

«Развитие и применение новых экспериментальных методик на комплексе АКУЛИНА-2@У-400М»

Коллектив соавторов:

А.А. Безбах¹, С.Г. Белогууров¹, М.С. Головков¹, А.В. Горшков¹, С.А. Крупко¹, Е.Ю. Никольский^{1,2}, Г.М. Тер-Акопьян¹, А.С. Фомичев¹, В. Худоба¹, П.Г. Шаров¹.

¹ Лаборатория ядерных реакций им. Г.Н. Флерова ОИЯИ

² Институт теоретической физики, Университет г. Тюбинген, Германия

В представленный [цикл работ](#) входят 5 публикаций.

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 ${}^6\text{He}$, ${}^8\text{He}$, ${}^9\text{Li}$, ${}^{10}\text{Be}$ ($E \sim 26\text{-}44$ МэВ/нуклон) и криогенной дейтериевой 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, Е.Ю. 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 *IJMPA* (А.А. Bezbakh et al., “Properties of the ${}^7\text{He}$ ground state studied by the ${}^6\text{He}(d, p){}^7\text{He}$ reaction”), информация по изотопам ${}^{8,9}\text{Li}$ 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 данных измерения спектра состояний экзотических ядер по методу недостающей массы. Эта калибровка имела принципиальное значение для спектров ${}^{6,7}\text{H}$;

2) получена зависимость разрешения по энергии возбуждения от толщины дейтериевой мишени и проведено сравнение измеренных значений с результатами Монте-Карло симуляций;

3) из данных измерения дифференциального сечения $d\sigma/d\Omega$ для реакции ${}^2\text{H}({}^{10}\text{Be}, {}^3\text{He}){}^9\text{Li}_{g.s.}$ получена информация об эффективности (светимости) детектирующей аппаратуры.

Из анализа полученных угловых распределений реакции ${}^2\text{H}({}^{10}\text{Be}, {}^3\text{He}){}^9\text{Li}_{g.s.}$ с использованием кода FRESCO были получены важные физические результаты: 1) для канала кластеризации ${}^{10}\text{Be} = p + {}^9\text{Li}_{g.s.}$ определен спектроскопический фактор $SF \approx 1.7$ который совпал с теоретическим расчетом; 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^+), в то время как в измеренном спектре уровней не было обнаружено заселение

основного и первого возбужденного состояний ${}^8\text{Li}$. Этот результат эксперимента находится в полном согласии с описанием спектра ${}^8\text{Li}$ из этой реакции при учете структуры ядер ${}^{10}\text{Be}$ и ${}^8\text{Li}$ с помощью оболочечной модели.

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 нейтронная стенка позволит существенно повысить светимость экспериментов с регистрацией двух, трех и даже 4-х нейтронов из распада ${}^7\text{H}$. Создаваемая нейтронная стенка позволит получать информацию о спектрах и траекториях разлёта всех частиц, испущенных при мульти-нейтронном распаде ядер ${}^7\text{H}$, полученных в реакции ${}^2\text{H}({}^8\text{He}, {}^3\text{He}){}^7\text{H}$, а также при изучении спектров распада ряда ядер, ${}^6\text{H}$, ${}^{10}\text{He}$, ${}^{13}\text{Li}$ 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 высокой точностью $\sigma \sim 70$ 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 $\sigma \sim 1.2$ мм. В работе детально представлена методика по настройке, калибровке и обработке измерений, показаны возможности в работе с экзотическими пучками и сравнение с моделированием работы детекторов.

В работе [5] описаны характеристики и принцип работы системы криогенных физических мишеней на установке АКУЛИНА-2, представлена новая методика получения тонких водородных мишеней в твердой фазе при пониженном давлении, что важно для улучшения разрешения экспериментов с экзотическими пучками. 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/см² при толщине входных/выходных окон из нержавеющей стали на уровне 6–10 мкм.

Таким образом, в данной серии работ представлен практически весь спектр методических работ от концептуальной проработки новых методов регистрации продуктов реакций до детального анализа функционирования систем, а также применение тестовых реакций (экспериментов) для калибровки и апробирования всей детектирующей системы и методики обработки данных в реальных условиях. 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 продолжатся на качественно новом уровне.

Список работ цикла:

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. Mauryey, I. Mukha, Yu.L. Parfenova, A.M. Quynh, V.N. Schetinina, 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. «Письма в ЭЧАЯ», № 1 (2024).