

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук Пенионжкевича Юрия Эрастовича  
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

Одним из важнейших направлений ядерной физики является исследование нуклон-нуклонного взаимодействия. Данные, полученные на основе исследования нуклон- нуклонного взаимодействия (протон-протонного - ( $pp$ ) и нейтрон-протонного - ( $np$ )) позволяют построить различные реалистические модели ядерных сил, описывающие подавляющее большинство экспериментальных данных. Ситуация с описанием нейтронно-нейтронного ( $nn$ ) взаимодействия более неоднозначна. Данные об этом типе взаимодействия получаются в основном из реакций с участием двух нейтронов в конечном состоянии. Сравнение всех типов  $NN$  взаимодействия являются важным источником информации для проверки гипотезы о зарядовой симметрии ядерных сил. Одной из основных задач физики малонуклонных систем является задача описания разнообразных процессов в этих системах с использованием высокоточных расчетов  $2N$  и  $3N$  взаимодействий на основе уравнений Фаддеева. Однако во многих случаях наблюдались серьезные расхождения между имеющимися экспериментальными данными и результатами расчетов на основе уравнений Фаддеева.

Целью диссертационной работы Конобеевского Е.С. является исследование нейтрон-нейтронного взаимодействия в малонуклонных системах. С этой целью диссертантом были использованы реакции при низких энергиях ( $< 100$  МэВ), в которых в конечном состоянии образуется нейтрон-нейтронная пара (например, в реакциях  $n+{}^2\text{H}\rightarrow nn+p$  и  $d+{}^2\text{H}\rightarrow nn+pp$ ). Кроме этого автором был разработан и предложен метод использования т.н. динейтронного кластера в боромеановском ядре ( ${}^6\text{He}$ ) В этом случае на таком динейтронном кластере возможно квазисвободное рассеяние частиц. В ходе исследования показана роль  $3N$ -сил на параметры  $NN$ -взаимодействия, извлекаемые в реакциях с тремя частицами в конечном состоянии.

Диссертантом созданы вычислительные программы для кинематического моделирования различных реакций с тремя и более частицами в конечном состоянии. Им **впервые** было показано, что в реакции, проходящей через стадии образования и развала промежуточного  $nn$ -состояния, энергетический спектр нейтронов имеет специфический вид, зависящий от энергии виртуального  ${}^1S_0$  состояния  $nn$ -системы и, соответственно, от длины рассеяния  $a_{nn}$ .

Конобеевским была разработана методика определения параметров  $nn$ -взаимодействия (энергии виртуального синглетного состояния  $nn$ -системы и соответствующей длины  $nn$ -рассеяния) в реакции  $nd$ -развала. Созданная экспериментальная установка на пучке нейтронов канала РАДЭКС Института ядерных исследований РАН, позволила провести измерения характеристик (функции возбуждения) реакции  $nd$ -развала в диапазоне энергии первичных нейтронов 20–100 МэВ с высоким энергетическим разрешением. **Впервые** получены данные о параметрах  $nn$ -взаимодействия в реакции  $nd$ -развала при энергии нейтронов 40 МэВ – энергии виртуального синглетного состояния  $nn$ -системы  $E_{nn} = 0.129 \pm 0.013$  МэВ и длине  $nn$ -рассеяния  $a_{nn} = -16.6 \pm 0.9$  фм (ранее в литературе присутствовали только данные полученные при энергии 13–23 МэВ).

Особенно хотелось бы отметить, как наиболее близкие мне по тематике, эксперименты по исследованию реакции квазисвободного рассеяния (КСР) протонов на кластерах галообразных ядер. Здесь использовались в качестве мишени и детектора заряженных частиц

стопки бесподложечных ядерных фотоэмульсий (ФЭ). В этом случае использование фотоэмульсий было вполне оправдано из-за невысокой интенсивности пучка  ${}^6\text{He}$ . **Впервые** в этих экспериментах были получены данные, о квазисвободном рассеянии протонов на динейтронном кластере. Это подтвердило обнаруженную в ЛЯР ОИЯИ динейтронную структуру  ${}^6\text{He}$ , как систему кор ( ${}^4\text{He}$ ) + динейтрон.

Диссертантом была исследована также реакция  $d+{}^2\text{H}\rightarrow n+n+p+p$ . С этой целью им была создана экспериментальная установка на пучке дейтронов циклотрона У-120 НИИЯФ МГУ. С ее помощью было получено значение энергии виртуального синглетного состояния  $nn$ -системы в реакции  $dd$ -развала.

В работе убедительно показана возможность согласования существующих данных, полученных при различных энергиях с учетом влияния  $3N$ -сил, зависящих от скорости разлета вторичных фрагментов ( $nn$ -пары и заряженного фрагмента) и сделан вывод, что учет эффекта  $3N$ -сил при анализе данных при различных энергиях позволяет получить значение параметров  $nn$ -взаимодействия.

Актуальность, новизна и научная ценность поставленных в диссертации задач и проведенных в ней исследований не вызывают сомнений. 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.

**В Главе 1** рассмотрены некоторые нерешенные проблемы в физике малонуклонных систем. Отмечены возможные источники расхождения экспериментальных данных по нейтрон-нейтронному квазисвободному рассеянию (КСР) в реакциях  $nd$  и  $pd$ -развала с результатами современных теоретических расчетов. Рассмотрены извлеченные из экспериментов данные о синглетных длинах рассеяния. Отмечено значительные расхождения в величинах  $nn$ -длины рассеяния, полученных в различных экспериментах. Показана необходимость получения как новых дополнительных данных о параметрах  $nn$ -взаимодействия – длине рассеяния и энергии виртуального  ${}^1S_0$  синглетного состояния, так и разработки метода, который позволит объективно минимизировать (или определить) вклад  $3N$ -сил, независимо от конкретной структуры этих сил.

**В Главе 2** диссертации дается информация о разработанной диссертантом вычислительных программ кинетического моделирования экспериментов по изучению ядерных реакций с различным числом частиц в конечном состоянии (3, 4, 5...). На примере моделирования различных реакций продемонстрирована возможность определения оптимальных параметров эксперимента, позволяющих получить данные с необходимой точностью и возможностью отделения этих данных от фоновых процессов. **Впервые** сделан важный вывод, что при определенных условиях эксперимента (детектирование нейтронов под углом, соответствующим вылету  $nn$ -системы в двухчастичной реакции  $n + {}^3\text{H} \rightarrow d + nn$ ) энергетический спектр (или соответствующий ему временной спектр) нейтронов имеет специфический вид, зависящий от энергии виртуального  ${}^1S_0$  состояния  $nn$ -системы и, соответственно, от длины рассеяния  $a_{nn}$ .

**В Главе 3** описывается созданная с учетом результатов моделирования экспериментальная установка на пучке нейтронов канал РАДЭКС ИЯИ РАН. С целью экспериментального исследования реакции  $nd\rightarrow pnn$  при энергии нейтронов 40 МэВ. Рассмотрена постановка эксперимента по определению длины  $nn$ -рассеяния в этой реакции. Подробно рассмотрены параметры эксперимента и детектирующей установки – пучка нейтронов, дейтериевой мишени, протонного и нейтронных детекторов, система сбора информации, позволяющая определять энергии всех вторичных частиц и энергию налетающего нейтрона в реакции  $nd\rightarrow pnn$ . Получено хорошее согласие экспериментальных данных о выходе

реакции  $nd$ -развала от относительной энергии  $nn$ -системы с результатами моделирования, зависящими от значения энергии виртуального  $^1S_0$  состояния  $nn$ -системы. В результате проведенного  $\chi^2$ -анализа **впервые** получено новое значение длины рассеяния  $a_{nn} = -16.6 \pm 0.9$  Фм при энергии первичных нейтронов 40 МэВ (ранее данные о длине рассеяния в реакции  $nd$ -развала были получены при энергиях 13-23 МэВ). В конце 3 главы помещены приложения, в которых описаны методики, разработанные при проведении данного эксперимента.

**В Главе 4** рассматривается экспериментальный метод изучения структуры двухнейтронного гало в реакции квазисвободного рассеяния протона на кластерах гало-ядер в обратной кинематике. Описана методика, позволяющая выделять события рассеяния протонов (ядер водорода) на кластерах ядра  $^6\text{He}$  и эксперимент, проведенный в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ, в котором пучок радиоактивных гало-ядер  $^6\text{He}$  с энергией 60 МэВ облучал стопку ядерных фотоэмульсий. При сравнении экспериментальных данных с кинематическими расчетами **впервые** обнаружены события квазисвободного рассеяния протона на динейтронном кластере. Сделан вывод о существовании в гало-ядре  $^6\text{He}$  “подсвязанного” состояния  $nn$ -пары – динейтрона, на котором возможно рассеяние как на кластере. Рассмотрена возможность будущих исследований структуры галообразных ядер ( $^8\text{He}$ ,  $^{11}\text{Li}$  и др.) в реакции квазисвободного рассеяния протона, а также возможность исследования  $nn$ -корреляций в реакциях подхвата кора из ядра  $^6\text{He}$ :  $^6\text{He} + ^2\text{H} \rightarrow ^6\text{Li} + (nn)$ . Показано, что анализ формы энергетических спектров нейтронов, регистрируемых под углами близкими 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** описываются эксперименты по исследованию характеристик реакции  $dd \rightarrow pp + nn$  при энергии дейтронов 15 МэВ. Результаты моделирования этой реакции, показали, что при условии регистрация двух протонов и нейтрона (под определенными углами с определением их энергий), энергия синглетного состояния  $nn$ -системы может быть определена из формы энергетического спектра нейтрона при развале из этого состояния. Эксперименты на пучке дейтронов проводились на пучке дейтронов циклотрона У-120 НИИЯФ МГУ с помощью специально созданной для этих целей экспериментальной установки. Установка включает в себя дейтериевую мишень, протонный и нейтронный детекторы. Проведенное сравнение экспериментального времени пролетного спектра нейтронов с результатами моделирования показал хорошее согласие расчета и эксперимента. На основе проведенного  $\chi^2$ -анализа экспериментальных и моделированных данных **впервые** в реакции  $dd$ -развала при энергии 15 МэВ получено значение энергии синглетного  $nn$ -состояния  $E_{nn} = 76 \pm 6$  кэВ и, соотнесенное с величиной  $nn$ -длины рассеяния  $a_{nn} = -22.6 \pm 0.6$  фм.

**В Главе 6** диссертации приводится сравнительный анализ экспериментальных данных по нейтрон-нейтронной длине рассеяния, полученных в реакциях  $nd$  и  $dd$ -развала. Эти данные включают в себя и результаты настоящей работы, представленные в 3 и 5 главах диссертации. Отмечены значительные расхождения экспериментальных данных, полученных в различных геометриях и при различных энергиях налетающих частиц, которые объясняются влиянием  $3N$ -сил, зависящих от скорости разлета  $nn$ -пары и заряженного фрагмента (различной в рассматриваемых экспериментах). **Впервые** показано, что учет этого влияния позволяет согласовать данные о нейтрон-нейтронной длине рассеяния, полученной в различных экспериментах. Показано, что из данных, полученных при различных энергиях, можно выделить эффект действия  $3N$ -сил и получить значение параметров  $nn$ -взаимодействия.

**В Заключение** представлены основные результаты и выводы диссертации.

Таким образом, диссертация представляет собой законченное фундаментальное исследование нейтрон-нейтронного взаимодействия в малонуклонных системах, включающее

моделирование исследуемых реакций, создание экспериментальных методик, проведение экспериментальных исследований этих реакций и теоретический анализ полученных данных.

В диссертации настолько детально обсуждается решение проблемы нейтрон-нейтронного взаимодействия, что ее несущественные недостатки являются незаметными на фоне тщательно изложенной фундаментальной проблемы. К ним можно отнести следующее:

1. Говорится о роли  $nn$ -взаимодействия в реакциях  $nd$ -развала при энергии нейтронов 40 МэВ, однако не приводится анализ данных такого взаимодействия при более низкой энергии (13 –23 МэВ), полученных в других работах.
- 2 Недостаточно обосновано заключение о наличии динейтронных кластеров в галообразных ядрах ( например  ${}^6\text{He}$ ).
3. И конечно, ряд стилистических ошибок при описании проблемы малонуклонных систем. Например, выражение “Этой проблемой занималось огромное число физиков-ядерщиков на протяжении почти столетия”, “Некоторые расхождения эксперимента и теории удается ликвидировать”, “...определяет меру нарушения зарядовой симметрии (НЗС) ядерных сил.”, “..если из  ${}^6\text{He}$  или  ${}^{11}\text{Li}$  быстро удалить кор” и др.

Отмеченные недостатки не снижают ценности полученных автором результатов и не могут 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  
Начальник сектора Лаборатории  
ядерных реакций им Г.Н.Флерова  
Доктор физ.-мат- наук, профессор

Ю.Э.Пенионжкевич

Объединенный институт ядерных исследований, Лаборатория ядерных реакций им.  
Г.Н.Флерова;  
141980 г.Дубна, Московской обл., ул.Жолио Кюри 6;  
Телефон: +7(496) 216-59-32; e-mail: ryuer@lnr.jinr.ru

Подпись д.ф.-м.н. Пенионжкевича Ю.Э. подтверждаю

Ученый секретарь ЛЯР ОИЯИ

А.В.Карпов

15.01.2020

## СВЕДЕНИЯ ОБ ОППОНЕНТЕ:

Пенионжкевич Юрий Эрастович

Ученая степень: доктор физико-математических наук;

Ученое звание: профессор;

Специальность 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

Должность: начальник сектора;

Место работы: Объединенный институт ядерных исследований, Лаборатория ядерных реакций им. Г.Н.Флерова (ЛЯР ОИЯИ);

Адрес: 141980 г.Дубна, Московской обл., ул.Жолио Кюри 6;

Телефон: +7(496) 216-59-32;

Адрес электронной почты: ruueg@lnr.jinr.ru

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

1. S.Bagchi, J.Gibelin, M.N.Harakeh, . . . **Yu. Penionzhkevich et al** /Observation of isoscalar multipole strengths in exotic doubly-magic  $^{56}\text{Ni}$  in inelastic  $\alpha$  scattering in inverse kinematics // Phys.Lett. B 751 (2015) 371.
2. S.Calinescu, L. Cáceres, S. Grévy, . . . **Yu. Penionzhkevich et al** Coulomb excitation of  $^{44}\text{Ca}$  and  $^{46}\text{Ar}$  // Phys.Rev. C 93 (2016) 044333. 14 Всего 34 соавтора
3. **Ю.Э. Пенионжкевич** // Ядерный экзотизм // Ядерная физика, том 79 №4 (2016) 362.
4. Р.Г.Калпакчиева, **Ю.Э. Пенионжкевич**. Легкие ядра у границы нейтронной стабильности // Издательство ОИЯИ, Дубна 2016 410 стр.
5. **Yu. E. Penionzhkevich**. Nuclei in Astrophysics // J. Phys.: Conf. Ser.724 (2016) 012036.
6. D. Verney, D. Testov, F. Ibrahim, . . . **Yu. Penionzhkevich et al**. Pygmy Gamow-Teller resonance in the N=50 region: New evidence from staggering of  $\beta$ -delayed neutron-emission probabilities // Phys.Rev. C 95 (2017) 054320.
7. G. D. Kabdrakhimova, Yu. G. Sobolev, I. N. Kuhtina, K. A. Kuterbekov, K. O. Mendibaev, **Yu. E. Penionzhkevich**. Investigation of total cross sections for reactions induced by  $^6\text{He}$  interaction with silicon nuclei at energies between 5 and 50 MeV/A // Physics of Atomic Nuclei 80 (2017) 32

8. A M Kabyshev, K A Kuterbekov, Yu G Sobolev, **Yu E Penionzhkevich** *et al.*  
Some peculiarities of interactions of weakly bound lithium nuclei at near-barrier  
energies // Journal of Physics G45: Nuclear and Particle Physics N2 (2018) 025103.

9. **Yu.E. Penionzhkevich** , Yu. G. Sobolev, V.V. Samarin, *et al.*  
Energy dependence of the total cross section for the  $^{11}\text{Li} + ^{28}\text{Si}$  reaction // Phys. Rev.  
C99 (2019) 014609.