

Каспаров Александр Александрович

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ МАЛОНУКЛОННЫХ РЕАКЦИЙ
ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ДАННЫХ О НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРАХ nn -ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

*Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук*

Москва, 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН)

Научный руководитель:

Конобеевский Евгений Сергеевич, кандидат физико-математических наук, ИЯИ РАН, Лаборатория атомного ядра, зав. лабораторией.

Официальные оппоненты:

Гуров Юрий Борисович, доктор физико-математических наук, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ), кафедра физики элементарных частиц (№ 40), главный научный сотрудник.

Зеленская Наталья Семеновна, доктор физико-математических наук, профессор, Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (НИИЯФ МГУ), Отдел ядерных реакций, главный научный сотрудник.

Ведущая организация:

Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ), г. Дубна

Защита диссертации состоится _____ в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 002.119.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук по адресу: 117312 Москва, проспект 60-летия Октября, д. 7а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯИ РАН и на сайте www.inr.ru

Автореферат разослан _____

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.119.01,
член-корреспондент РАН

С.В. Троицкий

Общая характеристика работы

Актуальность

Актуальность исследований определяется важностью получения данных о низкоэнергетических параметрах NN -взаимодействия, связанных с фундаментальными основами ядерной физики, в частности, с природой нейтрон-нейтронных корреляций в малонуклонных системах и с проблемой нарушения зарядовой симметрии ядерных сил – отличия взаимодействия различных пар нуклонов, и понимания механизмов, приводящих к этим нарушениям.

В течение многих лет одной из важнейших задач ядерной физики было объяснение свойств ядер исходя из данных о нуклон-нуклонных потенциалах. Несмотря на большой прогресс в исследовании NN -взаимодействия остается ряд проблем, до конца еще не решенных. К их числу относится проблема нарушения зарядовой симметрии (НЗС) ядерных сил. НЗС является малым эффектом, который согласно современным представлениям связан с различием масс u - и d -кварков, их зарядов и магнитных моментов [1; 2].

Особую роль в проверке гипотезы о зарядовой симметрии ядерных сил играют исследования низкоэнергетических характеристик NN -взаимодействия в синглетном спиновом состоянии – длин рассеяния и энергий виртуального 1S_0 состояния NN -систем. Так как синглетное 1S_0 состояние двух нуклонов почти связано (существует виртуальное состояние с энергией близкой к нулю), это малое различие может проявляться в виде заметной разности nn - и pp -длин рассеяния – a_{nn} и a_{pp} (после исключения кулоновских эффектов). Таким образом, разность длин рассеяния (или энергий виртуального синглетного состояния) является важной характеристикой эффекта НЗС, и требуются точные данные об этих низкоэнергетических параметрах NN -взаимодействия.

Эксперименты по рассеянию протона на протоне приводят к величине pp -длины рассеяния $a_{pp} = -7.8063 \pm 0.0026$ фм [3], а после исключения

поправок на вклады электромагнитных эффектов – к значению чисто ядерной pp -длины рассеяния $a_{pp} = -17.3 \pm 0.4$ фм [1].

Более неоднозначная ситуация возникает, когда мы говорим о нейтрон-нейтронном взаимодействии. Ввиду отсутствия чисто нейтронной мишени, данные об nn -взаимодействии в основном получают из анализа реакций с двумя нейтронами в конечном состоянии. Однако, 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 [4], что не дает возможности однозначно ответить на вопрос о степени НЗС ядерных сил и даже о ее знаке.

В реакциях трехчастичного развала $N + d \rightarrow N + n + p$ также наблюдаются проявления эффекта НЗС, не описываемые теорией. Оказалось, что экспериментальные данные для pd - и nd -развала в так называемой “SPACE STAR” кинематике (три вылетающих нуклона имеют в системе ц.м. одинаковые амплитуды импульса и углы разлета) сильно отличаются друг от друга, тогда как теоретические сечения развала оказываются почти одинаковыми и не совпадают с экспериментальными данными.

Возможное объяснение описанных выше расхождений, предложенное в [5] – это предположение, что в ядре ${}^3\text{H}$ (nd -система) дополнительная корреляция двух нейтронов, индуцированная протоном, приводит к появлению эффективного “слабосвязанного состояния” двух нейтронов в поле протона, а соответственно в ядре ${}^3\text{He}$ (pd -система) появляется околороговое состояние двух протонов в поле нейтрона. Кулоновское взаимодействие в pp -паре может кардинально изменить весь механизм такой парной корреляции и динамика ее распада будет совсем иная, чем динамика распада “эффективного nn -связанного состояния”. И можно рассчитывать, что измеренные NN -корреляции, в частности извлеченные энергии NN виртуального синглетного 1S_0 состояния окажутся совсем не те, которые присущи свободным NN -системам.

При динамическом образовании коррелированной пары степень “подсвязанности” состояния может зависеть от времени взаимодействия NN -пары с третьей частицей, а, следовательно, от относительной скорости их разлета. Измерения при различных энергиях первичных частиц, а, следовательно, и при различных скоростях вторичных фрагментов позволят исследовать эффект влияния времени взаимодействия на усиление NN -притяжения в ядерной среде.

Для устранения существующей неопределенности необходимы новые эксперименты и точная извлеченная информация о параметрах NN -взаимодействия при различных энергиях. В ИЯИ РАН планируются (и частично уже проводятся) эксперименты по определению низкоэнергетических параметров NN -взаимодействия (длин рассеяния и энергий виртуальных состояний) в реакциях $d + {}^2\text{H} \rightarrow p + p + n + n$ [6], $n + {}^2\text{H} \rightarrow p + n + n$, $n + {}^3\text{H} \rightarrow d + n + n$ и $d + {}^1\text{H} \rightarrow p + p + n$.

Для проведения этих экспериментов необходимо моделирование как планируемых, так и различных фоновых реакций. Эта необходимость стимулировала создание ряда программ кинематического моделирования ядерных реакций с тремя и более частицами в конечном состоянии. На основе данных моделирования получены параметры экспериментальных установок и разработаны методики извлечения данных о низкоэнергетических параметрах NN -взаимодействия.

Цель работы и решаемые задачи

1) Разработка новых подходов и методов для извлечения данных о низкоэнергетических параметрах NN -взаимодействия в реакциях с образованием и развалом NN -виртуальных состояний.

2) Создание ряда вычислительных программ, позволяющих проводить кинематическое моделирование ядерных реакций с тремя и более частицами в конечном состоянии.

3) Создание ряда вспомогательных программ, позволяющих проводить моделирование экспериментов, на основе проведенного кинематического моделирования.

4) Определение параметров экспериментальной установки для исследования реакции $d + {}^2\text{H} \rightarrow p + p + n + n$ по результатам моделирования данной реакции.

5) Получение новых экспериментальных данных для реакции $d + {}^2\text{H} \rightarrow p + p + n + n$ при энергии дейтронов 15 МэВ. На основе сравнения экспериментальных временных спектров нейтронов и результатов моделирования извлечение величины нейтрон-нейтронной длины рассеяния.

Научная новизна

1) Разработан ряд новых методов и подходов, а также вычислительных программ, для кинематического моделирования ядерных реакций с произвольным количеством вторичных частиц. Результаты моделирования позволяют определить геометрию эксперимента – углы регистрации, с диапазоны энергий, определить параметры детекторов, позволяющие получить данные с необходимой точностью и возможностью отделения от фоновых процессов.

2) При моделировании реакций, проходящих через стадию образования и развала виртуального состояния NN -системы, впервые обнаружена зависимость формы энергетического спектра развального нуклона от энергии и ширины этого состояния [7].

3) Впервые, в результате сравнения полученных экспериментальных данных кинематически полного эксперимента $d + {}^2\text{H} \rightarrow p + p + n + n$ при энергии пучка дейтронов 15 МэВ с результатами моделирования, получено значение энергии виртуального синглетного 1S_0 состояния двухнейтронной системы $E_m = 76 \pm 6$ кэВ [6].

4) Полученное значение энергии, значительно ниже значений, пересчитанных из длин рассеяния в экспериментах по nd -развалу (100 –

130 кэВ), что, по-видимому, указывает на эффективное усиление nn -взаимодействия в промежуточном состоянии в исследуемой реакции.

Практическая значимость

1) Разработанный программный комплекс может быть использован для моделирования различных реакций с тремя и более частицами в конечном состоянии. Результаты расчетов будут использованы при создании экспериментальных установок в таких экспериментах.

2) Начатые измерения реакции $d + {}^2\text{H} \rightarrow p + p + n + n$ на модернизированной установке позволяют получить новую информацию об энергиях синглетных виртуальных состояний NN -системы. Анализ полученных данных позволит судить о мере нарушения зарядовой симметрии ядерных сил.

3) Результаты исследования реакции $d + {}^2\text{H} \rightarrow p + p + n + n$ имеют фундаментальный характер и могут быть использованы для совершенствования и тестирования современных теоретических моделей ядерных сил.

Положения и результаты, выносимые на защиту

1) Разработка новых подходов и методов для извлечения данных о низкоэнергетических параметрах NN -взаимодействия в реакциях с образованием и развалом NN -виртуальных состояний, основанных на выборе оптимальной геометрии для регистрации развалных частиц, введении ограничений на параметры вторичных частиц и анализе их спектров.

2) Создание программ в рамках этого подхода для моделирования реакций с тремя и более частицами в конечном состоянии, а также комплекса программ для моделирования параметров экспериментальных установок для исследования этих реакций.

3) Обнаружение при моделировании реакций, проходящих через стадию образования и развала виртуального состояния NN -системы,

зависимости формы энергетического спектра развального нуклона от энергии и ширины этого состояния.

4) Результаты детального моделирования реакции $d + {}^2\text{H} \rightarrow p + p + n + n$ и определения на основе этих результатов параметров экспериментальной установки для извлечения энергии виртуального состояния nn -системы.

5) Получение экспериментальных данных об энергетическом спектре нейтронов в реакции $d + {}^2\text{H} \rightarrow p + p + n + n$ и определение энергии виртуального состояния nn -системы на основе сравнения этих данных и результатов моделирования.

Вклад автора

1) Разработаны программы кинематического моделирования ядерных реакций с произвольным количеством вторичных частиц, с помощью которых проведены многочисленные расчеты, в том числе и для эксперимента по исследованию nn -взаимодействия в реакции $d + {}^2\text{H} \rightarrow p + p + n + n$.

2) Созданы различные сервисные программы для моделирования экспериментов на основе проведенного кинематического моделирования.

3) Проведена обработка экспериментальных данных, анализ и интерпретация результатов по определению энергии виртуального синглетного nn -состояния в реакции $d + {}^2\text{H} \rightarrow p + p + n + n$.

4) Выполнена основная работа по апробации результатов исследования и подготовке основных публикаций по выполненной работе.

Приведенные результаты получены либо самим автором, либо при его непосредственном участии.

Апробация работы

Результаты исследований, положенные в основу диссертации, были представлены на следующих российских и международных семинарах и конференциях:

- Международная конференция «ЯДРО» по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра (Москва, 2013; Минск, 2014; Санкт-Петербург, 2015; Саров, 2016).
- The 22nd European Conference on Few-Body Problems in Physics (Krakow, Poland, 2013).
- The 23rd European Conference on Few-Body Problems in Physics (Aarhus, Denmark, 2016).
- XIV International Seminar on Electromagnetic Interactions of Nuclei «EMIN-2015» (Москва, 2015).
- The 2nd international conference on particle physics and astrophysics (Москва, 2016).
- XVI Международная научная конференция СКМП-2015 (Смоленск, 2015).
- LXIX Международная научная конференция «Герценовские чтения – 2016» (Санкт-Петербург, 2016).
- LXX Международная научная конференция «Герценовские чтения – 2017» (Санкт-Петербург, 2017).
- 56-я, 57-я и 59-я всероссийская научная конференция МФТИ (2013, 2014, 2016).
- Научные семинары в ИЯИ РАН и МПГУ.

Основные публикации по теме диссертации

Основные научные результаты диссертации изложены в 9 работах, опубликованных в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК:

- 1) *С.В. Зуев, А.А. Каспаров, Е.С. Конобеевский.* Программа для моделирования экспериментов по изучению реакций с тремя частицами в

конечном состоянии // Известия РАН. Серия физическая. 2014. Т. 78(5). С. 527–531; Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics. 2014. V. 78(5). P. 345–349.

2) *E.S. Konobeevski, S.V. Zuyev, A.A. Kasparov, V.V. Ostashko*. The Results of Simulation of $d + t \rightarrow {}^3\text{He} + {}^2\text{n}$; ${}^2\text{n} \rightarrow n + n$ Reaction // Few-Body Systems. 2014. V. 55(8–10). P. 1059–1060.

3) *Е.С. Конобеевский, С.В. Зуев, А.А. Каспаров, В.М. Лебедев, М.В. Мордовской, А.В. Спасский*. Исследование реакции $d + d \rightarrow {}^2\text{He} + {}^2\text{n}$ при энергии дейтронов 15 МэВ // Ядерная физика. 2015. Т. 78(7–8). С. 687–695; Physics of Atomic Nuclei. 2015. V. 78(5). P. 643–651.

4) *С.В. Зуев, А.А. Каспаров, Е.С. Конобеевский*. Возможности исследования структуры гало-ядер в реакциях квазисвободного рассеяния протона при низких энергиях // Ядерная физика. 2015. Т. 78(7–8). С. 739–747; Physics of Atomic Nuclei. 2015. V. 78(5). P. 694–702.

5) *С.В. Зуев, А.А. Каспаров, Е.С. Конобеевский, В.М. Лебедев, М.В. Мордовской, А.В. Спасский*. Реакция $d + {}^2\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + n$ как источник квазимоноэнергетических нейтронов для исследования свойств нейтронных детекторов // Известия РАН. Серия физическая. 2016. Т. 80(3). С. 260–265; Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics. 2016. V. 80(3). P. 232–236.

6) *С.В. Зуев, А.А. Каспаров, Е.С. Конобеевский, М.В. Мордовской, И.М. Железных, А.Г. Гасанов, В.М. Лебедев, А.В. Спасский*. Установка для изучения NN-корреляций в реакции $d + {}^2\text{H} \rightarrow n + n + p + p$ // Известия РАН. Серия физическая. 2016. Т. 80(3). С. 254–259; Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics. 2016. V. 80(3). P. 227–231.

7) *А.А. Каспаров, Е.С. Конобеевский, С.В. Зуев*. Моделирование кинематики реакции $d + d \rightarrow p + p + n + n$ // Дифференциальные уравнения и процессы управления. 2016. №2. С. 257–261.

8) *Konobeevski E., Kasparov A., Mordovskoy M., Zuyev S., Lebedev V., Spassky A.* Determination of energies of nn-singlet virtual state in $d + {}^2\text{H} \rightarrow p + p + n + n$ reaction // Few-Body Syst (2017) 58: 107.

9) *E. Konobeevski, A. Kasparov, M. Mordovskoy, S. Zuyev, V. Lebedev, A. Spassky.* Determination of n-n correlations in $d + {}^2\text{H} \rightarrow p + p + n + n$ reaction // *Journal of Physics: Conf. Series* 798 (2017) P. 012076 (1–4).

Журналы «*Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics*», «*Physics of Atomic Nuclei*», «*Few-Body Systems*», «*Journal of Physics: Conference Series*» включены в реферативные базы данных по мировым научным публикациям «*Web of Science*» или «*Scopus*».

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения, содержит 105 страниц печатного текста, 49 рисунков, 6 таблиц и список литературы из 62 наименований.

Содержание работы

Во **Введении** обосновывается актуальность и новизна научной проблемы, изучению которой посвящена работа. Изложены цели исследования, представлены основные положения, выносимые на защиту, указаны данные об апробации работы и личном вкладе автора.

Первая глава посвящена важным фундаментальным величинам, играющим существенную роль в исследовании сильного нуклон-нуклонного взаимодействия – низкоэнергетическим характеристикам NN -взаимодействия – NN -длинам рассеяния и энергиям виртуальных состояний. Исследование этих величин является важным в связи с проверкой гипотезы о зарядовой независимости и зарядовой симметрии ядерных сил. В главе приведены основные результаты экспериментов по исследованию NN -взаимодействия в различных ядерных реакциях и полученные в них значения NN -длин рассеяния и энергий виртуальных состояний. Рассмотрение результатов экспериментов показало, что полученные в них данные о длинах рассеяния и энергиях виртуальных синглетных NN -состояниях являются довольно

противоречивыми. Для устранения существующей неопределенности необходимы новые эксперименты и точная извлеченная информация о параметрах NN -систем при различных энергиях.

Вторая глава посвящена описанию ряда разработанных вычислительных программ кинематического моделирования ядерных реакций с произвольным количеством вторичных частиц. В программах по произвольно заданным кинетическим энергиям и углам разлета вторичных частиц отбираются только те решения, которые удовлетворяют выполнению законов сохранения энергии и импульса с заданной заранее точностью.

Один из примеров работы программы – получение различных двумерных диаграмм кинематических наблюдаемых. Например, на рис. 1 представлена рассчитанная двумерная диаграмма $\Theta_p - E_p$ реакции ${}^6\text{He} + p \rightarrow p' + C + S$ квазисвободного рассеяния протона на кластере C гало-ядра ${}^6\text{He}$ в рамках спектаторной модели. Энергия налетающего ядра ${}^6\text{He}$ в расчетах взята 40 МэВ.

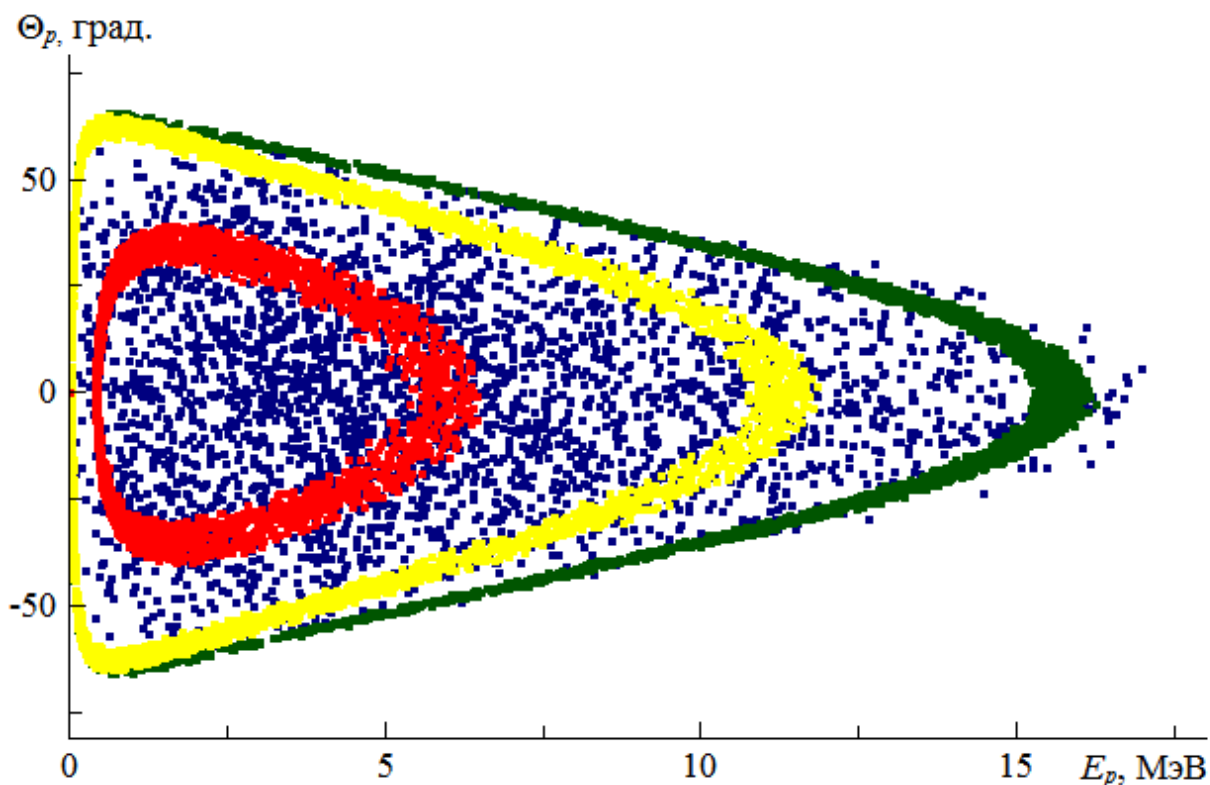
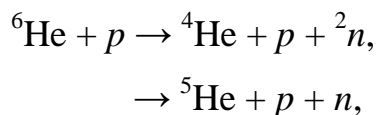


Рис. 1. Результаты кинематического моделирования реакции КСР протонов на кластерах гало-ядра ${}^6\text{He}$: двумерная диаграмма $\Theta_p - E_p$. Указанные

области: темно-синяя – область фоновых событий реакции ${}^6\text{He} + p \rightarrow {}^4\text{He} + p + n + n$; зеленая – область КСР протона на кластере ${}^4\text{He}$; красная – область КСР протона на нейтроне; желтая – область КСР протона на динейтронном кластере.

На диаграмме представлены области как искомым реакций



так и фоновой реакции



Видно, что существуют выделенные области в угловых и энергетических распределениях вторичных частиц, связанные с событиями реакций КСР протона на различных кластерах (${}^4\text{He}$, нейтроне, динейтроне), которые могут быть исследованы в эксперименте.

В **Третьей главе** приведены результаты кинематического моделирования некоторых ядерных реакций. Моделирование проводилось с помощью разработанных программ, описанных во второй главе.

Результаты кинематического моделирования различных ядерных реакций позволяют определить не только углы регистрации и размеры детекторов вторичных частиц, но также и определить угловые, энергетические или временные характеристики детекторов необходимые для достижения результатов с требуемой точностью и возможностью отделения исследуемой реакции от фоновых процессов. Исходя из результатов кинематического моделирования, определяется схема экспериментальной установки для исследования нужной реакции.

В **Четвертой главе** описан ряд созданных вспомогательных программ, позволяющий проводить моделирование экспериментов, на основе проведенного кинематического моделирования. В малонуклонных экспериментах, в конечных каналах которых могут быть как заряженные частицы, так и нейтроны, необходима процедура идентификации зарегистрированных частиц, определения их энергий и времен пролета,

которые в свою очередь сильно зависят от точного расчета ионизационных потерь заряженных частиц и точных энергетических калибровок.

В главе 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. В качестве примера на рис. 2 представлена диаграмма моделированных потерь в ΔE - и E -детекторах однозарядных (протоны, дейтроны, тритоны) и двухзарядных частиц (гелий-3 и гелий-4) в интервале энергий от 0 до 10 МэВ. В данном примере заряженные частицы проходят следующие слои: выходное окно камеры рассеяния (лексан) 20 мкм, слой воздуха 10 мм от выходного окна до пролетного ΔE -детектора, толщина пролетного кремниевого ΔE -детектора 24 мкм, второй слой воздуха 10 мм между ΔE - и E -детектором, толщина кремниевого E -детектора полного поглощения 316 мкм.

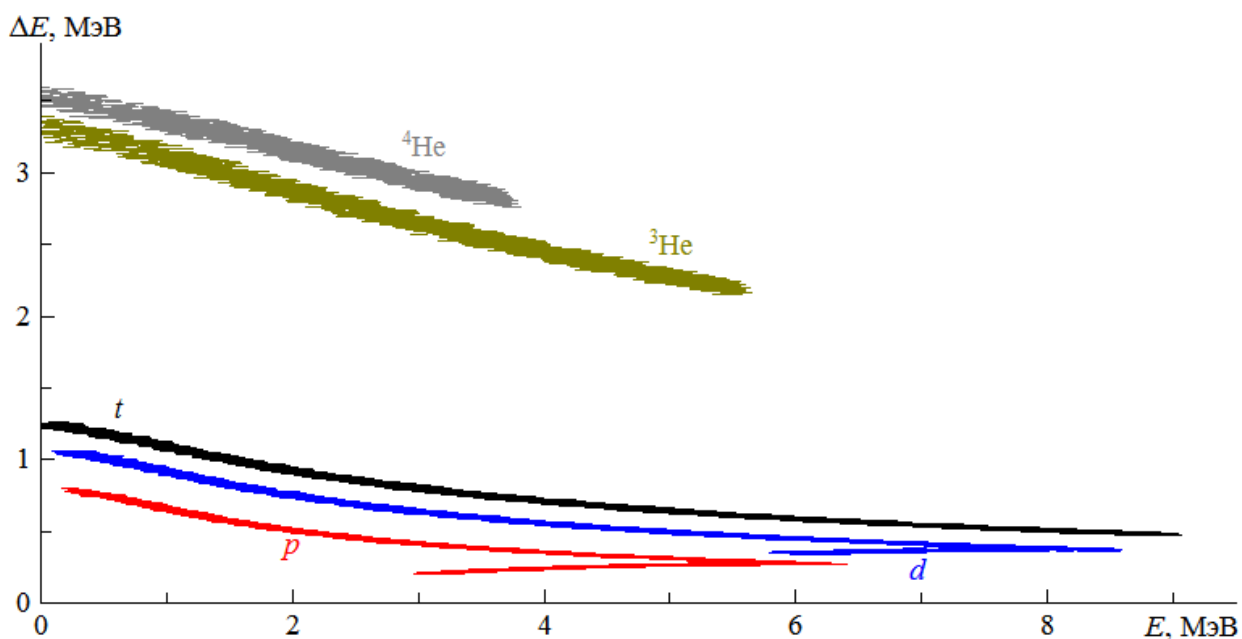


Рис. 2. Двумерная ΔE – E диаграмма ионизационных потерь для идентификации заряженных частиц.

В главе также описаны принципы работы программы моделирования спектра альфа-частиц для энергетической калибровки детекторов, программы определения времени пролета заряженных и нейтральных частиц, а также

программы оптимизации спектров коррелирующих наблюдаемых в ядерных реакциях.

В **Пятой главе** описано моделирование реакции $d + {}^2\text{H} \rightarrow (nn)^s + (pp)^s \rightarrow p + p + n + n$, проходящей через промежуточную стадию с образованием синглетных дипротона и динейтрона. Коррелированные nn - и pp -пары могут образовываться динамически в промежуточном состоянии. При этом измеряемые nn - и pp -корреляции, в частности энергии виртуального синглетного 1S_0 состояния (E_{nn} , E_{pp}), могут оказаться отличными от тех, которые присущи свободным nn - и pp -системам.

Моделирование реакции $d + {}^2\text{H} \rightarrow (nn)^s + (pp)^s \rightarrow p + p + n + n$ проведено в два этапа. На первом этапе моделировалась “квазибинарная” реакция $d + {}^2\text{H} \rightarrow {}^2n^s + {}^2p^s$, в результате которой определяются оптимальные значения углов вылета двухпротонной и двухнейтронной систем, на которые предполагается установить детекторы протонов и нейтронов. 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.

Одним из условий эксперимента является детектирование в совпадении двух протонов одним телескопом детекторов, при этом полученные в результате моделирования данные об энергиях протонов были использованы для вычисления ионизационных потерь двух протонов в различных слоях на пути от мишени до детекторов и было обнаружено, что кинематическая область, отвечающая двухпротонным событиям, может быть однозначно отделена в эксперименте от локусов одиночных частиц.

Отбор событий с определенной относительной энергией двух нейтронов в интервале $E_{nn} \pm \Gamma_{nn}$ (соответствующей развалу виртуального nn -состояния с определенной энергией E_{nn}) показал, что различным энергиям соответствуют различные временные интервалы между пиками (рис. 3) в

спектре по времени пролета нейтронов [7]. Чем больше значение энергии виртуального nn -состояния, тем больше расстояние между пиками.

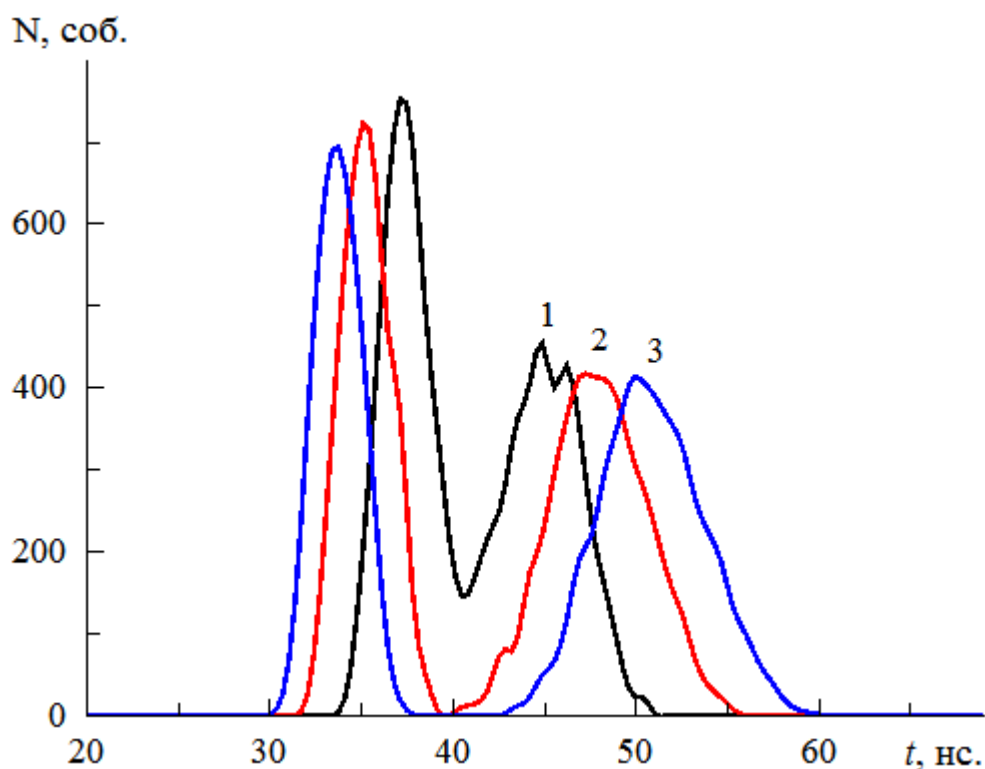


Рис. 3. Моделированные спектры времен пролета нейтронов для событий, отобранных в интервалах $E_{nn} \pm \Gamma_{nn}$: 1 — $E_{nn} = 50$ кэВ, $\Gamma_{nn} = 30$ кэВ; 2 — $E_{nn} = 120$ кэВ, $\Gamma_{nn} = 70$ кэВ; 3 — $E_{nn} = 200$ кэВ, $\Gamma_{nn} = 100$ кэВ. Длина времяпролетной базы нейтронов 0.79 м.

Временные спектры нейтронов, отобранные при фиксированном значении энергии виртуального nn -состояния, например при $E_{nn} = 120$ кэВ в различных интервалах $\Gamma_{nn} = 20; 70; 110$ кэВ (рис. 4), показывают, что изменение ширины интервала влияет в основном на “замытие” области между пиками и небольшому смещению пика с большим значением времени пролета к середине распределения.

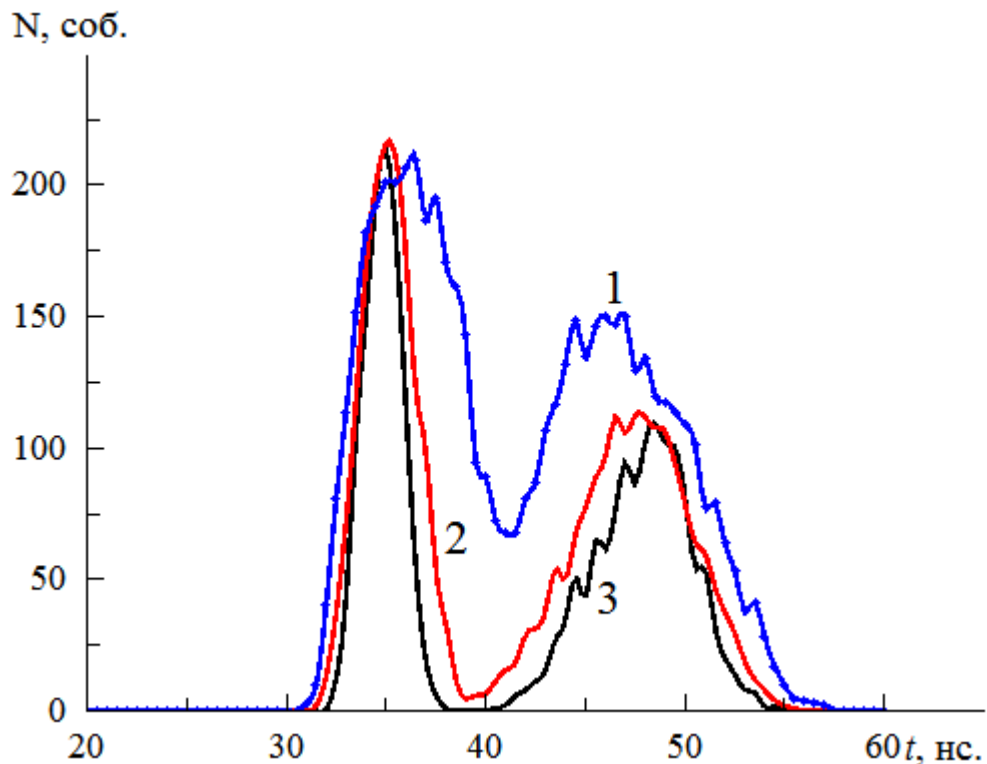


Рис. 4. Моделированные спектры времен пролета нейтронов для событий, отобранных в интервалах $E_{nn} \pm \Gamma_{nn}$: $E_{nn} = 120$ кэВ и 1 – $\Gamma_{nn} = 30$ кэВ, 2 – $\Gamma_{nn} = 70$ кэВ и 3 – $\Gamma_{nn} = 110$ кэВ. Длина времяпролетной базы нейтронов 0.79 м.

При кинематическом моделировании реакции $d + {}^2\text{H} \rightarrow p + p + n + n$ с образованием и развалом виртуального nn -состояния **впервые** показано, что при определенных кинематических условиях форма временного спектра нейтронов чувствительна как к величине энергии виртуального nn -состояния, так и к ее ширине. Получение экспериментальных временных спектров нейтронов от развала 2n -системы и сравнение их с результатами моделирования позволят определить энергию 1S_0 виртуального nn -состояния.

В **Шестой главе** описана схема экспериментальной установки, созданной на основе моделирования реакции $d + {}^2\text{H} \rightarrow p + p + n + n$, приведены результаты экспериментального исследования и анализа экспериментальных результатов.

Схема экспериментальной установки показана на рис. 5.

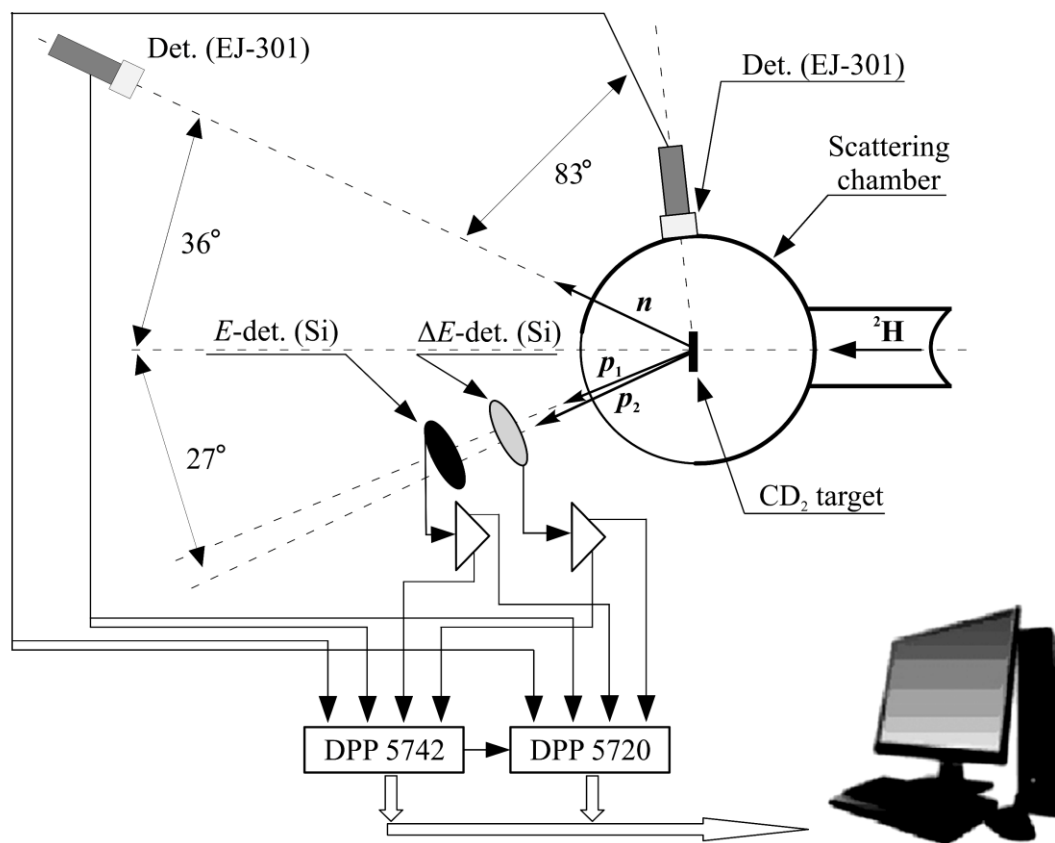


Рис. 5. Схема экспериментальной установки для исследования реакции $d + {}^2\text{H} \rightarrow n + n + p + p$.

Эксперимент был проведен на пучке дейтронов с энергией 15 МэВ НИИЯФ МГУ с током на мишени 10–20 нА [6]. Использовались мишени из дейтерированного полиэтилена толщиной $2 \text{ мг} \cdot \text{см}^{-2}$. Углы регистрации протонов и нейтрона были определены по результатам моделирования. Протоны регистрировались ΔE – E телескопом, установленным под расчетным углом $\Theta_p = 27^\circ$ слева от направления первичного пучка. В качестве ΔE -детектора использовался полностью обедненный поверхностно-барьерный кремниевый детектор с толщиной 24 мкм, а в качестве E -детектора кремниевый детектор с толщиной 316 мкм. Нейтроны детектировались жидким водородсодержащим сцинтиллятором EJ-301 (аналог NE-213) под углом $\Theta_n = 36^\circ$ справа от оси пучка, установленным на расстоянии 0.79 м от мишени. Энергия нейтронов определялась по времени пролета нейтронов до

детектора, при этом в качестве стартового сигнала времяпролетной системы использовался временной сигнал от ΔE -детектора.

На рис. 6 показана двумерная ΔE - E диаграмма, полученная при совпадении сигналов от ΔE -, E - и нейтронного детекторов, установленных под расчетными углами. На рисунке также показана область диаграммы для событий, полученных в результате моделирования прохождения двух протонов через детектирующую систему. В эксперименте проводился отбор событий с регистрацией нейтрона и определением его времени пролета, при условии попадания события на диаграмме ΔE - E в область двухпротонного события. Дополнительным условием, также определенным при моделировании, было ограничение суммарной энергии $E_{p1} + E_{p2} > 4.5$ МэВ, которое позволяет исследовать область малых относительных энергий двухнейтронной системы (~ 0 –300 кэВ) и снизить фон нерезонансных событий без уменьшения количества полезных (от развала nn -состояния).

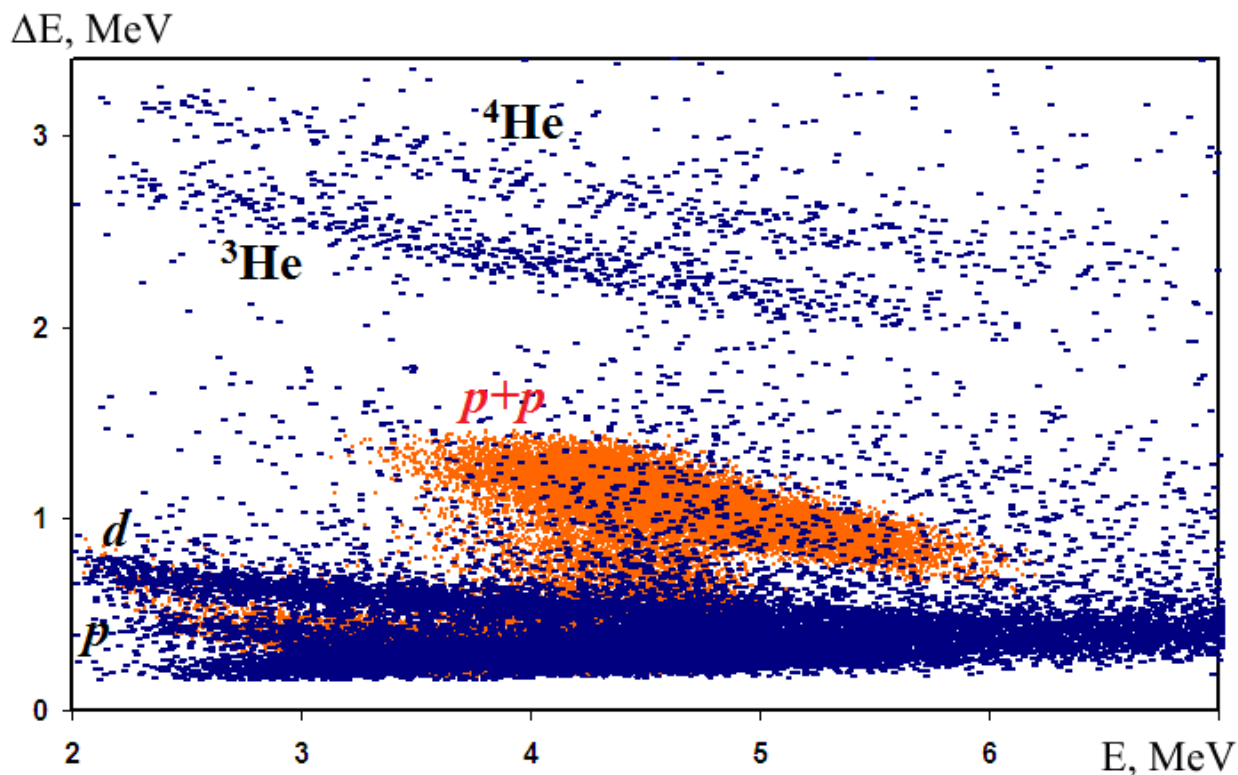


Рис. 6. Двумерная ΔE - E диаграмма, полученная при условии совпадения сигналов от ΔE -, E - и нейтронного детектора. Точки – экспериментальные

события, красная область – результаты моделирования прохождения двух протонов через ΔE – E телескоп.

Полученный в эксперименте времяпролетный спектр нейтронов сравнивался с результатами моделирования для различных значений энергии и ширин интервалов виртуального состояния nn -системы (рис. 7). Для каждого значения E_{nn} проводилась процедура фитирования, в процессе которой определялось наилучшее значение интервала Γ_{nn} . В процессе подгонки минимизировалось значение χ^2 для экспериментальных $N^{\text{exp}}(t)$ и моделированных $N_{E_{nn}, \Gamma_{nn}}^{\text{mod}}(t)$ точек:

$$\chi^2(E_{nn}, \Gamma_{nn}) = \sum_t \frac{(N_{E_{nn}, \Gamma_{nn}}^{\text{mod}}(t) - A \cdot N^{\text{exp}}(t))^2}{(\Delta N^{\text{exp}}(t))^2}, \quad (1)$$

где A – нормировочный коэффициент, определяемый отношением интегралов экспериментального и теоретического спектров по всему интервалу суммирования t , а $\Delta N^{\text{exp}}(t)$ – статистическая ошибка экспериментальных точек.

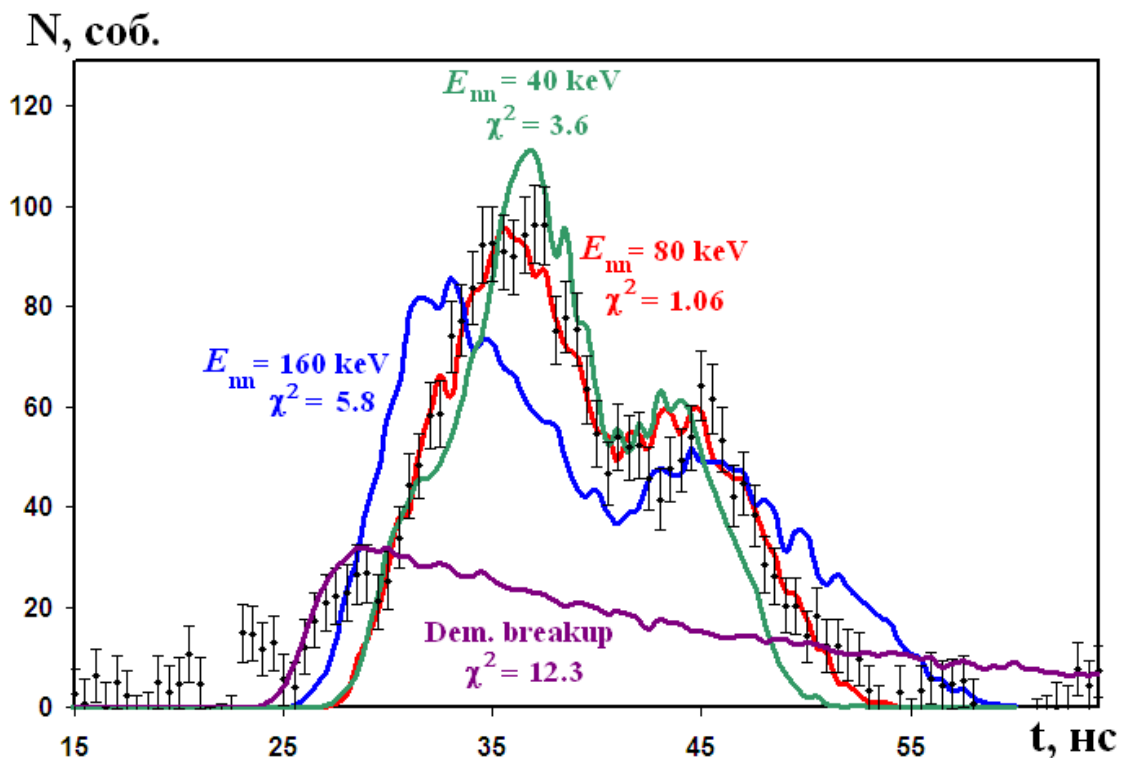


Рис. 7. Экспериментальный времяпролетный спектр нейтронов и примеры моделированных спектров. Моделирование: сиреневая линия – демократический развал, синяя линия – $E_{nn} = 160$ кэВ, $\Gamma_{nn} = 150$ кэВ; красная – $E_{nn} = 80$ кэВ, $\Gamma_{nn} = 70$ кэВ, зеленая – $E_{nn} = 40$ кэВ, $\Gamma_{nn} = 35$ кэВ.

Для определения величины E_{nn} строилась зависимость минимального значения $\chi^2_{\min}(E_{nn}^i, \Gamma_{nn}^{\text{opt}})$ от величины E_{nn}^i , которая подгонялась квадратичным полиномом (рис. 8). При этом минимальное значение χ^2_{\min} определяет величину энергии состояния, а ошибка ΔE_{nn} в определении E_{nn} дается формулой

$$\Delta E_{nn} = |E_{nn}(\chi^2_{\min}) - E_{nn}(\chi^2_{\min} + 1)|. \quad (2)$$

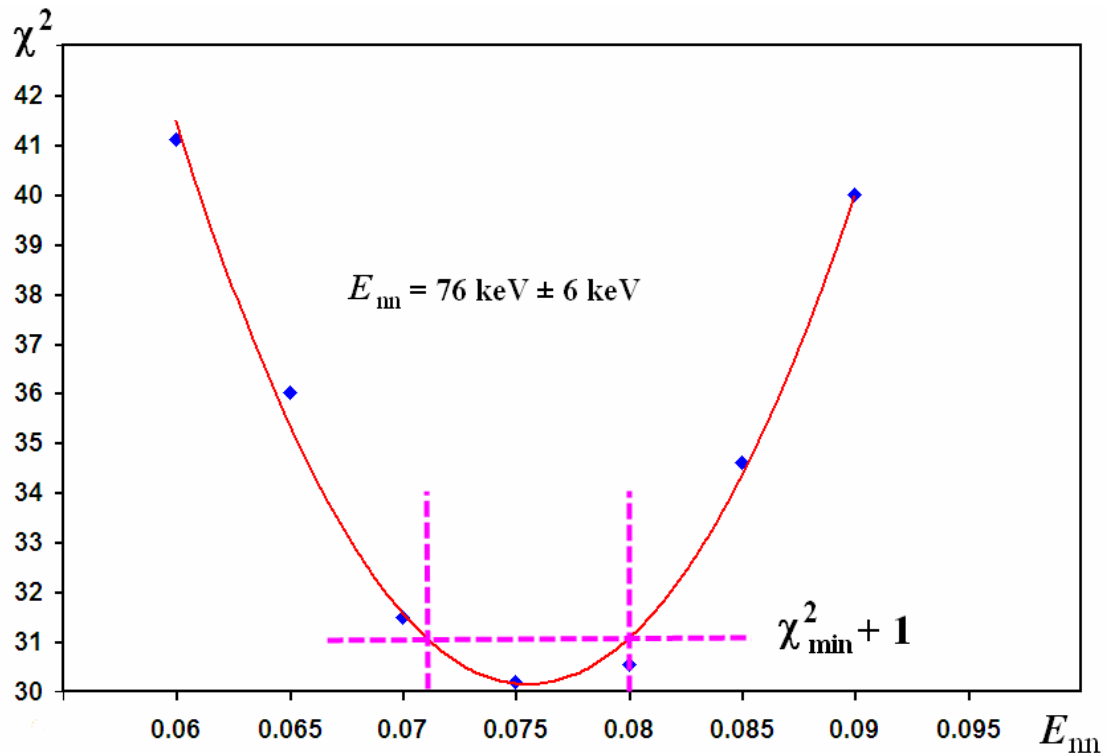


Рис. 8. Зависимость $\chi^2(E_{nn}^i, \Gamma_{nn}^{\text{opt}})$ от величины E_{nn}^i . Кривая – подгонка квадратичным полиномом.

Проведенный анализ сравнения экспериментального времяпролетного спектра нейтронов с результатами моделирования показал, что минимальное значение χ^2 достигается при энергии виртуального синглетного nn -состояния, образованного в промежуточном состоянии реакции

$d + {}^2\text{H} \rightarrow {}^2n^S + {}^2p^S \rightarrow n + n + p + p$, $E_{nn} = 76 \pm 6$ кэВ. Полученное значение энергии виртуального синглетного nn -состояния $E_{nn} = 76 \pm 6$ кэВ соответствует значению синглетной nn -длины рассеяния $a_{nn} = -22.2 \pm 0.6$ фм [6].

Данное значение nn -длины рассеяния, значительно превышает (по абсолютной величине) значения длин рассеяния в экспериментах по nd -развалу (от $a_{nn} = -19$ фм до $a_{nn} = -16$ фм), что, по-видимому, указывает на эффективное усиление nn -взаимодействия в промежуточном состоянии в исследуемой реакции.

В **Заключении** приведены основные результаты работы, которые можно сформулировать следующим образом:

1) Разработаны новые подходы и методы для извлечения данных о низкоэнергетических параметрах NN -взаимодействия в реакциях с образованием и развалом NN -виртуальных состояний, основанных на выборе оптимальной геометрии для регистрации развальных частиц, введении ограничений на параметры вторичных частиц и анализе их спектров.

2) В рамках этого подхода созданы программы для моделирования реакций с тремя и более частицами в конечном состоянии, а также комплекса программ для моделирования параметров экспериментальных установок для исследования этих реакций.

3) При моделировании реакций, проходящих через стадию образования и развала промежуточных состояний, впервые обнаружена зависимость формы энергетического спектра развальной частицы от энергии и ширины этих состояний.

5) На основе расчетов моделирования реакции $d + {}^2\text{H} \rightarrow p + p + n + n$ определены параметры экспериментальной установки для исследования данной реакции. Проведены соответствующие экспериментальные исследования.

6) На основе сравнения экспериментальных данных реакции $d + {}^2\text{H} \rightarrow p + p + n + n$, идущей в промежуточном состоянии через

образование синглетных динуклонных состояний, и результатов моделирования получены данные о nn -длине рассеяния в исследуемой реакции $a_{nn} = -22.2 \pm 0.6$ фм.

7). Данное значение nn -длины рассеяния значительно превышает (по абсолютной величине) значения длин рассеяния в экспериментах по nd -развалу (от $a_{nn} = -19$ фм до $a_{nn} = -16$ фм), что, по-видимому, указывает на эффективное усиление nn -взаимодействия в промежуточном состоянии в исследуемой реакции.

Список литературы

- 1) G.A. Miller, B.M.K. Nefkens, and I. Slaus. Charge symmetry, quarks and mesons // Phys. Rep. 1990. V. 194(1-2). P. 1–116.
- 2) G.A. Miller and W.T.H. van Oers. Charge Independence and Charge Symmetry // 1994, e-print [arXiv:nucl-th/9409013](https://arxiv.org/abs/nucl-th/9409013).
- 3) J.R. Bergervoet, P.C. van Campen, W.A. van der Sanden, et al. Phase shift analysis of 0–30 MeV pp scattering data // Phys. Rev. C. 1988. V. 38(1). P. 15–50.
- 4) C. R. Howell. Review of indirect methods used to determine the 1S_0 neutron-neutron scattering length // 2008, e-print [arXiv:0805.1177](https://arxiv.org/abs/0805.1177).
- 5) E.C. Конобеевский, В.И. Кукулин, С.В. Зуев и др. Исследование нейтрон-нейтронных и протон-протонных корреляций в малонуклонных системах с двумя нуклонами в конечном состоянии // Известия РАН. Серия физическая. 2014. Т 78 (5). С. 522–526.
- 6) Konobeevski E., Kasparov A., Mordovskoy M., Zuyev S., Lebedev V., Spassky A. Determination of energies of nn -singlet virtual state in $d + ^2\text{H} \rightarrow p + p + n + n$ reaction // Few-Body Syst (2017) 58: 107.
- 7) E.S. Konobeevski, S.V. Zuyev, A.A. Kasparov, V.V. Ostashko. The Results of Simulation of $d + t \rightarrow ^3\text{He} + ^2n$; $^2n \rightarrow n + n$ Reaction // Few-Body Systems. 2014. V. 55(8–10). P. 1059–1060.