

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ И ПОЛЯ

УДК 539.17

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК pp -ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В РЕАКЦИИ $d + {}^1\text{H} \rightarrow p + p + n$

© 2025 г. А. А. Каспаров¹⁾, М. В. Мордовской¹⁾, В. В. Мицук^{1)*},
В. М. Лебедев²⁾, А. В. Спасский²⁾

Поступила в редакцию 30.09.2024 г.; после доработки 30.10.2024 г.; принята к публикации 09.01.2025 г.

В работе представлены результаты исследования реакции $d + {}^1\text{H} \rightarrow p + p + n$. В кинематически полном эксперименте, проведенном на ускорителе У-120 НИИЯФ МГУ при энергии дейтронов 15.3 МэВ, регистрировались в совпадении протон от развала синглетного pp -состояния и вторичный нейтрон. В результате исследования определены низкоэнергетические характеристики pp -взаимодействия: величина энергии виртуального синглетного pp -состояния и соответствующее ей значение длины pp -рассеяния.

Ключевые слова: реакция $d + {}^1\text{H} \rightarrow p + p + n$, ускоритель дейтронов, pp -взаимодействие, энергия виртуального синглетного pp -состояния, длина pp -рассеяния

DOI: 10.31857/S0044002725020063, EDN: GKXCSL

1. ВВЕДЕНИЕ

Одной из важных задач современной ядерной физики является изучение нарушения зарядовой симметрии (НЗС) ядерных сил. Данное нарушение отражается, в частности, в различии протон-протонной (pp) и нейтрон-нейтронной (nn) синглетных длин рассеяния. Длину pp -рассеяния a_{pp} извлекают из прямого эксперимента по рассеянию протона на водородной мишени [1]. Из-за отсутствия чисто нейтронной мишени длину nn -рассеяния a_{nn} извлекают из реакций с двумя нейтронами в конечном состоянии, например, $n + d \rightarrow n + n + p$ [2] и $d + d \rightarrow p + p + n + n$ [3]. В работе [4] было высказано предположение, что на извлекаемую величину длины nn -рассеяния из реакций nd - и dd -развалов может оказывать влияние взаимодействие nn -пары с протоном или протонной парой. Можно предположить, что аналогичное влияние на величину длины pp -рассеяния, извлекаемую из малонуклонных реакций с двумя протонами в конечном состоянии, например, $d + p \rightarrow n + p + p$ и $d + d \rightarrow p + p + n + n$, может оказать взаимодействие pp -пары с нейтроном или нейтронной парой, соответственно.

В ИЯИ РАН совместно с НИИЯФ МГУ проводятся работы по исследованию реакции

$d + {}^1\text{H} \rightarrow n + p + p$, целью которых является исследование влияния трехнуклонных ($3N$) сил на величины извлекаемых низкоэнергетических характеристик pp -взаимодействия — энергии виртуального состояния и синглетной длины рассеяния. На ускорителе У-120 НИИЯФ МГУ были проведены несколько пучковых сеансов, в результате которых накоплены экспериментальные данные, разработана процедура извлечения и проведен анализ данных величины энергии pp -состояния.

2. КИНЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для определения оптимальных параметров эксперимента было проведено двухэтапное кинематическое моделирование реакции $d + {}^1\text{H} \rightarrow p + p + n$. На первом этапе моделировалась двухчастичная реакция $d + {}^1\text{H} \rightarrow (pp) + n$ при энергии дейтронов 15.3 МэВ, определялись углы вылета и кинетические энергии нейтрона и pp -пары. На втором этапе рассматривалась реакция трехчастичного развала $d + {}^1\text{H} \rightarrow p + p + n$, при этом угол вылета “развального” протона выбирается близким к углу вылета pp -пары. Проведенное моделирование показало, что при определенных кинематических условиях имеется зависимость формы энергетического распределения “развальной” частицы (двух пиков в энергетическом спектре протонов) от энергии квазисвязанного синглетного pp -состояния. Присутствие двух пиков в энергетическом спектре протонов объясняется тем, что в реакциях с образованием и раз-

¹⁾ Институт ядерных исследований Российской академии наук, Москва, Россия.

²⁾ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, Москва, Россия.

* E-mail: vyacheslavmitsuk@yandex.ru

валом виртуального pp -состояния при условии детектирования “развального” протона под углом, близким к углу вылета pp -системы, попасть в детектор могут только частицы от развала pp -состояния, вылетающие в системе центра масс или вперед ($\sim 0^\circ$), или назад ($\sim 180^\circ$). При этом разность между энергиями в спектре зависит от величины энергии pp -состояния. Поэтому сравнение полученного в эксперименте энергетического спектра протонов с результатами моделирования позволит определить энергию виртуального квазисвязанного pp -состояния в трехчастичной реакции $d + {}^1\text{H} \rightarrow p + p + n$. Подробно кинематическое моделирование представлено в [5, 6].

На рис. 1 представлена экспериментальная схема, спроектированная по результатам проведенного кинематического моделирования. Протоны регистрируются под углом $18^\circ \pm 2^\circ$ телескопом кремниевых ΔE – E -детекторов. Диапазон измерения энергии протонов 0.5–9 МэВ. С кремниевых детекторов сигналы поступают на предусилители, усилители, и затем сигнал от E -детектора поступает на формирователь со следящим порогом (ФСП),

а от ΔE -детектора — на цифровой сигнальный процессор (ЦСП). Нейтроны регистрируются под углом $38^\circ \pm 1.5^\circ$ по другую сторону от оси пучка жидким водородосодержащим сцинтиллятором EJ-301. Диапазон измерения энергии нейтронов 2–6 МэВ. Сигнал от нейтронного детектора через усилитель поступает на другой ФСП. Через ФСП сигналы от E -детектора и нейтронного детектора поступают на время-амплитудный преобразователь, позволяющий отбирать такие события, в которых время пролета соответствует диапазону энергий нейтрона, установленному в ходе кинематического моделирования. Оцифровывание сигналов осуществляется с помощью ЦСП DT5720, через буферную память которого они передаются в основной компьютер. Обработка информации ведется в режиме offline и заключается в определении амплитуд и площадей импульсов, определении времен возникновения сигналов в детекторах, цифровом анализе формы импульсов для n – γ -разделения, отборе совпадающих событий и получении энергетических и временных спектров.

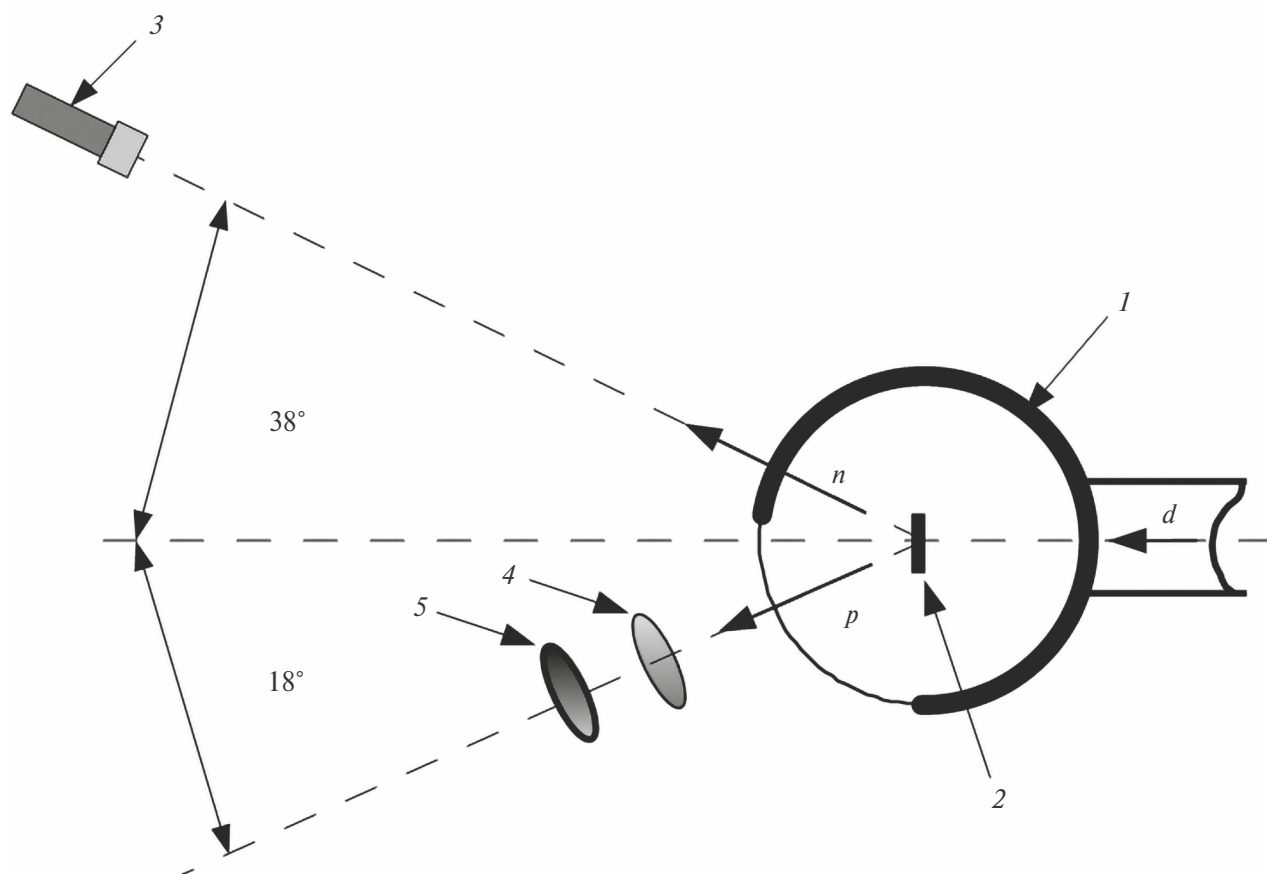


Рис. 1. Экспериментальная схема, спроектированная по результатам кинематического моделирования: 1 — вакуумная камера рассеяния (\varnothing 23 см с выходным окном из лавсана толщиной 20 мкм), 2 — мишень CH_2 (толщина 30 мкм), 3 — нейтронный детектор (\varnothing 5 см, толщина 5 см), 4 — ΔE -детектор (\varnothing 5 мм, толщина 25 мкм), 5 — E -детектор (\varnothing 10 мм, толщина 1000 мкм).

3. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Экспериментальные данные обрабатывались по следующему алгоритму.

1. Обработка осциллограмм сигналов от детекторов заряженных частиц и нейтронов, время-амплитудного преобразователя, включая разделение нейтронов и гамма-квантов по процедуре PSD (на данном этапе производится анализ данных, позволяющий выделить преимущественно события, соответствующие физическим процессам, при значительном подавлении фона).

2. Выделение событий, соответствующих протонам на ΔE – E -диаграмме.

3. Восстановление энергий протонов, образующихся в мишени.

4. Анализ спектров восстановленных энергий протонов, измеренных в совпадении с нейтронами.

На рис. 2 представлена полученная в эксперименте двумерная ΔE – E -диаграмма. С учетом всех экспериментальных особенностей (толщины поглощающих слоев детектирующей системы, энергетические пороги в детекторах и т.д.) отбирались события, соответствующие протонам в диапазоне потерь в E -детекторе от 1 до 8 МэВ. На диаграмме на протонном локусе отмечена область моделированных событий от развала синглетной pp -системы с $E_{pp} = 400 \pm 100$ кэВ и углом вылета обоих протонов в интервале $18^\circ \pm 2^\circ$. Также на рис. 2 отмечены “пятна”, соответствующие нескольким фоновым двухчастичным реакциям. В результате моделирования были получены величины энергий, соответствующих центрам этих “пятен”, которые позволили значительно расширить область калибровки кремниевых детекторов, выполненной при помощи источника ^{226}Ra .

Отбор событий протонного локуса в совпадении с нейтронами приводит к энергетическим корреляциям $E_p - E_n$, представленным на рис. 3. Видно

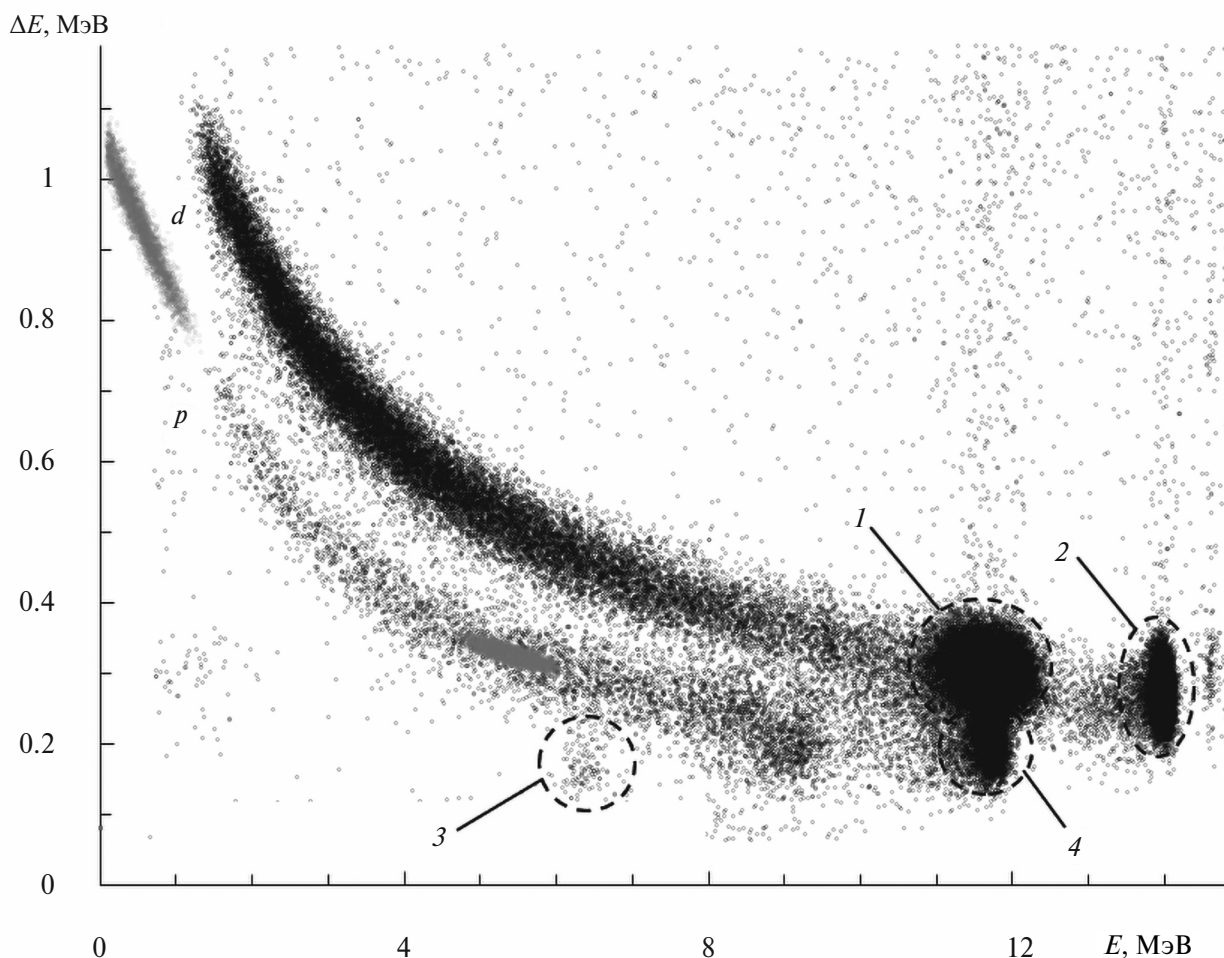


Рис. 2. Экспериментальная ΔE – E -диаграмма. “Пятна” соответствуют реакциям: 1 — $d + p \rightarrow d + p$; 2 — $d + {}^{12}\text{C} \rightarrow d + {}^{12}\text{C}$; 3 — $d + {}^{12}\text{C} \rightarrow p + {}^{13}\text{C}$; 4 — $d + p \rightarrow p + d$. Серая область на протонном локусе — моделированные события от развала синглетной pp -системы с $E_{pp} = 400 \pm 100$ кэВ и углом вылета обоих протонов в интервале $18^\circ \pm 2^\circ$.

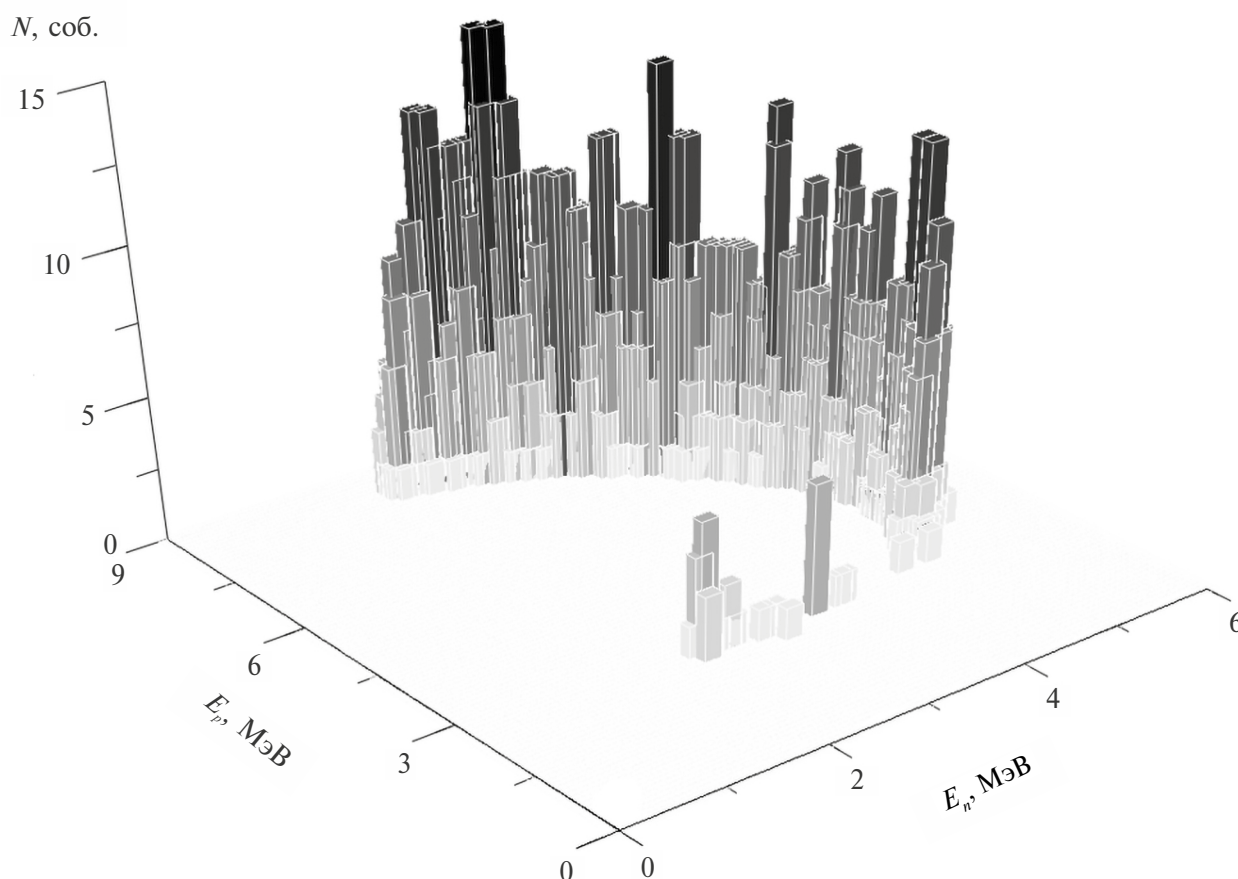


Рис. 3. Энергетические корреляции $E_p - E_n$, измеренные в реакции $d + {}^1\text{H} \rightarrow p + p + n$ при $\Theta_p = 18^\circ \pm 2^\circ$ и $\Theta_n = 38^\circ \pm 1.5^\circ$.

достаточно равномерное заполнение области в интервале энергий протонов от ~ 2.7 до 9 МэВ. Протоны с энергией менее 2.7 МэВ не долетают до E -детектора, поэтому проецирование двумерного распределения на ось E_p не приводит к двухпиковой структуре в энергетическом спектре протонов. Это подтверждается также практически полным отсутствием экспериментальных точек в моделированной области событий от развала синглетной pp -системы с $E_{pp} = 400 \pm 100$ кэВ в области низкоэнергетического пятна, показанной на рис. 2.

Решение уравнений законов сохранения энергии и импульса дает возможность восстановить энергию, импульс и угол вылета нерегистрируемой частицы. Кроме того, дополнительный отбор по массе нерегистрируемой частицы, соответствующей массе протона с ошибкой определения не более 1%, на наш взгляд, исключает вклад фоновой реакции $d + {}^{12}\text{C} \rightarrow p + n + {}^{12}\text{C}$ в область интересующих событий реакции $d + {}^1\text{H} \rightarrow p + n + p$. Восстановление угла вылета нерегистрируемого протона позволяет отобрать экспериментальные события с вылетом обоих “развальных” протонов под углом, близким к углу вылета синглетной

pp -системы. Поскольку оба протона от развала pp -пары коррелируют по энергии (один имеет большую энергию, а другой — меньшую), то протоны с меньшей энергией не долетают до E -детектора и не регистрируются $\Delta E-E$ -системой, однако восстановить значение энергии такого нерегистрируемого протона ниже порога регистрации возможно. Таким образом, спектры энергий обоих протонов были просуммированы для извлечения значения энергии виртуального синглетного pp -состояния [7]. Форма итогового спектра по энергии протонов сильно зависит от отбора по углу вылета нерегистрируемых протонов, на рис. 4 показаны несколько вариантов таких спектров в зависимости от углового захвата нерегистрируемых протонов. Видно, что с увеличением углового захвата начинает замываться долина между пиками. Для извлечения величины энергии виртуального синглетного pp -состояния использовался спектр при угле вылета нерегистрируемых протонов $18^\circ \pm 2^\circ$, соответствующий угловому акцептансу $\Delta E-E$ -системы.

На рис. 5 представлено сравнение полученного в эксперименте в совпадении с нейтронами энер-

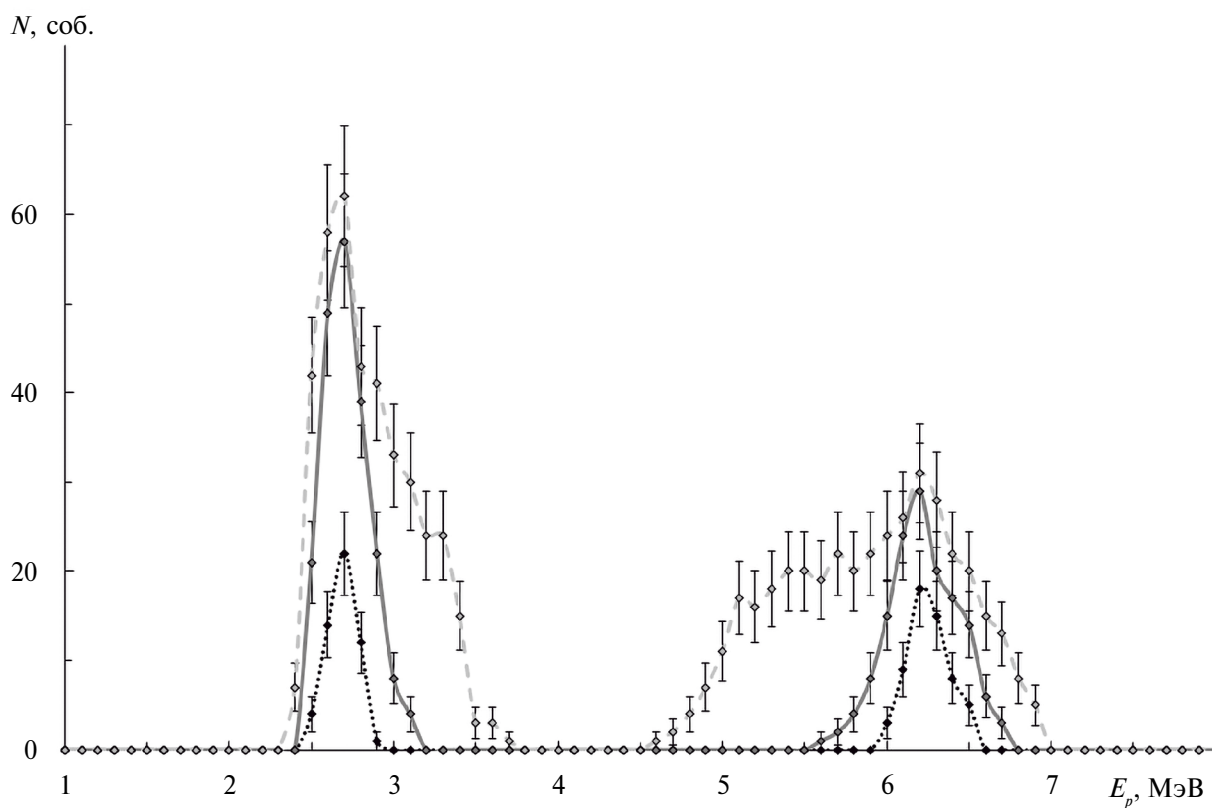


Рис. 4. Итоговый спектр по энергии протонов, измеренный в совпадении с нейтронами, в зависимости от угла вылета второго регистрируемого протона $\Theta_p = 18^\circ \pm 0.5^\circ$ (точечная кривая), $\Theta_p = 18^\circ \pm 2^\circ$ (сплошная) и $\Theta_p = 18^\circ \pm 4^\circ$ (штриховая).

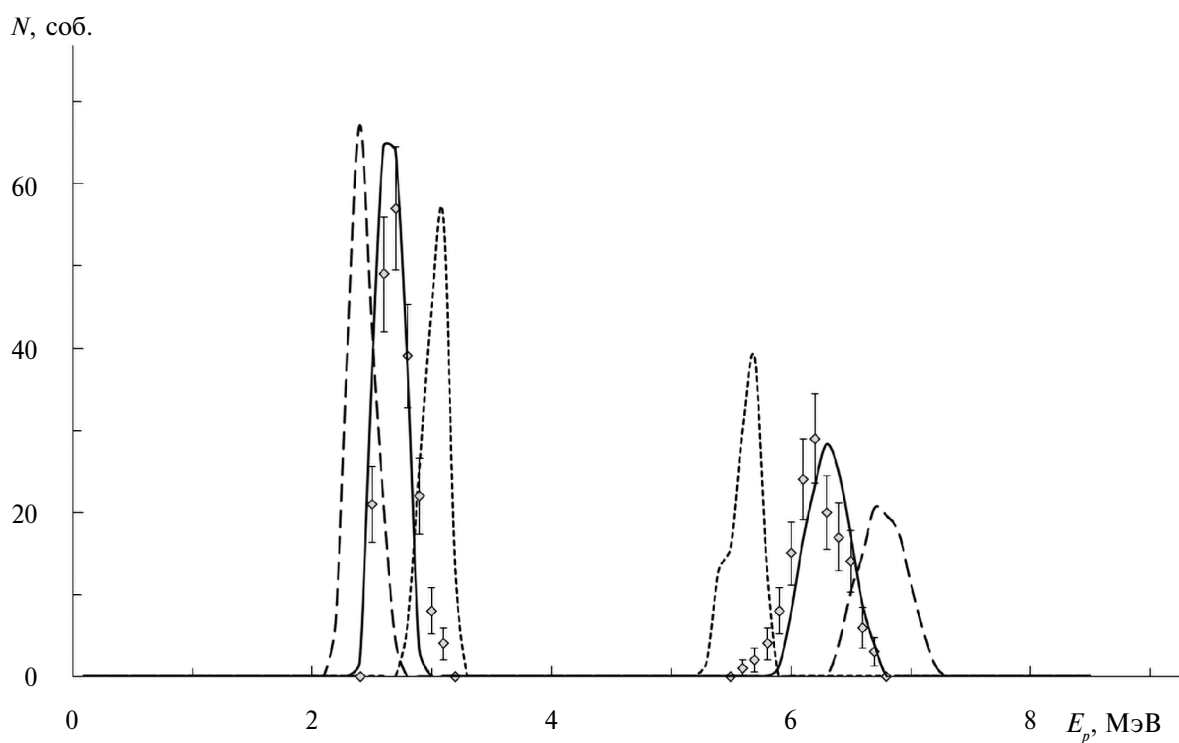


Рис. 5. Сравнение полученного в эксперименте энергетического спектра протонов с моделированными спектрами, соответствующими $E_{pp} = 200 \pm 10$ (точечная кривая), 400 ± 50 (сплошная), 600 ± 50 кэВ (штриховая).

гетического спектра протонов с моделированными спектрами, соответствующими $E_{pp} = 200 \pm 10$ (точечная линия), 400 ± 50 (сплошная линия), 600 ± 50 (пунктирная линия) кэВ. Из рис. 5 видно, что полученный в эксперименте спектр ближе всего соответствует величине $E_{pp} = 400 \pm 50$ кэВ, что позволяет ориентироваться на примерную величину E_{pp} при использовании метода χ^2 .

Величина E_{pp} определялась в два этапа по методу минимума χ^2 . На первом этапе рассматривалась зависимость χ^2 от ΔE_{pp} для различных значений E_{pp} (величина ΔE_{pp} представляет собой ширину интервала, в котором отбираются события, и задает оптимальные границы определения E_{pp}). На рис. 6 представлены несколько вариантов таких зависимостей. Отсюда, вычислив наименьшее значение χ^2 , для каждого фиксированного E_{pp} можно определить оптимальное значение $\Delta E_{pp \text{ опт}}$. Таким образом, на первом этапе был получен массив пар $(E_{pp}; \Delta E_{pp \text{ опт}})$.

На втором этапе рассматривалась зависимость χ^2 от массива пар $(E_{pp}; \Delta E_{pp \text{ опт}})$. Для определения величины E_{pp} значения $\chi^2(E_{pp}; \Delta E_{pp \text{ опт}})$ аппроксимировались квадратичным полиномом (рис. 7).

Таким образом, проведенный χ^2 -анализ показал, что наименьшее значение полинома достигается при энергии виртуального синглетного pp -состояния $E_{pp} = 375 \pm 5$ кэВ, $\Delta E_{pp} = 70 \pm 3$ кэВ.

В табл. 1 представлено сравнение экспериментальных данных, полученных в настоящей работе, с результатами других экспериментов [8–10]. В работах [8–10] результаты представлены либо в виде a_{pp} , либо в виде E_{pp} . В табл. 1 звездочкой обозначены пересчитанные нами значения E_{pp} и a_{pp} при значении эффективного радиуса $r_{pp} = 2.85$ Фм [11]. Для пересчета значений E_{pp} и a_{pp} использовалась формула (3) из работы [12]. Для вычисления погрешности величины a_{pp} в случае результата настоящей работы использовалась величина ΔE_{pp} . Пересечение доверительных интервалов результата настоящей работы и данных работы [10] может указывать на эффективное усиление pp -взаимодействия в реакциях $d + {}^2\text{H}$ и $d + {}^1\text{H}$ при близких первичных энергиях.

Результаты настоящей работы и группы Шанхайского института ядерных исследований (Китай) [10] существенно превышают по абсолютному значению величину $a_{pp} = -7.8063 \pm 0.0026$ Фм, из-

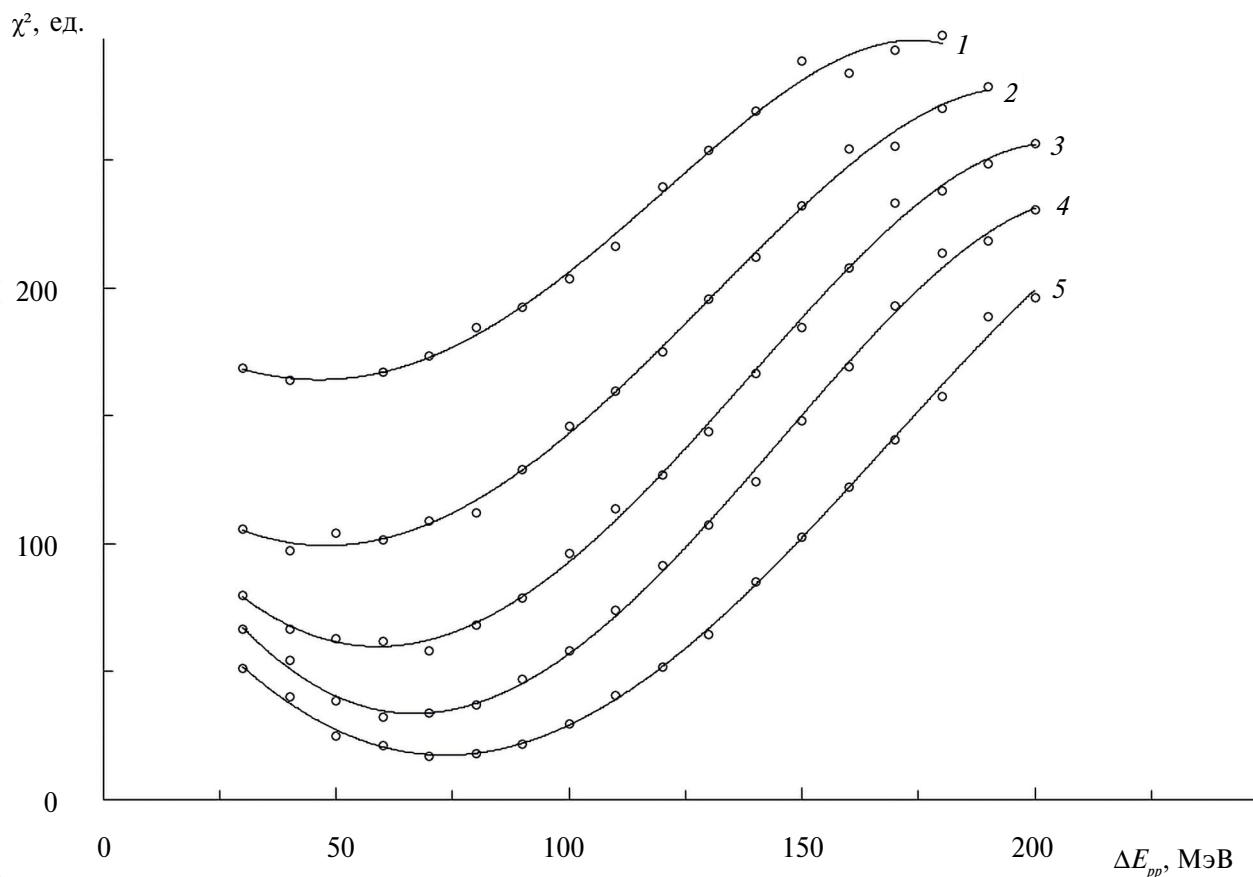


Рис. 6. Зависимость χ^2 от ΔE_{pp} для различных значений E_{pp} . Кривые соответствуют значениям E_{pp} : 1 — 330, 2 — 340, 3 — 350, 4 — 360, 5 — 375 кэВ.

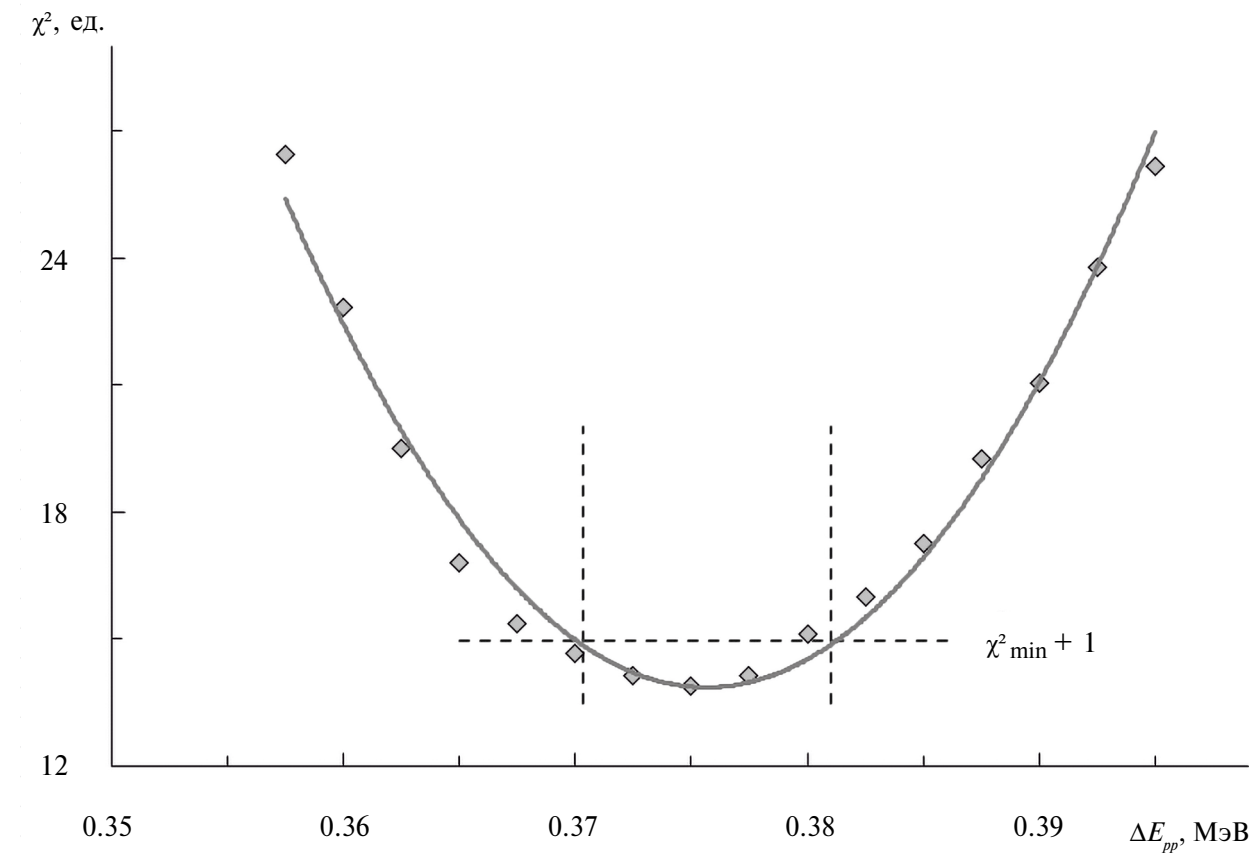


Рис. 7. Зависимость χ^2 от E_{pp} . Каждому значению E_{pp} соответствует свое оптимальное значение $\Delta E_{pp\text{ опт.}}$. Кривая — аппроксимация квадратичным полиномом. Штриховыми линиями показаны ошибки в определении E_{pp} .

Таблица 1. Сравнение результатов измерения величин E_{pp} и a_{pp} , полученных в различных исследовательских группах (результаты, отмеченные *, пересчитаны из значений E_{pp} или a_{pp} , при значении эффективного радиуса $r_{pp} = 2.85$ Фм [11])

Реакция	E_0 , МэВ	E_{pp} , кэВ	a_{pp} , Фм	Литература
свободное pp -рассеяние	0–30	510*	-7.8063 ± 0.0026	[8]
$d + {}^1\text{H} \rightarrow p + p + n$	52.3	$550 \pm 70^*$	-7.5 ± 0.5	[9]
$d + {}^2\text{H} \rightarrow p + p + n + n$	15.7	450 ± 50	$-8.4^{+0.5}_{-0.6}^*$	[10]
$d + {}^1\text{H} \rightarrow p + p + n$	15.3	375 ± 5	$-9.2^{+0.8}_{-1.1}^*$	настоящая работа

влеченную из эксперимента по свободному рассеянию протона на протоне [8], в то время как данные Института экспериментальной ядерной физики (Карлсруэ, Германия) [10] согласуются с этим значением. Можно предположить возможное объяснение данной картины в рамках дибарионной концепции ядерных сил, которая предсказывает достаточно сильное $3N$ -взаимодействие, обусловленное обменом легким скалярным σ -мезоном между синглетом (дипротоном) и третьей частицей (нейтроном или динейтронной парой) [13]. При этом влияние этого взаимодействия на низкоэнергетические

характеристики pp -взаимодействия может зависеть от скорости разлета фрагментов. Можно предположить, что при более высокой энергии реакции развала время, когда все три частицы (два протона и нейтрон или два протона и динейтронная пара) находятся близко друг к другу меньше, и, следовательно, вклад $3N$ -сил также становится меньше.

Для подтверждения этого предположения планируется проведение других экспериментов, в частности, на пучках протонов с энергией 7.5 МэВ и пучках дейтронов с энергией 15.3 МэВ циклотро-

на У-120 НИИЯФ МГУ по исследованию реакций $p + {}^2\text{H} \rightarrow p + p + n$ и $d + {}^2\text{H} \rightarrow p + p + n + n$. Такие исследования либо подтверждают наше предположение о влиянии $3N$ -сил на извлекаемые низкоэнергетические характеристики pp -взаимодействия, либо опровергнут их. Планируется также проведение теоретического исследования с целью получения “ядерной” длины pp -рассеяния в результате удаления кулоновского вклада из измеренной нами величины длины pp -рассеяния. Такое исследование необходимо для определения степени НЗС ядерных сил.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного кинематического моделирования реакции $d + {}^1\text{H} \rightarrow p + p + n$ установлено, что анализ формы энергетического спектра “развалных” протонов при определенных условиях эксперимента может дать информацию о низкоэнергетических характеристиках pp -взаимодействия. Определены оптимальные параметры эксперимента и схема экспериментальной установки. В результате нескольких пучковых сеансов, проведенных на ускорителе У-120 НИИЯФ МГУ, исследована реакция $d + {}^1\text{H} \rightarrow p + p + n$. В кинематически полном эксперименте при энергии дейтронов 15.3 МэВ регистрировались в совпадении протон от развала синглетного pp -состояния и вторичный нейтрон. В результате исследования определены низкоэнергетические характеристики pp -взаимодействия: величина энергии виртуального синглетного pp -состояния $E_{pp} = 375 \pm 5$ кэВ и соответствующее ей значение синглетной длины pp -рассеяния $a_{pp} = -9.2_{-1.1}^{+0.8}$ Фм. Высказано предположение, что на извлекаемые характеристики pp -взаимодействия в реакциях с двумя протонами в конечном состоянии может оказывать вклад $3N$ -сил. Предполагается проведение дальнейших исследований с большей статистикой и лучшими фоновыми условиями. Также предполагаются работы по измерениям тока пучка для получения оценок сечения данной реакции.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 6 “Ядерная и радиационная физика”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. G. J. Stoks, R. A. M. Klomp, C. P. F. Terheggen, and J. J. de Swart, *Phys. Rev. C* **49**, 2950 (1994).
2. Е. С. Конобеевский, С. В. Зуев, М. В. Мордовской, С. И. Поташев, И. М. Шарапов, *ЯФ* **76**, 1479 (2013) [*Phys. At. Nucl.* **76**, 1398 (2013)].
3. C. B umer, D. Frekers, E.-W. Grewe, P. Haefner, S. Hollstein, B. C. Junk, A. Korff, S. Rakers, R. Schmidt, A. M. van den Berg, B. Davids, M. N. Harakeh, M. Hunyadi, M. A. de Huu, H. J. W rtche, N. Blasi, *et al.*, *Phys. Rev. C* **71**, 044003 (2005).
4. Е. С. Конобеевский, С. В. Зуев, А. А. Каспаров, В. И. Кукулин, В. М. Лебедев, М. В. Мордовской, В. Н. Померанцев, А. В. Спасский, *ЯФ* **81**, 555 (2018) [*Phys. At. Nucl.* **81**, 595 (2018)].
5. Е. С. Конобеевский, А. А. Афонин, С. В. Зуев, А. А. Каспаров, В. М. Лебедев, В. В. Мицук, М. В. Мордовской, А. В. Спасский, *Изв. РАН. Сер. физ.* **84**, 492 (2020) [*Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys.* **84**, 378 (2020)].
6. Е. С. Конобеевский, А. А. Афонин, А. А. Каспаров, В. М. Лебедев, В. В. Мицук, М. В. Мордовской, А. В. Спасский, С. В. Зуев, *Изв. РАН. Сер. физ.* **85**, 685 (2021) [*Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys.* **85**, 530 (2021)].
7. A. A. Kasparov, M. V. Mordovskoy, V. V. Mitsuk, V. M. Lebedev, and A. V. Spassky, *Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys.* **88**, 1189 (2024).
8. J. R. Bergervoet, P. C. van Campen, W. A. van der Sanden, and J. J. de Swart, *Phys. Rev. C* **38**, 15 (1988).
9. H. Br ckmann, W. Kluge, H. Matth y, L. Sch nzler, and K. Wick, *Phys. Lett. B* **30**, 460 (1969).
10. Zhang Ying-ji, Yang Jin-qing, Zhang Jie, and He Jian-hua, *Phys. Rev. C* **45**, 528 (1992).
11. G. A. Miller, B. M. K. Nefkens, and I. Šlaus, *Phys. Rep.* **194**, 1 (1990).
12. А. А. Каспаров, М. В. Мордовской, А. А. Афонин, С. И. Поташев, В. В. Мицук, *ЯФ* **86**, 245 (2023) [*Phys. At. Nucl.* **86**, 44 (2023)].
13. В. И. Кукулин, В. Н. Померанцев, О. А. Рубцова, М. Н. Платонова, *ЯФ* **82**, 521 (2019) [*Phys. At. Nucl.* **82**, 934 (2019)].

DETERMINING LOW-ENERGY CHARACTERISTICS OF THE pp INTERACTION IN THE $d + {}^1\text{H} \rightarrow p + p + n$ REACTION

  2025 A. A. Kasparov¹), M. V. Mordovskoy¹), V. V. Mitsuk¹), V. M. Lebedev²), A. V. Spassky²)

¹*Institute for Nuclear Research of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²*Skobeltsyn Research Institute of Nuclear Physics, Moscow State University, Moscow, Russia*

The study results of the $d + {}^1\text{H} \rightarrow p + p + n$ reaction are presented. A kinematically complete experiment with using a deuteron beam energy of 15.3 MeV at the U-120 accelerator of the MSU SINP was carried out. A proton from the breakup of the singlet pp state and a secondary neutron were registered in coincidence. As a result of the study, the low-energy characteristics of pp interaction, namely, the energy value of the virtual singlet pp state and the corresponding value of the pp scattering length were determined.