

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук, профессора Натальи Семеновны Зеленской о диссертации Каспарова Александра Александровича «Моделирование и анализ малонуклонных реакций для получения данных о низкоэнергетических параметрах NN -взаимодействия», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

Диссертация Каспарова А. А. принадлежит к числу работ, которые появляются в ответ на прямые запросы, связанные с фундаментальными основами нуклон-нуклонных взаимодействий, и посвящена экспериментальному определению низкоэнергетических параметров NN -взаимодействий в малонуклонных реакциях на экспериментальных установках со специфическими свойствами, определенными путем кинематического моделирования.

Низкоэнергетические параметры NN -взаимодействия в синглетном спиновом состоянии, особенно длина NN -рассеяния, играют важную роль в решении проблемы нарушения зарядовой симметрии (НЗС) ядерных сил, которая по современным представлениям связана с кварковой структурой нуклонов. Однако, если в настоящее время величина чисто ядерной pp -длины рассеяния установлена достаточно точно: $a_{pp} = -17.3 \pm 0.4$ фм, то величина nn -длины рассеяния, которую как правило получают из реакций с двумя нейтронами в конечном состоянии, имеет существенный разброс: $-25 \text{ фм} \leq a_{nn} \leq -14 \text{ фм}$. Для устранения столь значительной неопределенности nn -длины рассеяния необходимы новые эксперименты на легчайших малонуклонных системах и новые подходы для извлечения из полученных экспериментальных сечений информации о параметрах NN -взаимодействия. В результате на первый план выдвигается задача кинематического моделирования ядерных реакций с тремя и более нуклонами в конечном состоянии. Именно этот комплекс проблем решается в представленной диссертации. Поэтому новизна, актуальность и практическая ценность диссертации не вызывает сомнений.

Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения. Работа изложена на 105 стр. текста, имеет обширный иллюстративный материал – 49 рисунков и 6 таблиц. Библиография включает в себя 62 наименования.

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 длин pp - и nn -рассеяния. Для определения длины nn -рассеяния рассматриваются новые эксперименты на легчайших малонуклонных системах и обосновывается необходимость кинематического моделирования ядерных реакций с четырьмя нуклонами в конечном состоянии. Определяются цели и актуальность проведенных в диссертации исследований, и перечисляются основные задачи, составляющие предмет диссертации.

ПЕРВАЯ глава диссертации посвящена краткому обзору результатов экспериментов по исследованию NN -взаимодействия в различных ядерных реакциях и полученных в них значения NN -длин рассеяния и энергий двухнуклонных виртуальных состояний. Полученные в этих работах данные о длинах nn -рассеяния и энергиях виртуальных синглетных NN -состояний являются довольно противоречивыми. Автор убедительно показал, что для устра-

нения существующей неопределенности необходимы новые экспериментальные данные о характеристиках малонуклонных реакций и новые методы извлечения из них точной информации о параметрах NN -систем при различных энергиях.

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 позволяют полностью решить поставленные задачи. С помощью этих программ автор, задавая углы разлета и энергии вторичных частиц, получает возможность получить двумерные диаграммы Далица, отделяя фоновые процессы и отбирая только те события, которые удовлетворяют законам сохранения кинематических переменных с заранее заданной точностью. Такая диаграмма, построенная для классической реакции квазисвободного рассеяния ${}^6\text{He} + p$ показывает, что в ней существуют достаточно четко выделенные области в угловых и энергетических распределениях вторичных протонов, связанных с его рассеянием на различных кластерах (${}^4\text{He}$, нейтроне, динейтроне), которое может быть исследовано в дальнейших экспериментах.

В ТРЕТЬЕЙ главе приведены результаты кинематического моделирования некоторых малонуклонных реакций. Моделирование проводилось с помощью разработанных автором программ, описанных во второй главе. Результаты кинематического моделирования различных реакций 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 установить угловые, энергетические или временные характеристики детекторов необходимые для достижения результатов и возможностью отделения исследуемой реакции от фоновых процессов с требуемой точностью. Именно результаты кинематического моделирования определяют конкретную схему экспериментальной установки для исследования той или иной реакции.

В ЧЕТВЕРТОЙ главе диссертации описан ряд созданных вспомогательных программ, позволяющих проводить дополнительное моделирование экспериментов, на основе проведенного кинематического моделирования. В малонуклонных экспериментах, в конечных каналах которых могут быть как заряженные частицы, так и нейтроны, необходимо идентифицировать зарегистрированные частицы, определяя их энергии и времена пролета, учитывая их сильную зависимость от точного расчета ионизационных потерь заряженных частиц и точных энергетических калибровок. Автором описан принцип работы вычислительной программы для расчета ионизационных потерь заряженных частиц в различных поглощающих слоях веществ с возможностью введения толщин слоев и энергетического разрешения детекторов. Описаны принципы работы и других вспомогательных программ.

ПЯТАЯ глава диссертации посвящена описанию конкретного моделирования реакции с четырьмя нуклонами в конечном состоянии, на первом этапе проходящей через промежуточную стадию с образованием синглетных дипротона и динейтрона: $d + 2\text{H} \rightarrow (nn)_s + (pp)_s \rightarrow p + p + n + n$. На основе этих расчетов автором определены параметры экспериментальной установки для исследования данной реакции. 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. Отбор событий с определенной относительной энергией двух нейтронов в интервале $E_{nn} \pm \Gamma_{nn}$ (развал виртуального синглетного nn -состояния с определенной энергией E_{nn} и шириной Γ_{nn}), выполненный в диссертации, показал, что различным энергиям и ширинам соответствуют различные временные интервалы между пиками во времяпролетном

спектре нейтронов. Другими словами, при кинематическом моделировании реакции $d + 2\text{H} \rightarrow n + n + p + p$ с образованием и развалом виртуального nn -состояния впервые показано, что при определенных кинематических условиях форма временного спектра двух нейтронов чувствительна как к величине энергии виртуального синглетного nn -состояния, так и к его ширине.

В ШЕСТОЙ главе описана схема экспериментальной установки, созданной на основе моделирования реакции $d + 2\text{H} \rightarrow n + n + p + p$, приведены результаты эксперимента и их анализа. Протоны регистрировались ΔE - E телескопом, установленным под определенным в предыдущей главе углом $\Theta_p = 27^\circ$ слева от направления первичного пучка (ΔE -детектор – кремниевый детектор толщиной 24 мкм, E -детектор – кремниевый детектор толщиной 316 мкм). Нейтроны детектировались жидким водородсодержащим сцинтиллятором под углом $\Theta_n = 36^\circ$ справа от оси пучка, установленном на расстоянии 0.79 м от мишени. Их энергия определялась по времени пролета нейтронов до детектора, при этом в качестве стартового сигнала времяпролетной системы использовался временной сигнал от ΔE -детектора. В эксперименте проводился отбор событий с регистрацией нейтрона и определением его времени пролета, при условии попадания этого события на диаграмме ΔE - E в область двухпротонного события. Полученный в эксперименте времяпролетный спектр нейтронов автор сопоставлял с полученным в результатах моделирования для различных значений энергий и ширин виртуального состояния nn -системы. Для каждого значения E_{nn} проводилась процедура фитирования, в процессе которой определялось наилучшее значение Γ_{nn} . Сравнение экспериментального времяпролетного спектра нейтронов с результатами моделирования показало, что минимальное значение χ^2 (близкое к единице) достигается при энергии виртуального 1S_0 синглетного nn -состояния (промежуточного состояния реакции $d + 2\text{H} \rightarrow 2n_s + 2p_s \rightarrow n + n + p + p$) $E_{nn} = 76 \pm 6$ кэВ. Полученное значение энергии E_{nn} соответствует значению синглетной nn -длины рассеяния $a_{nn} = -22.2 \pm 0.6$ фм. Это значение a_{nn} значительно превышает (по абсолютной величине) значения a_{nn} в экспериментах по nd -развалу (-19 фм $\leq a_{nn}$ -16 фм), что, по видимому, указывает на эффективное усиление nn -взаимодействия за счет образования 1S_0 синглетного промежуточного nn -состояния в исследуемой реакции.

В ЗАКЛЮЧЕНИИ приведены основные результаты работы.

Оценивая диссертацию в целом, можно сказать, что ее научная ценность чрезвычайно высока. Автором проведено экспериментальное исследование и кинематическое моделирование (для которого в диссертации созданы соответствующие программы) малонуклоновых реакций с нуклонами в конечном состоянии. При кинематическом моделировании реакции $d + 2\text{H} \rightarrow n + n + p + p$ 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 $E_{nn} = 76 \pm 6$ кэВ и соответствующую ей nn -длину рассеяния $a_{nn} = -22.2 \pm 0.6$ фм. 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 четко формулировать и трактовать полученные результаты вплоть до проведения необходимых численных расчетов.

Диссертация написана четким и ясным языком, хорошо оформлена, расположение материала компактно и продумано, так что диссертация легко читается, несмотря на сложность и обширность материала. Автор подробно проанализировал полученные результаты и на их основе сделал ценные выводы о влиянии nn -взаимодействия за счет образования 1S_0 синглетного промежуточного nn -состояния в системе четырех конечных частиц, что существенно увеличивает (по абсолютной величине) значения a_{nn} в экспериментах по nd -развалу.

В диссертациях такого уровня сложно находить недостатки. Тем не менее, стоит отметить ряд замечаний:

- 1). Одно из замечаний касается структурирования диссертации: возможно следовало бы объединить материал, изложенный в главах 3 и 4.
- 2). Текст диссертации не свободен от опечаток. Например, на стр. 59 автор пишет: «...при такой толщине на протонном локусе видна «прострельная» область», хотя на рис.4.3 «прострельная» область видна также для дейтронов. На стр. 78 в подписи к рис.5.6а фигурирует черный цвет, в то время как на рисунке нет событий, выделенных этим цветом.

Высказанные замечания не влияют на общую положительную оценку выполненной работы. Все основные материалы диссертации опубликованы в ведущих журналах (в том числе и в журналах из списка ВАК) и неоднократно представлялись на различных конференциях. Автореферат и опубликованные работы достаточно полно и правильно отражают содержание диссертации.

Диссертация удовлетворяет требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением №74 Правительства Российской Федерации от 30 января 2002 г. в редакции Постановления №227 Правительства РФ от 20.04.2006 г., предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор, Каспаров Александр Александрович, безусловно заслуживает присуждения искомой степени.

Официальный оппонент:
доктор физико-математических наук, профессор,
главный научный сотрудник
отдела ядерных реакций НИИЯФ МГУ

Н.С.ЗЕЛЕНСКАЯ

3 октября 2017 г.

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

Зеленская Наталья Семеновна, доктор физ.-мат. наук, профессор

01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

Список основных публикаций по теме диссертации:

- 1). **2017.** Differential Cross Section of $^{16}\text{O}(t, p)^{18}\text{O}$ Reaction and Definition of ^{18}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
- 2). **2016.** Spatial Periphery Structure of ^{11}Li , ^{11}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
- 3). **2016.** Структура пространственной периферии изобар ^{11}Li , ^{11}Be . Галанина Л.И., Зеленская Н.С. // *Ядерная физика* Издательство "Наука" (М.), том 79, № №4, с. 401-410
- 4). **2015.** 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
- 5). **2015.** Structure of Spatial Periphery of the Isotopes $^{9,11}\text{Li}$. Galani-na L.I., Zelenskaya N.S. // *Physics of Atomic Nuclei*, издательство *Maik Nauka/Interperiodica Publishing (Russian Federation)*, том 78, № 5, с. 685-693
- 6). **2015.** 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
- 7). **2015.** 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
- 8). **2014.** Spatial periphery of lithium and beryllium isotopes. Galanina L.I., Zelenskaya N.S. // *Physics of Atomic Nuclei*, издательство *Maik Nauka/Interperiodica Publishing (Russian Federation)*, том 77, № 6, с. 704-715
- 9). **2014.** Tensor Features and Dynamical Deformation of the $^{24}\text{Mg}(2+)$ Nucleus in the Reaction $^{24}\text{Mg}(d, d\gamma)^{24}\text{Mg}$ at $E_d = 15.3$ MeV. Galanina L.I., Zelenskaya N.S., Konyukhova I.A., Lebedev V.M., Orlova N.V., Spassky A.V., Artemov S.V. // *Physics of Atomic Nuclei*, издательство *Maik Nauka/Interperiodica Publishing (Russian Federation)*, том 77, № 11, с. 1421-1428
- 10). **2014.** Пространственная периферия изотопов лития и бериллия. Галанина Л.И., Зеленская Н.С. // *Ядерная физика* Издательство "Наука" (М.), том 77, с. 744-755
- 11). **2014.** Тензорные характеристики и динамическая деформация ядра $^{24}\text{Mg}(2+)$ в реакции $^{24}\text{Mg}(d, d\gamma)^{24}\text{Mg}$ при $E_d = 15.3$ МэВ. Галанина Л.И., Зеленская Н.С., Конюхова И.А., Лебедев В.М., Орлова Н.В., Спасский А.В., Артемов С.В. // *Ядерная физика* Издательство "Наука" (М.), том 77, № 11, с. 1487-1495
- 12). **2013.** Angular Correlations in the Inelastic-Scattering Process $^{24}\text{Mg}(d, d\gamma)^{24}\text{Mg}$ at $E_d = 15.3$ MeV. Galanina L.I., Zelenskaya N.S., Konyukhova I.A., Lebedev V.M., Orlova N.V., Spassky A.V. // *Physics of Atomic Nuclei*, издательство *Maik Nauka/Interperiodica Publishing (Russian Federation)*, том 76, № 11, с. 1415-1422
- 13). **2013.** Пространственная периферия изотопов лития. Галани-на Л.И., Зеленская Н.С. // *Ядерная физика* Издательство "Наука" (М.), том 76, №12. с. 1542–1548
- 14). **2012.** Mechanisms of sequential particles transfer and characteristics of light neutron-excess and oriented nuclei. Galanina L.I., Zelenskaya N.S. // *Physics of Particles and Nuclei*, издательство *Maik Nauka/Interperiodica Publishing (Russian Federation)*, том 43, № 2, с. 147-186