

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи

СИДОРЧУК
Сергей Иванович

Исследования структуры тяжелых изотопов
гелия в реакциях передачи и выбивания

Специальность: 01.04.16 – физика атомного ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук

Дубна, 2017

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций имени Г.Н. Флерова Объединенного института ядерных исследований.

Официальные оппоненты:

Пономарев Леонид Иванович, доктор физико-математических наук, академик РАН, Высотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени А.А. Бочвара, главный эксперт.

Оглоблин Алексей Алексеевич, доктор физико-математических наук, профессор, Национальный исследовательский центр Курчатовский институт, руководитель отделения.

Кадменский Станислав Георгиевич, доктор физико-математических наук, профессор, Воронежский государственный университет, заведующий кафедрой ядерной физики.

Ведущее предприятие

ИЯРФ ВНИИЭФ (г. Саров)

Защита диссертации состоится «_____» _____ 2017 года в «___» часов на заседании диссертационного совета Д 720.001.06 при Лаборатории нейтронной физики имени И.М. Франка и Лаборатории ядерных реакций имени Г.Н. Флерова Объединенного института ядерных исследований (г. Дубна, Московская обл.).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ и на сайте http://www.info.jinr.ru/dissertation/DC_flnr_flnp.htm.

Автореферат разослан «___» _____ 2017 года.

Ученый секретарь диссертационного совет
кандидат физико-математических наук

А.Г. Попеко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Благодаря значительному прогрессу в области техники вторичных пучков исследования свойств ядер вблизи границ нуклонной стабильности в последние десятилетия получили новый импульс к развитию. В частности, в области малых масс необходимо отметить последовательность изотопов гелия, обладающих необычными свойствами. Эти свойства включают в себя гелиевую аномалию, нейтронное гало и нарушения оболочечной структуры. Согласно оболочечной модели, два изотопа, доступные для экспериментальных исследований, ^4He и ^{10}He , являются дважды магическими, т.е. обладают замкнутыми протонными и нейтронными оболочками. Изотопы ^6He и ^8He обладают, соответственно, двухнейтронным гало и четырехнейтронным «скином». Изотопы $^{5,7,9,10}\text{He}$ не стабильны относительно эмиссии нейтронов и дают возможность изучать закономерности ядерной структуры путем измерения корреляций продуктов их распада.

Значительные ограничения интенсивности, характерные для вторичных пучков, стимулируют развитие экспериментальных подходов, которые предполагают повышение эффективности измерений. Энергия первичных пучков, которые могут быть ускорены на циклотроне У400М, составляет несколько десятков МэВ/нуклон. Относительно низкие энергии первичных и, соответственно, вторичных пучков, позволяют эффективно использовать в исследованиях как реакции передачи, так и реакции выбивания нуклонов или кластеров. В экспериментах на установке АКУЛИНА широко используется уникальная тритиевая мишень, позволяющая изучать чрезвычайно нейтроноизбыточные ядра в реакциях передачи двух нейтронов с тритона с сечением порядка ста мкб/ср. Малая интенсивность вторичных пучков компенсируется использованием систем регистрации с большим угловым акцептансом, что позволяет изучать эти ядра в широких диапазонах кинематических параметров.

Целью работы является:

- Наблюдение состояний сверхтяжелого изотопа гелия ^{10}He в спектре энергии относительного движения ^8He - n - n , полученного в реакции передачи нейтронов $^3\text{H}(^8\text{He},p)^{10}\text{He}$;
- Исследование оболочечной структуры дважды магического ^{10}He путем измерения угловых и энергетических корреляций продуктов его распада;
- Экспериментальное изучение механизма выбивания нуклонов и кластеров как альтернативного метода получения ядер за границей нейтронной стабильности на примере реакции квазисвободного рассеяния $^4\text{He}(^6\text{He},2\alpha)2n$;
- Экспериментальное исследование влияния взаимодействия в конечном состоянии на формирование низкоэнергетического спектра нейтроноизбыточных ядер;
- Экспериментальное исследование трехтельных α - n - n корреляций, характерных для основного состояния слабосвязанного борромиевского ядра ^6He , в реакции квазисвободного выбивания α -частицы $^4\text{He}(^6\text{He},2\alpha)2n$;
- Сравнительный анализ спектров, полученных в реакциях выбивания и передачи, приводящих к образованию нейтроноизбыточных несвязанных систем;

В связи с указанными целями в диссертационной работе **ставятся и решаются следующие задачи:**

- Проведение экспериментального исследования реакции передачи двух нейтронов $^3\text{H}(^8\text{He},p)^{10}\text{He}$ с использованием вторичного пучка ^8He с энергией 21.5А МэВ и газовой тритиевой мишени. Регистрация протона, который являлся ядром отдачи, в кинематической области, соответствующей малым углам в центре масс и максимальному сечению реакции. В этой кинематической области протон вылетает в направлении, противоположном направлению движения налетающей частицы, что позволяет минимизировать вклад фоновых и конкурирующих процессов. Регистрация ^8He из распада ^{10}He и измерение угловых и энергетических корреляций, характерных для основного и возбужденных состояний ^{10}He . Выбор реакции позволяет интерпретировать полученные результаты в предположении, что нейтроны передаются на ^8He и

испускаются из ^{10}He в s -состоянии с нулевым спином и относительным орбитальным моментом.

- Проведение экспериментального исследования реакции передачи двух нейтронов $^3\text{H}(^6\text{He},p)^8\text{He}^*$ на вторичном пучке ^6He с энергией 25А МэВ с использованием газовой тритиевой мишени. Исследование низкоэнергетического спектра ^8He и поиск проявлений мягкой дипольной моды возбуждения ^8He .
- Проведение экспериментального исследования структуры борромиевского ядра ^6He в реакции упругого рассеяния на α -частице, связанной в гелии-6, $^4\text{He}(^6\text{He},2\alpha)2n$. Поиск проявлений квазисвободного рассеяния при малых энергиях налетающей частицы. Поиск корреляций, соответствующих трехтельной волновой функции основного состояния и сравнение экспериментальных распределений с предсказаниями теории.
- Создание Монте Карло симуляции эксперимента, включающей (а) регистрацию совпадающих α -частиц с помощью системы регистрации с большим угловым акцептансом; (б) спектроскопическую функцию на основе трехтельной волновой функции ^6He с учетом взаимодействия в конечном состоянии двух нейтронов; (в) реалистических амплитуд α - α рассеяния в широком угловом и энергетическом диапазонах. Вычисление модельных распределений и сравнение с экспериментальными данными.
- Выяснение механизма формирования спектра несвязанного состояния в реакциях выбивания нуклонов или кластеров. Экспериментальное определение степени влияния начального состояния на характеристики спектра, получаемого в эксперименте.
- Изучение экзотических кластеризаций нейтроноизбыточных ядер на примере ^6He и реакции квазисвободного рассеяния на тритоне, связанном в этом ядре.

Научная новизна работ, вошедших в диссертацию:

1. Впервые спектр энергии ^{10}He получен в реакции передачи двух нейтронов с тритона на ^8He . Эксперименты были проведены с использованием криогенной газовой тритиевой мишени и вторичного пучка ^8He с энергией 21.5А МэВ. В результате измерений был получен спектр недостающей массы ^{10}He , в котором

было идентифицировано основное состояние 0^+ с энергией 2.1 МэВ и шириной около 2 МэВ.

2. В измерениях угловых распределений продуктов распада ^{10}He в системе центра масс ядра, образованного в реакции, впервые были обнаружены ярко выраженные корреляции, позволившие идентифицировать спин-четности двух возбужденных состояний: $J^\pi = 1^-$ с энергией около 5 МэВ и шириной около 2 МэВ, а также $J^\pi = 2^+$ с энергией более 7 МэВ.
3. Установленный порядок следования возбужденных уровней ^{10}He позволил сделать вывод о нарушении оболочечной структуры в ядрах за границей нейтронной стабильности.
4. В спектре энергии возбуждения ^8He , полученном в реакции передачи нейтронов $^3\text{H}(^6\text{He}, p)^8\text{He}$, наблюдался резкий рост сечения в надпороговой области, который был интерпретирован как признак возбуждения мягкой дипольной моды в ядре ^8He .
5. Впервые в реакции квазисвободного выбивания α -кора из ядра с борромиевским двухнейтронным гало ^6He непосредственно в эксперименте наблюдались импульсные корреляции нейтронов, соответствующие трехтельной волновой функции основного состояния ^6He .
6. Впервые создана компьютерная симуляция квазисвободной реакции $^4\text{He}(^6\text{He}, 2\alpha)2n$ с использованием трехтельной волновой функции ^6He и амплитуд свободного α - α рассеяния в широком диапазоне относительных энергий. Симуляция позволяет детально изучать сложные многомерные корреляции в четырехтельном выходном канале реакции.
7. Впервые наблюдалось квазисвободное рассеяние на сильно связанном в ^6He тритонном кластере с тритоном и системой дейтрон-нейтрон в качестве спектатора.

Практическая ценность.

- В работе показано, что корреляционные измерения продуктов распада нейтроноизбыточных ядерных систем дают важную информацию о структуре изучаемых ядер. Данные по структуре ядер $^{8,10}\text{He}$, полученные в реакциях $^3\text{H}(^{6,8}\text{He}, p)^{8,10}\text{He}$ могут быть использованы для развития теоретических моделей,

имеющих отношение к структуре ядер, расположенных вдали от линии β -стабильности.

- Полученные данные по рассеянию на виртуальных кластерах в ${}^6\text{He}$ могут быть использованы в теоретических исследованиях слабосвязанных ядер на границе нуклонной стабильности.
- Для анализа данных, полученных в эксперименте по исследованию реакции ${}^4\text{He}({}^6\text{He}, 2\alpha)2n$, была создана компьютерная симуляция квазисвободной с использованием трехтельной волновой функции ${}^6\text{He}$ и амплитуд свободного α - α рассеяния в широком диапазоне относительных энергий. Симуляция позволяет детально изучать сложные многомерные корреляции в выходном канале реакции. Поскольку реакции на виртуальных частицах характеризуются достаточно высоким сечением даже при относительно малых энергиях, подобная симуляция является эффективным инструментом при исследованиях значительного числа реакций.
- По результатам исследований реакции квазисвободного рассеяния ${}^4\text{He}({}^6\text{He}, 2\alpha)2n$ был сделан вывод о существенном влиянии начального состояния на наблюдаемый спектр динейтрона. Несмотря на наблюдавшееся в эксперименте взаимодействие в конечном состоянии двух нейтронов, спектр энергии возбуждения динейтронной системы, в основном, определяется корреляциями, характерными для начального состояния, что необходимо учитывать при интерпретации спектров несвязанных состояний, которые наблюдаются в реакциях фрагментации.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы были представлены на следующих совещаниях и конференциях:

- Совещание по физике сильных взаимодействий (Гуйлинь, Китай, 30 октября – 2 ноября 2015).
- Семинар в Школе физики Пекинского университета (Пекин, Китай, 8 октября 2012).
- Семинар в Школе физики Нанкинского университета (Нанкин, Китай, 11 октября 2012).

- Международный симпозиум по экзотическим ядрам (Владивосток, Россия, 29 сентября – 6 октября 2012).
- Международная конференция Nuclear Structure and Dynamics (Опатия, Хорватия, 8 – 14 июля 2012).
- Конференция Ядро-2012 (Воронеж, Россия, 25 – 29 июня 2012).
- Международная конференция EURORIB'2012 (Абано Терме, Италия, 20 – 26 мая 2012).
- Совещание БЛТФ-ИТФ (Пекин, Китай, 4 – 11 сентября 2011).
- Международная конференция по нестабильным ядрам (Ханой, Вьетнам, 2011).
- Семинар в университете г. Стелленбош (Стелленбош, ЮАР, 25 октября 2009).
- Семинар в iThemba Labs (Кейптаун, ЮАР, 22 октября 2009).
- 5 Международная конференция по экзотическим ядрам и атомным массам (Сверк, Польша, 2009).
- 9 Международная конференция по кластерным аспектам ядерной структуры и динамики (Стратфорд, Великобритания, 2008).
- Конференция Ядро-2007 (Воронеж, Россия, 25 – 29 июня 2007).
- 7 Международная конференция по радиоактивным ядерным пучкам (RNB7), (Кортина д'Ампеццо, Италия 2007).
- Симпозиум по ядерной физике VI (Турс, Франция, 2007).
- 11 Международная конференция по механизмам ядерных реакций (Варенна, Италия, 12 - 16 июня 2006).
- Международный симпозиум по экзотическим ядрам (Ханты-Мансийск, Россия, 17-21 июля 2006).

Публикации. По результатам исследований, составивших основу диссертации, опубликовано 19 работ. Результаты, вошедшие в эти работы, были получены автором в период 2003 – 2016 гг.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и изложена на 132 страницах машинописного текста, включая 47 рисунков и список литературы из 141 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность поставленных задач, содержится обзор литературных данных по теме диссертации, сформулирована цель работы, изложены основные положения, которые выносятся на защиту, и приводится краткое содержание диссертации по главам.

В первой главе приведено описание экспериментальных методик, включающее описание фрагмент-сепаратора АКУЛИНА и характеристики вторичных пучков. Приведено описание криогенного мишенного устройства, предназначенного для получения тритиевой и гелиевой газовых мишеней, которые использовались в экспериментах.

Вторая глава посвящена результатам эксперимента по изучению сверхтяжелого изотопа гелия ^{10}He в реакциях передачи нейтронов $^3\text{H}(^8\text{He},p)^{10}\text{He}$. В этой главе приводится описание проведенных измерений, а также обсуждаются полученные результаты. Для регистрации заряженных частиц в эксперименте использовались два телескопа, установленные перед мишенью и после мишени. Первый телескоп предназначался для регистрации протонов отдачи, второй – для регистрации ^8He , испущенного в результате распада ^{10}He . Геометрия эксперимента была ориентирована на регистрацию продуктов реакции в диапазоне малых углов в системе центра масс, отвечающем максимальному сечению и минимальному вкладу фоновых реакций.

В спектре энергии возбуждения ^{10}He был обнаружен пик основного состояния 0^+ с энергией 2.1 МэВ и шириной около 2 МэВ (см. рис. 1). При этом часть спектра с энергией выше 4 МэВ представляет собой гладкое распределение, не содержащее явных признаков заселения возбужденных состояний ^{10}He . Вместе с тем была обнаружена значительная анизотропия вылета ^8He из ^{10}He по отношению к направлению переданного импульса, а также зависимость углового распределения от энергии ^{10}He .

При анализе предполагалось, что в реакции динейтрон передается с тритона на ^8He как одна частица с полным спином $S=0$ и нулевым относительным орбитальным моментом, что подтверждается многочисленными экспериментальными данными. В этом случае, при условии, что орбитальный момент в системе динейтрона $\ell_x=0$, угловые корреляции продуктов распада ^{10}He определяются орбитальным моментом

ℓ_y в системе $2n-^8\text{He}$. В данном случае орбитальный момент ℓ_y совпадает с полным спином ^{10}He J и лежит в плоскости, перпендикулярной направлению переданного момента.

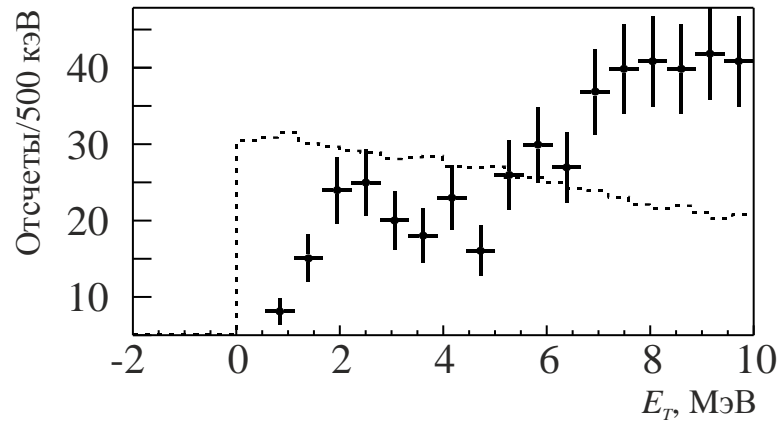


Рис. 1. Спектр недостающей массы ^{10}He . Пунктирная гистограмма показывает зависимость эффективности регистрации от энергии ^{10}He .

Анализ угловых распределений ^8He показал, что они характеризуются весьма характерными корреляциями, которые зависят от диапазона энергии ^{10}He . На рис. 2 показаны распределения косинуса угла вылета ^8He из ^{10}He по отношению к направлению переданного импульса, а также распределения доли энергии относительного движения нейтронов в полной энергии ^{10}He $\varepsilon = E_{nn}/E_T$ для разных диапазонов энергии ^{10}He .

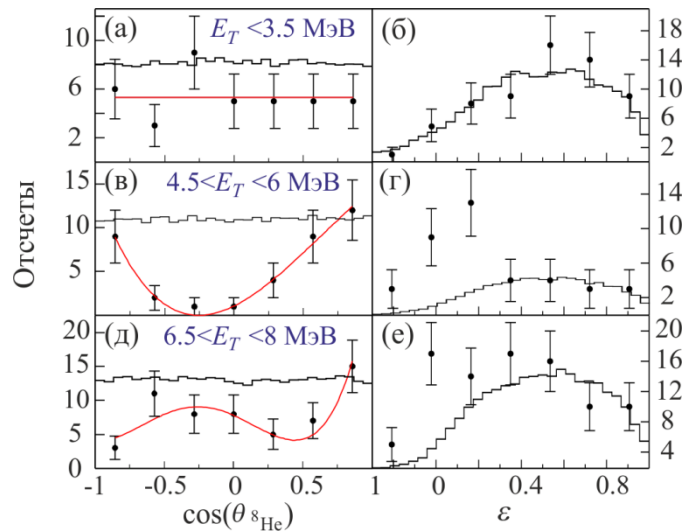


Рис. 2. Угловые распределения (три левые панели) и распределение по ε (три правые панели), полученные для различных диапазонов возбуждения ^{10}He . Гистограммы и красные линии на левых панелях (а), (в) и (д) показывают, соответственно, эффективность регистрации и результаты подгонки спектров. Гистограммы на правых панелях (б), (г) и (е) получены в результате симуляции трехфазового объема.

Красные линии на распределениях, показанных в левом столбце, получены в результате подгонки экспериментальных спектров при помощи выражения

$$\omega = [A \cdot P_0(x) + B \cdot \sqrt{3} \cdot P_1(x) + C \cdot \sqrt{5} \cdot P_2(x)]^2 + D^2,$$

где P_ℓ - полиномы Лежандра с $x = \cos \vartheta_{8\text{He}}$. Коэффициенты A , B и C представляют собой амплитуды s -, p - и d -волн, которые складываются когерентно. Коэффициент D отвечает за некогерентный фон, обусловленный вкладом других состояний ^{10}Ne , например, со спином динейтрона $S=1$. Кроме этого, коэффициент D может описывать вклад других процессов, которые не учитываются в нашем анализе. Коэффициенты A , B , C и D являются подгоночными параметрами. Результаты подгонки экспериментального спектра показаны на рис. 3 (а).

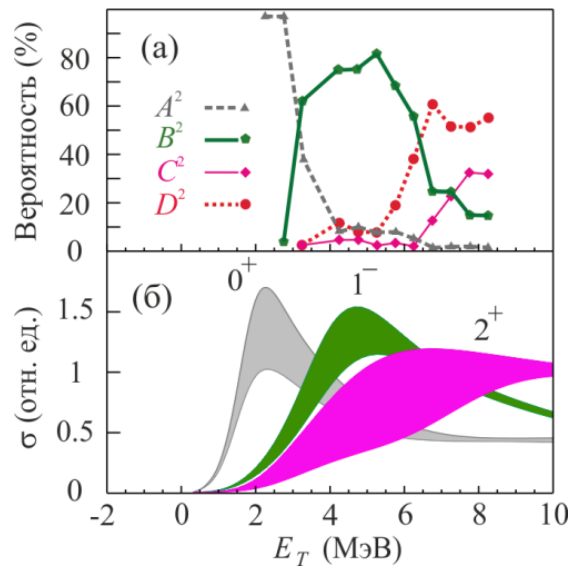


Рис. 3. (а) Амплитуды вкладов s -, p - и d -волн, возведенные в квадрат. Амплитуды получены в результате подгонки экспериментального спектра с помощью выражения (2.3.1); (б) результаты теоретических расчетов для состояний с спин-четностями $J^\pi=0^+, 1^-$ и 2^+ . Размер областей, окрашенных в разные цвета, отражает степень неточности вычислений.

Таким образом, анализ корреляций продуктов распада позволил выявить в спектре возбуждения ^{10}Ne области, в которых угловые распределения ^8He хорошо описываются когерентной суммой трех состояний: 0^+ , 1^- и 2^+ . Обнаружение состояния с отрицательной четностью в качестве первого возбужденного уровня является одним из наиболее неожиданных результатов, который свидетельствует о нарушении оболочечной структуры в ^{10}Ne .

Третья глава посвящена анализу результатов эксперимента по изучению низкоэнергетического спектра ядра ^8He в реакции передачи нейтронов

$^3\text{H}(^6\text{He}, p)^8\text{He}$. В исследованиях применялись экспериментальные подходы, аналогичные тем, которые использовались в исследованиях ^{10}Ne : протон отдачи регистрировался в области малых углов в системе центра масс, соответствующей направлению вылета протона, обратному направлению движения бомбардирующей частицы. ^8He мог быть образован либо в основном, либо в возбужденном состоянии. В первом случае протон регистрировался в совпадении с ^8He , во втором в совпадении продуктами распада ^8He : с ^6He и одним из нейтронов. В измерениях были получены спектры энергии возбуждения ^8He , соответствующие одному из трех вариантов совпадений частиц в выходном канале реакции: p - ^8He , p - ^6He и p - ^6He - n . Эти спектры показаны на рис. 4.

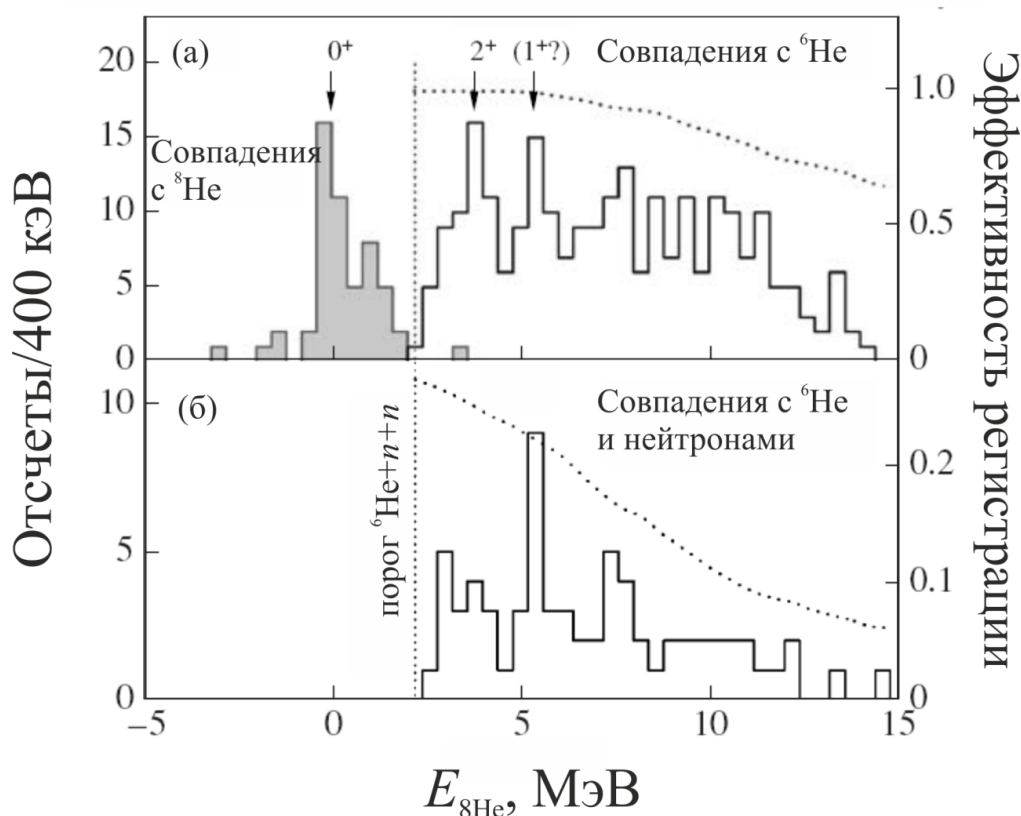


Рис. 4. (а) Спектр энергии возбуждения ^8He . Серая гистограмма в области энергии ниже порога $^6\text{He}+n+n$ соответствует совпадениям протона с ^8He . Распределение выше порога распада ^8He получено при условии совпадения протона с ^6He ; (б) спектр энергии возбуждения ^6He для тройных совпадений ^6He , протона и нейтрона. Пунктирными линиями показаны зависимости от энергии эффективности регистрации.

В спектре энергии возбуждения ^8He ясно видны пики, отвечающие образованию основного состояния $^8\text{He}^{0+}$ (ниже порога распада $^6\text{He}-n-n$) и первого возбужденного

состояния ${}^8\text{He}^{2+}$ с энергией ≈ 3.6 МэВ. Также можно предположить, что в реакции, помимо состояния 2^+ , заселяется уровень 1^+ с энергией 5.4 МэВ, о котором упоминается в ряде экспериментальных и теоретических работ. Важной особенностью спектра, показанного на рис. 4, является резкий подъем сечения выше порога трехтельного распада ${}^6\text{He}+n+n$. В спектре, полученном в эксперименте, сечение растет заметно быстрее, чем можно было бы ожидать, исходя из стандартного R -матричного подхода, согласно которому при энергии выше порога двухтельного распада ${}^8\text{He}^{2+} \rightarrow {}^7\text{He}+n$ сечение заселения состояния должно быть пропорционально $E_{\text{He}}^{3/2}$. Более резкое поведение сечения может рассматриваться как указание на возбуждение мягкой дипольной моды ${}^8\text{He}^{1-}$.

В четвертой главе содержатся результаты исследований реакции рассеяния на виртуальной α -частице, связанной в ${}^6\text{He}$ ${}^4\text{He}({}^6\text{He}, 2\alpha)2n$. Данная работа преследовала две основные цели. Первая связана с изучением возможностей исследования структуры экзотических ядер в квазисвободных реакциях при относительно небольшой энергии налетающего ядра 25А МэВ. В качестве изучаемого ядра был выбран ${}^6\text{He}$, поскольку он характеризуется наиболее ярко выраженной трехтельной структурой α - n - n и его волновая функция считается хорошо установленной. В качестве ядра-зонда, взаимодействующего с α -кором ${}^6\text{He}$, использовался ${}^4\text{He}$, поскольку амплитуда упругого α - α рассеяния хорошо известна в широком энергетическом диапазоне. Механизм квазисвободной реакции подразумевает наличие в диаграмме реакции двух независимых вершин, одна из которых описывается волновой функцией ${}^6\text{He}$, а вторая – амплитудой α - α рассеяния. Импульсное приближение плоских волн подразумевает следующую факторизацию выражения для сечения реакции

$$d\sigma^{QFS} \sim N_{eff} \frac{d^2\sigma_{free}}{dE_{\alpha\alpha}d\vartheta_{\alpha\alpha}} |\Psi(\mathbf{P}_{nn}, \mathbf{P}_{2n})|^2 d\mathbf{P}_{\alpha\alpha} d\mathbf{P}_{2\alpha 2n} d\mathbf{P}_{nn},$$

где N_{eff} – эффективное число кластеров в изучаемом ядре, σ_{free} – сечение свободного α - α рассеяния, а $\Psi(\mathbf{P}_{nn}, \mathbf{P}_{2n})$ – волновая функция ${}^6\text{He}$ в импульсном представлении. Независимость двух вершин также означает, что если угловые распределения α - α рассеяния в широком энергетическом диапазоне описываются амплитудой свободного α - α рассеяния, то должны наблюдаться и весьма выразительные трехтельные корреляции, характерные для волновой функции ${}^6\text{He}$.

Второй целью являлся полный или частичный ответ на вопрос, почему в экспериментальных исследованиях ядерных состояний за границей стабильности, таких, например, как ^{10}He , реакции выбивания (протона из ^{11}Li) и реакции передачи (двух нейтронов на ^8He) дают разный результат. В рамках этой задачи мы используем аналогию между ^{10}He , полученном в реакции выбивания протона из ^{11}Li , и виртуальным состоянием динейтрона, который получен в реакции выбивания α -кора из ^6He . Как отмечалось выше, преимуществом реакции $^4\text{He}(^6\text{He}, 2\alpha)2n$ является возможность детально изучить проблему, поскольку для нее известны как начальное, так и конечное состояния.

Для идентификации процесса путем описания четырехтельных угловых и энергетических корреляций в выходном канале реакции была создана компьютерная Монте-Карло симуляция эксперимента на базе плосковолнового импульсного приближения. Для моделирования реакции использовалась спектральная функция, построенная на основе трехтельной волновой функции ^6He с учетом взаимодействия в конечном состоянии двух нейтронов, а также зависимость амплитуды α - α рассеяния от угла и энергии. Экспериментальные спектры подгонялись с помощью набора распределений, полученных в симуляции квазисвободного рассеяния. Набор включал в себя спектры 7 независимых величин, которые подгонялись одновременно, что значительно повышало достоверность описания данных. На рис. 5 показан результат подгонки экспериментальных распределений угла рассеяния $\vartheta_{\alpha\alpha}$, угла Треймана-Янга ϑ_{T-Y} , гипер-угла ϑ_h , двух компонентов импульса спектатора (динейтрон) в центре масс исходного налетающего ядра P_{2n}^Z и P_{2n}^X , а также полного импульса P_{2n} . Пунктирной линией показаны распределения, полученные в результате моделирования квазисвободного рассеяния, темно-серая гистограмма отвечает четырехтельному фазовому объему, светло-серая представляет собой сумму двух вышеупомянутых распределений. Точками с ошибками показаны экспериментальные данные. Из рисунка видно хорошее согласие эксперимента с модельными представлениями.

Совпадение форм экспериментальных угловых распределений $\vartheta_{\alpha\alpha}$ в различных энергетических диапазонах с модельными распределениями свидетельствует о том, что α - α взаимодействие в реакции $^4\text{He}(^6\text{He}, 2\alpha)2n$ описывается амплитудой свободного α - α рассеяния. Отсюда следует, что из экспериментальных данных

можно извлечь достоверную информацию о структуре ${}^6\text{He}$. В частности, распределения импульса P_{2n} , его проекций P_{2n}^Z и P_{2n}^Y , а также гипер-угла $\tan \vartheta_h = \sqrt{E_{nn}/\tilde{E}_{2n-\alpha}}$ ($\tilde{E}_{2n-\alpha} = P_{2n}^2/2\mu_{2n-\alpha}$), содержат информацию о волновой функции ${}^6\text{He}$.

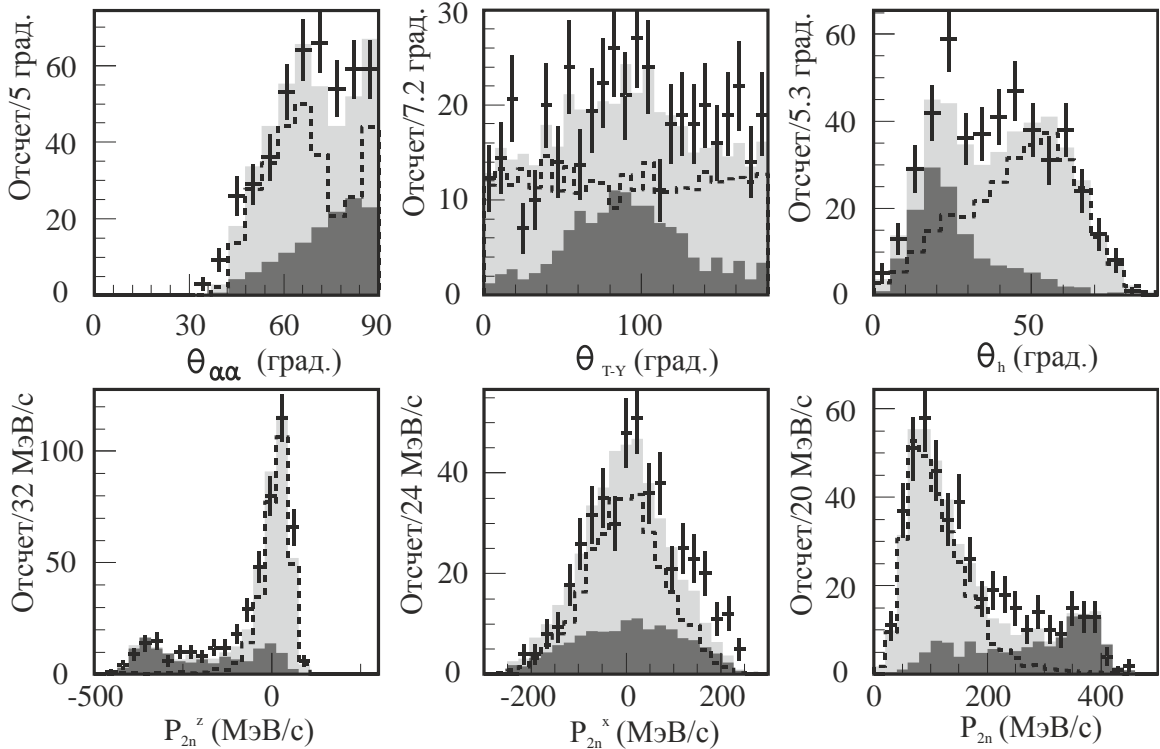


Рис. 5. Результаты одновременной подгонки экспериментальных данных в энергетическом диапазоне $35 < E_{\alpha\alpha} < 40$ МэВ и $E_{nn} < 10$ МэВ. Вклад квазисвободного рассеяния показан пунктирными гистограммами, темно-серые гистограммы соответствуют четырехтельному фазовому объему. Светло-серые гистограммы соответствуют сумме вкладов квазисвободного рассеяния и фазового объема. Точками с ошибками показаны экспериментальные данные.

Экспериментальное распределение по гипер-углу для событий, отвечающих условию $P_{2n}^Z > 80$ МэВ/с, показано на рис. 6. В распределении хорошо заметна асимметрия спектра, возникающая благодаря вкладам «динейтронной» и «сигарообразной» компонентов волновой функции ${}^6\text{He}$.

Полученные результаты содержат важную информацию относительно механизма формирования спектра конечного состояния, которая заключается в том, что несмотря на взаимодействие в конечном состоянии, основное влияние на форму спектра несвязанного состояния и положение его максимума (около 5 МэВ) оказывает волновая функция состояния начального.

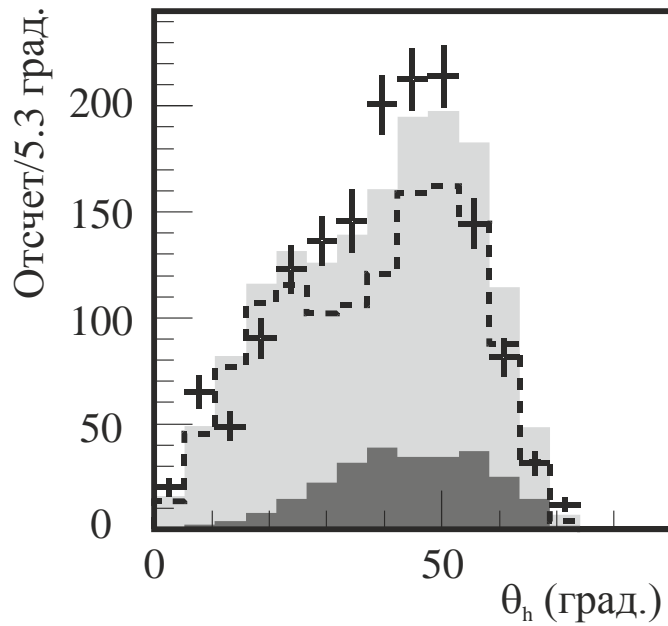


Рис. 6. Экспериментальное распределение по гипер-углу ϑ_h , полученное в реакции ${}^4\text{He}({}^6\text{He}, 2\alpha)2n$ при условии $P_{2n}^Z > 80$ МэВ/с. Обозначения объясняются в подписи к рис. 5.

В пятой главе приводятся экспериментальные данные, полученные в реакции рассеяния α -частицы на виртуальном тритоне, связанном в ${}^6\text{He}$, при энергии налетающего ${}^6\text{He}$ 150 МэВ. В экспериментах изучались двух- и трехчастичные конфигурации ${}^6\text{He} \rightarrow t+t$ и ${}^6\text{He} \rightarrow t+d+n$. Для описания внутреннего движения тритонов в ${}^6\text{He}$ в симуляции использовалась волновая функция, воспроизводящая энергию связи ядра по отношению к распаду ${}^6\text{He} \rightarrow t+t$ (12.6 МэВ). Радиус потенциала выбирался таким образом, чтобы воспроизвести экспериментальное импульсное распределение спектатора.

Описание экспериментальных данных осуществлялась таким же образом, как и в главе 4 в случае α - α рассеяния, – путем одновременной подгонки экспериментальных распределений набора переменных с использованием модельных распределений квазисвободного рассеяния и фазового объема. Результаты подгонки для реакции ${}^4\text{He}({}^6\text{He}, \alpha t)t$ показаны на рис. 7. Аналогичные результаты были получены и для реакции ${}^4\text{He}({}^6\text{He}, \alpha t)dn$.

Эффективное число тритонов для конфигурации ${}^6\text{He} \rightarrow t+d+n$ оказалось довольно большим по сравнению с $t-t$ конфигурации: $N_t=0.18(5)$ против $N_t=0.06(2)$. При этом измеренное сечение рассеяния в угловом диапазоне $30^\circ < \vartheta_{\alpha t} < 150^\circ$ составило $23(6)$ мб. Интересно отметить, что энергия дезинтеграции ${}^6\text{He}$ в этом случае значительно

превышает соответствующие величины для конфигурации ${}^6\text{He} \rightarrow \alpha + n + n$ (0.97 МэВ) и ${}^6\text{He} \rightarrow t + t$ (12.3 МэВ) и составляет 18.6 МэВ.

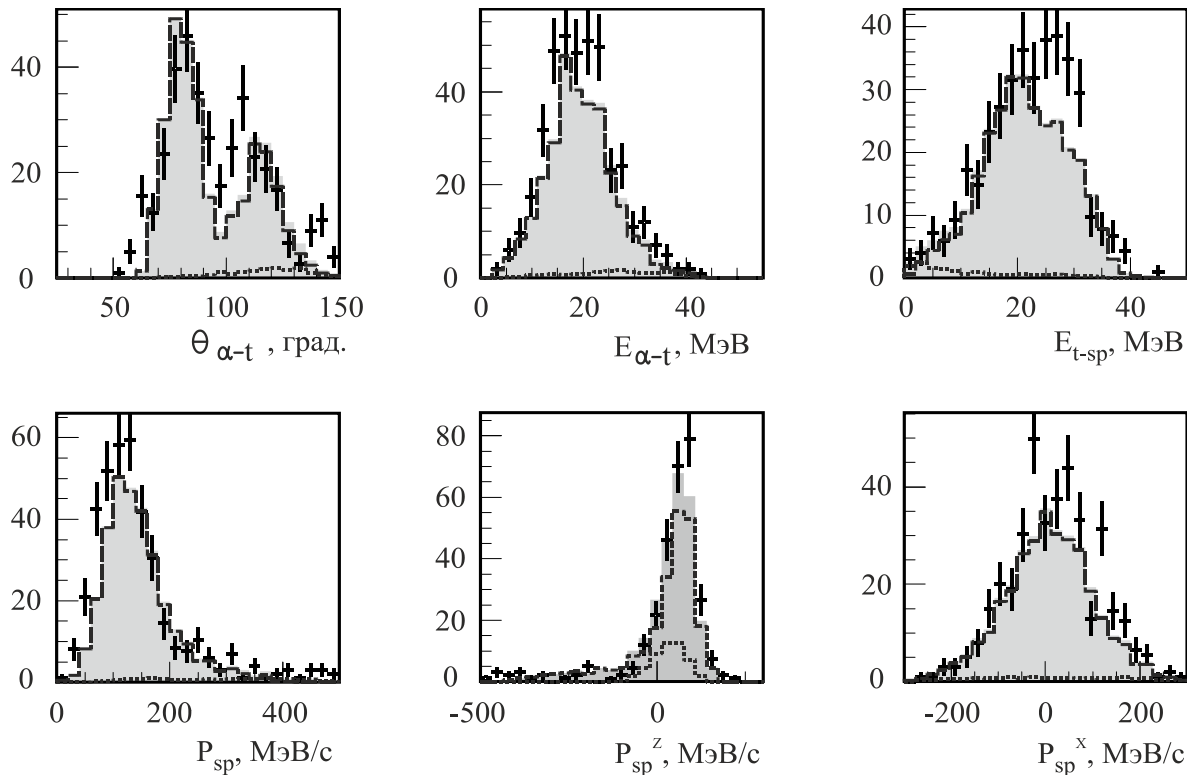


Рис. 7. Результаты одновременной подгонки экспериментальных данных, полученные для реакции рассеяния на виртуальном тритоне, с тритоном в качестве спектатора ${}^4\text{He}({}^6\text{He}, \alpha t)t$. Обозначения объясняются в подписи к рис. 5.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы:

- Впервые были проведены измерения низкэнергетического спектра сверхтяжелого изотопа гелия ${}^{10}\text{He}$ в реакции передачи двух нейтронов с использованием криогенной тритиевой мишени и вторичного пучка радиоактивных ядер ${}^8\text{He}$ с энергией 21.5А МэВ;
- Экспериментально измерены энергия и ширина основного состояния ${}^{10}\text{He}$: $E_t \approx 2.1$ МэВ и $\Gamma \approx 2$ МэВ;
- Наблюдение ярко выраженных угловых корреляций продуктов распада ${}^{10}\text{He}$ позволило установить спины и четности возбужденных состояний ${}^{10}\text{He}$: $J^\pi = 1^-$ с энергией около 5 МэВ и шириной около 2 МэВ, а также $J^\pi = 2^+$ с энергией более 7 МэВ;
- Впервые установлено, что ядро ${}^{10}\text{He}$, обладающее максимальной среди известных ядер величиной отношения $N/Z = 4$, характеризуется необычным

порядком следования возбужденных уровней: энергия состояния с отрицательной четностью 1^- мала, и это состояние расположено на энергетической шкале ниже состояния с положительной четностью 2^+ , что свидетельствует о нарушении оболочечной структуры в ядерной системе ^{10}He , расположенной за линией нейтронной стабильности;

- В спектре энергии возбуждения ядра ^8He необычное поведение сечения вблизи порога распада $^6\text{He}+n+n$ интерпретируется как указание на возбуждение мягкой дипольной моды в ядре ^8He .
- Впервые проведено детальное изучение квазисвободного рассеяния с несвязанным динейтронным спектатором на вторичном пучке ^6He . Показано, что квазисвободные реакции на слабосвязанных ядрах доминирующим процессом даже при относительно невысокой энергии бомбардирующей частицы 25А МэВ;
- Для описания четырехтельных энергетических и импульсных корреляций в выходном канале реакции квазисвободного рассеяния $^4\text{He}(^6\text{He},2\alpha)2n$ впервые была создана полная компьютерная симуляция эксперимента на основе реалистической волновой функции ^6He и амплитуды упругого α - α рассеяния в широком энергетическом диапазоне;
- В результате изучения реакции квазисвободного рассеяния $^4\text{He}(^6\text{He},2\alpha)2n$ впервые экспериментально наблюдались трехтельные импульсные корреляции основного состояния ^6He , согласующиеся с модельным представлением;
- Впервые было показано, что в реакциях квазисвободного выбивания кластера на формирование энергетического спектра несвязанного спектатора оказывают влияние как начальное состояние, так и взаимодействие в конечном состоянии частиц, составляющих спектатор. Из этого следует, что учет только одного из этих факторов в реакциях фрагментации может приводить к неверной интерпретации особенностей спектра изучаемой системы.
- В реакциях квазисвободного рассеяния на тритоне, связанном в ^6He , $^4\text{He}(^6\text{He},\alpha t)t$ и $^4\text{He}(^6\text{He},\alpha t)dn$, показано, что конфигурации с разрушенной α -частицей в ^6He вносят значительный вклад в формирование структуры ^6He , несмотря на большую, более 10 МэВ, энергию дезинтеграции ядра. При этом

относительный вес трехтельной комбинации ${}^6\text{He} \rightarrow t+d+n$ значительно превышает вес двухтельной комбинации ${}^6\text{He} \rightarrow t+t$.

Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Л.В. Григоренко, М.С. Головков, С.А. Крупко, С.И. Сидорчук, Г.М. Тер-Акопьян, А.С. Фомичев, В. Худоба,
Исследования легких экзотических ядер вблизи границы стабильности в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ,
Успехи физических наук т. 186 №4 (2016) 337-386.
2. С.И. Сидорчук, А.А. Безбах, Р. Вольски, М.С. Головков, А.В. Горшков, В.А. Горшков, Л.В. Григоренко, И.А. Егорова, Г. Каминьски, С.А. Крупко, Е.А. Кузьмин, Е.Ю. Никольский, Ю.Ц. Оганесян, Ю.Л. Парфенова, Р.С. Слепнев, С.В. Степанцов, Г.М. Тер-Акопьян, А.С. Фомичев, В. Худоба, П.Г. Шаров, П. Ялувкова,
Корреляционные исследования низкоэнергичного спектра ${}^{10}\text{He}$,
Изв. РАН, серия физическая, т. 77, №4 (2013) 398-403.
3. A.S. Fomichev, A.A. Bezbakh, V. Chudoba, I.A. Egorova, S.N. Ershov, M.S. Golovkov, A.V. Gorshkov, L.V. Grigorenko, P. Jaluvkova, G. Kaminski, S.A. Krupko, E.A. Kuzmin, E.Yu. Nikolskii, I.G. Mukha, Yu.L. Parfenova, P.G. Sharov, S.I. Sidorchuk, R.S. Slepnev, S.V. Stepantsov, G.M. Ter-Akopian, R. Wolski, M.V. Zhukov, A.A. Yukhimchuk, S.V. Filchagin, A.A. Kirdyashkin, I.P. Maksimkin, O.P. Vikhlyantsev,
Recent results related to excited states of ${}^6\text{Be}$ and ${}^{10}\text{He}$,
Eur. Phys. J., **38** (2012) 15002-1-6.
4. S.I. Sidorchuk, A.A. Bezbakh, V. Chudoba, I.A. Egorova, A.S. Fomichev, M.S. Golovkov, A.V. Gorshkov, V.A. Gorshkov, L.V. Grigorenko, P. Jaluvkova, G. Kaminski, S.A. Krupko, E.A. Kuzmin, E.Yu. Nikolskii, Yu.Ts. Oganessian, Yu.L. Parfenova, P.G. Sharov, R.S. Slepnev, S.V. Stepantsov, G.M. Ter-Akopian, R. Wolski, A.A. Yukhimchuk, S.V. Filchagin, A.A. Kirdyashkin, I.P. Maksimkin, O.P. Vikhlyantsev,
 ${}^{10}\text{He}$ low-lying states structure uncovered by correlations,
Phys. Rev. Lett., **108** (2012) 202502-1-5.

5. S.I. Sidorchuk, A.S. Fomichev, M.S. Golovkov, A.V. Gorshkov, L.V. Grigorenko, V.A. Gorshkov, S.A. Krupko, Yu.Ts. Oganessian, A.M. Rodin, R.S. Slepnev, S.V. Stepantsov, G.M. Ter-Akopian, R. Wolski, A.A. Korsheninnikov, E.Yu. Nikolskii, P. Roussel-Chomaz, W. Mittig,
Study of the ${}^6\text{He}$ structure in the reaction of quasifree scattering ${}^4\text{He}({}^6\text{He}, 2\alpha)$,
Nucl. Phys. A **840** 1 (2010) 1-18.
6. С.И. Сидорчук, Р. Вольски, М.С. Головков, В.А. Горшков, Л.В. Григоренко, С.А. Крупко, Ю.Ц. Оганесян, А.М. Родин, Р.С. Слепнев, С.В. Степанцов, Г.М. Тер-Акопьян, А.С. Фомичев,
Исследование структуры ${}^6\text{He}$ в реакциях квазисвободного рассеяния,
Известия РАН, серия физическая **74** №4 (2010) 475-480.
7. M.S. Golovkov, L.V. Grigorenko, G.M. Ter-Akopian, A.S. Fomichev, Yu.Ts. Oganessian, V.A. Gorshkov, S.A. Krupko, A.M. Rodin, S.I. Sidorchuk, R.S. Slepnev, S.V. Stepantsov, R. Wolski, D.Y. Pang, V. Chudoba, A.A. Korsheninnikov, E.A. Kuzmin, E.Yu. Nikolskii, B.G. Novatskii, D.N. Stepanov, P. Roussel-Chomaz, W. Mittig, A. Ninane, F. Hanappe, L. Stuttge, A.A. Yukhimchuk, V.V. Perevozchikov, Yu.I. Vinogradov, S.K. Grishechkin, S.V. Zlatoustovskiy,
The ${}^8\text{He}$ and ${}^{10}\text{He}$ spectra studied in the (t,p) reaction,
Phys. Lett. B **672** (2009) 22-29.
8. L.V. Grigorenko, M.S. Golovkov, G.M. Ter-Akopian, A.S. Fomichev, Yu.Ts. Oganessian, V.A. Gorshkov, S.A. Krupko, A.M. Rodin, S.I. Sidorchuk, R.S. Slepnev, S.V. Stepantsov, R. Wolski, D.Y. Pang, V. Chudoba, A.A. Korsheninnikov, E.A. Kuzmin, E.Yu. Nikolskii, B.G. Novatskii, D.N. Stepanov, P. Roussel-Chomaz, W. Mittig, A. Ninane, F. Hanappe, L. Stuttge, A.A. Yukhimchuk, V.V. Perevozchikov, Yu.I. Vinogradov, S.K. Grishechkin, S.V. Zlatoustovskiy,
Soft dipole mode in ${}^8\text{He}$,
Phys. of Part. and Nucl. Lett.. v. 6, N 2, (2009) 118 – 125.
9. G.M. Ter-Akopian, M.S. Golovkov, L.V. Grigorenko, S.I. Sidorchuk,
Breakdown of shell closure in helium-10,
McGraw-Hill encyclopedia of science & technology (2013) 49 – 53.
10. A.S. Fomichev, L.V. Grigorenko, M.S. Golovkov, G.M. Ter-Akopian, Yu.Ts. Oganessian, V.A. Gorshkov, S.A. Krupko, A.M. Rodin, S.I. Sidorchuk, R.S. Slepnev,

- S.V. Stepantsov, R. Wolski, V. Chudoba, D. Pang, A.A. Korshennikov, E.A. Kuzmin, B.G. Novatskii, D.N. Stepanov, E.Yu. Nikolskii, P. Roussel-Chomaz, W.Mittig, A. Ninane, F. Hanappe, L. Stuttge, A.A. Yukhimchuk, V.V. Perevozchikov, Yu.I. Vinogradov, S.K. Grishechkin, S.V. Zlatoustovskiy,
Properties of very n-rich He isotopes,
Eur. Phys. J. A **42** (2009) 465-469. The 5th Int. Conf. on Exotic Nuclei and Anomalous Masses, Swierk, Ryn, Poland.
11. V. Chudoba, A.S. Fomichev, L.V. Grigorenko, M.S. Golovkov, Yu.Ts. Oganessian, V.A. Gorshkov, S.A. Krupko, A.M. Rodin, S.I. Sidorchuk, R.S. Slepnev, S.V. Stepantsov, G.M. Ter-Akopian, R. Wolski, D. Pang, A.A. Korshennikov, E.A. Kuzmin, E.Yu. Nikolskii, B.G. Novatskii, D.N. Stepanov, P. Roussel-Chomaz, W.Mittig, A. Ninane, F. Hanappe, L. Stuttge, A.A. Yukhimchuk, Yu.I. Vinogradov, V.V. Perevozchikov, S.K. Grishechkin,
Low-energy spectra of ^8He and ^{10}He studied in (t,p) type reactions in inverse kinematics,
Acta Physica Polonica B **40** (2009) 899-902.
12. V. Chudoba, A.S. Fomichev, M.S. Golovkov, A.V. Gorshkov, V.A. Gorshkov, L.V. Grigorenko, S.A. Krupko, Yu.Ts. Oganessian, A.M. Rodin, S.I. Sidorchuk, R.S. Slepnev, S.V. Stepantsov, G.M. Ter-Akopian, R. Wolski, A.A. Korshennikov, E.Yu. Nikolskii, V.A. Kuzmin, B.G. Novatskii, D.N. Stepanov, P. Roussel-Chomaz, W. Mittig, V. Bouchat, V. Kinnard, T. Materna, F. Hanappe, O. Dorvaux, L. Stuttge,
Quest for the ^{10}He nucleus,
Eur. Phys. J. ST **162** (2008) 161-164.
13. G.M. Ter-Akopian, M.S. Golovkov, L.V. Grigorenko, A.S. Fomichev, A.V. Gorshkov, S.A. Krupko, Yu.Ts. Oganessian, A.M. Rodin, S.I. Sidorchuk, R.S. Slepnev, S.V. Stepantsov, R. Wolski, A.A. Korshennikov, E.Yu. Nikolskii, E.A. Kuzmin, B.G. Novatskii, D.N. Stepanov, P. Roussel-Chomaz, W. Mittig,
Neutron excess nuclei of hydrogen and helium at ACCULINNA,
Eur. Phys. J. ST **150** (2007) 61-66. The 7th Int. Conf. on Radioactive Nuclear Beams, Cortina d'Ampezzo, Italy.

14. R. Wolski, M.S. Golovkov, L.V. Grigorenko, A.S. Fomichev, S.A. Krupko, S.I. Sidorchuk, S.V. Stepantsov, R.S. Slepnev, G.M. Ter-Akopian, L. Standylo, Y.M. Tchuvil'sky, D.Y. Pang,
Unbound states studied by direct reactions,
J. of Phys. **111** (2008) 1-6. The 9th Int. Conf. on Clustering Aspects of Nuclear Structure and Dynamics. Stratford upon Avon, Great Britain.
15. R. Wolski, M.S. Golovkov, L.V. Grigorenko, A.S. Fomichev, A.V. Gorshkov, S.A. Krupko, A.M. Rodin, S.I. Sidorchuk, R.S. Slepnev, S.V. Stepantsov, G.M. Ter-Akopian, A.A. Korshennikov, E.Yu. Nikolskii, E.A. Kuzmin, B.G. Novatskii, D.N. Stepanov, S. Fortier, P. Roussel-Chomaz, W. Mittig,
Spectroscopy of ^9He , quasi-free scattering $^6\text{He}+^4\text{He}$,
Proc. of Tours Symp. on Nucl. Phys. VI (Tours, France), AIP 981 (2007) 226-234.
16. S.I. Sidorchuk, S.G. Belogurov, A.A. Bezbakh, A.S. Fomichev, V. Chudoba, M.S. Golovkov, A.V. Gorshkov, L.V. Grigorenko, G. Kaminski, A.G. Knyazev, S.A. Krupko, M. Mentel, Yu.L. Parfenova, P. Pluchinski, R.S. Slepnev, S.A. Rymzhanova, G.M. Ter-Akopian, R. Wolski, I. Mukha, O. Kiselev, O. Tarasov,
First experiments at the fragment-separator ACCULINNA-2: hydrogen-7,
In Proc. of Int. Conf. on Exotic Nuclei (Kaliningrad, Russia), World Scientific (2014) 183-190.
17. S.I. Sidorchuk, A.S. Fomichev, A.V. Gorshkov, V.A. Gorshkov, S.A. Krupko, Yu.Ts. Oganessian, A.M. Rodin, R.S. Slepnev, S.V. Stepantsov, G.M. Ter-Akopian, R. Wolski, A.A. Korshennikov, E.Yu. Nikolskii, P. Roussel-Chomaz, W. Mittig,
Three-body correlations in ^6He revealed in the quasi-free knockout reaction $^4\text{He}(^6\text{He}, 2\alpha)2n$,
In Proc. of Int. Conf. on Exotic Nuclei (Khanty-Mansiysk, Russia), AIP (2007) 43-52.
18. S.I. Sidorchuk, M.S. Golovkov, L.V. Grigorenko, A.S. Fomichev, V.A. Gorshkov, A.V. Gorshkov, S.A. Krupko, Yu.Ts. Oganessian, A.M. Rodin, R.S. Slepnev, S.V. Stepantsov, G.M. Ter-Akopian, R. Wolski, A.A. Korshennikov, E.Yu. Nikolskii, E.A. Kuzmin, B.G. Novatskii, D.N. Stepanov, P. Roussel-Chomaz, W. Mittig,
Experimental study of 3-body correlations in the quasi-free knockout reaction $^4\text{He}(^6\text{He}, 2\alpha)2n$,

In Proc. of 11th Int. Conf. on Nuclear Reaction Mechanisms (Varenna, Villa Monastero, Italy), Universita degli Studi di Milano, supplemento 126, (2006) 459-465.

19. R. Wolski, S.I. Sidorchuk, G.M. Ter-Akopian, A.S. Fomichev, A.M. Rodin, S.V. Stepantsov, W. Mittig, P. Roussel-Chomaz, H. Savajols, N. Alamanos, F. Auger, V. Lapoux, R. Raabe, Yu.M. Tchuvil'sky, K. Rusek,
Elastic scattering of ^8He on ^4He and $4n$ system,
Nucl. Phys. A **722** (2003) 55-60.