

СТЕНОГРАММА

заседания диссертационного совета Д 720.001.06
в Международной межправительственной организации
Объединенный институт ядерных исследований

№243 от 27 октября 2017 года

Присутствовали:

Председатель совета:	Оганесян Ю.Ц.	доктор физ-мат. наук	01.04.16
Ученый секретарь совета:	Попеко А.Г.	кандидат физ-мат. наук	01.04.16

Члены совета:

Авдеев М.В.	доктор физ-мат. наук	01.04.07
Апель П.Ю.	доктор хим. наук	01.04.01
Балагуров А.М.	доктор физ-мат. наук	01.04.07
Белушкин А.В.	доктор физ-мат. наук	01.04.07
Гикал Б.Н.	доктор физ-мат. наук	01.04.01
Гледенов Ю.М.	доктор физ-мат. наук	01.04.16
Головков М.С.	доктор физ-мат. наук	01.04.16
Джолос Р.В.	доктор физ-мат. наук	01.04.16
Дмитриев С.Н.	доктор физ-мат. наук	01.04.16
Изосимов И.Н.	доктор физ-мат. наук	01.04.01
Иткис М.Г.	доктор физ-мат. наук	01.04.01
Приезжев В.Б.	доктор физ-мат. наук	01.04.07
Реутов В.Ф.	доктор физ-мат. наук	01.04.07
Скуратов В.А.	доктор физ-мат. наук	01.04.01
Тер-Акопьян Г.М.	доктор физ-мат. наук	01.04.16
Утенков В.К.	доктор физ-мат. наук	01.04.01
Шабалин Е.П.	Доутор физ-мат. наук	01.04.01

Оганесян Ю.Ц.: Сегодня мы должны рассмотреть диссертацию Сидорчука Сергея Ивановича, «Исследования структуры тяжелых изотопов гелия в реакциях передачи и выбивания» на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц. Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций имени Г.Н. Флерова ОИЯИ.

Официальные оппоненты: Леонид Иванович Пономарев, академик РАН, доктор физико-математических наук, главный эксперт Высотехнологического научно-исследовательского института неорганических материалов им. А.А. Бочвара, Алексей Алексеевич Оглоблин, профессор, доктор физико-математических наук, руководитель отделения Национального исследовательского центра Курчатовский институт, и Станислав Георгиевич Кадменский, профессор, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой ядерной физики Воронежского университета.

Ведущая организация – Институт ядерной и радиационной физики Всероссийского научно-исследовательского института экспериментальной физики, г. Саров.

Присутствуют 19 из 25 членов совета, в том числе 6 докторов наук по профилю диссертации. Слово предоставляется ученому секретарю совета для оглашения личного дела соискателя.

Попеко А.Г.: Присутствуют два оппонента, - Леонид Иванович Пономарев и Алексей Алексеевич Оглоблин. Станислав Георгиевич Кадменский не смог приехать из-за болезни, положительный отзыв предоставлен. Соискатель Сидорчук Сергей Иванович родился в 1961 году. В 1984 году окончил Московский инженерно-физический институт. В 2004 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в нашем диссертационном совете Д720.001.06. Все необходимые документы соискателем представлены, размещены на официальном интернет портале диссертационного совета, автореферат разослан, диссертация и автореферат представлены в библиотеке ОИЯИ.

Оганесян Ю.Ц.: Слово предоставляется соискателю.

Сидорчук С.И.: Уважаемые члены диссертационного совета, позвольте мне представить работу «Исследования структуры тяжелых изотопов гелия в реакциях передачи и выбивания». Благодаря прогрессу в области техники вторичных пучков исследования свойств ядер вблизи границ нуклонной стабильности в последние десятилетия получили новый импульс к развитию. В области легких ядер одно из наиболее интересных явлений представлено необычными свойствами изотопов гелия. 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 ${}^6\text{He}$ и ${}^8\text{He}$ обладают, соответственно, двухнейтронным гало и четырехнейтронным «скином».

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.

Цели работы сформулированы на первом слайде. Это

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

Поставленные цели определяют круг задач, которые решаются в представленной работе:

1. Проведение экспериментального исследования реакции передачи двух нейтронов ${}^3\text{H}({}^8\text{He}, p){}^{10}\text{He}$ с использованием вторичного пучка ${}^8\text{He}$ 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 ${}^8\text{He}$ из распада ${}^{10}\text{He}$ и измерение угловых и энергетических корреляций, характерных для основного и возбужденных состояний ${}^{10}\text{He}$. Выбор реакции позволяет интерпретировать полученные результаты в предположении, что нейтроны передаются на ${}^8\text{He}$ и испускаются из ${}^{10}\text{He}$ в s -состоянии с нулевым спином и относительным орбитальным моментом.
2. Проведение экспериментального исследования реакции передачи двух нейтронов ${}^3\text{H}({}^6\text{He}, p){}^8\text{He}^*$ на вторичном пучке ${}^6\text{He}$ с энергией 25А МэВ с использованием газовой тритиевой мишени. Исследование низкоэнергетического спектра ${}^8\text{He}$ и поиск проявлений мягкой дипольной моды возбуждения ${}^8\text{He}$.
3. Проведение экспериментального исследования структуры борромиевского ядра ${}^6\text{He}$ 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.
4. Создание Монте Карло симуляции эксперимента, включающей (а) регистрацию совпадающих α -частиц с помощью системы регистрации с большим угловым аксептансом; (б) спектроскопическую функцию на основе трехтельной волновой функции ${}^6\text{He}$ 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.
5. Выяснение механизма формирования спектра несвязанного состояния в реакциях выбивания нуклонов или кластеров. Экспериментальное определение степени

влияния начального состояния на характеристики спектра, получаемого в эксперименте.

6. Изучение экзотических кластеризаций нейтроноизбыточных ядер на примере ${}^6\text{He}$ и реакции квазисвободного рассеяния на тритоне, связанном в этом ядре.

В центре работы находятся результаты экспериментов по изучению сверхтяжелого изотопа гелия ${}^{10}\text{He}$ в реакциях передачи нейтронов ${}^3\text{H}({}^8\text{He},p){}^{10}\text{He}$. Замкнутые нейтронные и протонные оболочки ${}^{10}\text{He}$, как ожидалось, должны стабилизировать это ядро, обеспечивая его стабильность относительно испускания нейтронов. В 60-х годах прошлого столетия предпринимались попытки найти стабильный ${}^{10}\text{He}$ в продуктах распада Cf, затем его пытались получить путем фрагментации ${}^{18}\text{O}$ и ${}^{48}\text{Ca}$. В 1994 году ${}^{10}\text{He}$ был обнаружен в качестве резонанса в реакции выбивания протона из ${}^{11}\text{Li}$. Это был единственный способ получения ${}^{10}\text{He}$ до 2003 года, когда сотрудниками ВНИИЭФ была создана для ЛЯР ОИЯИ криогенная тритиевая мишень, в результате чего ${}^{10}\text{He}$ мог быть получен в реакции передачи.

Начиная с 2008 года в ЛЯР были предприняты экспериментальные попытки получения ${}^{10}\text{He}$ в реакции передачи нейтронов. Для регистрации заряженных частиц в этих экспериментах использовались два телескопа, установленные перед мишенью и после мишени. Первый телескоп предназначался для регистрации протонов отдачи, второй – для регистрации ${}^8\text{He}$, испущенного в результате распада ${}^{10}\text{He}$. 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 результате проведенных измерений в спектре энергии возбуждения ${}^{10}\text{He}$ был обнаружен пик основного состояния 0^+ с энергией 2.1 МэВ и шириной около 2 МэВ. При этом часть спектра с энергией выше 4 МэВ представляет собой гладкое распределение, не содержащее явных признаков заселения возбужденных состояний ${}^{10}\text{He}$. Вместе с тем была обнаружена значительная анизотропия вылета ${}^8\text{He}$ из ${}^{10}\text{He}$ по отношению к направлению переданного импульса, а также зависимость углового распределения от энергии ${}^{10}\text{He}$.

При анализе предполагалось, что в реакции динейтрон передается с тритона на ${}^8\text{He}$ 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.

Анализ угловых распределений ^8He показал, что они характеризуются весьма характерными корреляциями, которые зависят от диапазона энергии ^{10}He . На этом слайде 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 различных диапазонов энергии ^{10}He .

Красные линии на распределениях, показанных в левом столбце, получены результате подгонки экспериментальных спектров при помощи выражения, которое представляет собой когерентную сумму полиномов Лежандра. Здесь 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}He , 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 этом рисунке.

Как видно из рисунка, корреляции продуктов распада позволяют выявить в спектре возбуждения ^{10}He области, в которых угловые распределения ^8He хорошо описываются вкладом трех состояний: 0^+ , 1^- и 2^+ . Заселение состояния 1^- соответствует нейтрону в $2s$ состоянии. В свою очередь это говорит об исчезновении энергетического зазора между $2s$ и $1p$ оболочками. Таким образом, обнаружение состояния с отрицательной четностью в качестве первого возбужденного уровня является одним из наиболее неожиданных результатов, который свидетельствует о нарушении оболочечной структуры в ^{10}He .

Та же экспериментальная схема использовалась для изучения низкоэнергетического спектра ядра ^8He в аналогичной реакции передачи двух нейтронов с тритона на ^6He $^3\text{H}(^6\text{He},p)^8\text{He}$. Протон отдачи регистрировался в области малых углов в системе центра масс, соответствующей направлению вылета протона, обратному направлению

движения бомбардирующей частицы. ${}^8\text{He}$ мог быть образован либо в основном, либо в возбужденном состоянии. В первом случае протон регистрировался в совпадении с ${}^8\text{He}$, во втором в совпадении продуктами распада ${}^8\text{He}$: с ${}^6\text{He}$ и одним из нейтронов. В измерениях были получены спектры энергии возбуждения ${}^8\text{He}$, соответствующие одному из трех вариантов совпадений частиц в выходном канале реакции: p - ${}^8\text{He}$, p - ${}^6\text{He}$ и p - ${}^6\text{He}$ - n . Эти спектры показаны на рисунке. В спектре энергии возбуждения ${}^8\text{He}$ 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 около 3.6 МэВ. Также можно предположить, что в реакции, помимо состояния 2^+ , в реакции заселяется уровень 1^+ с энергией 5.4 МэВ, о котором упоминается в ряде экспериментальных и теоретических работ. Важной особенностью спектра, показанного на рисунке, 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. Такое поведение сечения может рассматриваться как указание на возбуждение мягкой дипольной моды ${}^8\text{He}^{1-}$.

На этом слайде сравниваются результаты экспериментальных исследований ${}^{10}\text{He}$, полученные в реакциях выбивания и передачи. Видно, что эти результаты значительно отличаются. Необходимо было выяснить причину и природу влияния механизма реакции на спектр изучаемой системы. В рамках этой задачи использовалась аналогия между ${}^{10}\text{He}$, полученном в реакции выбивания протона из ${}^{11}\text{Li}$, и виртуальным состоянием динейтрона, который получен в реакции выбивания α -кора из ${}^6\text{He}$. 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. Механизм квазисвободной реакции подразумевает наличие в диаграмме реакции двух независимых вершин, одна из которых описывается волновой функцией ${}^6\text{He}$, а вторая – амплитудой свободного упругого α - α рассеяния. Обе вершины в данном случае нам хорошо известны.

Кроме этого, подобное измерение позволяет ответить на вопрос относительно возможностей исследования структуры экзотических ядер в квазисвободных реакциях при относительно небольшой энергии налетающего ядра 25А МэВ.

Импульсное приближение плоских волн подразумевает факторизацию выражения для сечения реакции. Выражение приведено на этом слайде. Здесь 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 ${}^6\text{He}$.

Для идентификации процесса путем описания четырехтельных угловых и энергетических корреляций в выходном канале реакции была создана Монте-Карло симуляция эксперимента на базе плосковолнового импульсного приближения. Для моделирования реакции использовалась спектральная функция, построенная на основе трехтельной волновой функции ${}^6\text{He}$ 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 этом рисунке показан результат подгонки экспериментальных распределений. 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, его проекций, а также гипер-угла содержат информацию о волновой функции ${}^6\text{He}$.

Разработанные в ходе исследования реакции квазисвободного рассеяния ${}^4\text{He}({}^6\text{He}, 2\alpha)2n$ подходы были использованы для изучения экзотических кластеризаций ${}^6\text{He}$ в реакции рассеяния α -частицы на виртуальном тритоне, связанном в ${}^6\text{He}$. 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 случае α - α рассеяния, – путем одновременной подгонки экспериментальных распределений набора переменных с использованием модельных распределений квазисвободного рассеяния и фазового объема. Результаты подгонки для реакции ${}^4\text{He}({}^6\text{He},\alpha)t$ показаны на этом слайде. Аналогичные результаты были получены и для реакции ${}^4\text{He}({}^6\text{He},\alpha)dn$. 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 $30^\circ < \vartheta_{\text{от}} < 150^\circ$ 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. Здесь можно отметить, что $t+d+n$ кластеризация, которая так же, как $\alpha+n+n$ кластеризация, является борромиевской, т.е. ни одна из трех подсистем ${}^6\text{He}$ не связана. Кроме этого, интересно отметить, что вероятность более связанной конфигурации $t+d+n$ в 3 раза выше, чем вероятность менее связанной конфигурации $t+t$.

Полученные в работе результаты суммированы на этом слайде:

1. 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;
2. Экспериментально измерены энергия и ширина основного состояния ${}^{10}\text{He}$: $E_T \approx 2.1$ МэВ и $\Gamma \approx 2$ МэВ;
3. 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;
4. Впервые установлено, что ядро ${}^{10}\text{He}$, обладающее максимальной среди известных ядер величиной отношения $N/Z = 4$, характеризуется необычным порядком следо-

- вания 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;
5. 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 .
 6. 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;
 7. 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;
 8. 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;
 9. 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.
 10. В реакциях квазисвободного рассеяния на тритоне, связанном в ^6He , $^4\text{He}(^6\text{He},at)t$ и $^4\text{He}(^6\text{He},at)dn$, 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 $^6\text{He}\rightarrow t+t$.

На последних слайдах приведен список работ, к в которых опубликованы полученные результаты. Благодарю вас за внимание!

Оганесян Ю.Ц.: Спасибо. Вопросы, пожалуйста.

Апель П.Ю. Сергей Иванович, результаты в вашем докладе представлены и выглядят так, как будто они примерно равнозначны. Можно ли выделить какой-то обобщающий пункт и, если его нет, назвать причину, по которой он отсутствует?

Сидорчук С.И. Среди показанных выводов в качестве основных я бы выделил результат по гелию-10. Вместе с тем важно то, что в результате изучения влияния механизма реакции на спектр несвязанных состояний было показано, что к этим спектрам нужно относиться критически, что для окончательных выводов необходимы исследования корреляций продуктов распада. Пик в спектре конечного состояния, наблюдаемый в реакции выбивания нуклона или кластера, не означает, что мы наблюдаем именно изучаемое состояние.

Джолос Р.В.: У меня вопрос, связанный с предполагаемым опусканием *s*-обложки. А как отличается энергия отделения одного ли двух нейтронов в гелии-8 и в гелии-10?

Сидорчук С.И. Отличия значительные и связаны в первую очередь с тем, что гелий-10 является несвязанной системой относительно отделения двух нейтронов, а гелий-8 связан на 2.14 МэВ.

Джолос Р.В.: Поэтому гелий-8 выглядит как дважды маг, а не гелий-10.

Сидорчук С.И. Гелий-8 имеет замкнутую $p_{3/2}$ подоболочку и по этой причине он связан сильнее, чем более легкий гелий-6. В гелии-6 два валентных нейтрона, а в гелии-8 их четыре, и тем не менее он связан сильнее благодаря наличию подоболочки. Это обстоятельство давало основания полагать, что если мы заполним еще и $p_{1/2}$ подоболочку, т.е. полностью заполним нейтронную $1p$ -оболочку в гелии-10, то она окажет стабилизирующее влияние на свойства гелия-10.

Иткис М.Г.: Оболочечная структура является достаточно сложным понятием. Когда вы говорите о нарушении структуры, это означает, что число нейтронов, равное 8, уже не является магическим числом?

Сидорчук С.И. Да. Оно не является магическим для ядер, находящихся на границе нейтронной стабильности. В этой области оно не является единственным ядром с подобными свойствами. В других ядрах с числом нейтронов, равным 8, таких как ^{11}Li и ^{12}Be , тоже была обнаружена значительная смесь *s*- и *p*-состояний.

Оганесян Ю.Ц.: А можно ли говорить об оболочечной структуре нестабильного ядра? Если ядро нестабильно, то какие могут быть оболочки? Вопрос: подчиняются ли нестабильные ядра модели оболочек?

Сидорчук С.И. С моей точки зрения мы можем ожидать от нестабильных ядер тех же свойств, какими обладают стабильные ядра. Вместе с тем надо иметь в виду, что подобные исследования не распространены по причине их сложности. Работ, посвященных изучению оболочечной структуры ядер за границей нуклонной стабильности, просто мало.

Оганесян Ю.Ц.: Еще вопросы?

Джолос Р.В.: Возможно, я что путаю, но мне казалось, что существуют работы, в которых наблюдалось 3^- состояние в гелии-8 или в гелии-10. Это так?

Сидорчук С.И. Я думаю, что Алесей Алексеевич Оглоблин мог бы высказаться по этому поводу, поскольку он является соавтором одной из самых первых работ посвященных гелию-10. В этой работе наблюдался целый спектр этих состояний, и один из пиков в этом спектре как раз интерпретировался как 3^- . Спектр показан на этом слайде. Здесь видно основное состояние 0^+ , первое возбужденное состояние, которому были приписаны спин и четность 2^+ , а третье состояние, предположительно, имело спин-четность как раз 3^- .

Оглоблин А.А.: В этой работе была очень маленькая статистика.

Сидорчук С.И. Тем не менее это именно та работа, в которой упоминалось состояние с такой спин-четностью.

Оганесян Ю.Ц.: Еще вопросы? Если нет, то у меня еще есть вопрос. Классическая реакция $(p,2p)$ на ^{11}Li . Протон взаимодействует с протоном, они вылетают оба, и по углам разлета и энергиям протонов можно определить импульсное распределение протонов в ядре. Теперь мы берем реакцию $(\alpha,2\alpha)$. Берем ^6He , выбиваем альфу и определяем импульсное распределение α -частицы. Потом мы можем выбивать из ^6He тритоны и говорить о распределении тритона в ^6He . Насколько справедливо предположение, что мы можем применить такой подход в отношении тритонов? Если вы получаете результат, близкий к модели, то это наверное в первую очередь потому, что исследуются слабосвязанные ядра?

Сидорчук С.И. Действительно, тритон с тритоном в ^6He связаны на 12 МэВ и это означает, что они сильно перекрыты.

Оганесян Ю.Ц.: Тогда, казалось бы, этого не должно быть.

Сидорчук С.И. Это один из вопросов, на которые пока нет ответа. Все, что можно сказать, - это то, что экспериментальные распределения хорошо согласуются с моделью, несмотря на сильную связь кластеров и их предполагаемое сильное перекрытие.

Оганесян Ю.Ц.: Если нет, спасибо. Теперь секретарь огласит отзыв организации, в которой выполнялась работа, а также отзыв ведущей организации.

Попеко А.Г.: Имеется заключение научно-технического совета Лаборатории ядерных реакций, утвержденное директором лаборатории профессором С.Н. Дмитриевым. Оно положительное и замечаний не содержит. Имеется заключение ведущего предприятия, Российского федерального ядерного центра, утвержденное директором, доктором технических наук, профессором В.Е. Костюковым. Оно положительное, однако содержит несколько замечаний: (а) акцентированно не указаны источники погрешностей экспериментальных результатов и не описана процедура их определения; (б) не очень четко изложены кинематические и энергетические соотношения для реакции $t+{}^8\text{He}\rightarrow{}^{10}\text{He}+p$; (в) имеются повторение в изложении материалы (приводятся номера страниц); (г) встречаются очевидные недосказанности, например, на рисунке 2.2.3 приведена энергетическая зависимость эффективности регистрации для совпадений $p-{}^8\text{He}$, однако, об ее очевидном использовании при обработке результатов не сказано; (д) присутствуют опечатки и грамматические ошибки. Однако, отмеченные замечания ни в коей мере не умаляют научную и практическую значимость диссертационной работы. Соискатель заслуживает присвоения ему искомой степени доктора наук.

Сидорчук С.И. Что касается обсуждения экспериментальных ошибок, я вынужден согласиться, что это недостаток работы. Ошибки подгонки для каждой точки спектра составляют приблизительно 10%. Это не статистические погрешности, а ошибки, которые возникают в результате подгонки угловых распределений той или иной функцией. Значение приведенного χ^2 при этом для каждой точки было близко к единице.

Оганесян Ю.Ц.: В замечании говорится, что не указаны источники погрешности.

Сидорчук С.И. Главным источником ошибок является статистика.

Оганесян Ю.Ц.: Что можно сказать по поводу кинематических и энергетических соотношений в реакции $t+{}^8\text{He}$?

Сидорчук С.И. Я согласен с тем, что кинематические соотношения должны были быть рассмотрены более детально. Что касается замечания об учете эффективности

регистрации, то эффективность никак не учитывалась, т.к. симуляция показала, что в данном энергетическом диапазоне зависимость эффективности регистрации от энергии практически равномерная.

Попеко А.Г.: Поступил отзыв на автореферат от заведующего кафедрой ядерной физики физического факультета Киевского национального университета имени Тараса Шевченко доктора физ.-мат. наук, профессора И.Н. Каденко. Здесь много длинных замечаний. В целом делается вывод, что работа является актуальной и соответствует всем требованиям к докторским диссертациям, но хотелось бы отметить по тексту автореферата и диссертации следующее: из текста автореферата не ясно, от какого состояния ведется отсчет энергии, ведь по умолчанию основное состояние принимает нулевое значение, а возбужденные имеют положительные значения энергии относительно основного состояния.

Оганесян Ю.Ц.: Еще раз можно показать спектр, о котором идет речь?

Сидорчук С.И. Эти распределения были получены в трехтельной модели, которая не имеет отношения к оболочечной модели, и показывает только то, что такой порядок урвень в принципе возможен. Что касается ошибок: 30-50% это статистические ошибки, ошибки определения коэффициентов несколько меньше, поскольку они являются результатом подгонки угловых распределений по нескольким точкам. Эти ошибки порядка 10%. К сожалению, эти ошибки не показаны. Это результат подгонки угловых распределений с помощью когерентной суммы, включающей в себя полиномы Лежандра трех порядков. В результате мы определяем, каков вклад каждого компонента в данном энергетическом диапазоне.

Оганесян Ю.Ц.: Ошибки, действительно, большие – это видно из гистограммы. Это какие сечения?

Сидорчук С.И. Это сечения порядка 100 микробарн/стерадиан, соответствующие передаче двух нуклонов.

Оганесян Ю.Ц.: Какая интенсивность требовалась для этих экспериментов?

Сидорчук С.И. Интенсивность гелия-8 была очень невысокая – 10-15 тысяч частиц в секунду. При этом тритий в мишени мы были вынуждены держать в газовом состоянии, потому что работа с жидкой мишенью означала дополнительные сложности, среди которых можно упомянуть ухудшение разрешения. В результате светимость пучка на мишени была очень невысокая.

Попеко А.Г.: На странице 7 автореферата приведена фраза, что в реакции передается динейтрон. Не определено, что такое динейтрон в понимании автора. Эта неопределенность проходит по тексту всей диссертационной работы, в которой фигурируют: «ненаблюдаемая динейтронная система», «динейтрон передается», «динейтронный компонент», «несвязанное состояние динейтрона». Было бы разумно в начале работы определить, что будет подразумеваться под этим научным понятием. Так, например, в одной из моих работ наблюдается динейтрон как одна частица в связанном состоянии, но такая его конфигурация не имеет ничего общего с тем, о чем идет речь в диссертационной работе.

Сидорчук С.И. В основном под динейтроном понимается система из двух нейтронов.

Оганесян Ю.Ц.: Это очень важно, поскольку когда говорят о динейтроне, имеют в виду дейтрон, у которого вместо протона еще один нейтрон, а два нейтрона отдельно – это не динейтрон.

Попеко А.Г.: На рисунках 5, 6, 7 автореферата к сожалению не удастся разглядеть светло-серые гистограммы, о которых говорится в подписях к рисунку. Несмотря на приведенные замечания, диссертационная работа, несомненно, представляет большой вклад в исследования структуры нейтроноизбыточных легких ядер, понимания процессов формирования кластеров в легких ядрах, и механизмов формирования динейтронных конфигураций в ядрах $^{6,8,10}\text{He}$, а также в исследования низколежащих состояний. Подытоживая, хотелось бы отметить, что исследования, проведенные в диссертационной работе, выполнены на высоком научном уровне, а ее автор Сидорчук Сергей Иванович, без сомнений заслуживает присуждения ему научной степени доктора физико-математических наук.

Оганесян Ю.Ц.: Слово первому оппоненту. Алексей Алексеевич, пожалуйста.

Оглоблин А.А.: Оглашает отзыв. Текст прилагается.

Оганесян Ю.Ц.: Спасибо большое. Леонид Иванович Пономарёв, пожалуйста.

Пономарев Л.И. Оглашает отзыв. Текст прилагается.

Сидорчук С.И. По поводу мягкой дипольной моды только что говорил Алексей Алексеевич, - это аналог гигантского дипольного резонанса. Его действительно ищут и находят в слабосвязанных ядрах. Что касается разницы между механизмами, она заключается в том, что в реакциях фрагментации заселяется низкоэнергетическая часть спектра, в районе 1 МэВ. Это связано с влиянием волновой функции начального со-

стояния. Нейтроны гало очень слабо двигаются, обладают малыми импульсами и благодаря этому заселяется низкоэнергичная часть спектра.

Пономарев Л.И. В чем заключается наблюдаемый эффект.

Сидорчук С.И. Как видно из этого рисунка, спектры, полученные в реакции передачи и в реакции фрагментации, совместить никак нельзя, несмотря на близость максимумов: 1 и 2 МэВ. Они имеют принципиально разную форму. Проблема заключается еще и в том, что все спектры, полученные в реакциях фрагментации, очень хорошо совпадают. Это сильный аргумент против нашего результата. В нашей работе удалось показать, что сдвиг в малые энергии в реакциях фрагментации есть влияние начального состояния.

Оганесян Ю.Ц.: У нас еще есть отзыв от Станислава Георгиевича Кадменского. Я прошу учёного секретаря огласить отзыв.

Попеко А.Г.: Оглашает отзыв. Текст прилагается.

Оганесян Ю.Ц.: Сергей Иванович, есть ли ответ на замечания?

Сидорчук С.И. Что касается нарушения структуры или ее перестройки, то мне кажется, что это вопрос терминологии. Вместе с тем готов согласиться со Станиславом Георгиевичем, что «перестройка» является более точным определением. Что касается виртуальных частиц, я думаю, что частица, сильно удаленная от энергетической поверхности, а именно это происходит с альфа-частицей, связанной в ${}^6\text{He}$, - является виртуальной, поскольку для нее, действительно, не выполняются нормальные соотношения.

Оганесян Ю.Ц.: Хорошо, теперь мы должны перейти к дискуссии. Сейчас мы должны поговорить таким образом, чтобы выработать общее мнение относительно ценности этой работы, ее соответствия званию доктора наук. Потом будет голосование. Пожалуйста.

Оглоблин А.А.: Я хотел бы обсудить пример, который сильно обсуждается в литературе, - лично я с ней не согласен, - что, может быть, структура гелия-10 совсем другая. Два протона и восемь нейтронов, - ясно, что корреляции играют здесь важную роль. Сейчас рассматривается модель бозонного конденсата: не реализуется ли в гелии-10 состояние, в котором нейтронные пары, являющиеся бозонами, образуют конденсат? Поэтому спектроскопию гелия-10 необходимо проводить тщательно. То что в этой работе удалось сделать – это получить 1^- состояние, которое лежит ниже, чем 2^+ .

Подобные примеры имеются, например, в бериллии-11, где s-оболочка спускается вниз. Здесь получается некая закономерность, которая заключается в том, что это происходит на границе стабильности. Модель оболочек означает хорошее среднее поле. В нашем случае с восемью нейтронами это поле может значительно отличаться от привычной нам Вуд-Саксоновской формы. С этой точки зрения результат, полученный соискателем, очень важен. Что касается части работы, посвященной гелию-8, то здесь соискатель искал мягкую моду дипольного резонанса – особая форма колебаний ядерной материи. Явных проявлений не было обнаружено, но это не обесценивает саму попытку найти это явление. Третий блок посвящен исследованию механизма реакции. В этом блоке удалось показать, что механизм удаления кластера не является чистым. Показано, что конечное состояние нейтронов сильно отличается от начального. Они взаимодействуют, и общий вывод заключается в том, что к результатам, полученным в таких реакциях, нужно относиться достаточно осторожно. Во-первых, необходимо повышать интенсивность радиоактивных пучков, во-вторых, нужно развивать теоретические подходы для анализа этих эффектов.

Тер-Акопьян Г.М.: Главная изюминка экспериментов, о которых идет речь в диссертации – это то, что удалось соединить радиоактивную тритиевую мишень и радиоактивный пучок – гелий-8. Такой подход является уникальным, поскольку ранее реализовать такой чистый механизм не удавалось. Мне кажется, эта работа позволила нам сделать довольно большой шаг в понимании того, что творится за нейтронной границей стабильности.

Оганесян Ю.Ц.: Подведем итог. Диссертация экспериментальная. Проблеме 50 лет, она возникла тогда, когда был открыт ^8He . Работать с пучком, интенсивность которого исчисляется в тысячах штук, очень трудно. Сам эксперимент очень трудный в этом плане. Будь я на месте Сергея Ивановича, я обязательно об этом бы сказал. Второе – это подход к исследованию ^{10}He . Много было разных вариантов, - далеко не все были перечислены. В данном случае инструментом являются реакции (t,p) и $(p,2p)$. Одним из больших преимуществ этого эксперимента является уникальная, единственная в мире тритиевая мишень, сделанная в Сарове, которая к тому же может быть жидкой, твердой и газообразной. Она является очень важным компонентом всего эксперимента. Здесь мы должны вспомнить утверждение Базя, что если ^{10}He стабильный, то ^{20}He тоже стабильный. Этого не произошло, ^{10}He оказался нестабильным. То, что

модель оболочек на этом ядре рухнула – это не так неожиданно. Она рухнула еще раньше и это было обнаружено еще для нуклонно-стабильных ядер. Так что, если ^{10}Ne нестабилен, тем более трудно ожидать согласия с моделью оболочек. Здесь это впервые показано экспериментально. Вместе с тем задача требует более детального исследования и в этом смысле ^6He с его ярко выраженной $\alpha n n$ структурой является очень удачным объектом для таких исследований. Реакции по выбиванию альфа частиц и тритонов, наверное, могут считаться направлением, которое только что начато и требует детальных исследований с хорошей статистикой, ибо мы хотим иметь еще один инструмент, такой же информативный, как и реакции (t,p) , (d,p) . Я сказал бы, что это одна из самых ярких работ нашей Лаборатории. Длилась она много лет, не всегда все получалось. Были попытки провести кинематически полный эксперимент с совпадениями с нейтронами. Результаты много раз проверялись прежде чем вы услышали сегодняшний доклад. В этой работе С.И. Сидорчук принимал очень активное участие на протяжении многих лет. Суммируя выступления оппонентов, и добавляя все, что было сегодня сказано, в том числе и свое мнение, я думаю, что соискатель полностью соответствует требованиям, предъявляемым к доктору наук, способному самостоятельно ставить сложные эксперименты и интерпретировать полученные результаты. Если кто-то хочет что-нибудь добавить, я с удовольствием предоставлю слово. Если нет, то тогда есть такая процедура, как заключительное слово. Прошу вас.

Сидорчук С.И. Во-первых, позвольте поблагодарить за внимание членов диссертационного совета. Во-вторых, я хочу выразить благодарность своим оппонентам за их труд и положительные отзывы. Кроме этого, я благодарю своих коллег за их участие в этой работе. Я благодарен команде циклотрона У400М, которая обеспечила нам пучок, и, разумеется, сотрудникам ВНИИЭФ в Сарове, которые сделали и обеспечили работу тритиевой мишени. Спасибо большое!

Оганесян Ю.Ц.: Теперь мы переходим к голосованию. Предлагаю выбрать счетную комиссию, для проведения тайного голосования для решения вопросов о соответствии рассматриваемой работы требованиям Положения и о присуждении ученой степени доктора физико-математических наук Сидорчуку Сергею Ивановичу: Тер-Акопян Г.М., Скуратов В.А., Приезжев В.Б.

ПОСТАНОВИЛИ: Избрать счетную комиссию в составе: Тер-Акопьян Г.М., Скуратов В.А. и Приезжев В.Б.

СЛУШАЛИ: Утверждение протокола счетной комиссии по проведению тайного голосования о присуждении ученой степени доктора физико-математических наук Сидорчуку С.И.: Состав совета утвержден в количестве 25 человек, присутствовали на заседании 19 членов совета, роздано бюллетеней - 19, оказалось в урне для голосования – 19, при этом с отметкой "за" - 19, подано с отметкой "против" - нет, действительных бюллетеней - нет.

Оганесян Ю.Ц.: Прошу утвердить протокол счетной комиссии. Протокол счетной комиссии утвержден единогласно. На основании изложенного диссертационный совет Д 720.001.06 в Объединенном институте ядерных исследований принял решение о присуждении ученой степени доктора физико-математических наук Сидорчуку С.И. Переходим к обсуждению заключения совета по диссертации Сидорчука С.И. Проект заключения есть у всех членов совета. Текст заключения прилагается.

Оганесян Ю.Ц.: Есть у кого-либо замечания. Если замечаний нет, то мы за него проголосуем. Все «за». Против - нет. Единогласно утверждено.

Председатель диссертационного совета,
академик РАН

Ученый секретарь
диссертационного совета



Оганесян Ю.Ц.

Попеко А.Г.

14 ноября 2017 г.