

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Сидорчука Сергея Ивановича «Исследования структуры тяжелых изотопов гелия в реакциях передачи и выбивания», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.16 «Физика атомного ядра и элементарных частиц»

Тема диссертации С. И. Сидорчука, посвященной исследованию характеристик рекордно нейтроно-избыточного и «дважды магического» изотопа гелия-10, впервые экспериментально образуемого в реакции $t(^8\text{He}, p)^{10}\text{He}$ передачи двух нейтронов с использованием вторичного радиоактивного пучка ^8He и уникальной криогенной тритиевой мишени, несомненно является актуальной. Метод диссертации отличается от использованных ранее методов получения изотопа ^{10}He , основанных на реакциях выбивания протона из ядра ^{11}Li (именно этим способом был впервые получен ^{10}He в 1994 году) и α -частицы из ядра ^{14}B . Проведенный в диссертации для исследуемой реакции анализ спектра энергий возбуждения изотопов гелия демонстрирует значительное расхождение этих спектров с аналогичными спектрами в реакциях выбивания нуклонов и кластеров. Диссертантом высказывается предположение, что причинами указанных расхождений являются два фактора, во-первых, отличающаяся структура состояний нейтронных подсистем в ядрах, фигурирующих в начальных каналах реакций передачи двух нейтронов и реакций выбивания и, во-вторых, различный характер взаимодействия частиц конечных каналов рассматриваемых реакций. Для обоснования этого предположения диссертантом исследуется роль указанных факторов на примере реакции $^4\text{He}(^6\text{He}, 2\alpha)2n$ квазисвободного рассеяния ядра-мишени ^4He на α -частице, входящей в состав налетающего ядра ^6He . Кроме этого, в работе представляются результаты исследований низкоэнергетического спектра ^8He , полученного в реакции передачи нейтронов $^3\text{H}(^6\text{He}, p)^8\text{He}$, и анализа реакций квазисвободного рассеяния ядра-мишени ^4He на тритиевых кластерах ядра ^6He .

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, трех приложений и списка цитируемой литературы.

Во введении даётся обоснование выбора темы диссертации, формулируются её цели, а также делается обзор литературы по изучаемой тематике. В обзоре представляется круг работ, посвященных исследованиям тяжелых нейтронно-избыточных изотопов гелия, а также экспериментальным подходам к изучению ядер, расположенных за границей нейтронной стабильности.

В первой главе приводится описание фрагмент-сепаратора АКУЛИНА Лаборатории Ядерных Реакций Объединенного Института Ядерных Исследований, используемого для генерации, формирования и очистки вторичных радиоактивных пучков методом *in-flight* сепарации. Отмечается, что все проводимые эксперименты выполняются на современном методическом уровне с использованием уникальной криогенной тритиевой газовой мишени, что позволяет получать ядра с большим избытком нейтронов в реакциях передачи двух нейтронов с сечением до 100 мкб/ср. Малая интенсивность вторичных пучков компенсируется при этом использованием систем регистрации с большими угловым аксептансом, что позволяет изучать получаемые ядра в широких диапазонах кинематических параметров.

Во второй главе диссертации содержатся результаты исследований реакции $t(^8\text{He}, p)^{10}\text{He}$ передачи двух нейтронов из ядра-мишени трития налетающему ядру ^8He ($T_{1/2} \approx 120$ мс) с энергией 21.5 А МэВ с вылетом протона в обратной кинематике и образованием основного ($i = 0$) и возбужденных ($i = 1, 2, \dots$) квазистационарных состояний с комплексными энергиями $E^i = \text{Re } E^i - i\Gamma^i / 2$ сильно нейтронно-избыточного ядра ^{10}He . Используя экспериментальные энергии и направления движения налетающего ядра ^8He , а также угловые и энергетические характеристики продуктов реакции, включая и подобные характеристики ядра ^8He , вылетающего при распаде образуемого в реакции ядра ^{10}He , диссертантом строится спектр наблюдаемых энергий недостающих масс E_T ядра ^{10}He , определяемых через сумму кинетических энергий относительного движения возникающей при распаде ядра ^{10}He системы ($^8\text{He}-n-n$). В этом спектре выделяются характерные структуры, отличающиеся друг от друга угловыми и энергетическими распределениями продуктов реакции. Формы этих структур описываются суммами перекрывающихся Брейт-Вигнеровских пиков, связанных с комплексными энергиями i -ых состояний ядра ^{10}He и характеризующихся энергией их максимумов

E_T^i и шириной Γ^i , причём $E_T^i = \text{Re } E^i - E_{8\text{He}}$, где $E_{8\text{He}}$ - энергия основного состояния ядра ${}^8\text{He}$, которую можно рассматривать как действительную величину из-за малости ширины распада этого состояния по сравнению с ширинами Γ^i .

Среди этих структур диссертантом выделяются структура с энергией $E_T^{i=0} \approx 2.1$ МэВ и шириной $\Gamma^{i=0} \approx 2$ МэВ, которая связана с основным состоянием ядра ${}^{10}\text{He}$, характеризуемым спин-чётностью $J^\pi = (0^+)$, а также ещё две структуры с энергиями $E_T^{i=1} > 4.5$ МэВ и $E_T^{i=2} > 6$ МэВ, которые связываются в диссертации с первым и вторым возбужденными состояниями ядра ${}^{10}\text{He}$. Использование представления о передаче налетающему ядру ${}^8\text{He}$ и о испускании при распаде ${}^{10}\text{He}$ dineйтрона в виртуальном s -состоянии позволяет соискателю подтвердить спин-чётности основного (0^+) и определить спин-чётности первого (1^-) и второго (2^+) возбужденных состояний ядра ${}^{10}\text{He}$. Полученные соискателем в спектре энергий недостающей массы структуры для состояний ${}^{10}\text{He}$ заметно отличаются от аналогичных структур, полученных ранее в реакциях образования ядра ${}^{10}\text{He}$ при выбивании протона из ядра ${}^{11}\text{Li}$ или α -частицы из ядра ${}^{14}\text{B}$ и характеризуемых энергией $E_T^{i=0} \approx 1$ МэВ и шириной $\Gamma^{i=0} < 1$ МэВ для основного (0^+) состояния ${}^{10}\text{He}$ и энергией $E_T^{i=1} \approx 4.3$ МэВ для первого возбужденного (2^+) состояния ${}^{10}\text{He}$. Обнаружение диссертантом состояния с отрицательной чётностью в качестве первого возбужденного уровня ядра ${}^{10}\text{He}$ противоречит существующему представлению, основанному на использовании стандартной оболочечной модели для указанного ядра, согласно которому первое возбужденное состояние ${}^{10}\text{He}$ имеет спин-чётность 2^+ , а состояние 1^- , по-видимому, является вторым возбужденным состоянием ${}^{10}\text{He}$. Это позволило диссертанту сделать вывод о нарушении оболочечной структуры в ядре ${}^{10}\text{He}$, расположенном за линией нейтронной стабильности.

В третьей главе представляются результаты, полученные при исследовании реакции $t({}^6\text{He}, p){}^8\text{He}$, в которой изучалась структура образуемого ядра ${}^8\text{He}$. Схема эксперимента совпадает со схемой эксперимента по изучению ядра ${}^{10}\text{He}$ во второй главе, но при этом дополнительно проводится регистрация одного из нейтронов, появляющихся при распаде ядра ${}^8\text{He}$. Проведённое в указанной главе исследование спектра энергий возбуждения $E_{8\text{He}}^i$ состояний i образуемого в реакции ядра ${}^8\text{He}$

позволяет выделить помимо пика основного состояния со спин-чётностью 0^+ и энергией $E_{8He}^{i=0} = 0$, также второй и третий пики с энергиями $E_{8He}^{i=1} \approx 3,6$ МэВ и $E_{8He}^{i=2} \approx 5,4$ МэВ, для которых вначале предполагалось, что они соответствуют возбужденным состояниям ядра ${}^8\text{He}$ со спин-чётностями 2^+ и 1^+ . Проведенный в дальнейшем диссертантом анализ корреляций продуктов распада ядра ${}^8\text{He}$ с вылетом двух нейтронов и образованием ядра ${}^6\text{He}$ для второго пика $E_{8He}^{i=1}$ позволяет обосновать появление в области этого пика возбужденного состояния 1^- ядра ${}^8\text{He}$, лежащего ниже пика возбужденного состояния 2^+ , совместный учёт которых улучшает описание формы второго пика. Тем самым демонстрируется возможное сближение спектра возбуждения ядра ${}^{10}\text{He}$, исследованного во второй главе, к полученному в третьей главе спектру возбуждений ядра ${}^8\text{He}$.

В четвёртой главе диссертации проводится исследование реакции ${}^4\text{He}({}^6\text{He}, 2\alpha)2n$ при относительно небольшой кинетической энергии (≈ 150 МэВ) ядра ${}^6\text{He}$, налетающего на криогенную газообразную мишень, состоящую из ядер ${}^4\text{He}$. Диссертант аргументирует, что эта реакция носит квазисвободный характер, при использовании для описания её дифференциального сечения амплитуды α - α упругого рассеяния в широком энергетическом диапазоне и метода гиперсферических функций при построении трёхтельной волновой функции ядра ${}^6\text{He}$ в форме α - n - n структуры. Компьютерная симуляция эксперимента, проведенная диссертантом на основе метода Монте-Карло, приводит к заключению, что основное влияние на положение максимума в районе 5 МэВ и форму спектра несвязанного конечного состояния анализируемой реакции оказывает не только учёт взаимодействия в четырёхтельном конечном канале реакции, но, в большей мере, структура волновой функции начального состояния ядра ${}^6\text{He}$, содержащей сигарообразную и динейтронную компоненты. Этот результат рассматривается диссертантом как основа для понимания обсуждаемого во второй главе расхождения между спектрами энергий возбуждения нейтроноизбыточного изотопа ${}^{10}\text{He}$, образуемого в реакциях выбивания нуклонов или α -кластеров и реакциях передачи двух нейтронов.

В пятой главе диссертации проводятся экспериментальные и теоретические исследования квазисвободных реакций ${}^4\text{He}({}^6\text{He}, \alpha t)t$ и ${}^4\text{He}({}^6\text{He}, \alpha t)dn$ рассеяния α -частицы на тритонном кластере ядра ${}^6\text{He}$, которые соответствуют выделению во

внутренней волновой функции ядра ${}^6\text{He}$ компонент вида $(t + t)$ и $(t + d + n)$. При использовании введённых в диссертации понятий эффективных чисел α -кластеров N_α и t -кластеров N_t в ядре ${}^6\text{He}$ показывается, что соответствующие значения N_α и N_t для перечисленных выше реакций оказываются равными $N_\alpha = 0.03 \pm 0.02$, $N_t = 0.06$ и $N_l = 0.18$, так что учёт конфигураций, связанных с разрушенным α -кластером в ${}^6\text{He}$, вносит заметный вклад в формирование структуры ${}^6\text{He}$, несмотря на большие значения (> 12 МэВ) энергии дезинтеграции ядра ${}^6\text{He}$ на структуры с участием ядра трития.

Вместе с тем при анализе содержания диссертации возникают некоторые замечания.

1) Во второй главе диссертации на основе изучения спектра энергий недостающей массы в реакции ${}^3\text{H}({}^8\text{He}, p){}^{10}\text{He}$ делается заключение о нарушении оболочечной структуры в ядре ${}^{10}\text{He}$, расположенном за линией нейтронной стабильности. Формулировка этого заключения нуждается в определенном уточнении.

Для ядер на границах нуклонной стабильности, обладающих большими избытками протонов или нейтронов, наблюдаются резкие перестройки структуры оболочечных потенциалов по сравнению со структурой аналогичных потенциалов для бета-стабильных ядер. Эти перестройки обусловлены заметными изменениями характера деформаций анализируемых ядер, а также значений спин-орбитальных и зависящих от разности $(N-Z)$ компонент оболочечных потенциалов. Эти изменения приводят к возникновению новых интродер-состояний с нестандартными спинами (именно появление подобных состояний позволило объяснить появление гало в ряде легких ядер), а также к исчезновению известных и появлению новых замкнутых оболочек. В принципе, изменение порядка появления состояний с различными спинами в спектре возбуждений ядра ${}^{10}\text{He}$ может быть объяснено через подобные перестройки. В этом случае вместо утверждения «нарушение оболочечной структуры» более естественным является использование утверждения «перестройка оболочечной структуры».

При формировании спектра возбужденных состояний ядер необходимо иметь в виду многочастичные эффекты, выходящие за рамки оболочечной модели. Эти эффекты учитываются в теории конечных Ферми-систем, которая опирается

на представления оболочечной модели и одновременно учитывает эффективные нуклон-нуклонные взаимодействия, как в канале «частица-дырка», приводящие к появлению коллективных возбужденных состояний ядер, так и в канале «частица-частица», обуславливающие появление куперовского спаривания нуклонов.

Куперовское спаривание нуклонов играет важную роль для формирования энергетических спектров ядер лежащих за пределами протонной и нейтронной дрип-линий. В диссертации обсуждаются характеристики чётного-чётного изотопа ^{10}He , испытывающего двухнейтронный распад, который имеет целый ряд общих черт с двухпротонным распадом протонно-избыточных ядер. Для уверенного наблюдения двухпротонного распада чётного по Z ядра (A, Z) необходимо отсутствие вероятности его однопротонного распада. Это происходит, если отрицательная энергия спаривания двух протонов превосходит по модулю положительную оболочечную энергию отделения одного протона. С теоретической точки зрения подобная ситуация должна возникать и для двухнейтронного распада исследуемого в диссертации ядра ^{10}He . Расчёты ширины двухпротонного распада ядер, а также обсуждаемые в диссертации аналогичные расчёты для двухнейтронного распада изотопа ^{10}He основаны на R-матричной теории ядерных реакций в рамках метода трёхчастичных гиперсферических функций, в котором вводятся эффективные трёхчастичные силы, параметры которых подбираются так, чтобы воспроизвести наблюдаемые характеристики указанных распадов. Поскольку явление куперовского спаривания нейтронов является многочастичным эффектом, его трудно воспроизвести детально в рамках указанного выше метода гиперсферических функций. В настоящее время развита теория виртуального двухпротонного распада ядер, основанная на сверхтекучей модели атомного ядра и учитывающая влияние эффектов спаривания нуклонов на характеристики указанного распада. Возможно, что учёт представлений, развитых в этой теории, может помочь в объяснении причин расхождения спектров энергий недостающих масс для обсуждаемых в диссертации реакций выбивания и передач.

2) В диссертации исследуется реакция $^4\text{He}(^6\text{He}, 2\alpha)2n$, которая рассматривается как квазисвободная, поскольку при передаче α -частице, входящей в состав ядра ^6He , больших энергий, существенно превосходящих её энергию связи в данном ядре, указанную α -частицу можно рассматривать с хорошей степенью

точности как свободную частицу, энергия которой связана с её импульсом стандартной формулой Эйнштейна. В диссертации указанная α -частица называется виртуальной частицей, в то время как, в квантовой теории поля виртуальной частицей называется частица, для которой не выполняется рассмотренная выше формула Эйнштейна.

3) При обсуждении реакции ${}^4\text{He}({}^6\text{He}, \alpha t)$ в диссертации используется понятие эффективного числа альфа-частиц N_α в ядре ${}^6\text{He}$, которое определяется как отношение экспериментально измеренного сечения указанной реакции к сечению свободного α - α рассеяния. Как правило, при описании кластерных эффектов в ядрах, например, при расчётах абсолютных ширин α -распада ядер, используется иное определение эффективного числа кластеров, связанное с вероятностью формирования этих кластеров из нуклонов ядер и не зависящее от сечений реакций, в которых участвуют кластеры.

Указанные замечания не влияют на общее яркое впечатление от содержания данной диссертации. Безусловно, результаты этой диссертации представляет собой новый шаг в экспериментальных и теоретических исследованиях структуры тяжелых нейтронно-избыточных изотопов гелия и могут быть использованы при анализе еще не исследованных изотопов других ядер, лежащих вне границ нейтронной устойчивости ядер.

Диссертация С.И. Сидорчука удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.16 «Физика атомного ядра и элементарных частиц». Автореферат диссертации полностью отражает содержание диссертации. Основные результаты диссертации доложены на международных конференциях и совещаниях и опубликованы в журналах, обладающих высоким импакт-фактором. По итогам проведенных исследований С.И. Сидорчук заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.16 «Физика атомного ядра и элементарных частиц».

Доктор физико-математических наук,
профессор

Скаф



С. Г. Кадменский
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Боронежский государственный университет»
(ФГБОУ ВО «ВГУ»)
Подпись С. Г. Кадменского
заверяю Скаф должность Скаф
подпись, расшифровка подписи 31.08.20