

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ им. Г. Н. Флерова

На правах рукописи

Шаров Павел Германович

**Изучение энергетических спектров экзотических ядер
 ^{10}He и ^{17}Ne**

01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 2020

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

Научный руководитель – Григоренко Леонид Валентинович, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН

Научный руководитель – Фомичёв Андрей Сергеевич, доктор физико-математических наук

Официальные оппоненты – Буртебаев Насурлла, доктор физико-математических наук, профессор, РГП ИЯФ МЭ РК, г. Алматы, Казахстан, Заведующий лабораторией низкоэнергетических ядерных реакций
– Чувильский Юрий Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор, НИИЯФ МГУ, ведущий научный сотрудник

С электронной версией диссертацией можно ознакомиться на официальном сайте Объединенного института ядерных исследований в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» по адресу:

<http://>

С печатной версией диссертации можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке ОИЯИ (г. Дубна, Московская область, ул. Жолио-Кюри, д. 6).

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук

А.Г. Попеко

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. В теоретических и экспериментальных исследованиях экзотических ядерных систем, находящихся вблизи границы нуклонной стабильности, существует ряд новых задач, которые не возникали при исследовании стабильных и сравнительно долгоживущих ядерных систем. Из-за этого исследования подобных систем часто требуют применения новых подходов. В настоящее время, данная область ядерной физики активно развивается по всему миру.

В Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н. Флерова ОИЯИ на фрагментсепараторе ACCULINNA [9] реализуется программа исследований свойств радиоактивных ядер вблизи границы нуклонной стабильности. В экспериментах, выполненных на установке ACCULINNA за два десятилетия, был получен ряд важных результатов, среди которых следует особо отметить следующие:

- выявлена кластерная структура ядра ${}^6\text{He}$, обладающего нейтронным галло [10, 11];
- впервые получен изотоп ${}^5\text{H}$ [12] и полностью пересмотрены свойства основного состояния ${}^{10}\text{He}$ [1];
- изучены спектры и однозначно идентифицированы спин-четности низлежащих состояний экзотических ядер ${}^4\text{H}$ [13] и ${}^9\text{He}$ [14];
- обнаружена мягкая дипольная мода возбуждения ядра ${}^8\text{He}$ [15] и новая мода распада — изовекторная мягкая дипольная мода возбуждения в ядре ${}^6\text{Be}$ [16].

В области методики эксперимента были развиты корреляционные методы для исследования резонансных состояний, заселяемых в реакциях передачи. Эти методы особенно актуальны в исследованиях ядерных систем, находящихся

за границей нуклонной стабильности, а также возбужденных состояний ядер, распадающихся путем испускания нуклонов.

В 2017 году в ЛЯР ОИЯИ был введен в строй новый фрагмент-сепаратор ACCULINNA-2. Высокая интенсивность и качество радиоактивных пучков нового сепаратора обеспечивают оптимальные условия для развития сильных сторон существующей программы исследований легких экзотических ядер. В частности, на новом фрагмент-сепараторе интенсивность вторичных пучков повышена более чем в 15 раз по сравнению с фрагмент-сепаратором ACCULINNA. Дополнительные устройства (ВЧ-фильтр скоростей и магнитный спектрометр нулевого угла) обеспечивают условия для проведения прецизионных экспериментов, направленных на исследования структуры ядер, находящихся в окрестностях границ нейтронной и протонной стабильности, а также на получение новых данных прикладного астрофизического значения.

Данная работа является составной частью программы исследований легких экзотических ядер в ЛЯР ОИЯИ.

Цели и задачи диссертационной работы: Данная работа посвящена решению двух актуальных проблем, тесно связанных с экспериментами на фрагмент-сепараторе ACCULINNA.

- При заселении спектра состояний ядра ^{10}He в различных реакциях максимум в спектре, ассоциированный с основным состоянием, наблюдался при разных значениях энергии трехчастичного распада $^8\text{He}+n+n$. Нами предложено решение проблемы определения основного состояния ^{10}He без необходимости пересматривать экспериментальные результаты.

В эксперименте, проведенном в ЛЯР [1], ядра ^{10}He получали в реакции двухнейтронной передачи $^3\text{H}(^8\text{He},p)^{10}\text{He}$. Нами проведен корреляционный анализ данных, который позволил установить положение состояний и значения их спин-четности (J^π). Было получено положение основного состояния при $E_{\text{g.s.}} = 2,1$ МэВ. В экспериментах [17–19] система ^{10}He

изучалась в реакциях выбивания протона из ^{11}Li [17, 18] и фрагментации ^{14}Be [19]. На основе результатов анализа инклюзивных спектров инвариантной массы ^{10}He в этих работах получена энергия основного состояния $E_{\text{g.s.}} = 1,2 - 1,5$ МэВ. Нами было показано, что при заселении ^{10}He в реакциях выбивания из ядер с гало (^{11}Li , ^{14}Be), наблюдается смещение спектральной плотности к малым энергиям (эффект структуры начального состояния), что объясняет имеющиеся противоречия и консолидирует все существующие экспериментальные результаты.

- Проведен пилотный эксперимент по поиску $2p$ -распада первого возбужденного состояния ^{17}Ne , получаемого в реакции $^1\text{H}(^{18}\text{Ne}, d)^{17}\text{Ne}$. Работа выполнена с применением нового метода, получившего название “метод комбинированной массы”.

Двухпротонный распад первого возбужденного состояния ^{17}Ne является давно обсуждаемой проблемной темой. Значительная часть интереса к этому распаду связана с тем, что он является обратным процессом для реакции двухпротонного радиационного захвата $^{15}\text{O} + p + p \rightarrow ^{17}\text{Ne} + \gamma$. Данные о таком захвате важны для теории астрофизического гр-процесса, так как он является одним из механизмов преодоления “точки ожидания” гр-процесса — долгоживущего ядра ^{15}O ($T_{1/2} = 122$ с). С экспериментальной точки зрения основная трудность задачи наблюдения $2p$ -канала распада первого возбужденного состояния ^{17}Ne , имеющего спин-четность $3/2^-$, связана с крайне низким уровнем ветвления в $2p$ канал по сравнению с γ -каналом: ожидаемое отношение парциальных ширин $\Gamma_{2p}/\Gamma_{\gamma} \leq 10^{-5}$. Таким образом, перед нами стояла задача наблюдения исключительно редких событий в жестких фоновых условиях. Для этого был развит оригинальный метод, основанный на корреляционном анализе спектров недостающей и комбинированной массы, который позволил почти в 50 раз понизить существующий в литературе

предел для этого отношения. Показана перспективность этого метода и обоснована возможность прямого наблюдения двухпротонного распада первого возбужденного состояния ^{17}Ne в экспериментах на технически более совершенном фрагмент-сепараторе ACCULINNA-2.

Научная новизна.

- На примере ядра ^{10}Ne впервые строго рассмотрена задача учета отдачи остаточного ядра при выбивании нуклона (кластера нуклонов) из кора ядерной системы с двухнейтронным гало (^{11}Li , ^{14}Be) с последующим заселением состояний в трехчастичном непрерывном спектре. Впервые показано, что подобный процесс для ядер с выраженным гало со значительной вероятностью может происходить с ненулевой передачей углового момента.
- Впервые реализована новая схема измерения спектров возбужденных состояний ядер, испытывающих распады с испусканием частиц (p , n , $2p$, $2n$, α и др.). Указанная схема, объединяющая возможности известных методов недостающей и инвариантной массы, получила название метода комбинированной массы. Использование данной схемы позволяет значительно повысить энергетическое разрешение в измеряемых спектрах возбуждения ядер. В свою очередь, высокое энергетическое разрешение является необходимым условием для решения многих экспериментальных задач.
- Впервые для измерения соотношения парциальных ширин каналов трехчастичного распада и гамма-перехода достигнута чувствительность порядка 10^{-4} , что соответствует характерным значениям предельной чувствительности, достигнутым в экспериментальных исследованиях бинарных распадов.

Теоретическая и практическая значимость.

- Влияние начального состояния на наблюдаемые свойства спектров, полученных в реакциях выбивания, рассмотренное для случая ^{10}He , может проявляться и для других ядерных систем, полученных в реакциях выбивания из гало-ядер. Понимание данного эффекта важно для интерпретации спектров ядерных систем, находящихся за границей стабильности, так как реакции выбивания являются единственным доступным экспериментальным методом во многих исследовательских центрах.
- Опробован новый метод постановки эксперимента, который позволил существенно повысить чувствительность при поиске редких ветвей двух-протонного распада. Этот метод может использоваться для других редких ветвей распада ядер с испусканием нуклонов (кластеров нуклонов), представляющими интерес для астрофизики.

Методология и методы исследования. Первая часть работы теоретическая (теория реакций, структура ядер с гало), вторая — экспериментально-методическая.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработано новое теоретическое описание экспериментально наблюдаемого спектра ^{10}He , полученного в реакциях выбивания нуклонов из гало-ядер. Показано, что в данных реакциях пик, ассоциируемый авторами работ [17–19] с основным состоянием ^{10}He , является смесью трех состояний: 1^- , 0^+ и 2^+ , имеющих максимумы при крайне близких энергиях.
2. При заселении ^{10}He в реакциях выбивания из гало-ядер наблюдается аномальное поведение спектральных плотностей 1^- , 0^+ и 2^+ , которое связано с экстремально большим размером исходных гало-ядер ^{11}Li и ^{14}Be .

3. На основании расчетов сделан вывод о том, что действительное положение основного (0^+) состояния ядра ^{10}Ne при энергии $\sim 2,1$ МэВ над порогом $^8\text{He} + n + n$ [1], а не при энергии $\sim 1,3$ МэВ, как было принято считать с момента открытия ^{10}Ne в 1994 году [17].
4. Основываясь на полученных результатах анализа спектра состояний ядра ^{10}Ne и допущении об одночастичной природе низколежащих состояний ^9He , получены существенные ограничения на предполагаемую структуру состояний ^9He . В рамках данного допущения, значительная часть имеющихся экспериментальных данных о состояниях ^9He $1/2^+$ и $1/2^-$ [18, 20–22] не согласуется с ограничениями, вытекающими из экспериментальных данных [17, 18]. В то же время, указанные ограничения не вызывают сомнений в достоверности экспериментальных результатов по спектру ^9He , полученных в ЛЯР [14].
5. Рассмотренные в работе эффекты влияния начального состояния не специфичны для системы ^{10}Ne и могут проявляться во многих реакциях, заселяющих широкие состояния ядерных систем, находящихся за границей нейтронной стабильности.
6. Выполнен анализ данных, полученных в эксперименте, нацеленном на поиск двухпротонного распада первого возбужденного состояния (спин-четность $J^\pi = 3/2^-$) изотопа ^{17}Ne . Измерен и проанализирован спектр низколежащих состояний ^{17}Ne (при энергии возбуждения $E^* < 3$ МэВ), полученный в реакции $^1\text{H}(^{18}\text{Ne}, d)^{17}\text{Ne}$. В результате, для первого возбужденного уровня ^{17}Ne получен новый предел отношения парциальных ширин $\Gamma_{2p}/\Gamma_\gamma \leq 1,6(3) \times 10^{-4}$, что примерно в пятьдесят раз ниже литературного значения [23].
7. Значительное улучшение предела отношения $\Gamma_{2p}/\Gamma_\gamma$ достигнуто благодаря использованию в эксперименте нового подхода к проведению ядер-

нофизических измерений — метода “комбинированной” массы.

8. Использование метода “комбинированной” массы дает возможность напрямую наблюдать в эксперименте редкие ветви распада с $\Gamma_{\text{part}}/\Gamma_{\gamma} \sim 10^{-6} - 10^{-5}$, что делает этот метод перспективным для решения ряда проблем ядерной физики и ядерной астрофизики. В частности, прямое экспериментальное наблюдение двухпротонного распада первого возбужденного состояния ^{17}Ne .

Степень достоверности и апробация результатов. Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях:

1. XVII научная конференция Объединения молодых ученых и специалистов ОИЯИ (Дубна, Россия 6–11 февраля 2012)
2. XVIII международная научная конференция Объединения молодых ученых и специалистов ОИЯИ (Дубна, Россия 8–12 апреля 2013)
3. The XXXIII Mazurian Conference on Physics (Пяски, Польша 1–7 сентября 2013)
4. XVIII международная научная конференция Объединения молодых ученых и специалистов ОИЯИ (Дубна, Россия 24–28 февраля 2014); вторая премия ОМУС в номинации: за научно-исследовательскую и экспериментальную работу.
5. Zakopane Conference on Nuclear Physics (Закопане, Польша 31 августа – 7 сентября 2014)
6. XIX международная научная конференция Объединения молодых ученых и специалистов ОИЯИ (Дубна, Россия 16–20 февраля 2015)
7. EURORIB’15 — European Radioactive Ion Beam Conference 2015 (Хоэнрода, Германия 7–12 июня 2015)

8. The XX International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists (AYSS-2016) (Дубна, Россия 14–18 марта 2016)
9. ECT* workshop: “Unbound nuclei/continuum states” (Тренто, Италия 17–21 октября 2016)
10. The XXI International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists (AYSS-2017) (Дубна, Россия 2–6 октября 2017)
11. The Third International Conference on Particle Physics and Astrophysics (ICPPA-2017) (Москва, Россия 2–5 октября 2017)

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 8 печатных работах, из них 4 статьи в рецензируемых журналах [1–4], 4 статьи в сборниках трудов конференций [5–8].

Личный вклад автора.

- Автор внес определяющий вклад в решение вопроса строгого учета эффекта отдачи остаточного ядра при выбивании нуклона (альфа-частицы) из кора гало-ядер с последующим заселением состояний в трехчастичном непрерывном спектре ^{10}Ne . Полученные им результаты показали, что в таких условиях реакции выбивания могут приводить к аномально интенсивной передаче углового момента.
- Автором выполнен количественный анализ условий экспериментов, показавший принципиальную возможность реализации нового метода исследования резонансов в непрерывном спектре экзотических ядер — метода комбинированной массы. Обоснованы преимущества реакции одонейтронной передачи $^1\text{H}(^{18}\text{Ne}, d)^{17}\text{Ne}$ для поиска указанным методом слабой ветви двухпротонного распада первого возбужденного состояния ^{17}Ne .

- Проведена в полном объеме обработка экспериментальных результатов измерений спектра состояний ядра ^{17}Ne , полученного в указанной реакции, изученной под передними углами в системе центра масс $\theta_{cm} = 4^\circ - 18^\circ$ при энергии радиоактивного пучка ^{18}Ne , равной 35 МэВ на нуклон. Впервые определены сечения реакции, приводящей к заселению основного состояния и первого возбужденного уровня ^{17}Ne . Методом комбинированной массы определены выходы двух возбужденных состояний ^{17}Ne со значениями спин-четности $J^\pi = 1/2^+$ ($E^* = 1,916$ МэВ) и $J^\pi = 5/2^+$ ($E^* = 2,651$ МэВ), испытывающих распад с испусканием протонов. Для первого возбужденного уровня ^{17}Ne ($E^* = 1,288$ МэВ, $J^\pi = 3/2^-$) получен предел отношения парциальных ширин $\Gamma_{2p}/\Gamma_\gamma = 1,6(3) \times 10^{-4}$.
- На основе Монте Карло моделирования, выполненного с использованием программного пакета GEANT4, найдены условия постановки экспериментов, обеспечивающих надежную регистрацию событий двухпротонного распада первого возбужденного состояния ^{17}Ne с чувствительностью, превышающей в 100 раз достигнутое значение. Это позволит напрямую проверить теоретические предсказания, дающие диапазон отношения ширин $\Gamma_{2p}/\Gamma_\gamma \sim (0,9 - 2,5) \times 10^{-6}$.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, двух глав, заключения, приложения и библиографии. Общий объем диссертации 85 страницы, из них 77 страниц текста, включая 23 рисунка. Библиография включает 70 наименования на 7 страницах.

Содержание работы

Во Введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований; рассматривается проблематика, ставшая основой для исследования. В основе рабо-

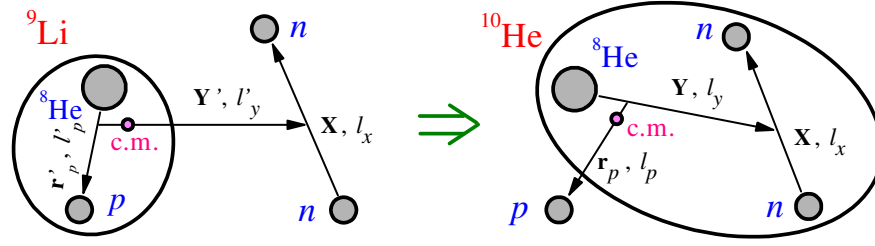


Рис. 1. Схемы координат, используемые для расчетов выбивания протона (кластера в общем случае).

ты лежат две задачи, напрямую связанные с экспериментальными исследованиями экзотических ядерных систем на фрагмент-сепараторе ACCULINNA. Показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

В первой главе проведен анализ существующих экспериментальных данных о спектре состояний ^{10}He . На основе полученных результатов анализа предложено объяснение расхождений данных о наблюдаемых положениях пика основного состояния ^{10}He , полученных в реакциях двух типов: в реакциях выбивания нуклонов из гало ядер ^{11}Li и ^{14}Be , и в реакции передачи $^3\text{H}(^8\text{He}, p)^{10}\text{He}$. Для описания спектра ^{10}He использовалась модель с источником, развитая на базе метода гиперсферических гармоник. В данной модели волновая функция непрерывного спектра трех частиц с расходящейся асимптотикой получается путем решения дифференциального уравнения

$$(\hat{H} - E)\Psi^{(+)} = \Phi_q,$$

где $\hat{H}$ гамильтониан трехчастичной системы, описывающий взаимодействие в конечном состоянии (ВКС), а Φ_q — функция источника, несущая информацию о структуре исходного состояния (СИС).

Для описания механизма реакции выбивания протона из ядра ^{11}Li с последующим заселением состояний ядра ^{10}He рассматривалась волновая функ-

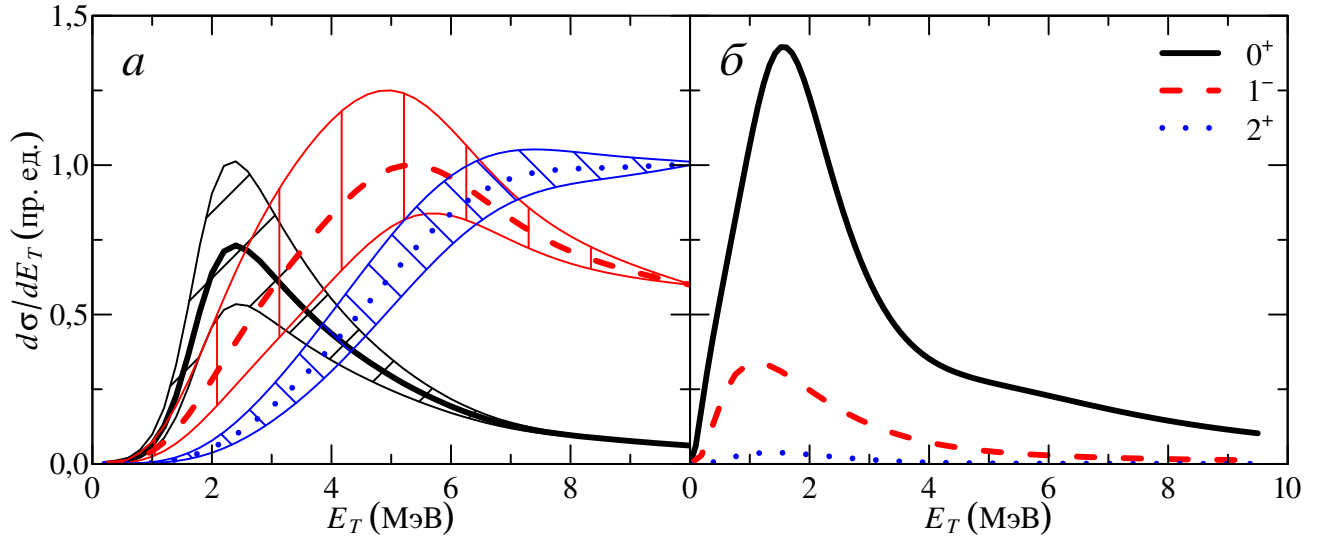


Рис. 2. Результаты расчетов спектра ^{10}He , для различных состояний. Панель *a* показывает оценочные результаты для “обычной” ситуации (среднеквадратичный гиперрадиус исходного состояния $\langle \rho^2 \rangle^{1/2}(^{11}\text{Li}) = 3 - 5$ фм). Результаты для выбивания протона из ^{11}Li показаны на панели *б*.

ция ^{11}Li , факторизованная в четырехчастичном приближении (см. Рис. 1): движение валентных нейтронов ^{11}Li описывалось трехчастичной волновой функцией, движение протона внутри кора ^9Li — двухчастичной. Для описания механизма реакции использовалось приближение внезапного срыва. В данном приближении источник получается путем действия оператора уничтожения протона на волновую функцию ^{11}Li , что сводится к Фурье-преобразованию волновой функции по координате r_p . Полученные источники имеют характерный среднеквадратичный гиперрадиус в 9, 11 и 14 фм для состояний с $J^\pi = 0^+$, 1^- и 2^+ , соответственно (для сравнения $\langle \rho^2 \rangle^{1/2}(^{11}\text{Li}) = 8,36$ фм).

На Рис. 2 представлены результаты расчетов инклюзивного спектра ^{10}He . На Рис. 2*a* представлены расчеты с модельным источником, имеющим характерный среднеквадратичный гиперрадиус $\langle \rho^2 \rangle^{1/2}(^{11}\text{Li}) = 3 - 5$ фм, сопоставимый с размером исходного состояния в реакции $^3\text{H}(^8\text{He}, p)^{10}\text{He}$. В данном случае пик основного состояния с $J^\pi = 0^+$ расположен при энергии распада

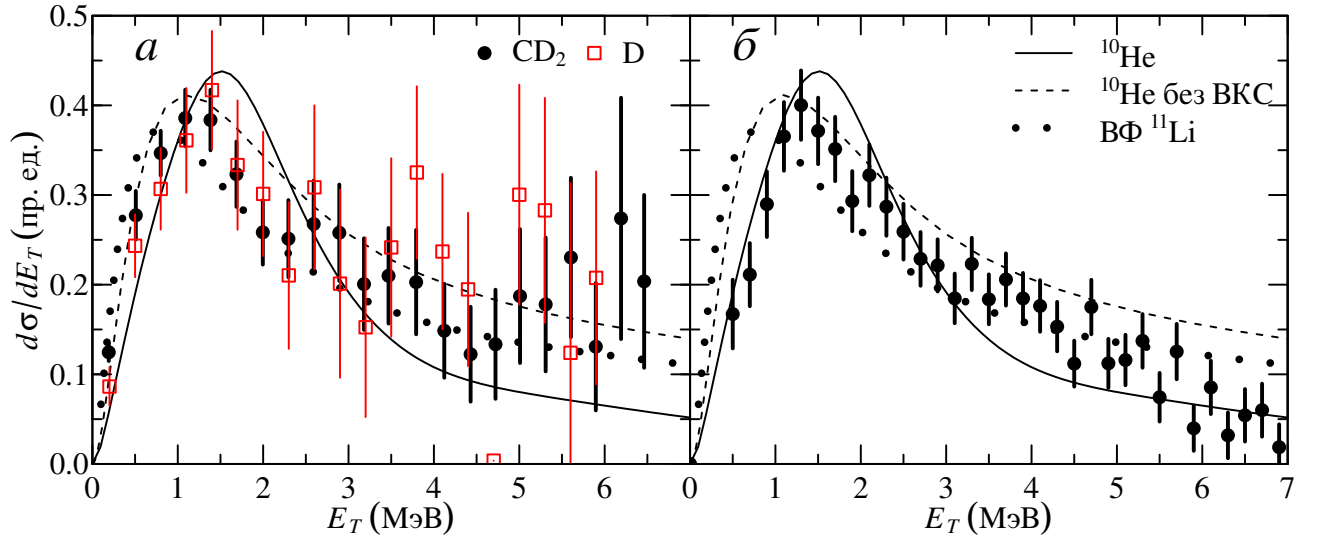


Рис. 3. Сравнение расчетов спектра ^{10}He с результатами экспериментов [17] (панель *а*) и [18] (панель *б*). Сплошная черная кривая показывает сумму компонент спектра ^{10}He , представленных на Рис. 2*б*. Серая пунктирная кривая показывает результаты расчета спектра ^{10}He без учета ВКС. Серые точки показывают Фурье-Образ волновой функции ^{11}Li .

$E_T \sim 2$ МэВ, а состояния с $J^\pi = 1^-$ и 2^+ заселяются при более высоких энергиях. На Рис. 2*б* представлены расчеты для случая заселения ^{10}He путем выбивания протона из ^{11}Li . В случае выбивания протона из ^{11}Li пики спектральных плотностей с различными J^π смещаются в область $E_T < 1,5$ МэВ. Таким образом, пик, наблюдаемый в спектре, мы интерпретируем как смесь трех состояний с различными J^π . Полученная теоретическая форма спектра хорошо согласуется с экспериментальными данными, полученными в работах [17, 18] (см. Рис. 3). Таким образом, пик наблюдаемый в реакциях выбивания не должен напрямую ассоциироваться с основным состоянием ^{10}He , и его следует интерпретировать как отклик непрерывного спектра ^{10}He на аномально большие размеры ^{11}Li .

Так как теоретически вычисляемые свойства ^{10}He в представлении системы трех тел ($^{10}\text{He} = {}^8\text{He} + n + n$) чувствительны к взаимодействию в подсистеме ${}^8\text{He} + n$, в рамках данного теоретического подхода возникают значительные ограничения на параметры взаимодействия в системе ${}^8\text{He} + n$. В

работе рассмотрено, как выводы существующих экспериментальных исследований ${}^9\text{Ne}$ согласуются с наблюдаемым в реакциях выбивания околопороговым поведением спектра ${}^{10}\text{Ne}$.

Результаты, описанные в первой главе, опубликованы в работах [1–3, 5, 6].

Во второй главе изложены результаты исследования спектров возбужденных состояний ${}^{17}\text{Ne}$, полученного в реакции ${}^1\text{H}({}^{18}\text{Ne}, d){}^{17}\text{Ne}$. В работе, основной целью которой был поиск редкой ветви двухпротонного распада первого возбужденного состояния ${}^{17}\text{Ne}$ со спин-четностью $J^\pi = 3/2^-$, был использован новый метод изучения спектра ядерных состояний, заселяемых в реакциях передачи, получивший название метода комбинированной массы.

В первой части этой главы рассмотрены результаты предыдущих исследований ${}^{17}\text{Ne}$. Существуют несколько проблем, связанных с изотопом ${}^{17}\text{Ne}$. Основное состояние ${}^{17}\text{Ne}$ является единственным реальным кандидатом на обладание двухпротонным гало. Условия возникновения двухпротонного гало рассмотрены в работах [24, 25], а результаты экспериментальных исследований основного состояния ${}^{17}\text{Ne}$ представлены в [26, 27].

С вопросом ядерной структуры ${}^{17}\text{Ne}$ связана одна из проблем ядерной астрофизики. Первое возбужденное состояние ${}^{17}\text{Ne}$ может испытывать так называемый истинно двухпротонный распад (см. Рис. 4), то есть распад с одновременным испусканием двух протонов. Наблюдение данной ветви распада затруднено из-за ее крайне малой парциальной ширины. Для первого возбужденного уровня ${}^{17}\text{Ne}$ было теоретически предсказано значение для отношения ширины двухпротонного распада к ширине γ -распада $\Gamma_{2p}/\Gamma_{\text{tot}} = (0,9 - 2,5) \times 10^{-6}$ [28]. Экспериментально достигнутый предел составляет $\Gamma_{2p}/\Gamma_\gamma \leq 7,7 \times 10^{-3}$ [23].

Вопрос о вероятности двухпротонного распада первого возбужденного уровня ${}^{17}\text{Ne}$ является частным случаем довольно общей проблемы ядерной

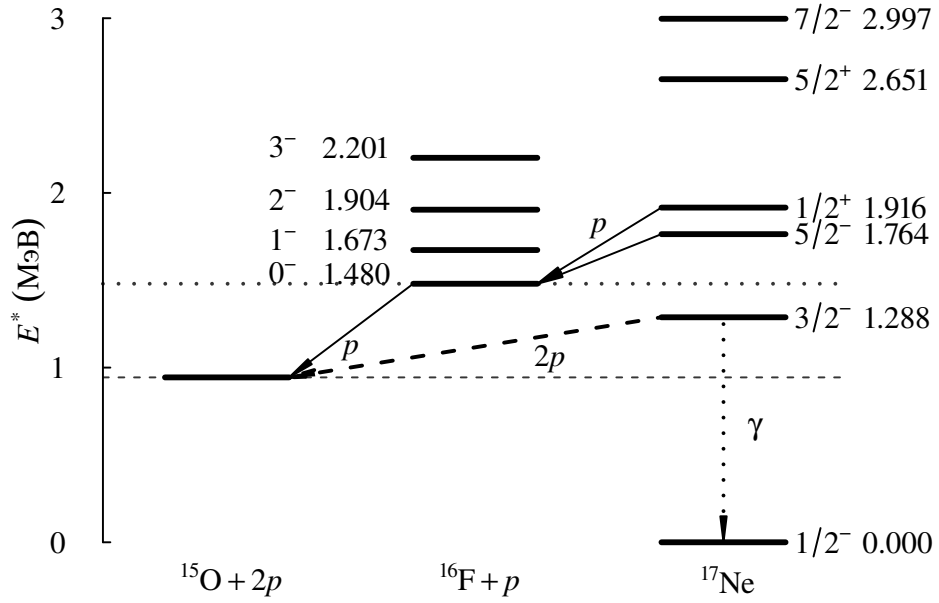


Рис. 4. Схемы уровней изотопа ^{17}Ne и его подсистемы ^{16}F и схема возможных распадов для состояний ^{17}Ne .

астрофизики. Реакции радиационного захвата протонов играют ведущую роль в нуклеосинтезе при горении водорода в звездах, при взрывах сверхновых и процессах аккреции.

Интенсивность астрофизического радиационного захвата может определяться двумя вкладками: нерезонансным и резонансным. Резонансная часть интенсивности захвата зависит от соотношения парциальных ширин распада с испусканием нуклонов и гамма-перехода для одного или нескольких низколежащих резонансов. Для резонансов с небольшой энергией над порогом парциальная ширина испускания частиц крайне мала, что делает экспериментальное определение соотношения парциальных ширин весьма затруднительным. Таким образом, для определения интенсивности резонансного радиационного захвата необходимы исследования редких ветвей распада с испусканием частиц. Задача определения слабой ветви двухпротонного распада первого возбужденного состояния ^{17}Ne представляет пример такого исследования.

Верхний предел, полученный ранее для отношения ширины $2p$ распада к ширине γ -распада первого возбужденного уровня ^{17}Ne , $\Gamma_{2p}/\Gamma_{\gamma} \leq 7,7 \times$

10^{-3} [23], был улучшен почти в 50 раз в результате экспериментального исследования, выполненного в нашей работе. Новое значение предела этого отношения, $\Gamma_{2p}/\Gamma_{\gamma} \leq 1,6 \times 10^{-4}$, было получено благодаря трем методическим новациям.

Во-первых, в нашей работе возбужденные состояния ^{17}Ne заселялись в реакции передачи $^1\text{H}(^{18}\text{Ne}, d)^{17}\text{Ne}$, при выбранной энергии пучка бомбардирующих ионов ^{18}Ne 35 МэВ/нуклон. Для данной реакции в выбранном угловом диапазоне наблюдается значительное подавление заселения состояний выше искомого с $J^{\pi} = 3/2^{-}$, а именно эти состояния являются основным источником фона.

Во-вторых, для регистрации событий двухпротонного распада использовался метод комбинированной массы, предложенный и реализованный впервые в настоящей работе. Метод инвариантной массы довольно часто используется для изучения спектров ядерно-нестабильных систем, в том числе двухпротонных распадчиков. При использовании данного метода необходима регистрация тяжелого фрагмента распада ядра с достаточно высокой точностью., что создает ряд технических проблем, которые стоят особенно остро в экспериментах на вторичных пучках радиоактивных изотопов. В случае реакции передачи можно избежать регистрации тяжелого фрагмента. Восстановив по импульсу ядра отдачи (в данном случае, дейтрона) вектор импульса центра масс распадающейся системы (ядро ^{17}Ne) и измерив импульсы легких продуктов распада (два протона), мы восстанавливаем полную кинематическую картину образования и распада ядра ^{17}Ne . Данный подход был назван методом комбинированной массы. Применение метода комбинированной массы для изучения спектра возбужденных состояний ^{17}Ne решило задачу получения разрешения, достаточно высокого для отделения событий двухпротонного распада из первого возбужденного состояния ^{17}Ne от распадов из вышележащих состояний (см. Рис. 5б) при высокой светимости эксперимента и сравни-

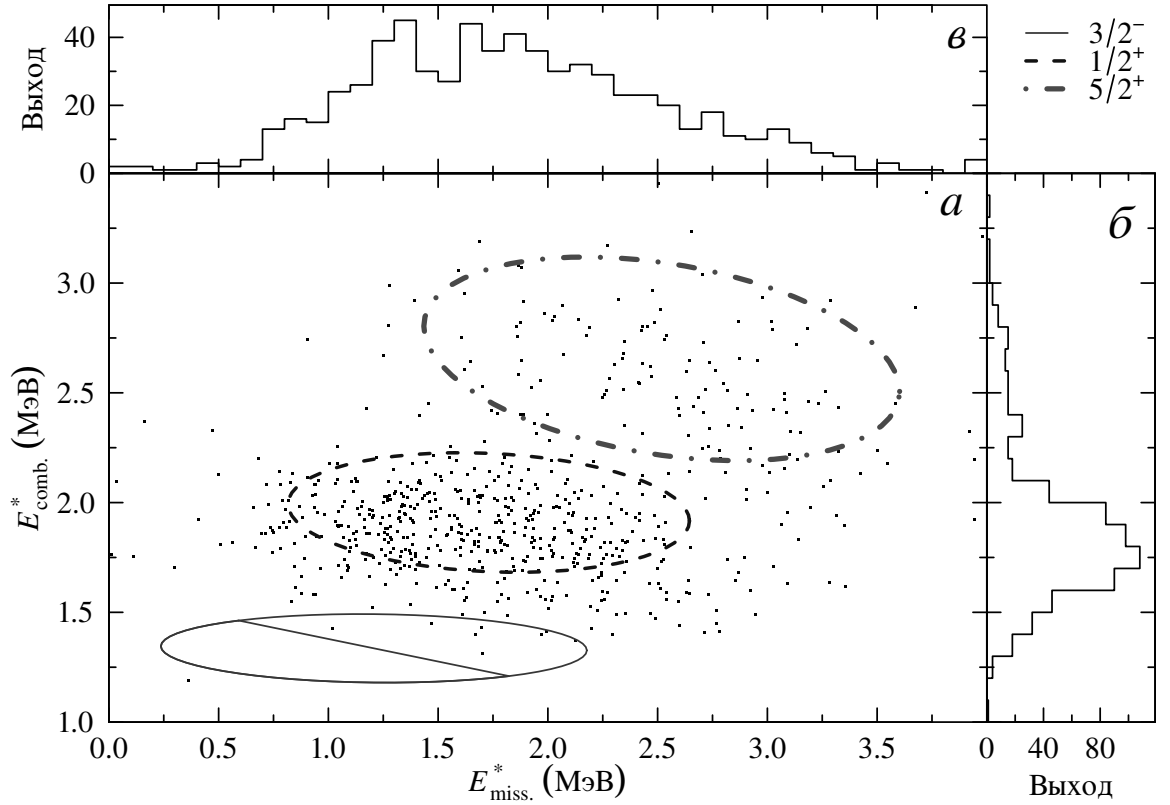


Рис. 5. Энергия возбуждения ^{17}Ne : *а* Диаграмма рассеяния для энергии возбуждения ^{17}Ne , измеренной методом недостающей массы ($E_{\text{miss.}}^*$) и методом комбинированной массы ($E_{\text{comb.}}^*$). Эллипсы указывают локусы вмещающие 68% событий для состояний $3/2^-$, $1/2^+$ и $5/2^+$ (см. легенду). *б* Спектр комбинированной массы. *в* Спектр недостающей массы.

тельно простой системе детекторов.

В-третьих, для очистки от фоновых событий, источником которых является распад резонансных состояний ^{17}Ne в высокоэнергичной части спектра, был проведен дополнительный корреляционный анализ. Энергию возбуждения ^{17}Ne можно получить из экспериментальных данных двумя способами: используя метод недостающей массы ($E_{\text{miss.}}^*$) или метод комбинированной массы ($E_{\text{comb.}}^*$). Величины $E_{\text{miss.}}^*$ и $E_{\text{comb.}}^*$ довольно слабо связаны друг с другом, из-за этого при анализе корреляций $E_{\text{miss.}}^*$ против $E_{\text{comb.}}^*$ происходит эффективное повышение энергетического разрешения в $\sqrt{2}$ раз. Кроме того, с помощью анализа на плоскости $E_{\text{miss.}}^* - E_{\text{comb.}}^*$ можно подавить фоновые события, связанные с перерассеянием протонов на пассивных частях системы детекто-

ров. Причины возникновения этих событий и их проявление в спектре ^{17}Ne детально рассмотрены в работе. Рисунок 5а демонстрирует очистку от событий, связанных с другими вышележащими состояниями и перерассеянием протонов на пассивных частях системы детекторов.

В завершении главы рассматривается вопрос о пределах чувствительности экспериментов по поиску редких ветвей распада с испусканием нуклонов.

Результаты описанные во второй главе опубликованы в работах [4, 7, 8].

В Заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

Список публикаций

1. Structure of ^{10}He low-lying states uncovered by correlations / S. I. Sidorchuk, A. A. Bezbakh, V. Chudoba et al. // *Phys. Rev. Lett.* — 2012. — Vol. 108. — P. 202502.
2. Sharov P. G., Egorova I. A., Grigorenko L. V. Anomalous population of ^{10}He states in reactions with ^{11}Li // *Phys. Rev. C.* — 2014. — Vol. 90. — P. 024610.
3. Корреляционные исследования низкоэнергичного спектра ^{10}He / С. И. Сидорчук, А. А. Безбах, Р. Вольски и др. // *Известия российской академии наук. Серия физическая.* — 2013. — Т. 77, № 4. — С. 398.
4. Search for $2p$ decay of the first excited state of ^{17}Ne / P. G. Sharov, A. S. Fomichev, A. A. Bezbakh et al. // *Phys. Rev. C.* — 2017. — Vol. 96. — P. 025807.
5. Three-body correlations data analysis through monte carlo simulation in decay of ^{10}He / S. A. Rymzhanova, L. V. Grigorenko, I. A. Egorova et al. // *Acta Physica Polonica B.* — 2017. — Vol. 48, no. 3. — P. 683–686.
6. Recent results related to excited states of ^6Be and ^{10}He / Fomichev, A. S.,

- Bezbakh, A. A., Chudoba, V. et al. // [EPJ Web of Conferences](#). — 2012. — Vol. 38. — P. 15002.
7. Sharov P. G. Search for $2p$ decay of the first excited state of ^{17}Ne // Proceedings of the International Symposium on Exotic Nuclei / Ed. by Yu. E. Penionzhkevich, Yu. G. Sobolev. — Singapore : Word Scientific, 2017. — P. 105–110.
 8. [Searching for \$2p\$ decay of the first excited state of Ne](#) / M. S. Golovkov, P. G. Sharov, A. A. Bezbakh et al. // Proceedings of the International Symposium on Exotic Nuclei / Ed. by Yu. E. Penionzhkevich, Yu. G. Sobolev. — Singapore : Word Scientific, 2015. — P. 171–182.

Цитированная литература

9. Исследования лёгких экзотических ядер вблизи границы стабильности в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ / Л. В. Григоренко, М. С. Головков, С. А. Крупко и др. // [УФН](#). — 2016. — Т. 186, № 4. — С. 337–386.
10. Two-neutron exchange observed in the $^6\text{He} + ^4\text{He}$ reaction. search for the “di-neutron” configuration of ^6He / G. M. Ter-Akopian, A. M. Rodin, A. S. Fomichev et al. // [Phys. Lett. B](#). — 1998. — Vol. 426, no. 3. — P. 251–256.
11. Cluster structure of ^6He studied by means of $^6\text{He} + p$ reaction at 25 MeV/ n energy / R. Wolski, A. S. Fomichev, A. M. Rodin et al. // [Phys. Lett. B](#). — 1999. — Vol. 467, no. 1. — P. 8–14.
12. Observation of excited states in ^5H / M. S. Golovkov, L. V. Grigorenko, A. S. Fomichev et al. // [Phys. Rev. Lett.](#) — 2004. — Dec. — Vol. 93. — P. 262501.
13. Experimental study of ^4H in the reactions $^2\text{H}(t, p)$ and $^3\text{H}(t, d)$ / S. I. Sidorchuk, D. D. Bogdanov, A. S. Fomichev et al. // [Phys. Lett. B](#). — 2004. — Vol. 594, no. 1. — P. 54–60.

14. New insight into the low-energy ^9He spectrum / M. S. Golovkov, L. V. Grigorenko, A. S. Fomichev et al. // [Phys. Rev. C](#). — 2007. — Vol. 76. — P. 021605(R).
15. The ^8He and ^{10}He spectra studied in the (t, p) reaction / M. S. Golovkov, L. V. Grigorenko, G. M. Ter-Akopian et al. // [Phys. Lett. B](#). — 2009. — Vol. 672. — P. 22.
16. Isovector soft dipole mode in ^6Be / A. S. Fomichev, V. Chudoba, I. A. Egorova et al. // [Phys. Lett. B](#). — 2012. — Vol. 708, no. 1. — P. 6–13.
17. Observation of ^{10}He / A. A. Korshennikov, K. Yoshida, D. V. Aleksandrov et al. // [Phys. Lett. B](#). — 1994. — Vol. 326. — P. 31.
18. The unbound isotopes $^{9,10}\text{He}$ / H. T. Johansson, Yu. Aksyutina, T. Aumann et al. // [Nucl. Phys. A](#). — 2010. — Vol. 842, no. 1–4. — P. 15–32.
19. Unresolved question of the ^{10}He ground state resonance / Z. Kohley, J. Snyder, T. Baumann et al. // [Phys. Rev. Lett.](#) — 2012. — Vol. 109. — P. 232501.
20. Evidence for an $l = 0$ ground state in ^9He / L. Chen, B. Blank, B. A. Brown et al. // [Phys. Lett. B](#). — 2001. — Vol. 505, no. 1–4. — P. 21–26.
21. Falou H. A., Leprince A., Orr N. Structure of the neutron-rich $n = 7$ isotones ^{10}Li and ^9He // [Journal of Physics: Conference Series](#). — 2011. — Vol. 312, no. 9. — P. 092012.
22. Structure of unbound neutron-rich ^9He studied using single-neutron transfer / T. Al Kalanee, J. Gibelin, P. Roussel-Chomaz et al. // [Phys. Rev. C](#). — 2013. — Vol. 88. — P. 034301.
23. Two-proton spectroscopy of low-lying states in ^{17}Ne / M. J. Chromik, P. G. Thirolf, M. Thoennessen et al. // [Phys. Rev. C](#). — 2002. — Vol. 66. — P. 024313.
24. Grigorenko L. V., Mukha I. G., Zhukov M. V. Prospective candidates for the two-proton decay studies I: structure and coulomb energies of ^{17}Ne and ^{19}Mg // [Nucl. Phys. A](#). — 2003. — Vol. 713. — P. 372.

25. Grigorenko L. V., Parfenova Y. L., Zhukov M. V. Possibility to study a two-proton halo in ^{17}Ne // [Phys. Rev. C](#). — 2005. — Vol. 71. — P. 051604.
26. Investigation of the CNO-break-out reaction: $^{15}\text{O}(2p, \gamma)^{17}\text{Ne}$ by the coulomb dissociation of ^{17}Ne / J. Marganec, T. Aumann, M. Heil et al. // [J.Phys.:Conf.Ser.](#) — 2012. — Vol. 337. — P. 012011.
27. Coulomb and nuclear excitations of narrow resonances in ^{17}Ne / J. Marganec, F. Wamers, F. Aksouh et al. // [Phys. Lett. B](#). — 2016. — Vol. 759. — P. 200.
28. Grigorenko L. V., Zhukov M. V. Two-proton radioactivity and three-body decay. III. integral formulas for decay widths in a simplified semianalytical approach // [Phys. Rev. C](#). — 2007. — Vol. 76. — P. 014008.