

## ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук, профессора Натальи Семеновны Зеленской о диссертации КОНОБЕЕВСКОГО ЕВГЕНИЯ СЕРГЕЕВИЧА «Исследование нейтрон-нейтронного взаимодействия в реакциях с двумя нейтронами в конечном состоянии», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

Диссертация Конобеевского Е.С. относится к немногим работам, в которых исследуется одно из основных фундаментальных представлений о нуклон-нуклонных взаимодействиях – проблема нарушения зарядовой симметрии (НЗС) ядерных сил посвящена экспериментальному определению длины  $nn$ -рассеяния. В рамках НЗС  $pp$ - и  $nn$ -взаимодействия в синглетном состоянии, также как и соответствующие им длины  $a_{pp}$  - и  $a_{nn}$  -рассеяния, не совпадают между собой. Проверкой этого утверждения занималось значительное количество как экспериментаторов, так и теоретиков на протяжении нескольких десятков лет.

Однако если чисто ядерная  $a_{pp}$  установлена достаточно точно и экспериментально, и теоретически (уравнения Фаддева с учетом  $3N$ -сил):  $a_{pp} = -17.3 \pm 0.4$  фм, то  $a_{nn}$ , которую как правило получают из реакций с двумя нейтронами в конечном состоянии, имеет существенный разброс: от  $-25$  фм до  $-14$  фм. В настоящее время общеприняты следующие значения  $a_{nn}$ :  $a_{nn}(1) = -16.4 \pm 0.5$  фм (усреднение значений, полученных из экспериментов по развалу дейтрона, до 1993 г.);  $a_{nn}(2) = -18.63 \pm 0.48$  фм (из экспериментов по поглощению остановившихся  $\pi^-$ -мезонов на дейтроне). Разницу между первым и вторым значением обычно приписывают влиянию  $3N$ -сил, поскольку во второй реакции они отсутствуют. Однако само значение  $a_{nn}(1)$  вызывает вопросы, поскольку при его получении усредняются экспериментальные  $a_{nn}$ , значительно различающиеся по величине. Для устранения неопределенности  $a_{nn}$  необходимы новые эксперименты на различных ядерных системах в широкой области энергий и принципиально новые подходы для извлечения из полученных экспериментальных сечений информации о параметрах  $nn$ -взаимодействия. В диссертации впервые решена задача кинематического моделирования ядерных реакций с тремя и более нуклонами в конечном состоянии с образованием нейтронной пары при различных энергиях, что позволило автору заранее предсказать те условия эксперимента, которые позволяют получить энергетический спектр двух нейтронов, наиболее чувствительный к синглетной  $a_{nn}$ . Поэтому новизна, актуальность и тем более высокая практическая ценность диссертации не вызывает сомнений.

Диссертация состоит из оглавления, введения, шести глав, заключения, четырех приложений, списка сокращений и условных обозначений. Работа изложена на 242 стр. текста,

имеет обширный иллюстративный материал – 120 рисунков и 6 таблиц. Библиография содержит 145 наименований, включая 47 работ, на основе которых написана диссертация.

ВО ВВЕДЕНИИ дается описание современного состояния исследования  $NN$ -взаимодействий и определения параметров высокоточных  $NN$ -потенциалов. Обсуждаются причины слабого нарушения НЗС ядерных сил и вызываемое этим нарушением различие  $a_{pp}$  и  $a_{nn}$ . Показано, что экспериментальные  $a_{nn}$ , полученные в различных ядерных центрах, также имеют значительный разброс по величине. Для более корректного определения  $a_{nn}$  рассматриваются новые эксперименты на ядерных системах, содержащих три и более нуклонов в конечном состоянии, и обосновывается необходимость кинематического моделирования эксперимента для таких ядерных реакций. Определяются цели и актуальность проведенных в диссертации исследований, и перечисляются основные задачи, составляющие предмет исследования. Сформулированы положения, выносимые на защиту. Показан личный вклад автора в полученные результаты и приведена их апробация.

ПЕРВАЯ глава диссертации посвящена обзору результатов экспериментов по исследованию  $nn$ -взаимодействия при низких (1–100 МэВ) в различных ядерных реакциях и полученных в них значения  $a_{nn}$  и энергий виртуальных состояний. Самой простой малонуклонной системой с двумя нуклонами является система трех нуклонов  $pnn$  ( $^3\text{H}$ ). Ее образование в реакции развала  $n + d$  позволяет проводить эксперименты в различных геометриях: взаимодействия в конечном состоянии (ВКС), квазисвободного рассеяния (КСР) и "звездной конфигурации". Экспериментальные сечения  $nn$ -КСР, также как и сечения развала в "звездной конфигурации" не согласуются с теоретическими расчетами, выполненными в рамках задачи трех тел (уравнения Фаддеева). Это несоответствие вновь вызывает значительные неопределенности в длине  $nn$ -рассеяния. В результате автор приходит к выводу, что довольно большая разница между  $a_{nn}$ , извлеченными из экспериментов одного и того же типа, но с разными начальными энергиями и кинематическими условиями, может быть обусловлена вкладом  $3N$ -сил. Для того чтобы определить (или минимизировать) вклад этих сил диссертант предложил принципиально новую методику моделирования эксперимента и обработки экспериментальных данных с созданием необходимых вычислительных программ.

ВТОРАЯ глава диссертации посвящена описанию разработанных автором программ кинематического моделирования малонуклонных реакций с произвольным количеством конечных частиц, поскольку существующие программы для расчета двухчастичной и трехчастичной кинематики реакций не дают возможности полностью решить поставленные задачи. Созданные автором программы с различным числом нуклонов (3, 4, 5...) в конечном состоянии позволяют проводить выбор геометрии эксперимента, в выбранной геометрии рассчиты-

вать времена пролета и энергии всех частиц, оптимизировать параметры установки (размеры детекторов, временное и энергетическое разрешение) для изучения промежуточной  $nn$ -системы в виртуальном состоянии. В результате автор получает двумерные диаграммы Далица для системы двух нейтронов, отделяя фоновые процессы и отбирая только те события, которые удовлетворяют законам сохранения кинематических переменных с заранее заданной точностью измерений. Такая диаграмма для реакции  $n + {}^3\text{H} \rightarrow d + n + n$  показывает, что энергетический или временной спектр нейтронов имеет специфический вид, зависящий от энергии  ${}^1S_0$  состояния  $nn$ -системы или  $a_{nn}$ .

Результаты кинематического моделирования различных реакций с произвольным числом частиц в конечном состоянии позволяют определить не только угловые и энергетические распределения вторичных частиц, но и углы регистрации и размеры детекторов этих частиц. Разработанные программы кинематического моделирования позволяют также устанавливать угловые, энергетические или временные характеристики детекторов, необходимые для достижения результатов, и возможностью отделения исследуемой реакции от фоновых процессов с требуемой точностью. В диссертации именно результаты кинематического моделирования определяют конкретную схему экспериментальной установки для исследования той или иной реакции.

ТРЕТЬЯ глава диссертации посвящена экспериментальному исследованию классической реакции  $n + d \rightarrow n + n + p$  на пучке нейтронов канала РАДЕКС ИЯИ РАН при энергии 40 МэВ. С этой целью впервые создана экспериментальная установка, позволяющая исследовать эту реакцию в широком диапазоне энергий. Для определения характеристик  $nn$ -взаимодействия необходимо регистрировать два нейтрона, вылетающих в узком конусе углов, измерять энергию каждого нейтрона и угол между ними. Результаты моделирования реакции позволяют определить геометрию эксперимента, энергии всех вторичных частиц и налетающего нейтрона, параметры детектирующей аппаратуры, например, характеристики галодоскопа нейтронных детекторов (в частности, угол разлета нейтронов не должен превышать  $10^\circ$ ). Результирующий экспериментальный выход реакции в ВКС-геометрии имеет вид максимума, форма которого зависит от значения энергии  $\varepsilon_{nn} = E_{nn} + \Gamma_{nn}$  виртуального  $nn$ -состояния, что позволяет путем моделирования определить  $\varepsilon_{nn}$ , а вместе с ней и  $a_{nn}$ . Для исследуемой реакции они равны:  $E_{nn} = 0.129 \pm 0.013$  МэВ,  $a_{nn} = -16 \pm 1.0$  фм.

В ЧЕТВЕРТОЙ главе диссертации предложен экспериментальный метод изучения структуры нейтронного гало в реакциях на кластерах в гало-ядрах. В Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ проведен эксперимент с обратной кинематикой, когда пучок  ${}^6\text{He}$  с энергией 60 МэВ облучает стопку ядерных фотоэмульсий. Ядра водорода, входящие в состав фото-

эмульсии, являлись мишенями. Создана методика, позволяющая выделить путем моделирования рассеяние протонов на кластерах, входящих в ядро-мишень  ${}^6\text{He}$ . Это рассеяние рассматривается в "звездной" ( $\alpha + n + n + p$ ) геометрии. Для каждой "звезды" определяются пробеги всех частиц, включая  ${}^6\text{He}$ , и углы разлета. При сравнении экспериментальных данных с моделированными на диаграмме Далица видна область экспериментальных точек, соответствующая  $nn$ -КСР на протоне. В результате в ядре  ${}^6\text{He}$  найдено слабосвязанное состояние  $nn$ -пары, на которой возможно рассеяние протона. Аналогичное моделирование проведено для реакций  ${}^6\text{He} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^6\text{Li} + nn$  и  ${}^{11}\text{Li} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^{11}\text{Be} + nn$ . Показано, что исследование спектра нейтронов в области энергий динейтронного кластера в совпадении с заряженной частицей позволит получить  $\varepsilon_{nn}$  в гало-ядре.

ПЯТАЯ глава диссертации посвящена исследованию изучения реакции  $d + {}^2\text{H} \rightarrow n + n + p + p$  на циклотроне У-120 НИИЯФ МГУ с  $E_d = 15.4$  МэВ. Проведено моделирование этой реакции с четырьмя нуклонами в конечном состоянии, на первом этапе проходящей через промежуточную стадию с образованием синглетных дипротона и динейтрона:  $d + {}^2\text{H} \rightarrow (nn)_s + (pp)_s$ . На основе этих расчетов автором определены затравочные значения углов вылета  $nn$ - и  $pp$ -систем, на которых предполагалось установить детекторы нейтронов и протонов. На втором этапе моделировалась реакция  $d + {}^2\text{H} \rightarrow n + n + p + p$  с четырьмя частицами в конечном состоянии при условии расположения детекторов протонов и нейтронов под углами равными или близкими к углам вылета двухнуклонных систем. Проведенное моделирование позволило определить геометрию эксперимента и условия, требуемые от детектирующей аппаратуры. Важным условием является детектирование двух протонов в совпадении, одним телескопом детекторов. Отбор событий с определенной относительной энергией двух нейтронов в интервале  $\varepsilon_{nn} = E_{nn} \pm \Gamma_{nn}$ , выполненный в диссертации, показал, что различным энергиям и ширинам соответствуют различные временные интервалы между пиками во времяпролетных спектрах нейтронов. Экспериментальные времяпролетные спектры нейтронов автор сопоставлял с полученными в результатах моделирования для различных значений энергий и ширин виртуального состояния  $nn$ -системы. Для каждого значения  $\varepsilon_{nn}$  проводилась процедура фитирования, в процессе которой определялось наилучшее значение ширины уровня  $\Gamma_{nn}$ . Сравнение экспериментального времяпролетного спектра нейтронов с результатами моделирования показало, что минимальное значение  $\chi^2$  (близкое к единице) достигается при  $E_{nn}$  промежуточного  $(nn)_s + (pp)_s$  состояния исследуемой реакции, равной  $76 \pm 6$  кэВ. Этому значению энергии  $E_{nn}$  соответствует  $a_{nn} = -22.2 \pm 0.6$  фм. Найденное  $a_{nn}$  значительно превышает (по абсолютной величине) значения  $a_{nn}$  в экспериментах по  $nd$ -развалу, что, по-

видимому, указывает на эффективное усиление  $nn$ -взаимодействия в промежуточном состоянии исследуемой реакции за счет  $3N$ -сил.

В ШЕСТОЙ главе диссертации автор проводит анализ экспериментальных  $a_{nn}$ , полученных в различных лабораториях с 1999 г. в реакциях развала, в том числе данных, приведенных в главах 3 и 5 диссертации. Им отмечены значительные расхождения в величинах  $a_{nn}$ , полученных в разных геометриях и при различных энергиях налетающих частиц. Это расхождение автор объясняет с помощью феноменологической модели учета  $3N$ -сил, зависящих от скорости разлета  $nn$ -системы и заряженного фрагмента, т. е. от энергии налетающих частиц. Несмотря на сугубо качественный характер модели, автору удалось оценить в ней степень влияния  $3N$ -сил, впервые получить значения  $a_{nn}$  в их отсутствии и показать, что все откорректированные  $a_{nn}$  стремятся к нижнему пределу  $\sim -16$  фм.

В ЗАКЛЮЧЕНИИ приведены основные результаты работы.

Оценивая диссертацию в целом, можно сказать, что ее научная ценность чрезвычайно высока. Автор впервые разработал комплекс программ для кинематического моделирования реакций с несколькими (3, 4, 5,...) нейтронами в конечном состоянии. При кинематическом моделировании различных реакции с образованием и развалом виртуального  $^1S_0$   $nn$ -состояния впервые показано, что при определенных кинематических условиях форма временного спектра двух нейтронов чувствительна как к величине энергии этого состояния, так и к его ширине. Впервые сравнение экспериментального времяпролетного спектра нейтронов с результатами моделирования позволило достаточно надежно определить фундаментальные параметры  $NN$ -взаимодействия: энергию  $^1S_0$   $nn$ -состояния и соответствующую ей  $nn$ -длину рассеяния в реакции развала дейтрона пучком нейтроном с энергией 40 МэВ и в реакции  $d + ^2\text{H} \rightarrow n + n + p + p$  с  $E_d = 15.4$  МэВ. В диссертации впервые показана возможность согласования данных по  $a_{nn}$ , полученных при разных энергиях, введением  $3N$  сил, зависящих от скорости разлета  $nn$ -системы и заряженного фрагмента. Надежность и достоверность полученных экспериментальных данных подкреплена стартовым использованием апробированных методов обработки экспериментов в малонуклонных реакциях и не вызывает сомнений. Автор продемонстрировал блестящее владение современными экспериментальными методиками и техникой программирования, умение формулировать и трактовать полученные результаты вплоть до проведения необходимых модельных расчетов.

Диссертация написана четким и ясным языком, хорошо оформлена, расположение материала достаточно продумано, так что диссертация легко читается, несмотря на сложность и обширность материала.

В диссертациях такого уровня сложно находить недостатки. Стоит лишь только отметить, что в тексте диссертации имеется ряд повторов и стилистических погрешностей, которые несколько не снижают ее качества и ценности полученных автором результатов.

Все основные материалы диссертации опубликованы в ведущих журналах (в том числе и в журналах из списка ВАК) и неоднократно представлялись на различных Международных конференциях. Автореферат и опубликованные работы достаточно полно и правильно отражают 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 безусловно заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.16.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, профессор,  
главный научный сотрудник  
отдела ядерных реакций НИИЯФ МГУ  
14 января 2020 г.

Н.С.ЗЕЛЕНСКАЯ

119992 г. Москва, Ленинские Горы, с. 51. НИИЯФ МГУ  
E-mail: ns-zelenskaya@yandex.ru  
тел.: 8-495-939-24-10

Подпись руки Зеленской Н. С. утверждаю:

Директор НИИЯФ МГУ,  
профессор

М. И. ПАНАСЮК

## СВЕДЕНИЯ ОБ ОППОНЕНТЕ:

Зеленская Наталья Семеновна

Ученая степень: доктор физико-математических наук;

Ученое звание: профессор;

01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц.

Должность: Главный научный сотрудник;

Место работы: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова”, Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В.Скобельцына (НИИЯФ МГУ), отдел ядерных реакций.

Адрес: 119992 г. Москва, Ленинские Горы, с. 51. НИИЯФ МГУ

Адрес электронной почты: ns-zelenskaya@yandex.ru

тел.: 8-495-939-24-10

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

1. Polarization Features of the  $^{24}\text{Mg}(2+)$  Nucleus Produced in the Reaction  $^{27}\text{Al}(p, \alpha)^{24}\text{Mg}(+)$ . Galanina L.I., **Zelenskaya N.S.**, Lebedev V.M., Orlova N.V., Spassky A.V., Tiurin I.S. // *Physics of Atomic Nuclei*, издательство *Pleiades Publishing, Ltd (Road Town, United Kingdom)*, том 82, с. 233–242.

2. Поляризационные характеристики ядра  $^{24}\text{Mg}(2+)$ , образованного в реакции  $^{27}\text{Al}(p, \alpha)^{24}\text{Mg}(2+)$ . Галанина Л.И., **Зеленская Н.С.**, Лебедев В.М., Орлова Н.В., Спасский А.В., Тюрин И.С. // *Ядерная физика*, издательство *Наука (М.)*, том 82, № 3, с. 218–227.

3. Study of the Mechanism of the  $^{13}\text{C}(d, p)^{14}\text{C}$  Reaction at  $E_d = 15.3$  MeV // Galanina L.I., **Zelenskaya N.S.**, Lebedev V.M., Orlova N.V., Spassky A.V. // *Physics of Atomic Nuclei*, издательство *Pleiades Publishing, Ltd (Road Town, United Kingdom)*, том 81, с. 176–182.

4. Исследование механизма реакции  $^{13}\text{C}(d, p)^{14}\text{C}$  при  $E_d = 15.3$  МэВ // Галанина Л.И., **Зеленская Н.С.**, Лебедев В.М., Орлова Н.В., Спасский А.В. // *Ядерная физика*, издательство *Наука (М.)*, том 81, с. 174–180

5. Differential Cross Section of  $^{16}\text{O}(t, p)^{18}\text{O}$  Reaction and Definition of  $^{18}\text{O}$  Nucleus Dineutron Periphery. Galanina L.I., **Zelenskaya N.S.** // *Physics of Atomic Nuclei*, издательство *Maik Nauka/Interperiodica Publishing (Russian Federation)*, том 80, № 4, с. 193–202.

6. Spatial Periphery Structure of  $^{11}\text{Li}$ ,  $^{11}\text{Be}$  Isobars. Galanina L.I., **Zelenskaya N.S.** // *Physics of Atomic Nuclei*, издательство *Maik Nauka/Interperiodica Publishing (Russian Federation)*, том 79, № 4, с. 382–392.

7. Структура пространственной периферии изобар  $^{11}\text{Li}$ ,  $^{11}\text{Be}$ . Галанина Л.И., **Зеленская Н.С.** // *Ядерная физика* Издательство “Наука” (М.), том 79, № №4, с. 401–410.

**8.** Orientation Features of  $^{24}\text{Mg}(2+)$  Aligned Nuclei in  $(p, p)$  and  $(d, d)$  Reactions at  $E_x \approx 7.5$  MeV per Nucleon. Galanina L.I., **Zelenskaya N.S.**, Lebedev V.M., Orlova N.V., Spassky A.V. // *Physics of Atomic Nuclei*, издательство *Maik Nauka/Interperiodica Publishing (Russian Federation)*, том 78, № 6, с. 767–776.

**9.** Structure of Spatial Periphery of the Isotopes  $^{9,11}\text{Li}$ . Galanina L.I., **Zelenskaya N.S.** // *Physics of Atomic Nuclei*, издательство *Maik Nauka/Interperiodica Publishing (Russian Federation)*, том 78, № 5, с. 685-693.

**10.** Ориентационные характеристики выстроенного ядра  $^{24}\text{Mg}(2+)$  в реакциях  $(p, p)$  и  $(d, d)$  при  $E_x = 7.5$  МэВ/нуклон. Галанина Л.И., **Зеленская Н.С.**, Лебедев В.М., Орлова Н.В., Спасский А.В. // *Ядерная физика*, издательство "Наука" (М.), том 78, № 9, с. 818–827.

**11.** Структура пространственной периферии изотопов  $^{9,11}\text{Li}$ . Галанина Л.И., **Зеленская Н.С.** // *Ядерная физика* Издательство "Наука" (М.), том 78, № 7-8, с. 730–739.