

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук Демьяновой Аллы Сергеевны
на диссертацию Конобеевского Евгения Сергеевича "Исследование нейтрон-нейтронного взаимодействия в реакциях с двумя нейтронами в конечном состоянии",
представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук
по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

Диссертационная работа Конобеевского Евгения Сергеевича посвящена исследованию нейтрон-нейтронного взаимодействия в малонуклонных реакциях при низких энергиях (< 100 МэВ). Это позволило открыть новые пути в решении фундаментальной проблемы ядерной физики - проверке гипотезы о зарядовой симметрии ядерных сил, предложенной в 1932 г. Гейзенбергом.

Известно, что в отличие от протон-протонного (pp) и нейтрон-протонного (np) взаимодействий, которые могут быть исследованы в прямых экспериментах по NN-рассеянию, данные о нейтрон-нейтронном взаимодействии получают только в реакциях с двумя нейтронами в конечном состоянии, где просматривается влияние $3N$ -сил. Разница между нейтрон-нейтронной и протон-протонной длинами рассеяния определяет меру нарушения зарядовой симметрии ядерных сил. Накоплено большое количество данных по pp - и np -взаимодействиям, проведен их тщательный анализ. Установлено предельное значение для длины pp - взаимодействия равным $a_{pp} = -17.3 \pm 0.4$ фм. Однако данные по np - взаимодействиям разрознены. Более того, во многих случаях имеются серьезные расхождения между имеющимися экспериментальными данными, и результатами точных расчетов на основе уравнений Фаддеева. Так, например, извлеченные значения о величии нейтрон-нейтронной длины рассеяния имеют существенный разброс значений: от $a_{nn} = -25$ фм до $a_{nn} = -14$ фм, что не дает возможности однозначно ответить на вопрос о степени зарядовой независимости ядерных сил и даже о ее знаке. Это привело к необходимости систематизации накопленных экспериментальных данных, получению нового экспериментального материала при ранее неизмеренных энергиях и различных геометриях эксперимента, а также разработки их общего теоретического описания. Безусловно, в этом плане исследования диссертанта явились **актуальными**.

Для исследования нейтрон-нейтронного взаимодействия в диссертационной работе были рассмотрены различные реакции, в конечном состоянии которых образуется нейтрон-нейтронная пара. При этом nn -пара может быть образована как в конечном состоянии реакции, например, в реакциях $n+{}^2\text{H} \rightarrow nn+p$ и $d+{}^2\text{H} \rightarrow nn+pp$, так и существовать, например, в нейтроноизбыточном ядре ${}^6\text{He}$. В работе также исследовано влияние $3N$ -сил на параметры нейтрон-нейтронного взаимодействия, извлекаемые в реакциях с тремя частицами в конечном состоянии.

Сложность экспериментов требовала большой предварительной методической подготовки и моделирования протекающих процессов. Под руководством диссертанта был создан программный комплекс кинематического моделирования различных реакций с тремя и более частицами в конечном состоянии. В результате моделирования диссертантом **впервые** было показано, что при определенных экспериментальных условиях в реакциях с двумя нейтронами в конечном состоянии энергетический спектр нейтронов имеет специфический вид, зависящий от энергии виртуального 1S_0 состояния nn -системы и, соответственно, от длины рассеяния a_{nn} .

При непосредственном участии диссертанта были созданы экспериментальные установки для исследования реакции nd -развала на пучке нейтронов канала линейного ускорителя в ИЯИ РАН и dd -развала на пучке дейтронов циклотрона У-120 НИИЯФ МГУ. Исследования nd -развала были проведены в диапазоне энергии первичных нейтронов 20–100 МэВ. В результате диссертантом в реакции nd -развала **впервые** получены данные о параметрах nn -взаимодействия при энергии нейтронов 40 МэВ: энергия виртуального синглетного состояния nn -системы $E_{nn} = 0.129 \pm 0.013$ МэВ и длина nn -рассеяния $a_{nn} = -16.6 \pm 0.9$ фм. Реакция dd -развала $d+^2\text{H} \rightarrow p+p+n+n$ была исследована при энергии дейтронов 15 МэВ, что позволило **впервые** в этой реакции получить значение энергии синглетного nn -состояния $E_{nn} = 0.076 \pm 0.06$ МэВ, соответствующее длине nn -рассеяния $a_{nn} = -22.6 \pm 0.6$ фм.

Диссертантом была разработана методика исследования реакции квазисвободного рассеяния (КСР) протонов на кластерах гало ядер в обратной кинематике, основанная на использовании в качестве мишени и детектора заряженных частиц стопки бесподложечных ядерных фотоэмульсий (ФЭ) а снаряда – пучка нейтроноизбыточных ядер. Эксперимент был проведен в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ. **Впервые** данные о КСР протонов на динейтронном кластере, позволяющие рассматривать структуру ^6He как систему кор (^4He) + динейтрон. Показано, что исследование энергетических спектров нейтронов, регистрируемых под углом близким к углу вылета nn -системы в совпадении с заряженной частицей, позволит получить информацию об эффективной энергии квазисвязанного nn -состояния в гало-ядре.

Диссертантом проведен полный анализ данных о нейтрон-нейтронной длине рассеяния, полученных в реакциях nd и dd -развала, как и литературных, так и полученных в рамках данного диссертационного исследования. **Впервые** удалось показать возможность согласования существующих данных, полученных при различных энергиях, учетом влияния $3N$ -сил, зависящих от скорости разлета вторичных фрагментов (nn -пары и заряженного фрагмента). И в результате было получено значение параметров nn -взаимодействия в их отсутствии.

Именно в рамках достаточно простой модели проф. Кукулина В.И. удалось описать значения всех nn - длин рассеяния с учетом вклада от $3N$ -сил, зависящих от скорости разлета вторичных фрагментов. И при этом удалось показать, что полученное диссертантом значение

длины рассеяния $a_{nn} = -16.6 \pm 0.9$ фм не зависит от $3N$ -сил и, вероятно, является истинным. Это значение практически совпадает с полученным ранее значением для длины рассеяния $a_{pp} = -17.4 \pm 0.4$ фм. Этот **нетривиальный результат** был получен диссертантом **впервые** и указывает на признаки зарядовой независимости ядерных сил.

Несомненно, исследования, проведенные в диссертации, являются **актуальными и характеризуются новизной, научной и практической ценностью.**

Общая характеристика

Диссертация состоит из Введения, шести глав и заключения, включает в себя 120 рисунков, 6 таблиц и список цитированной литературы из 145 наименований. Общий объем диссертации составляет 242 страницы.

Во **Введении** дана мотивация диссертационной работы, указаны цель, актуальность, научная новизна и практическая значимость диссертации. Сформулированы положения, выносимые на защиту, показан личный вклад автора в полученные результаты и описана их апробация, кратко изложено содержание диссертации и распределение материала по главам.

Глава 1 носит обзорный характер. Отмечены значительные расхождения экспериментальных данных по нейтрон-нейтронному квазисвободному рассеянию (КСР) и реакциям nd и pd -развала с результатами современных теоретических расчетов. Рассмотрены также расхождения в величинах длины рассеяния, полученных в различных экспериментах при различных энергиях. Высказано предположение, что эти расхождения могут быть обусловлены разным вкладом $3N$ сил, зависящим от энергии. Показана необходимость получения как новых дополнительных данных о параметрах nn -взаимодействия, так и метода определения влияния $3N$ -сил на величину этих параметров в реакциях с тремя и более нуклонами в конечном состоянии.

В Главе 2 диссертации описаны разработанные под руководством диссертанта программы кинетического моделирования ядерных реакций с различным числом частиц в конечном состоянии (3, 4, 5...). Показана возможность в созданных программах, задавая некоторые параметры вторичных частиц, определять кинематику реакции для различных типов и геометрий эксперимента, например, для квазисвободного рассеяния, взаимодействия в конечном состоянии, развала определенного возбужденного состояния ядра по заданному каналу. Сделан важный вывод, что при определенных условиях эксперимента (детектирование нейтронов под углом, соответствующим вылету nn -системы в двухчастичной реакции, например $n + {}^3\text{H} \rightarrow {}^2\text{H} + nn$) энергетический спектр нейтронов имеет специфический вид, зависящий от длины рассеяния a_{nn} .

В Главе 3 описано экспериментальное исследование реакции $nd \rightarrow pnn$ при энергии нейтронов 40 МэВ. Проведенное моделирование реакции позволило определить геометрию эксперимента и параметры детектирующей аппаратуры. Определены оптимальные углы

регистрации протона и нейтронов, диапазоны энергии регистрируемых частиц. Описана экспериментальная установка для исследования реакции nd -развала на нейтронном канале РАДЭКС ИЯИ РАН. Подробно рассмотрены параметры эксперимента и детектирующей установки – пучка нейтронов, дейтериевой мишени, протонного и нейтронных детекторов. описана система сбора данных. Полученные экспериментальные данные сравнивались с результатами моделирования, зависящими от значения энергии виртуального 1S_0 состояния nn -системы. Для представленных данных получено значение энергии виртуального нейтрон-нейтронного состояния $E_{nn} = 0.129 \pm 0.013$ МэВ. Этому значению энергия виртуального уровня соответствует значение нейтрон-нейтронной длины рассеяния $a_{nn} = -16.6 \pm 0.9$ фм. Таким образом, **впервые** получено значение nn -длины рассеяния в реакции nd -развала при энергии первичных нейтронов 40 МэВ.

В Главе 4 описан эксперимент по изучению структуры двухнейтронного гало в реакции квазисвободного рассеяния (КСР) протона на кластерах гало-ядра ^6He в обратной кинематике, проведенный в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ. Приведены результаты кинематических расчетов реакции КСР для двух случаев: рассеяния протона на динейтроне, и на одиночном нейтроне гало. Рассмотрен экспериментальный метод изучения структуры гало-ядер в реакции КСР, с использованием пучка ^6He и стопки фотоэмульсий. Описана методика эксперимента, включающая фотохимическую обработку эмульсий, оцифровку изображения следов заряженных частиц в эмульсии, обработку траекторий и получение кинематических характеристик вторичных частиц. При сравнении экспериментальных данных (двумерных диаграмм Далитца для энергий вторичных частиц) с результатами моделирования отмечена концентрация экспериментальных точек в кинематической области, разрешенной для КСР протона на динейтроне. Показано, что в спектре недостающей массы реакции $^6\text{He} + p \rightarrow ^4\text{He} + p + X$ возникает соответствующая структура с массой M_X , равной массе двухнейтронной компоненты. Сделан вывод о существовании в гало-ядре ^6He “подсвязанного” состояния nn -пары – динейтрона, на котором возможно рассеяние как на кластере. Рассмотрена также возможность исследования структуры гало-ядра ^8He в реакции КСР протона. Показано, что существуют выделенные области в угловых и энергетических распределениях вторичных частиц, однозначно соответствующие определенным кластерным конфигурациям гало-ядер, рассмотрено предложение возможного эксперимента. Также рассмотрена возможность исследования nn -корреляций в реакциях подхвата кора из ядер ^6He или ^{11}Li . Показано, что исследование энергетических спектров нейтронов, регистрируемых под углом близким к углу вылета nn -системы в совпадении с заряженной частицей, позволит получить информацию об эффективной энергии квазисвязанного nn -состояния в гало-ядре.

В Главе 5 описано экспериментальное исследование реакции $dd \rightarrow pp + nn$ на пучке 15 МэВ дейтронов циклотрона У-120 НИИЯФ МГУ. Приводятся результаты моделирования этой реакции, показавшие, что при определенных условиях регистрация двух протонов и нейтрона

энергия синглетного состояния nn -системы, и соответственно величина nn -длины рассеяния может быть определена из формы энергетического спектра нейтрона от развала этого состояния. Представлена созданная с учетом результатов моделирования экспериментальная установка. Рассмотрены требования к системе детектирования и сбора информации. Получен экспериментальный времяпролетный спектр нейтронов и проведено его сравнение с результатами моделирования, зависящими от значений энергии синглетного nn -состояния. Проведено χ^2 -сравнение экспериментальных и моделированных данных. Анализ зависимости χ^2 от E_{nn} показал, что минимальное значение χ^2 соответствует значению энергии синглетного nn -состояния $E_{nn} = 76 \pm 6$ кэВ и, соответственно, значению величины nn -длины рассеяния $a_{nn} = -22.6 \pm 0.6$ фм. Полученное впервые в реакции dd -развала при энергии 15 МэВ значение nn -длины рассеяния значительно превышает (по абсолютной величине) значения длин рассеяния в экспериментах по nd -развалу, что, по-видимому, указывает на эффективное усиление nn -взаимодействия в промежуточном состоянии в исследуемой реакции.

В Главе 6 диссертации проанализированы все данные о нейтрон-нейтронной длине рассеяния, полученные с 1999 г. в реакциях nd и dd -развала (в том числе и данные, представленные в 3 и 5 главах диссертации). Подробно рассмотрены схемы различных экспериментов и полученные в этих экспериментах значения нейтрон-нейтронной длины рассеяния. Отмечены значительные расхождения экспериментальных данных полученных в различных геометриях и при различных энергиях налетающих частиц. Наблюдаемые расхождения объясняются влиянием $3N$ -сил, которые зависят от скорости разлета nn -пары и заряженного фрагмента. Показано, что чем больше скорость разлета фрагментов, тем быстрее фрагменты покидают область действия $3N$ -сил, и тем меньше должно быть их влияние на параметры nn -взаимодействия, извлекаемые из эксперимента. Показано, что учет этого влияния позволяет согласовать данные о нейтрон-нейтронной длине рассеяния различных экспериментов. Сделан **важный** вывод, что из данных, полученных при различных скоростях разлета, можно выделить эффект $3N$ -сил и получить значение параметров nn -взаимодействия в их отсутствии.

В Заключение представлены основные результаты и выводы диссертации.

Оценивая диссертацию в целом, можно отметить, что диссертация представляет собой законченное фундаментальное исследование, включающее моделирование исследуемых реакций, создание экспериментальных методик, проведение экспериментального исследования этих реакций и теоретический анализ полученных данных.

К числу недостатков диссертации следует отнести:

Из экспериментов по захвату остановившихся пионов на дейтроне $\pi^- + {}^2\text{H} \rightarrow \gamma + n + n$ было получено значение длины nn -рассеяния равным $a_{nn} = -18.63 \pm 0.48$ фм. Это значение считается в настоящее время наиболее корректным, поскольку в таком процессе отсутствует вклад

трехнуклонной силы. Диссертантом было получено значение $a_{nn} = -16.6 \pm 0.9$ фм, независящее от $3N$ -сил. Причина расхождения не вполне ясна. В диссертации в Главах 1 и 6 дается объяснение этого расхождения на основе модели проф. Кукулина В.И. Однако, это объяснение не дает полного понимания этого расхождения.

Отмеченный недостаток не снижает ценности полученных автором результатов, и не может повлиять на общую положительную оценку работы.

Результаты диссертации докладывались на российских и международных конференциях и опубликованы в трудах конференций и ведущих научных журналах, включенных в перечень ВАК РФ.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Диссертация отвечает всем требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям «Положением о присуждении ученых степеней» утвержденным Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842, а ее автор Конобеевский Евгений Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.16.

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук,
начальник лаборатории, лаборатория ядерных структур
«Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»», Курчатовский ядерно-физический комплекс»

А.С. Демьянова

123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1
Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»», Курчатовский ядерно-физический комплекс, лаборатория ядерных структур,
тел.: 7(499)196-93-09, e-mail: Demyanova_AS@nrcki.ru

Подпись сотрудника ФГБУ НИЦ «Курчатовский институт»,
д.ф.-м.н. Демьяновой Аллы Сергеевны подтверждаю
Заместитель директора -
главный ученый секретарь Центра

А.В. Николаенко

24.01.2020

СВЕДЕНИЯ ОБ ОППОНЕНТЕ:

Демьянова Алла Сергеевна

Ученая степень: доктор физико-математических наук;

Отрасль науки: 01.04.00 – физика.

01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц.

Должность: Начальник лаборатории

Место работы: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»», Курчатовский ядерно-физический комплекс, лаборатория ядерных структур

Адрес: 123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1

тел.: 7(499)196-93-09

e-mail: Demyanova_AS@nrcki.ru

Список основных публикаций оппонента по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. Danilov A.N., **Demyanova A.S.**, Dmitriev S.V., Ogloblin A.A., Belyaeva T.L., Goncharov S.A., Gurov Yu B., Maslov V.A., Sobolev Yu G., Trzaska W., Khlebnikov S.V., Heikkinen P., Julin R., Tyurin G.P., Burtebaev N., Zholdybayev T. *“Study of Elastic and Inelastic $^{11}\text{B} + \alpha$ Scattering and Search for Cluster States of Enlarged Radius in ^{11}B ”*, Physics of Atomic Nuclei, **78**, p. 777 (2015)

2. A. A. Ogloblin, **A. S. Demyanova**, A. N. Danilov, S. A. Goncharov, T. L. Belyaeva, W. Trzaska, Yu. G. Sobolev, *“Possible observation of an excited state with an anomalously small radius in the ^{13}C nucleus”*, JETP Letters **102**, Issue 4, p. 199 (2015)

3. **A. S. Demyanova**, A. A. Ogloblin, A. N. Danilov, S. V. Dmitriev, V. I. Starastin, S. A. Goncharov, T. L. Belyaeva, W. Trzaska, V. A. Maslov, Yu. G. Sobolev, N. Burtebaev, E. Mukhamedzhanov, L. I. Slusarenko, Yu. N. Pavlenko, *“Neutron halo in the exotic first excited state of ^9Be ”* JETP Letters **102**, Issue 7, p. 413 (2015)

4. A.A. Ogloblin, **A.S. Demyanova**, A.N. Danilov, T.L. Belyaeva, S.A. Goncharov, W. Trzaska *“Nuclear states with anomalously large radius (size isomers)”*, Physics of Atomic Nuclei, **79**, p. 514 (2016)

5. **Demyanova A.S.**, Ogloblin A.A., Danilov A.N., Goncharov S.A., Belyaeva T.L., Sobolev Yu G., Khlebnikov S.V., Burtebaev N., Trzaska W., Heikkinen P., Tyurin G.P., Janseitov D., Gurov Yu B. *“States of ^{13}C with abnormal radii”*, EPJ Web of Conferences, **117**, p. 04012 (2016)

6. **A.S. Demyanova**, A.A. Ogloblin, A.N. Danilov, S.V. Dmitriev, V.I. Starastin, S.A. Goncharov, T.L. Belyaeva, W. Trzaska *“Inelastic $\text{Be-9} + \alpha$ Scattering at 90 MeV: Whether the Concept of the Be-9 Structure Should Be Changed?”*, JETP LETTERS **104**, p. 289 (2016)

7. **A.S. Demyanova**, A.A. Ogloblin, A.N. Danilov, T.L. Belyaeva, S.A. Goncharov, W. Trzaska *“Proton halo in the $N-13$ nucleus”*, JETP LETTERS **104**, p. 526 (2016)

8. A.A. Ogloblin, A.N. Danilov, **A.S. Demyanova**, S.A. Goncharov, T.L. Belyaeva, *“Search for dilute excited states in O-16 ”*, Physical Review C **94**, 051602® (2016)

9. A.A. Ogloblin, A.N. Danilov, **A.S. Demyanova**, S.A. Goncharov, T.L. Belyaeva, and W. Trzaska, “**NUCLEAR SIZE ISOMERS: THE EXCITED STATES OF LIGHT NUCLEI WITH CLUSTER STRUCTURE AND NONSTANDARD SIZES**”, “Nuclear Particle Correlations and Cluster Physics” book edited by Schröder Wolf-Udo (University of Rochester, USA), 311-338 (2017)
10. **A.S. Demyanova**, A.A. Ogloblin, S.A. Goncharov, A.N. Danilov, T.L. Belyaeva, W. Trzaska, “**Use of ($^3\text{He}, t$) Charge-Exchange Reactions in Determining Radii of Excited States of Nuclei**”, Physics of Atomic Nuclei, **80**, No.5, 831-837 (2017)
11. A.N. Danilov, **A.S. Demyanova**, A.A. Ogloblin, T.L. Belyaeva, S.A. Goncharov, “**Do Analogs of the Hoyle State Exist in ^{16}O ?**” Physics of Atomic Nuclei, **80**, No.5, 838-847 (2017)
12. N. Burtebayev, D.M. Janseitov, Zh. Kerimkulov, Y.S. Mukhamejanov, M. Nassurlla, **A.S. Demyanova**, A.N. Danilov, A.A. Ogloblin, A.S. Aimaganbetov “**Investigation of exotic states of ^{13}C at low energy**” International Journal of Modern Physics E **27**, 1850025 (2018)
13. T.L. Belyaeva, S.A. Goncharov, **A.S. Demyanova**, A.A. Ogloblin, A.N. Danilov, V.A. Maslov, Yu.G. Sobolev, W. Trzaska, S.V. Khlebnikov, G.P. Tyurin, N. Burtebaev, D. Janseitov, E. Mukhamejanov “**Neutron halos in the excited states of ^{12}B** ”, Physical Review C **98**, 034602 (2018)
14. W.H. Trzaska, P. Heikkinen, A.N. Danilov, **A.S. Demyanova**, S.V. Khlebnikov, T.Yu. Malamut, V.A. Maslov, A.A. Ogloblin, Yu.G. Sobolev, “**High-resolution scattering experiments at the K130 cyclotron in Jyvaskyla**”, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A **903** (2018) 241–245
15. B.A. Chernyshev, **A.S. Demyanova**, S.A. Goncharov, Yu.B. Gurov, S.V. Lapushkin, A.A. Ogloblin, V.G. Sandukovsky, W.H. Trzaska, “**The neutron structure of the ground state of ^7He** ” JETP Letters, Vol. **110**, No. 2, pp. 97–101 (2019)