Утверждаю  
Директор ЛЯР ОИЯИ,  
С.И. Сидорчук  
\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_  
«\_\_\_» \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 2025 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Научно-технического совета

Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ

по диссертации **Крупко Сергея Анатольевича**

«ЗАПУСК ФРАГМЕНТ-СЕПАРАТОРА АКУЛИНА-2 И ПЕРВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ С РАДИОАКТИВНЫМИ ПУЧКАМИ», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности

**1.3.2** – Приборы и методы экспериментальной физики

Диссертационная работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н. Флерова ОИЯИ. В период подготовки диссертации Крупко С.А. являлся сотрудником ЛЯР ОИЯИ в должности начальника группы. Результаты работы были представлены Крупко С.А. на общелабораторном семинаре ЛЯР 24 февраля 2025 г., на котором присутствовали сотрудники из различных подразделений ЛЯР и ОИЯИ. По результатам обсуждения представленных материалов было подготовлено следующее заключение:

# Актуальность работы

Изучение прямых ядерных реакций (таких как (d,3He), (d,p), (t,p) и др.) с использованием радиоактивных пучков промежуточных энергий и криогенных мишеней (изотопы водорода и гелия) является перспективным направлением в ядерной физике для получения новой информации о структуре экзотических ядер и редких каналах их распада.

Экспериментальный комплекс фрагмент-сепаратор АКУЛИНА-2 (англ. ACCULINNA-2) на ускорителе тяжелых ионов У-400М создан для проведения экспериментов с пучками короткоживущих ядер с Z~2-20 при энергиях ~10-50 МэВ/нуклон.

Комплекс, будучи оснащенным дополнительным оборудованием (ВЧ-фильтр, магнитный спектрометр, криогенная тритиевая мишень), позволит проводить широкий спектр исследований ядер, расположенных вблизи и за пределами границ нуклонной стабильности, на уровне, сравнимом с работами, ведущимися в других мировых центрах: GANIL (Франция), RIKEN (Япония), MSU (США), IMP (Китай) и др.

# Основные положения, выносимые на защиту

Работа посвящена созданию в ЛЯР ОИЯИ экспериментального комплекса на базе фрагмент-сепаратора АКУЛИНА-2 и ускорителя тяжелых ионов У-400М, предназначенного для научных исследований свойств легких экзотических ядер. Диссертантом выполнены следующие работы, выносимые на защиту:

I. Созданы ключевые подсистемы фрагмент-сепаратора АКУЛИНА-2 – средства диагностики первичного пучка, узлы диафрагмирования, комплекс производящей мишени, поглотитель первичного пучка, реакционная камера и другие специальные вакуумные камеры для размещения детекторов.

II. Разработана система тонкостенных изотопных криогенных физических мишеней 1,2H, 3,4He с рекуперацией для газовой, жидкой или твердой фаз толщиной рабочего вещества 1020 – 1022 атом/см2.

III. Создан детектор частиц вторичного радиоактивного пучка, исследованы его характеристики, проведено моделирование и определена точность восстановления кинематических характеристик налетающих частиц на физической мишени.

IV. Получены вторичные пучки 6,8He, 9,11Li, 10,12Be, 26P, 27S в реакциях фрагментации на бериллиевой мишени 11B(33,5 МэВ/нуклон), 15N(49,3 МэВ/нуклон) и 32S(52,7 МэВ/нуклон), интенсивности которых на 1-2 порядка превышают возможности установки АКУЛИНА-1. Измерены распределения продольного импульса для 8He, 9,11Li, 12Be.

V. Измерены характеристики вторичных радиоактивных пучков, такие как энергетическое, угловое и пространственное распределение частиц в финальном фокусе (на физической мишени), величина эмиттанса пучка, состав коктейля вторичных ионов и качество идентификации ионов методом ΔE-TOF. Проведено сравнение экспериментальных результатов с расчетами.

С использованием разработанных методик получены новые результаты по изучению энергетических спектров экзотических ядер 6,7H и каналов их распада. Полученные результаты дают основание предполагать, что впервые наблюдался распад основного состояния 7H с испусканием четырех нейтронов.

# Научная новизна работы

Комплекс АКУЛИНА-2@У-400М позволяет получать экзотические вторичные пучки в диапазоне энергий ~10-50 МэВ/нуклон с интенсивностями, сопоставимыми с возможностями мировых центров. На комплексе планируется проведение исследований структуры и свойств экзотических ядер, например, таких как 6,7Н, 6-10He, 10-13Li, 10-16Be, 19-21C, 24,26O, 10N, 17Ne, 26S.

Новая информация о продольных импульсных распределениях ряда радиоактивных пучков (6,8He, 9,11Li, 10,12Be и др.) в диапазоне энергий 27 – 45 МэВ/нуклон представляет интерес для их теоретического описания. Эта область энергий для радиоактивных пучков является малоизученной и находится за пределами применения существующих эмпирических моделей, описывающих сечения образования ядер в реакциях фрагментации и импульсные распределения образующихся вторичных ионов.

# Личный вклад автора

Автор принимал активное участие в планировании, проектировании и создании установки, ее оснащении подсистемами и детекторным оборудованием, а также в наладке и эксплуатации.

Автору принадлежит определяющий вклад в создание компонент установки: комплекса производящей мишени, системы регулируемых щелей и поглотителей, камеры рассеяния и других вакуумных камер, системы изотопных криогенных мишеней, механизма точного позиционирования переднего спектрометра.

Автором предложен ряд идей, легших в основу соответствующих разработок: компоновки физической кабины, поглотителя первичного пучка, логики системы управления, оповещения и защиты установки, алгоритмизации управления ВЧ-фильтром.

Автор координирует создание и запуск Системы Тритиевого Обеспечения на установке АКУЛИНА-2.

Автор принимал решающее участие в разработке, создании и оптимизации детектора пучковых частиц на основе MWPC и времяпролетной системы. Автором выполнено исследование характеристик указанного детектора, включавшее в себя проведение измерений, калибровку, обработку экспериментальных данных и результатов Монте Карло моделирования, представление результатов.

С использованием детектора пучковых частиц автор исследовал характеристики фрагмент-сепаратора, такие как энергетические зависимости выходов вторичных изотопов, состав коктейля вторичных ионов и качество идентификации ионов методом ΔE-TOF, распределения частиц в финальном фокусе. Было проведено сравнение измеренных характеристик с расчетами, которые либо были выполнены автором, либо автором была поставлена задача и проведена интерпретация результатов.

Автор участвовал во всех этапах исследований экзотических ядер 6Н и 7Н: постановка задачи, подготовка и проведение экспериментов, анализ и интерпретация экспериментальных данных, подготовка публикаций.

# Достоверность полученных результатов

Разработанные узлы и подсистемы фрагмент-сепаратора АКУЛИНА-2 эксплуатировались в условиях продолжительных экспериментов, показав свою эффективность и надежность.

Полученное согласие параметров радиоактивных пучков между расчетами (моделированием) и экспериментальными результатами по ряду изотопов позволяет утверждать о соответствии характеристик установки проектным значениям.

Использованные в анализе данных калибровочные параметры и значения эффективности детектирующей аппаратуры проверялись путем применения к хорошо исследованным реперным реакциям. Полученные для последних результаты совпадают с литературными данными.

# Практическая значимость работы

Материалы, изложенные в диссертации, применяются при планировании и подготовке экспериментов, как на самой установке АКУЛИНА-2, так и на других фрагмент-сепараторах, будут полезны при создании новых аналогичных установок.

Разработанные методики и результаты измерений основных характеристик вторичных пучков используются при реализации научной программы исследований на этой установке. Эти результаты представляют также интерес для совершенствования эмпирических моделей, применяемых для описания импульсных распределений продуктов фрагментации при энергиях до 50 МэВ/нуклон.

**Публикации материалов, выносимых на защиту**

Наиболее важные результаты диссертации, а также положения, выносимые на защиту, опубликованы в работах:

1) «Fragment separator ACCULINNA-2. Letter of intent» JINR Communication, Е13-2008-168, (2008)

A.S. Fomichev, G.M. Ter-Akopian, V. Chudoba, A.V. Daniel, M.S. Golovkov, V.A. Gorshkov, L.V. Grigorenko, S.A. Krupko, Yu.Ts. Oganessian, S.I. Sidorchuk, R.S. Slepnev, S.V. Stepantsov, R. Wolski, S.N. Ershov, V.K. Lukyanov, V. Danilin, A.A. Korsheninnikov, V.Z. Goldberg, I.G. Mukha, M. Pfützner, H. Simon, V.A. Shchepunov, O.B. Tarasov, N.K. Timofeyuk, M.V. Zhukov

2) «Long-range plans for research with radioactive ion beams at JINR» JINR Communication, Е7-2012-73, 2012

A.S. Fomichev, A.A. Bezbakh, V. Chudoba, I.A. Egorova, M.S. Golovkov, A.V. Gorshkov, L.V. Grigorenko, G. Kaminski, S.A. Krupko, Yu.Ts. Oganessian, Yu.L. Parfenova, S.I. Sidorchuk, R.S. Slepnev, S.V. Stepantsov, P.G. Sharov, G.M. Ter-Akopian, R. Wolski, S.N. Ershov, V.K. Lukyanov, A.A. Korsheninnikov, Е.А. Kuzmin, E.Yu. Nikolskii, V.Z. Goldberg, M. Pfützner, I.G. Mukha, H. Simon, O.B. Tarasov, N.K. Timofeyuk, A.A. Yukhimchuk, M.V. Zhukov

3) “Исследования легких экзотических ядер вблизи границы стабильности в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ”, УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК, Том 186, №4, с.337-386, 2016.

Л.В. Григоренко, М.С. Головков, С.А. Крупко, С.И. Сидорчук, Г.М. Тер-Акопьян, А.С. Фомичев, В. Худоба

4) «The ACCULINNA-2 project: The physics case and technical challenges», Eur. Phys. J. A 54 (2018) 97

A.S. Fomichev, L.G. Grigorenko, S.A. Krupko, S.V. Stepantsov, G.M. Ter-Akopian

5) «Диагностика вторичного пучка на фрагмент-сепараторе ACCULINNA 2», Письма в ЭЧАЯ. 2023. Т. 20, № 5(250). С. 1165–1180

С.А. Крупко, A.M. Абакумов, С.Г. Белогуров, А.А. Безбах, М.С. Головков, А.В. Горшков, В.А. Горшков, С.А. Рымжанова, Р.С. Слепнев, А.С.Фомичев

6) «Система криогенных физических мишеней установки ACCULINNA-2», Письма в ЭЧАЯ. 2024. Т. 21, № 1(252). С. 56–67

С.А. Крупко, А.А. Безбах, А.В. Горшков, Г.М. Тер-Акопьян, А.С.Фомичев

7) «Особенности конструкции и характеристики фрагмент-сепаратора ACCULINNA-2», Письма в ЭЧАЯ. 2024. Т. 21, № 4(255).

С.А. Крупко, С.Г. Белогуров, А.А. Безбах, Л.В. Григоренко, М.С. Головков, А.В. Горшков, В.А. Горшков, Г. Каминьски, А.Г. Князев, E.Ю. Никольский, Ю.Л. Парфенова, С.А. Рымжанова, Р.С. Слепнев, С.В. Степанцов, Г.М. Тер-Акопьян, А.С. Фомичев, В. Худоба, П.Г. Шаров

8) “Status of the new fragment separator ACCULINNA-2 and first Experiments”, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B 463 (2020) 504-507

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,

9) “Evidence for the first excited state of 7H”, Physical Review Letters 124 (2020) 022502 [arXiv:1906.07818].

A.A. Bezbakh, V. Chudoba, A.V. Gorshkov, S.A. Krupko, S.G. Belogurov, D. Biare, A.S. Fomichev, E.M. Gazeeva, L.V. Grigorenko, G.Kaminski, O. Kiselev, D.A. Kostyleva, I. Mukha, I.A. Muzalevskii, E.Yu. Nikolskii, Yu.L. Parfenova, 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, M.V. Zhukov

10) “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.

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

11) “Resonant states in 7H: Experimental studies of the 2H(8He, 3He) reaction”, Physical Review C 103 (2021) 044313 [arXiv: 2010.09655]

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

12) “6H states studied in the 2H(8He, 4He) reaction and evidence of an extremely correlated character of the 5H ground state”, Physical Review C 105 (2022) 064605 [arXiv:2105.04435]

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

13) “Study of proton and deuteron pickup reactions (d, 3He), (d, 4He) with 8He and 10Be radioactive beams at ACCULINNA-2 fragment separator”,

Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B 541 (2023) 121-125

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. Mauyey, I. Mukha, Yu.L. Parfenova, A.M. Quynh, V.N. Schetinin, 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

Диссертация Крупко Сергея Анатольевича «ЗАПУСК ФРАГМЕНТ-СЕПАРАТОРА АКУЛИНА-2 И ПЕРВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ С РАДИОАКТИВНЫМИ ПУЧКАМИ» рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности: 1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики

г. Дубна

«\_\_\_» \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 2025 г.

Председатель НТС ЛЯР

В.К. Утенков