

На конкурс научно-методических и научно-технических работ ОИЯИ

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ

**“Развитие и применение новых экспериментальных методик на комплексе  
АКУЛИНА-2@У-400М”**

Коллектив соавторов:

1. Безбах А.А. (ЛЯР ОИЯИ)
2. Белогуров С.Г. (ЛЯР ОИЯИ)
3. Головков М.С. (ЛЯР ОИЯИ)
4. Горшков А.В. (ЛЯР ОИЯИ)
5. Крупко С.А. (ЛЯР ОИЯИ)
6. Никольский Е.Ю. (НИЦ КИ / ЛЯР ОИЯИ)
7. Тер-Акопьян Г.М. (ЛЯР ОИЯИ)
8. Фомичев А.С. (ЛЯР ОИЯИ)
9. Худоба В. (ЛЯР ОИЯИ)
10. Шаров П.Г. (ЛЯР ОИЯИ)

В представленный цикл работ входят 5 публикаций.

Краткая аннотация:

В 2017 году в Лаборатории ядерных реакций была запущена новая установка – фрагмент сепаратор АКУЛИНА-2 на ускорителе тяжелых ионов У-400М. В 2018 году на этом комплексе были начаты первые физические эксперименты с использованием высококачественных радиоактивных пучков  ${}^6\text{He}$ ,  ${}^8\text{He}$ ,  ${}^9\text{Li}$ ,  ${}^{10}\text{Be}$  ( $E \sim 26-44$  МэВ/нуклон) и криогенной  $\text{D}_2$  мишени. В результате была получена новая информация о спектрах нейтронно-избыточных ядер  ${}^{6,7}\text{H}$ ,  ${}^7\text{He}$ ,  ${}^{8,9,10}\text{Li}$  и редких каналах их распада. Данные по изотопам водорода были опубликованы в 2020-2022 гг (А.А. Bezbakh, et al., “*Evidence for the first excited state of  ${}^7\text{H}$* ”, *Physical Review Letters* **124** (2020) 022502, I.A. Muzalevskii, et al., “*Resonant states in  ${}^7\text{H}$ : Experimental studies of the  ${}^2\text{H}({}^8\text{He}, {}^3\text{He})$  reaction*”, *Physical Review C* **103** (2021) 044313, E.Yu. Nikolskii, et al., “ *${}^6\text{H}$  states studied in the  ${}^2\text{H}({}^8\text{He}, {}^4\text{He})$  reaction and evidence of an extremely correlated character of the  ${}^5\text{H}$  ground state*”, *Physical Review C* **105** (2022) 064605), результаты по  ${}^7\text{He}$  направлены в журнал IJMP\_E (Bezbakh, et al., “*Properties of the  ${}^7\text{He}$  ground state studied by the  ${}^6\text{He}(d, p){}^7\text{He}$  reaction*”), информация для изотопов  ${}^{8,9}\text{Li}$  была недавно опубликована в работах [1,2], анализ эксперимента  ${}^9\text{Li}(d, p){}^{10}\text{Li} \rightarrow n+{}^9\text{Li}$  продолжается. Для углубленного изучения структуры этих и многих других экзотических ядер на комплексе АКУЛИНА-2@У-400М была проведена работа, нацеленная на дальнейшее развитие экспериментальных методик и техники физического эксперимента [3-5].

Экспериментальная методика по изучению ядер  ${}^{6,7}\text{H}$  в реакциях  ${}^2\text{H}({}^8\text{He}, {}^4\text{He}){}^6\text{H}$  и  ${}^2\text{H}({}^8\text{He}, {}^3\text{He}){}^7\text{H}$  получила дальнейшее развитие при использовании реперных реакций  ${}^2\text{H}({}^{10}\text{Be}, {}^4\text{He}){}^8\text{Li}$  и  ${}^2\text{H}({}^{10}\text{Be}, {}^3\text{He}){}^9\text{Li}$ , соответственно [1,2]. В этих экспериментах с пучком  ${}^{10}\text{Be}$  (44 МэВ/нуклон) решались несколько методических задач: 1) по известному из литературы спектру уровней  ${}^9\text{Li}$  была получена абсолютная калибровка метода недостающей массы, имеющая принципиальное значение для спектров  ${}^{6,7}\text{H}$ ; 2) получена зависимость энергетического

разрешения аппаратуры от толщины дейтериевой мишени и проведено сравнение измеренных значений с результатами Монте-Карло симуляций; 3) из данных  $d\sigma/d\Omega$  для реакции  ${}^2\text{H}({}^{10}\text{Be}, {}^3\text{He}){}^9\text{Li}_{g.s.}$  получена информация об эффективности (светимости) детектирующей аппаратуры. Кроме того, из анализа данных с использованием кода FRESKO были получены важные физические результаты: 1) для канала кластеризации  ${}^{10}\text{Be}=p+{}^9\text{Li}_{g.s.}$  определен спектроскопический фактор  $SF \approx 1.7$ ; 2) для реакции  ${}^2\text{H}({}^{10}\text{Be}, {}^4\text{He}){}^8\text{Li}$  наблюдалось заселение второго возбужденного уровня  ${}^8\text{Li}$  (2.255 МэВ,  $3^+$ ) при отсутствии основного и первого возбужденного состояний, что оказалось неожиданным, но как выяснилось из анализа данных, это соответствует описанию спектра  ${}^8\text{Li}$  из реакции  ${}^2\text{H}({}^{10}\text{Be}, {}^4\text{He}){}^8\text{Li}$  при помощи оболочечной модели ядер; 3) вероятность заселения третьего возбужденного состояния  ${}^8\text{Li}$  (3.21 МэВ,  $1_2^+$ ) оказалась примерно в 3 раза меньше, чем уровня с энергией  $E^*=2.255$  МэВ.

Методическая работа [3] посвящена моделированию эксперимента для дальнейшего изучения структуры  ${}^7\text{H}$  и каналов его распада с использованием массива из 100 нейтронных детекторов на основе пластиков ВС-404 шестигранной формы, собранных в компактную стенку. В дополнении к существующему массиву из 48 стильбенов [А.А. Безбах и др., ПТЭ №5 (2018) 1-8] эта стенка позволит существенно повысить светосилу экспериментов с регистрацией двух, трех и даже 4-х нейтронов из распада  ${}^7\text{H}$  (а также  ${}^6\text{H}$ ,  ${}^{10}\text{He}$ ,  ${}^{11}\text{Li}$  и др.).

С целью повышения качества экспериментов со вторичными пучками на установке АКУЛИНА-2 продолжается дальнейшее развитие методик [4]. Среди них следует отметить: 1) время-пролетные детекторы для пособытийного измерения энергий частиц с точностью уровне  $\sigma \sim 70$  пс, т.е. 0.2% по энергии, например, для случая  ${}^9\text{Li}$  с полной энергией 266 МэВ точность составляет  $\Delta E \sim 0.5$  МэВ (ПШПВ); 2) систему трекинга пучка на мишень, обеспечивающую координатное разрешение в точке взаимодействия  $\sim 1.2$  мм; 3) распределенную многоканальную систему сбора данных в стандарте VME.

В работе [5] описаны характеристики и принцип работы системы криогенных физических мишеней на установке АКУЛИНА-2. Уникальность комплекса заключается в том, что он обеспечивает безопасную работу со всеми изотопами водорода, включая тритий, и гелия -  ${}^3\text{He}$ ,  ${}^4\text{He}$ . Толщина мишени может варьироваться в зависимости от физической задачи в широком диапазоне, а именно,  $10^{19} - 7 \cdot 10^{21}$  атом/см<sup>2</sup> при толщине входных/выходных окон из нержавеющей стали на уровне 6–10 мкм.

Ожидается, что ускоритель тяжелых ионов У-400М после модернизации возобновит свою работу в начале 2024 года и, с учетом разработанных методик, эксперименты с радиоактивными пучками возобновятся на качественно новом уровне.

### Список работ цикла

#### “Развитие и применение новых экспериментальных методик на комплексе АКУЛИНА-2@У-400М”

1. E.Yu. Nikolskii, I.A. Muzalevskii, S.A. Krupko, A.A. Bezbakh, V. Chudoba, S.G. Belogurov, D. Biare, A.S. Fomichev, E.M. Gazeeva, A.V. Gorshkov, L.V. Grigorenko, G. Kaminski, M. Khirk, O. Kiselev, D.A. Kostyleva, M.Yu. Kozlov, B. Mauvey, I. Mukha, Yu.L. Parfenova, A.M. Quynh, V.N. Schetin, A. Serikov, S.I. Sidorchuk, P.G. Sharov, R.S. Slepnev, S.V. Stepantsov, A. Swiercz, G.M. Ter-Akopian, R. Wolski, M.V. Zhukov, “*Study of proton and deuteron pickup reactions ( $d, {}^3\text{He}$ ), ( $d, {}^4\text{He}$ ) with  ${}^8\text{He}$  and  ${}^{10}\text{Be}$  radioactive beams at ACCULINNA-2 fragment separator*”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B **541** (2023) 121–125.

2. E.Yu. Nikolskii, S.A. Krupko, I.A. Muzalevskii, A.A. Bezbakh, R. Wolski, C. Yuan, S.G. Belogurov, D. Biare, V. Chudoba, A.S. Fomichev, E.M. Gazeeva, M.S. Golovkov, A.V. Gorshkov, L.V. Grigorenko, G. Kaminski, M. Khirk, O. Kiselev, D.A. Kostyleva, B. Mauyey, I. Mukha, Yu.L. Parfenova, A.M. Quynh, S.I. Sidorchuk, P.G. Sharov, N.B. Shulgina, R.S. Slepnev, S.V. Stepantsov, A. Swiercz, G.M. Ter-Akopian, “*Study of proton and deuteron pickup reactions  $^2\text{H}(d, ^3\text{He})^9\text{Li}$  and  $^2\text{H}(d, ^4\text{He})^8\text{Li}$  with 44 AMeV  $^{10}\text{Be}$  radioactive beam at ACCULINNA-2 fragment separator*”, Physics of Atomic Nuclei, Vol. **86** № 6 (декабрь 2023).
3. A.A. Bezbakh, S.G. Belogurov, V. Chudoba, A.S. Fomichev, A.V. Gorshkov, L.V. Grigorenko, G. Kaminski, M.S. Khirk, A.G. Knyazev, S.A. Krupko, B. Mauyey, I.A. Muzalevskii, E.Yu. Nikolskii, A.M. Quynh, P.G. Sharov, R.S. Slepnev, S.V. Stepantsov, G.M. Ter-Akopian, R. Wolski, “*Detector array for the  $^7\text{H}$  nucleus multi-neutron decay study*”, JINR Preprint E13-2022-56; Particles and Nuclei Letters Vol. 20, No.4 (2023) 629-636.
4. Krupko S.A., Abakumov A.M., Belogurov S.G., Bezbakh A.A., Golovkov M.S., Gorshkov A.V., Gorshkov V.A., Rymzhanova S.A., Slepnev R.S., Fomichev A.S. “*Diagnostics of the secondary beam at the ACCULINNA-2 fragment separator*”, Physics of Particles and Nuclei Letters. - V. 20, № 5 (2023) P.1035–1045.
5. С.А. Крупко, А.В. Горшков, А.А. Безбах, А.С. Фомичев, Г.М. Тер-Акопьян, “*Система криогенных физических мишеней установки ACCULINNA-2*”, Препринт ОИЯИ P13-2022-48. Принято к печати в журнале «Письма в ЭЧАЯ» № 1 (2024).