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-Акопьян^{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 исследования, 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 ISOLметода 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 ⁷H, ¹⁷Ne, ²⁶O, ²⁶S.

В период 2015-2016 гг. фрагмент-сепаратор работал в тестовом режиме. Проводилась отладка систем управления и контроля вакуума, питания магнитов, мониторирования 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 ¹⁵N (49.7 МэВ/нуклон) на бериллиевой мишени толщиной 2 мм были измерены указанные параметры для целого ряда радиоактивных пучков: ^{6,8}He, ^{9,11}Li, ^{11,12}Be, ^{14,15}В 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: 5Н И 7Н

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 ⁷Н. Специфический интерес к проблеме ⁷Н обусловлен предсказанием ⁷Н в качестве истинного 4*n* излучателя [13], т.е. ядра, испытывающего радиоактивный 4*n*-распад. Попытки получения данных о свойствах основного состояния ядра ⁷Н предпринимались ранее неоднократно, см. [5, 14, 15] и ссылки внутри. Так, авторы работы [15] для пучка ⁸Не с энергией 42 МэВ/нуклон, бомбардирующего газовую

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

Более точное определение энергии основного состояния может быть достигнуто при условии одновременного измерения импульсов ядер отдачи ³Не и продуктов распада ядра ⁷Н. Для подготовки методической базы такого эксперимента нами исследовалась реакция передачи одного протона от снаряда ⁶He ($E \sim 25$ МэB/нуклон) на ядро дейтерия (мишень из дейтерированного полиэтилена CD₂, 20 мкм). Целью эксперимента было определение сечений заселения основного и возбужденных состояний тяжелого изотопа водорода ⁵H в реакции 2 H(⁶He, 3 He)⁵H. Ранее такая реакшия была изучена нами на установке АКУЛИНА [16] при энергии пучка ⁶Не 22 МэВ/нуклон. Недавно эту реакцию исследовали в MSU на сепараторе А1900 при энергии ⁶Не 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 ³Не в диапазоне углов θ_{nab} ~ ~ 4°-20° (см. рис. 1), что соответствовало полной энергии ядер ³Не, испущенных из мишени в реакции ²H(⁶He, ³He)⁵H_{g.s.}, от 8.5 до 11 МэВ (для передних углов в системе центра масс).

Детектирующая система эксперимента данной работы включала два $\Delta E - E$ -телескопа, предназначенных для регистрации двух продуктов реакции – ³Не и тритонов, летящих под передними углами в лабораторной системе координат. Телескоп для регистрации ³Не состоял из двух кремниевых детекторов, ΔE -детектора толщиной 22 мкм (площадь 50×50 мм², сегментация на 16 стрипов) и *Е*-детектора толщиной 1000 мкм (площадь 60 × \times 60 мм², 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 × 16.5 × × 50 мм, оптически соединенные с фотоумножителями R9880U-20 Hamamatsu. Этот телескоп, установленный на расстоянии 230 мм от мишени (расстояние до второго 1000 мкм кремниевого детектора), обеспечивал регистрацию ³Не 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 $\theta_{^{3}\text{He}}-\theta_{^{3}\text{H}}$ (*a*) и $E_{^{3}\text{He}}-E_{^{3}\text{H}}$ в лабораторной системе (*б*). Пунктиром обозначены зоны, которые обусловливались двухплечевой геометрией эксперимента; эффективность регистрации ${}^{3}\text{He}-t$ -совпадений составляла порядка 60%.

стоящий из аналогичных элементов (1000 мкм кремниевый детектор площадью $60 \times 60 \text{ мм}^2$, 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 $\theta_{na6} = 1.0^{\circ} - 12.8^{\circ}$. На рис. 1 представлены результаты моделирования методом Монте-Карло ожидаемых событий эксперимента, выполненные 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 ⁶He ($I \sim 10^5 \text{ c}^{-1}$) с энергией 25 МэВ/нуклон высокого качества: доля ядер ⁶Не 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 $8 \cdot 10^4 \text{ c}^{-1}$). В-третьих, был отработан механизм учета неоднородности толщины 22 мкм кремниевого детектора, карта толщины которого была измерена отдельно с помощью альфа-частиц от источника ²²⁶ Ra (измеренная толщина детектора в зависимости от позиции варьировалась от 19 до 26 мкм). Коррекция толщины тонкого кремниевого детектора в зависимости от места попадания частиц позволила провести идентификацию ядер отдачи ³Не 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 ³He-t, отвечающих кинематике реакции 2 H(6 He, 3 He) 5 H, и сделано сравнение с оценками моделирования методом Монте-Карло.

Отлаженная методика регистрации ³He—*t*-совпадений позволяет планировать эксперимент по изучению сверхтяжелого изотопа водорода ⁷H при его получении в реакции передачи протона из ядра-снаряда ⁸He. Постановка такого эксперимента запланирована на период 2018—19 гг. В этом эксперименте будет применена газовая криогенная дейтериевая мишень толщиной $3 \cdot 10^{20}$ ат. · см⁻² вместо CD₂, 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 ⁶Не (25 МэВ/нуклон) в финальной фокальной плоскости сепаратора АКУЛИНА-2. Поперечный размер, измеренный с помощью многопроволочной пропорциональной камеры (*a*), и состав пучка РИ, определенный по потерям в пластике толщиной 200 мкм и времени пролета частиц на базе 12.35 м (*б*). Количество примесей ³H, ⁸Li и ⁹Ве не превышало 10% при работе с бериллиевым клином 3 мм и импульсным захватом ±3% в дисперсионной фокальной плоскости сепаратора.

регистрации ядер ³Не, 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 ⁷H ($E^* = 0.5$ МэВ), полученных в реакции ²H(⁸He, ³He)⁷H. Предполагается, что регистрация ядер ³He и ³H проводится двумя телескопами, отстоящими от мишени на расстоянии 20 (I) и 30 см (2). Скорость счета искомых событий показана в зависимости от установленного угла ³He-телескопа (с учетом телесного угла) при интенсивности пучка ⁸He $5 \cdot 10^4$ с⁻¹ и толщине D₂-мишени $3 \cdot 10^{20}$ ат. \cdot см⁻². Расчеты по коду DWBA нормализованы на экспериментально измеренное значение $d\sigma/d\Omega = 30$ мкб \cdot ср⁻¹ для угла 10° в системе центра масс [15]. Ожидаемое энергетическое разрешение ΔE при установке ³He-телескопа под углом $\theta_{ла6} = 20^{\circ}$ 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 ³He-*t*-совпадений для $E_{^{7}H} \leq 2$ МэВ составит более 95%.

На рис. 3 приведены оценки скорости счета событий ⁷Н двумя телескопами за один день экспозиции, получаемой при изучении реакции 2 H(⁸He, ³He)⁷H_{g.s.}(E^{*} = 0.5 МэВ). Расчеты сечения реакции сделаны при помощи кода DWBA с нормировкой на значение $d\sigma/d'\Omega = 30$ мкб · ср⁻¹ для $\theta_{\text{ILM}} = 10^{\circ}$, согласно экспериментальным данным работы [15]. Так, принимая во внимание реальные условия эксперимента для установленных углов вылета ядер ³He \pm (5°-20°) и расстояния 20 см от мишени до ³Не-телескопов, ожидается регистрация порядка пяти событий ⁷Н в день в спектре недостающей массы, который будет измерен с энергетическим разрешением около 1.2 МэВ. Расчеты сделаны для интенсивности пучка ⁸Не $5 \cdot 10^4 \text{ c}^{-1}$ и для толщины мишени $3 \cdot 10^{20} \text{ ar.} \cdot \text{см}^{-2}$, 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 ³Не. 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 РАССЕЯНИЯ ⁶Не 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 ⁶Не 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 ⁶Не на протонах [18].

Ядро ⁶Не 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 провелены измерения упругого и неупругого рассеяния на дейтериевой мишени пучка ядер ⁶Не 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 He и 4 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 двухнедельного эксперимента была измерена зависимость сечения упругого и неупругого рассеяния для системы ⁶He-*d* в широком диапазоне углов $\theta_{\mu,M} = 20^{\circ} - 140^{\circ}$ с достаточно высокой статистикой, данные находятся в завершаюшей сталии обработки.

ПОСТАНОВКА ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В рамках подготовки к экспериментам "второго дня" на фрагмент-сепараторе АКУЛИНА-2 состоялся двухдневный эксперимент с пучком ⁹Li $(E = 25 \text{ МэВ/нуклон}, I \sim 8 \cdot 10^4 \text{ c}^{-1})$. 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 стильбена (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 ⁶He + *d* при помощи двух идентичных телескопов, состоящих из кремниевого детектора толщиной 1 мм и массива сцинтилляционных детекторов. События, представленные на панели (*б*) для ведомого телескопа, отвечают совпадениям с дейтронами, отобранными в мастер-телескопе (*a*). Данные по упругому рассеянию соответствуют угловому диапазону $\theta_{ILM} = 40^{\circ}-105^{\circ}$.

ния ¹⁰Li, 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 ¹⁷Ne, ²⁶S и ²⁶O с использованием криогенных мишеней изотопов водорода (H₂ или T₂) и дополнительного оборудования (BЧ-фильтра и магнитного спектрометра). Показаны пучок РИ (1), мишень (2), дипольный магнит (3), телескопы (4) для регистрации d и t в реакциях $p(^{18}$ Ne,d) и $p(^{28}$ S,t), в случае $t(^{24}$ O,p) телескопы для регистрации протонов в задней полусфере перемещаются в положение до мишени, массив нейтронных детекторов (5) на базе кристаллов стильбена, 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 ¹⁷Ne и ²⁶S, получаемых в реакциях 1 H(18 Ne,*d*) 17 Ne и 1 H(28 S,*t*) 26 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 ²⁶О. Авторы работы [22] сообщили, что ими был получен верхний предел энергии 2n-распада $E_{g.s.} < 53$ кэВ для основного состояния ²⁶О (указанное значение верхнего предела соответствует среднеквадратичной ошибке). Авторы работы [23] оценили энергию резонанса основного состояния ²⁶О $E_{g.s.} = 18$ 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 ²⁶О получался в реакции фрагментации ядер ²⁷F высокой энергии, нами предложена реакция ³H(²⁴O,*p*)²⁶O [6]. В эксперименте может быть достигнута светимость на уровне $2 \cdot 10^{23}$ см⁻¹ · с⁻¹ и разрешение $\sigma \sim 7$ кэВ в определении энергии в измеряемом спектре состояний ядра ²⁶О.

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 ¹⁵N (49.7 МэВ/нуклон) + 9 Be (2 мм), соответствуют проектным значениям установки. Проведены первые эксперименты с пучком ⁶Не (25 МэВ/нуклон) на дейтериевой мишени. Были получены новые результаты по заселению резонанса ⁵Н в реакции ²Н(⁶Не, ³Не)⁵Н и по рассеянию ядра ⁶Не 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 РНФ № 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.
- 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.nscl.msu.edu/.
- 9. RIBF, RIKEN Nishina Center for Accelerator-Based Science, http://www.riken.jp/en/research/labs/rnc/.
- 10. SPIRAL2, Grand Accelerateur 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. Korsheninnikov A.A., Nikolskii E.Yu, Kuzmin E.A. et al. // Phys. Rev. Lett. 2003 V. 90. Art. no. 082501.
- Nikolskii E.Yu., Korsheninnikov 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.
- Lapoux V., Alamanos N. // Eur. Phys. J. A. 2015. V. 51. P. 91.
- Mougeot X., Lapoux V., Mittig 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; Bezbakh A.A., Belogurov S.G., Wolski R. et al. // Instrum. Exp. Tech. 2018. V. 61. № 5. Р. 631.
- 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.