ ${}^6\text{He}$ НА ДЕЙТЕРИИ

Упругое рассеяние является неотъемлемым атрибутом всех процессов, происходящих при взаимодействии атомных ядер. Помимо информации о свойствах ядер и ядерном взаимодействии оптические потенциалы, непосредственно извлекаемые из данных по упругому рассеянию, находят широкое применение практически во всех моделях, связанных с описанием динамики ядерного взаимодействия (метод искаженных волн, метод связанных каналов и т.п.). Знание оптических потенциалов значительно повышает надежность получения информации о структуре ядра из экспериментов по изучению ядерных реакций. Хорошо известно, что глобальная параметризация оптических потенциалов, успешно применяемая в области тяжелых и средних ядер, сталкивается с серьезными проблемами при рассмотрении ядер легких. Очевидно это связано со сравнительно небольшим числом нуклонов и проявлением кластерной структуры легких ядер, что приводит к проявлениям специфических особенностей ядерного взаимодействия при переходе от одного ядра к другому, соседнему с ним. К настоящему времени экспериментальные данные по упругому рассеянию дейтронов на ядре ${}^6\text{He}$ в литературе отсутствуют. В то же время изучение взаимодействия этой пары представляет несомненный интерес, поскольку оба ядра слабо связаны и характеризуются протяженной пространственной структурой, что может проявиться в специфике угловых распределений упругого рассеяния, например, в сравнении с упругим рассеянием ${}^6\text{He}$ на протонах [18].

Ядро ${}^6\text{He}$ является слабосвязанным (пороги одно- и двухнейтронного распада 1.87 и 0.97 МэВ соответственно) и не имеет нуклонно-стабильных возбужденных состояний. Хорошо известно первое возбужденное состояние (2^+ , 1.8 МэВ). Однако вопрос о существовании низколежащих

(<10 МэВ) возбужденных состояний не является закрытым. Есть теоретические предсказания о проявлении мягкой дипольной моды возбуждения при энергии 4–6 МэВ, которые пока не нашли убедительного экспериментального подтверждения. В ряде экспериментальных работ докладывалось о наблюдении резонансов в различных реакциях (передачи, зарядово-обменных, поглощения медленных пионов), но, как правило, консенсус отсутствует как в экспериментальных данных, так и в теоретических расчетах [19].

На установке АКУЛИНА-2 были проведены измерения упругого и неупругого рассеяния на дейтериевой мишени пучка ядер ${}^6\text{He}$ с энергией 25 МэВ/нуклон. Дейтериевая мишень и телескопы детекторов, использованные в этих экспериментах, были описаны в разделе 2. Отличие заключалось лишь в отсутствии тонкого (22 мкм) кремниевого детектора, т.е. оба телескопа были идентичными. Было четыре серии измерений, различающихся выбором углов установки телескопов, регистрировавших в совпадении дейтроны отдачи и ядра ${}^6\text{He}$ и ${}^4\text{He}$, отвечающие событиям упругого и неупругого рассеяния. Диапазоны измеряемых углов рассеяния в каждой последующей экспозиции перекрывались с предыдущей с целью надежной нормировки. На рис. 4 показаны наблюдаемые спектры в одной из экспозиций. В результате двухдневного эксперимента была измерена зависимость сечения упругого и неупругого рассеяния для системы ${}^6\text{He}-d$ в широком диапазоне углов $\theta_{\text{ц.м.}} = 20^\circ - 140^\circ$ с достаточно высокой статистикой, данные находятся в завершающей стадии обработки.

ПОСТАНОВКА ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В рамках подготовки к экспериментам “второго дня” на фрагмент-сепараторе АКУЛИНА-2 состоялся двухдневный эксперимент с пучком ${}^9\text{Li}$ ($E = 25$ МэВ/нуклон, $I \sim 8 \cdot 10^4$ с $^{-1}$). Цель опыта заключалась в отладке методики регистрации совпадений нейтронов, летящих вперед, с протонами, летящими под задними углами, в реакции $d({}^9\text{Li}, p){}^{10}\text{Li} \rightarrow n + {}^9\text{Li}$. Для регистрации протонов использовался кольцевой кремниевый детектор толщиной 1000 мкм (с внешним и внутренним диаметрами 82 и 32 мм соответственно, сегментация 16 секторов и 16 колец), установленный до мишени CD_2 по ходу пучка на расстоянии 100 мм. Нейтроны в переднем конусе регистрировались массивом из 32-х детекторов на основе сцинтилляторов стилибена (толщиной 50 мм и диаметром 80 мм) [20], установленным на расстоянии 3.2 м за мишенью. Было зарегистрировано порядка 10 событий $p-n$ -совпадений, которые можно отнести к наблюдению распада низколежащего состоя-

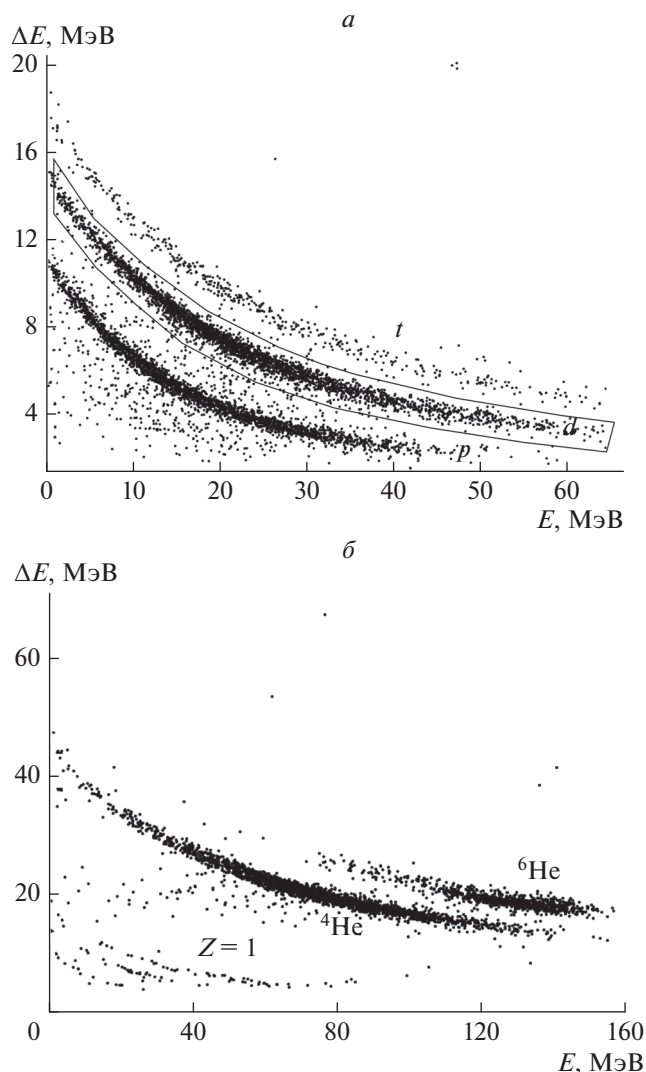


Рис. 4. Идентификация событий упругого и неупругого взаимодействия для системы ${}^6\text{He} + d$ при помощи двух идентичных телескопов, состоящих из кремниевых детектора толщиной 1 мм и массива сцинтилляционных детекторов. События, представленные на панели (б) для ведомого телескопа, отвечают совпадениям с дейтронами, отобранными в мастер-телескопе (а). Данные по упругому рассеянию соответствуют угловому диапазону $\theta_{\text{ц.м.}} = 40^\circ - 105^\circ$.

ния ${}^{10}\text{Li}$, находящегося при энергии $E < 500$ кэВ над порогом. Полученная информация необходима для подготовки и проведения экспериментов подобного класса [21].

Постановка экспериментов в среднесрочной перспективе планируется с подключением дополнительного оборудования, такого как спектрометр заряженных частиц, вылетающих под передними углами, на базе дипольного магнита с годоскопом заряженных частиц и радиочастотный фильтр, очищающий требуемый пучок РИ от

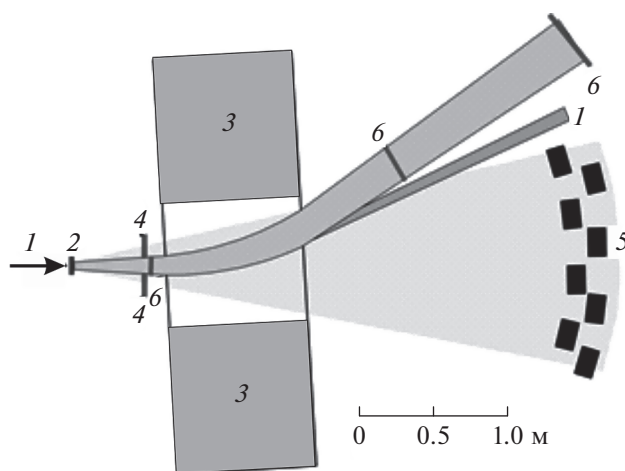


Рис. 5. Схема экспериментов по изучению ядер ${}^{17}\text{Ne}$, ${}^{26}\text{S}$ и ${}^{26}\text{O}$ с использованием криогенных мишеней изотопов водорода (H_2 или T_2) и дополнительного оборудования (ВЧ-фильтра и магнитного спектрометра). Показаны пучок РИ (1), мишень (2), дипольный магнит (3), телескопы (4) для регистрации d и t в реакциях $p({}^{18}\text{Ne}, d)$ и $p({}^{28}\text{S}, t)$, в случае $t({}^{24}\text{O}, p)$ телескопы для регистрации протонов в задней полусфере перемещаются в положение до мишени, массив нейтронных детекторов (5) на базе кристаллов стибьена, массив координатных детекторов (6) для регистрации ядер-остатков и легких фрагментов, образующихся при распаде изучаемых систем.

нежелательных фрагментов. Назначение и принцип работы этих устройств описаны в обзоре [6]. Это оборудование позволит на качественно новом уровне проводить опыты для дальнейшего изучения изотопов ${}^{17}\text{Ne}$ и ${}^{26}\text{S}$, получаемых в реакциях ${}^1\text{H}({}^{18}\text{Ne}, d){}^{17}\text{Ne}$ и ${}^1\text{H}({}^{28}\text{S}, t){}^{26}\text{S}$ соответственно. Еще одним устройством, делающим установку АКУЛИНА-2 уникальной в плане выбора физической мишени, является комплекс криогенных мишеней изотопов гелия и водорода, включая тритий, создание которого запланировано в 2019 г. Среди изучаемых ядер интерес представляет ${}^{26}\text{O}$. Авторы работы [22] сообщили, что ими был получен верхний предел энергии $2n$ -распада $E_{\text{g.s.}} < 53$ кэВ для основного состояния ${}^{26}\text{O}$ (указанное значение верхнего предела соответствует среднеквадратичной ошибке). Авторы работы [23] оценили энергию резонанса основного состояния ${}^{26}\text{O}$ $E_{\text{g.s.}} = 18$ кэВ. Приведенные в статье уровни ошибок, статистической и систематической, составляют ± 3 и ± 4 кэВ соответственно.

Типичная схема рассматриваемых нами экспериментов приведена на рис. 5. В отличие от работ [22, 23], в которых ${}^{26}\text{O}$ получался в реакции фрагментации ядер ${}^{27}\text{F}$ высокой энергии, нами предложена реакция ${}^3\text{H}({}^{24}\text{O}, p){}^{26}\text{O}$ [6]. В эксперименте может быть достигнута светимость на уров-

не $2 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ и разрешение $\sigma \sim 7 \text{ кэВ}$ в определении энергии в измеряемом спектре состояний ядра ^{26}O .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведение экспериментов с радиоактивными пучками на качественно новом уровне стало возможным на комплексе У-400М + АКУЛИНА-2, недавно введенном в эксплуатацию. Характеристики пучков РИ, проверенные экспериментально для реакции фрагментации ^{15}N (49.7 МэВ/нуклон) + ^9Be (2 мм), соответствуют проектным значениям установки. Проведены первые эксперименты с пучком ^6He (25 МэВ/нуклон) на дейтериевой мишени. Были получены новые результаты по заселению резонанса ^5H в реакции $^2\text{H}(^6\text{He}, ^3\text{He})^5\text{H}$ и по рассеянию ядра ^6He на дейтерии в широком угловом диапазоне. С пучком ^9Li (25 МэВ/нуклон) проведена отладка методики регистрации совпадений нейтронов, летящих вперед, с протонами, летящими под задними углами, в реакции $d(^9\text{Li}, p)^{10}\text{Li} \rightarrow n + ^9\text{Li}$. В работе также описаны планируемые эксперименты на установке АКУЛИНА-2 в ближайшей и среднесрочной перспективе.

Новый фрагмент-сепаратор был создан в коллаборации ОИЯИ с французской фирмой SIGMAPHI. Часть работ была выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-12-01367. Авторы благодарны проф. Ю.Ц. Оганесяну, С.Н. Дмитриеву и М.В. Жукову за постановку задачи и постоянный интерес к проекту.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Thoennessen M.* // Rep. Prog. Phys. 2004. V. 67 P. 1187.
2. *Fortune N.T.* // Eur. Phys. J. A. 2018. V. 54. P. 51.
3. *Audi G., Bersillon O., Blachot J. et al.* // Nucl. Phys. A. 2003. V. 729. P. 3.
4. *Pfützner M., Karny M.M., Grigorenko L.V. et al.* // Rev. Mod. Phys. 2012. V. 84. P. 567.
5. *Григоренко Л.В., Головков М.С., Крупко С.А. и др.* // УФН. 2016. Т. 186. С. 337; *Grigorenko L.V., Golovkov M.S., Krupko S.A. et al.* // Phys. Usp. 2016. V. 59. P. 321.
6. *Fomichev A.S., Grigorenko L.V., Krupko S.A. et al.* // Eur. Phys. J. A. 2018. V. 54. P. 97.
7. FAIR, Facility for Antiproton and Ion Research in Europe GmbH; <http://www.fair-center.eu>.
8. FRIB, National Superconducting Cyclotron Lab. Michigan St. Univ., <http://www.nsl.msu.edu/>.
9. RIBF, RIKEN Nishina Center for Accelerator-Based Science, <http://www.riken.jp/en/research/labs/rnc/>.
10. SPIRAL2, Grand Accelérateur Nat. d'Ions Lourds, <http://www.ganil-spiral2.eu/>.
11. ISOLDE, <http://isolde.web.cern.ch/>.
12. HIAF; <http://english.imp.cas.cn/Work2017/HI2017/>.
13. *Grigorenko L.V., Mukha I.G., Scheidenberger C. et al.* // Phys. Rev. C. 2011. V. 84. Art. no. 021303.
14. *Korshennikov A.A., Nikolskii E.Yu., Kuzmin E.A. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2003 V. 90. Art. no. 082501.
15. *Nikolskii E.Yu., Korshennikov A.A., Otsu H. et al.* // Phys. Rev. C. 2010. V. 81. Art. no. 064606.
16. *Ter-Akopian G.M., Fomichev A.S., Golovkov M.S. et al.* // Eur. Phys. J. A. 2005. V. 25. P. 315.
17. *Wuosmaa A.H., Bedoor S., Brown K.W. et al.* // Phys. Rev. C. 2017. V. 95. 014310.
18. *Lapoux V., Alamanos N.* // Eur. Phys. J. A. 2015. V. 51. P. 91.
19. *Mougeot X., Lapoux V., Mittag W. et al.* // Phys. Lett. B. 2012. V. 718. P. 441.
20. *Безбах А.А., Белогуров С.Г., Вольски Р. и др.* // ПТЭ. 2018. № 5. С. 5; *Bezakh A.A., Belogurov S.G., Wolski R. et al.* // Instrum. Exp. Tech. 2018. V. 61. № 5. P. 631.
21. *Cavallaro M., De Napoli M., Cappuzzello F. et al.* // J. Phys. Conf. Ser. 2015. V. 590. Art. no. 012037.
22. *Kohley Z., Baumann T., Christian G. et al.* // Phys. Rev. C. 2015. V. 91. Art. no. 034323.
23. *Kondo J., Nakamura T., Tanaka R. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2016 V. 116. Art. no. 102503.