

Физический ИНСТИТУТ



имени
П.Н. Лебедева

Российской академии наук

Ф И А Н

119991, ГСП-1, Москва,
Ленинский проспект, 53, ФИАН
Телефоны: (499) 135 1429
(499) 135 4264
Телефакс: (499) 135 7880
<http://www.lebedev.ru>
postmaster@lebedev.ru

"УТВЕРЖДАЮ"

Заместитель директора
по научной работе

Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Физического института имени
П.Н. Лебедева РАН

доктор физ.-мат. наук, профессор
В.А. Рябов

Дата 03 . 12 . 2019

ОТЗЫВ

Ведущей организации-

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Физического института имени П.Н. Лебедева РАН

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.

Исследование низкоэнергетического взаимодействия двух нуклонов очень важно для более глубокого понимания физики адронов. Нуклон-нуклонные длины синглетного рассеяния являются основными характеристиками NN -рассеяния. Особый интерес представляет исследование параметров нейтрон-нейтронного взаимодействия. В ядерных реакциях может быть получена информация о длине p -рассеяния a_{nn} в синглетном спиновом состоянии 1S_0 . Разница нейтрон-нейтронной и протон-протонной длин рассеяния определяет меру нарушения зарядовой симметрии ядерных сил. Однако, если длина протон-протонного рассеяния определена в настоящее время достаточно надежно, то извлеченные из экспериментов последних лет данные о величине 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 нарушения зарядовой симметрии ядерных сил и даже о ее знаке. Таким образом, имеется необходимость получения новых экспериментальных данных в различных экспериментах в достаточно широкой области энергий.

Помимо исследования параметров nn -взаимодействия в конечном состоянии большое значение представляет анализ реакций на ядрах, содержащих динейтронные виртуальные кластеры. В таком ядре динейтрон можно рассматривать как кластер, на котором, в частности, может происходить квазисвободное рассеяние частиц.

Целью диссертации является исследования нейтрон-нейтронного взаимодействия в малонуклонных реакциях при низких энергиях (<100 МэВ) как при рассмотрении реакций с образованием nn -пары в конечном состоянии, так и при анализе нейтронно-избыточных ядер, и изучение влияния $3N$ -взаимодействия на конечный результат.

Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения.

Во введении обоснованы цель и актуальность диссертационной работы. Указаны цель, научная новизна и практическая значимость диссертации. Показан личный вклад автора в полученные результаты и описана их апробация.

Первая глава диссертации посвящена анализу нерешенных проблем в системе трех нуклонов при энергии 10-100 МэВ. Указано на сильные расхождения, обнаруженные в нейтрон-нейтронном квазисвободном рассеянии при исследовании реакции nd -развала при $E_n = 26$ и 25 МэВ. Эти данные превышают теоретические оценки на 18%, при этом теория хорошо описывает сечение np -рассеяния. Показано, что

экспериментальные данные для pd и nd развала сильно отличаются друг от друга, тогда как теоретические оценки развала оказываются почти одинаковыми. Таким образом, отмечается невозможность на данный момент одновременно описать существующие данные по nd развалу даже с модификацией 1S_0 в nn -состоянии и введением существующих трехчастичных сил ($3N$). Поэтому необходимо получение дополнительных экспериментальных данных. Показано, что имеющиеся экспериментальные данные по nd -развалу приводят к значениям a_{nn} , которые варьируются от $a_{nn} = -16.2 \pm 0.3$ фм до $a_{nn} = -18.8 \pm 0.5$ фм.

Сделан вывод, что большая разница между указанными значениями a_{nn} , извлеченными из экспериментов одного и того же типа, но с использованием разных начальных энергий и разных кинематических условий, может быть обусловлена разным вкладом $3N$ сил. Таким образом, чтобы получить правильные значения a_{nn} из экспериментов по развалу, необходимо разработать метод, который позволит минимизировать вклад $3N$ -сил.

В главе 2 приведены разработка и создание ряда вычислительных программ, позволяющих проводить кинематическое моделирование экспериментов по изучению ядерных реакций с различным числом частиц в конечном состоянии. Показано, что результаты моделирования позволяют определить оптимальную геометрию и параметры эксперимента, необходимые для извлечения параметров nn -взаимодействия. Показано, что при определенных условиях эксперимента 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 и рассмотрена постановка эксперимента по определению длины nn -рассеяния. Представлены результаты моделирования, позволяющую определить геометрию эксперимента и параметры детектирующей аппаратуры. Показано, что в этом эксперименте необходимо детектировать в совпадении протон и два нейтрона при углах разлета нейтронов $2 - 10^\circ$. Описана экспериментальная установка для исследования реакции с двумя нейтронами в конечном состоянии. Большое внимание уделено характеристикам нейтронных детекторов. Рассмотрена система сбора данных установки, позволяющая определять энергии всех вторичных частиц и энергию налетающего нейтрона.

В разделе 3.4 проводится анализ экспериментальных данных о выходе реакции nd -развала и сравнение полученных данных с результатами моделирования, зависящими от значения энергии 1S_0 состояния nn -системы. Моделирование проводилось в области энергий E_{nn} от 0.075 до 0.245 МэВ. Для нахождения энергии виртуального уровня E_{nn} и статистической неопределенности ее значения, $\chi^2(E_{nn})$ аппроксимировалось квадратичным полиномом. Для представленных данных ($\Delta\Theta = 6^\circ$, $E_n = 40 \pm 5$ МэВ) получено $E_{nn} = 0.125 \pm 0.013$ МэВ, что соответствует $a_{nn} = -16.6 \pm 1.0$ фм.

В разделе 3.5 рассмотрены методики, разработанные для проведения этого эксперимента.

В главе 4 рассматривается экспериментальный метод изучения структуры двухнейтронного гало в реакции квазисвободного рассеяния на кластере гало-ядер. Описан эксперимент, проведенный в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ, в котором пучок гало-ядер 6He с энергией 60 МэВ облучал стопку ядерных фотоэмульсий. При этом динейтронный кластер рассеивается на протоне, в то время как спектатор 4He не взаимодействует и продолжает движение с тем же полным импульсом, который он имел в налетающем гало-ядре 6He .

Ядра водорода, входящие в состав фотоэмульсии, рассматриваются как ядра мишени. Использование стопки ФЭ позволило одновременно получить данные в области энергии ядер-снарядов 15-60 МэВ. Преимуществом работы с ФЭ является возможность детектирования вторичных частиц под очень малыми углами относительно направления частиц пучка.

В разделе 4.4 приведены полученные экспериментальные данные и их сравнение с результатами моделирования. Сделан вывод о существовании в гало-ядре 6He двух-нейтронного состояния - динейтрона, на котором возможно рассеяние как на кластере.

В разделе 4.5 рассмотрена возможность исследования структуры гало-ядра 8He в реакции квазисвободного рассеяния протона.

В разделе 4.6 исследована возможность изучения nn -корреляции в реакциях подхвата кора из ядер 6He и ^{11}Li с регистрацией нейтронов от распада синглетного nn состояния. Описано кинематическое моделирование реакции $^6He + ^2H \rightarrow ^6Li + n + n$. Показано, что исследование энергетических спектров нейтронов, регистрируемых под углом, близким к углу вылета nn -системы в совпадении заряженной частицей, позволяет получить информацию об эффективной энергии квазисвязанного nn -состояния в

гало-ядре.

В главе 5 получены данные о энергии виртуального состояния nn -системы в реакции $d + {}^2H \rightarrow p + p + n + n$. С этой целью описано кинематическое моделирование реакции dd -развала. В результате определены затравочные значения углов вылета pp и nn систем, на которых следует установить детекторы протонов и нейтронов. Моделирование реакции $d + {}^2H \rightarrow n + n + p + p$ показало, что отбор событий, соответствующих энергии виртуального уровня приводит к структуре во временном спектре нейтронов. С учетом результатов моделирования создана экспериментальная установка для исследования реакции $d + {}^2H \rightarrow n + n + p + p$ на пучке дейтронов циклотрона У-120 НИИЯФ МГУ, которая описана в разделе 5.3. Представлена процедура регистрации заряженных частиц и нейтронов. Обработка информации велась в режиме "of-line" и состояла из определения амплитуд и площадей импульсов, получения времени возникновения сигналов в детекторах и цифрового анализа формы импульсов. Для нейтронного канала регистрации проведено разделение событий, вызванных нейтронами и гамма-квантами.

В разделе 5.3.5.2 рассмотрена временная калибровка канала в реакции $d + {}^2H \rightarrow {}^3He + n$. По результатам калибровки были выбраны углы регистрации 27° для 3He и -83° для n и соответствующие энергии вторичных частиц при энергии дейтронов 15 МэВ.

Раздел 5.4 посвящен извлечению данных об энергии nn -синглетного состояния в реакции $d + {}^2H \rightarrow p + p + n + n$. Было проведено моделирование этой реакции при условии $E_{p1} + E_{p2} > 4.5$ МэВ, которое соответствует области относительных энергий двух нейтронов 0–300 кэВ. В результате были отобраны nn -пары с относительной энергией $\varepsilon = E_{nn} \pm \Gamma$. Анализ зависимости $\chi^2(E_{nn}, \Gamma)$ от величины E_{nn} показал, что минимальное значение χ^2 достигается при энергии $E_{nn} = 76 \pm 6$ кэВ, $\Gamma = 70 \pm 2$ кэВ, что соответствует $a_{nn} = -22.2 \pm 0.6$ фм. Полученное значение a_{nn} в рассмотренной реакции значительно превышает по абсолютной величине значения длин рассеяния в экспериментах по nd -развалу ($a_{nn} =$ от -19 до -16 фм), что указывает на эффективное усиление nn -взаимодействия в исследуемой реакции.

Глава 6 посвящена анализу данных о нейтрон-нейтронной длине рассеяния, извлеченной из реакций nd - и dd -развалов. Отмечены значительные расхождения в экспериментальных данных, полученных с 1999 года в этих реакциях при различных геометриях и при различных энергиях налетающих частиц.

В разделе 6.3 приведены новые исследования нейтрон-нейтронного 1S_0 состояния. Эти данные о значениях E_{nn} и a_{nn} в реакции $n + d \rightarrow p + n + n$ при энергии 40 ± 5 МэВ были получены на нейтронном пучке Московской мезонной фабрики ИЯИ РАН. В результате была определена энергия виртуального уровня $E_{nn} = 0.129 \pm 0.013$ МэВ, что приводит к величине $a_{nn} = -16.6 \pm 1.0$ фм.

В разделе 6.3.2 приведены результаты определения энергии виртуального nn -состояния в реакции $d + {}^2H \rightarrow p + p + n + n$. В эксперименте на установке ИЯИ-НИИЯФ при энергии дейтронов 15 МэВ было показано, что в определенных кинематических условиях форма энергетического спектра нейтрона зависит от значения nn -длины рассеяния. В эксперименте, проведенном на пучке дейтронов НИИЯФ МГУ было получено $E_{nn} = 76 \pm 6$ кэВ и $a_{nn} = -22.6 \pm 0.6$ фм, при значении эффективного радиуса $r_{nn} = 2.82$ фм.

Проанализированы все данные о нейтрон-нейтронной длине рассеяния, полученные с 1999 г. в реакциях nd и dd -развалов. Расхождение между экспериментальными данными, полученными в различных работах, объяснено влиянием $3N$ -сил, зависящих от скорости разлета nn -пары и заряженного фрагмента. Показано, что учет этого влияния позволяет согласовать данные о нейтрон-нейтронной длине рассеяния из разных экспериментов.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации, выносимые на защиту.

В качестве недостатков следует отметить:

1. При анализе экспериментальных установок, на которых проводились эксперименты по определению nn -длины рассеяния в реакциях nd и dd -развалов, повторены рисунки, ранее приведенные в главах 3 и 5 (Рис. 3.1 и 6.5), (Рис. 5.9 и 6.7), (Рис. 5.19 6.8).

2. Формула, связывающая длину рассеяния a_{nn} с энергией виртуального уровня E_{nn} (Рис 3.3), приведенная в главе 3, повторяется в главе 6 как Рис. 6.3.

3. При сравнении экспериментального временного спектра нейтронов с результатами моделирования (например, на Рис. 5.19) не указано принималось ли во внимание временное разрешение эксперимента при моделировании аналогичного расчетного спектра.

Указанные недостатки, однако, ни в коей мере не снижают общей положительной оценки результатов, полученных в диссертации. В целом, диссертация Конобеевского Е.С. выполнена на высоком

уровне на актуальную тему. Полученные в диссертации результаты являются новыми и оригинальными. Данные о параметрах pn -взаимодействия получены при низких энергиях в реакциях с двумя нейтронами в конечном состоянии при низких энергиях. Для этого были созданы оригинальные методики и проведены экспериментальные исследования на пучках нейтронов, дейтронов и легких ядер. Показана возможность согласования всех имеющихся данных по длине pn -рассеяния. Предложен экспериментальный метод изучения структуры двухнейтронного гало в реакциях рассеяния протона на кластерах гало-ядер.

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 Конобеевского Евгения Сергеевича 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 заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.16 - "физика атомного ядра и элементарных частиц".

Отзыв составил главный научный сотрудник лаборатории адронов и ядер
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Физического института имени П.Н. Лебедева РАН
доктор физ-мат наук, профессор
Тел.: +7-915-2954670, эл. адрес: filkovlv@lebedev.ru

Л.В. Фильков

Результаты диссертации были рассмотрены и одобрены на семинаре Лаборатории фундаментальных свойств материи Отделения ядерной физики и астрофизики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института имени П.Н. Лебедева РАН. 3 декабря 2019г.

Ученый секретарь Отделения ядерной физики и астрофизики ФИАН
доктор физ-мат. наук

Н.П. Топчиев

Список научных работ сотрудников Отделения ядерной физики и астрофизики Физического института имени П.Н.Лебедева РАН

1. **Л.В.Фильков** Сверхузкие дибарионы // ЭЧАЯ 2019, т.**50**, вып.5, с.585
2. S. Prakhov,... **V.L. Kashevarov**,**L.Filkov**... *et al.* // High-statistics measurement of the $\eta \rightarrow 3\pi^0$ decay at the Mainz Microtron // *Phys. Rev. C* 97, 065203
3. **O.D.Dalkarov** , M.A.Negodaev , **A.S.Rusetskii**, et al. // Nuclear Reactions under Irradiation of Deuterated Structures by X Rays. *Phys.Atom.Nucl.*, **2019**, **82**, № 5, p 425-438
4. **V.L. Kashevarov**,... **L.V.Filkov** et al. Study of η and η' Photoproduction at MAMI // *Phys.Rev.Lett.* 118 (2017) no.21, 212001
5. S. Gardner,... **L.V.Filkov**, **V.L. Kashevarov** *et al.* Photon asymmetry measurements of $\gamma \rightarrow p \rightarrow \pi^0 p$ for $E\gamma=320-650$ MeV // *Eur.Phys.J. A*52 (2016) no.11, 333
6. M. Bashkanov,.. **V.L. Kashevarov** *et al.* //Deuteron photodisintegration by polarized photons in the region of the $d^*(2380)$ // *Phys.Lett.* B789 (2019) 7-12
7. V. Sokhoyan,... **L.V.Filkov**, **V.L. Kashevarov**, *et al.* // Experimental study of the $\gamma p \rightarrow \pi^0 \eta p$ reaction with the A2 setup at the Mainz Microtron // *Phys.Rev. C*97 (2018) no.5, 055212
8. **Yu. A.Alexandrov**, N. G.Peresadko, **S. G.Gerasimov**, et al. // Dissociation of relativistic Be-7 nuclei through the He-3+He-4 channel on a proton target // *Phys.Atom.Nucl.* 2015, **78** № 3 P. 363
9. N.G. Peresadko, **S.G. Gerasimov**, V.A. Dronov, A.V. Pisetskaya, S.P. Kharlamov, L.N. Shesterkina // Measurement of the Mean Free Path of Relativistic ^{12}C Nuclei Undergoing Coherent Fragmentation to Three Alpha Particles in a Nuclear Emulsion Filled with Lead Nuclei // *Phys.Atom.Nucl.* **81** (2018) №.6, 673
10. **O.D. Dalkarov** , M.A.Negodaev , **A.S.Rusetskii**, et al.// Studying the Emission of X-Ray Quanta, Neutrons, and Charged Particles from Deuterated Structures Irradiated with X-Rays // *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques* **2019**, **13**, № 2, p. 272
11. R. Beisembaev, D. Beznosko, E. Beisembaeva, **O. D. Dalkarov**, A. Iakovlev, **V.A. Ryabov** // Fast Charged Particle Detector with High Dynamic Range at Horizon-10T Cosmic Rays Detector System // *PS Conf. Proc.* 27, 011015 (2019)