На конкурс научно-методических работ ОИЯИ

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ

**“Развитие экспериментальных методик на фрагмент-сепараторе АКУЛИНА-2”**

Коллектив соавторов:

1. Безбах А.А. (ЛЯР ОИЯИ)
2. Головков М.С. (ЛЯР ОИЯИ)
3. Горшков А.В. (ЛЯР ОИЯИ)
4. Крупко С.А. (ЛЯР ОИЯИ)
5. Музалевский И.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. Каминьски Г. (ЛЯР ОИЯИ)

В представленный цикл работ входят 5 публикаций.

Краткая аннотация:

В 2017 году в Лаборатории ядерных реакций была запущена уникальная новая установка – фрагмент сепаратор АКУЛИНА-2 на ускорителе тяжелых ионов У-400М. Тестовые испытания, проведённые для реакции фрагментации первичного пучка 15N (49.7 МэВ/нуклон) на бериллиевой мишени толщиной 2 мм, показали, что основные характеристики радиоактивных пучков для этой установки полностью соответствуют расчётным значениям, положенным в основу проекта. В 2018 году были начаты методические работы на установке АКУЛИНА-2 с целью проведения первых экспериментов с радиоактивными пучками 6Не, 8Не, 9Li, 10Ве и др. [1-5].

Повесткой первого флагманского эксперимента явились поиск загадочного ядра 7Н и изучение корреляций между продуктами его распада *t*+*4n.* Для заселения основного и возбужденного состояний 7Н была выбрана реакция 8He (26 МэВ/нуклон) + d → 3He + 7H. Ключевым индикатором наблюдения событий 7Н является факт совпадений между низкоэнергетическими частицами 3Не (E ~ 9÷30 МэВ, θ ~ 8÷26о в лабораторной системе, которые необходимо надежно идентифицировать на фоне интенсивной эмиссии альфа-частиц) с быстрыми тритонами (E > 70 МэВ), вылетающими под передними углами в узком конусе θ ≤ 6о. Эти тритоны необходимо детектировать с достаточно хорошим угловым разрешением Δθ ~ 0.5о и энергетическим разрешением ΔЕ/Е не хуже чем 2 %. Для решения этой задачи был создан телескоп, состоящий из позиционно-чувствительного кремниевого детектора толщиной 1.5 мм и массива сцинтилляторов 4х4 на основе CsI(Tl)/ФЭУ. С целью улучшения точности определения удельных потерь энергии продуктов реакций, измеряемых с помощью 20-микронных кремниевых детекторов, потребовалось картирование толщин этих детекторов с точностью менее 0.2 µ, чему в значительной степени посвящена отдельная работа [3]. Это позволило методом ΔE-E разделить все изотопы водорода, гелия и лития, образующиеся в реакции 2Н(8Не,3Не)7Н, и измерить их энергии с низким порогом регистрации ~1 МэВ/нуклон.

Предпосылками для постановки серии экспериментов по изучению 7Н в реакции 2Н(8Не,3Не)7Н на установке АКУЛИНА-2 являлись: (i) методика измерения энергия трития в совпадении с 3Не и выделение истинных событий 7Н по так называемому кинематическому треугольнику, (ii) использование криогенной газовой мишени, обеспечивающей высокое экспериментальное разрешение ~ 1 МэВ (ПШВП), низкие фоновые условия и возможность измерение этого фона, (iii) возможность калибровки используемого метода недостающей массы по реперной реакции 2Н(10Bе,3Не)9Li, (iv) высокое качество радиоактивных пучков на фрагмент-сепараторе АКУЛИНА-2 (интенсивность, очистка от примесей, фокусировка на физической мишени). С использованием разработанных методик была проведена серия из трех экспериментов и получены данные высокого качества, находящиеся в стадии анализа.

Второй эксперимент, подготовленный и проведенный на установке АКУЛИНА-2, был нацелен на изучение низколежащих состояний системы 10Li, образующейся в реакции 9Li(d,p)10Li → n+9Li при энергии 29 МэВ/нуклон [4]. Принципиальной особенностью этого эксперимента была регистрация протонов, испущенных под задними углами в лабораторной системе, в совпадении с 9Li и нейтронами, вылетающими из распада 10Li под передними углами. Для прецизионного измерения энергии и угла вылета нейтронов использовался специально созданный массив из 44 детекторов на основе кристаллов стильбена (диаметром 80 мм и толщиной 50 мм) и ФЭУ ЕТ-Enterprises 9822B [А.А. Безбах и др., ПТЭ №5 (2018) 1-8]. Важным звеном в регистрации 9Li, образовавшихся в результате распада 10Li, стал специально разработанный ToF-детектор, состоящий из тонкого пластика EJ-212 (125 мкм) и четырех ФЭУ Hamamatsu R7600. Этот детектор, установленный на пролетной базе 39 см от физической мишени по ходу пучка, позволял не только идентифицировать состав радиоактивного пучка (d, 6He, 9Li и 12Be) по потерям энергии в пластике и времени пролета, но и разделять пучковый 9Li от 9Li из распада 10Li. С целью определения экспериментального разрешения всей детектирующей системы и нормировки спектра недостающей массы 10Li проводилось дополнительное измерение тройных совпадений p-6He-n в реакции 6He(d,p)7He. Учитывая набранную статистику (примерно 400 тройных совпадений p-9Li-n) и хорошее энергетическое разрешение эксперимента ~ 250 кэВ (ПШПВ) для спектра возбуждений 10Li, из анализа этих данных ожидается получить новую информацию о низколежащих состояниях 10Li при энергиях ~ 0.5 МэВ и ~ 4 МэВ.

Ещё одна интересная задача, которая может решаться на установке АКУЛИНА-2 с использованием радиоактивных пучков низкой энергии (4-6 МэВ/нуклон), это реакции многонуклонных передач и квази-свободного рассеяния, ведущие к заселению малоизученных нейтронно-избыточных ядер в области 95 < Z < 110. Методическим подходам и аспектам исследований этой области ядер, важной для дальнейшего продвижения к острову сверхтяжёлых элементов, посвящена работа [5].

Развитие экспериментальных методик на новом фрагмент-сепараторе АКУЛИНА-2 демонстрирует высокий потенциал научных открытий, позволяющий решить ряд знаковых проблем экспериментальной ядерной физики с использованием радиоактивных пучков на этой установке.

Этапы данной работы неоднократно докладывались на международных конференциях по ядерной физике, семинарах ЛЯР и ОИЯИ. В представленном списке публикаций –5 статей в журналах «Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res. B» и «Известия РАН. Серия Физическая» и «Ядерная Физика».

Председатель НТС ЛЯР \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Секретарь НТС ЛЯР \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

**Приложение.**

**Список работ цикла**

**“Развитие экспериментальных методик на фрагмент-сепараторе АКУЛИНА-2”**

1. A. S. Fomichev, A. A. Bezbakh, S. G. Belogurov, R. Wolski, E. M. Gazeeva, A. V. Gorshkov, L. V. Grigorenko, B. Zalewski, G. Kaminski, S. A. Krupko, I. A. Muzalevskii, E. Yu. Nikolskii, Yu. L. Parfenova, S. I. Sidorchuk, R. S. Slepnev, G. M. Ter-Akopian, V. Chudoba, and P. G. Sharov,  
*“The first experiments with the new ACCULINNA-2 fragment separator”,*

Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, **83** (2019) 385–391.

2. G. Kaminski, B. Zalewski, S.G. Belogurov, A.A. Bezbakh, D. Biare, V. Chudoba, A.S. Fomichev, E.M. Gazeeva, M.S. Golovkov, A.V. Gorshkov, L.V. Grigorenko, D.A. Kostyleva, S.A. Krupko, I.A. Muzalevsky, E.Yu. Nikolskii, Yu.L. Parfenova, P. Plucinski, A.M. Quynh, A. Serikov, S.I. Sidorchuk, R.S. Slepnev, P.G. Sharov, P. Szymkiewicz, A. Swiercz, S.V. Stepantsov, G.M. Ter-Akopian, R. Wolski,

*“Status of the new fragment separator ACCULINNA-2 and first experiments”,*

Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B **463** (2020) 504-507.

3. I.A. Muzalevskii, V. Chudoba, S.G. Belogurov, A.A. Bezbakh, D. Biare, A.S. Fomichev, S.A. Krupko, E.M. Gazeeva, M.S. Golovkov, A.V. Gorshkov, L.V. Grigorenko, G. Kaminski, O. Kiselev, D.A. Kostyleva, M.Yu. Kozlov, B. Mauyey, I. Mukha, E.Yu. Nikolskii, Yu.L. Parfenova, W. Piatek, A.M. Quynh, V.N. Schetinin, A. Serikov, S.I. Sidorchuk, P.G. Sharov, R.S. Slepnev, S.V. Stepantsov, A. Swiercz, P. Szymkiewicz, G.M. Ter-Akopian, R. Wolski, B. Zalewski,

*“Detection of the low energy recoil 3He in the reaction 2H(8He,3He)7H”,*

Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, **84** (2020) 500-504.

4. A.A. Bezbakh, S.G. Belogurov, D. Biare, V. Chudoba, A.S. Fomichev, E.M. Gazeeva, M.S. Golovkov, A.V. Gorshkov, G.Kaminski, S.A. Krupko, B. Mauyey, I.A. Muzalevskii, E.Yu. Nikolskii, Yu.L. Parfenova, W. Piatek, A.M. Quynh, A. Serikov, S.I. Sidorchuk, P.G. Sharov, R.S. Slepnev, S.V. Stepantsov, A. Swiercz, P. Szymkiewicz, G.M. Ter-Akopian, R. Wolski, B. Zalewski,

*“Study of 10Li low energy spectrum in the 2H(9Li,p) reaction”,*

Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, **84** (2020) 491-494.

5. G. M. Ter-Akopian, Yu. Ts. Oganessian, A.A.Bezbakh, A. S. Fomichev, M. S. Golovkov, A.V.Gorshkov, S.A.Krupko, E. Yu. Nikolskii, S. I. Sidorchuk, S.V.Stepantsov, R.Wolski,

“*Radioactive-ion beams for the fission study of heavy neutron-rich nuclei*”,

Physics of Atomic Nuclei, 2020, Vol. **83**, No. 4, 497–502.