

УДК 539.172.13

АНАЛИЗ ДАННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ПРОТОН-ПРОТОННЫХ КОРРЕЛЯЦИЙ В РЕАКЦИИ $d + {}^1\text{H} \rightarrow p + p + n$

© 2024 г. А. А. Каспаров¹, М. В. Мордовской¹, В. В. Мицук^{1, *},
В. М. Лебедев², А. В. Спасский²

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

«Институт ядерных исследований Российской академии наук», Москва, Россия

²Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

³Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скobelцына, Москва, Россия

* E-mail: vyacheslav.mitsuk@phystech.edu

Поступила в редакцию 23.05.2024

После доработки 25.06.2024

Принята к публикации 31.07.2024

Рассмотрена процедура извлечения из экспериментальных данных величины энергии виртуального синглетного протон-протонного состояния. Из сравнения экспериментальных данных с результатами моделирования получено предварительное значение величины E_{pp} в реакции $d + {}^1\text{H} \rightarrow p + p + n$ при энергии дейtronов 15.3 МэВ.

DOI: 10.31857/S0367676524110179, EDN: FKGIIJ

ВВЕДЕНИЕ

Важной задачей для современной ядерной физики является изучение нарушения зарядовой симметрии (НЗС). Одним из отражений НЗС является различие протон-протонной (pp -) и нейтрон-нейтронной (nn -) длин рассеяния. Протон-протонную длину рассеяния получают из прямого эксперимента по рассеянию протонов на водородной мишени [1]. Ввиду отсутствия чисто нейтронных мишней данные о nn -длине рассеяния получают из реакций с двумя нейтронами в конечном состоянии, например $\pi^- + d \rightarrow n + n + \gamma$ [2, 3], $d + d \rightarrow p + p + n + n$ [4] или $n + d \rightarrow n + n + p$ [5].

В недавней работе [6] было показано, что на извлекаемую величину nn -длины рассеяния может влиять взаимодействие nn -пары и третьей частицы (протон или протонная пара). Можно предположить, что аналогичное влияние на извлекаемую величину pp -длины рассеяния (или связанной с ней энергией pp -синглетного состояния) в реакциях $d + p \rightarrow p + p + n$ или $d + d \rightarrow p + p + n + n$ с тремя и четырьмя частицами в конечном состоянии могут оказать нейтрон или нейтронная пара.

В ИЯИ РАН совместно с НИИЯФ МГУ на циклотроне У-120 в настоящее время проводятся работы по исследованию реакции $d + {}^1\text{H} \rightarrow p + p + n$ при энергии дейtronов 15.3 МэВ, целью которых является исследование влияния $3N$ -сил на

величины извлекаемых низкоэнергетических характеристик pp -рассеяния – энергии виртуального состояния и синглетной длины рассеяния. Были проведены несколько пучковых сеансов, в результате которых накоплена часть необходимых экспериментальных данных, опробована процедура извлечения и анализ предварительных данных величины энергии pp -состояния.

КИНЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для определения оптимальных параметров эксперимента было проведено кинематическое моделирование реакции $d + {}^1\text{H} \rightarrow p + p + n$. Моделирование реакции проведено в два этапа. На первом этапе моделируется двухчастичная реакция $d + {}^1\text{H} \rightarrow (pp) + n$ при энергии пучка дейtronов 15.3 МэВ. Затравочная масса двухпротонной системы берется как $m_{2p} = 2m_p + \varepsilon$. Поскольку искомое значение энергии виртуального уровня в рассматриваемой реакции неизвестно, при моделировании оно бралось в широком интервале $\varepsilon = 0.2 - 0.8$ МэВ. В результате моделирования были определены оптимальные углы вылета нейтрона (38°) и pp -системы (-18°), соответствующие максимально возможным в эксперименте энергиям протонов, а также возможностям установки детекторов заряженных частиц на выходе из камеры

рассеяния. Положительным и отрицательным углам соответствуют углы вылета направо и налево от оси пучка соответственно. На втором этапе моделирования рассматривается трехчастичная реакция $d + {}^1H \rightarrow p + p + n$. При этом углы регистрации нейтрона и протона, брались близкими к значениям углов вылета нейтрона и pp -системы, определенным на первом этапе моделирования ($38^\circ \pm 1.5^\circ$ и $-18^\circ \pm 2^\circ$ соответственно) [7].

Для каждого моделированного события относительная энергия системы двух протонов E_{pp} , т.е. превышение полной энергии pp -системы над ее массой, рассчитывается через кинетические энергии вторичных протонов и угол их разлета в лабораторной системе [8]. Отбор событий со значениями относительной энергии pp -системы ε в интервале $E_{pp} \pm \Gamma$ приводит к двухпиковой структуре в энергетическом спектре протонов [7]. Присутствие двух пиков в энергетическом спектре протонов объясняется тем, что в реакциях с образованием и развалом виртуального pp -состояния при условии детектирования частицы 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 энергии pp -состояния.

Проведенное кинематическое моделирование демонстрирует, что при определенных кинематических условиях имеется прямая зависимость формы энергетического распределения «развальной» частицы от энергии квазисвязанного синглетного состояния. Поэтому сравнение энергетических спектров протонов, полученных в ходе моделирования со спектрами, полученными из эксперимента, позволит определить энергию квазисвязанного pp -состояния в трехчастичной реакции [7, 9].

В результате моделирования были установлены следующие параметры эксперимента:

- 1) Угол регистрации протона: $-18^\circ \pm 2^\circ$.
- 2) Диапазон измерения энергии протонов: 0.5 – 9 МэВ.
- 3) Угол регистрации нейтрона: $38^\circ \pm 1.5^\circ$.
- 4) Диапазон измерения энергии нейтронов: 2 – 6 МэВ.

На рис. 1 представлена экспериментальная схема, спроектированная по результатам кинематического моделирования реакции $d + {}^1H \rightarrow p + p + n$.

Оцифровывание сигналов осуществляется с помощью цифрового сигнального процессора CAEN DT5720. Через буферную память DT5720 оцифрованные сигналы передаются в основной компьютер для обработки в режиме off-line.

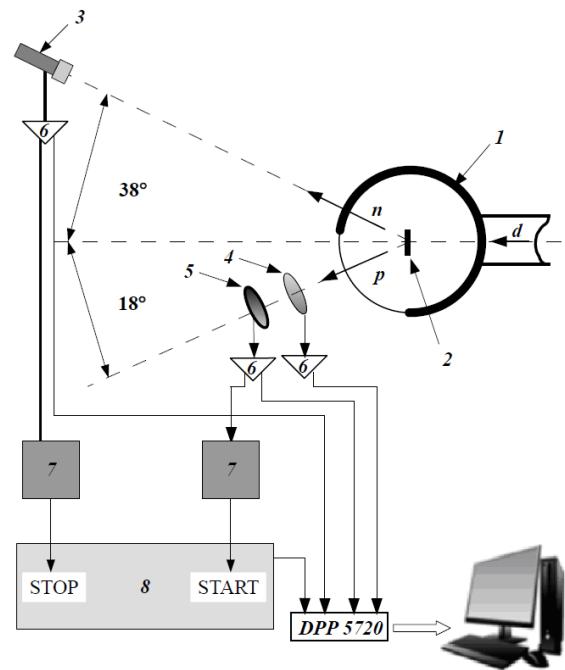


Рис. 1. Схема экспериментальной установки, спроектированная по результатам кинематического моделирования: 1 – вакуумная камера рассеяния ($\varnothing 23$ см), 2 – мишень CH_2 , 3 – нейтронный детектор на основе жидкого сцинтиллятора EJ301, 4 – кремниевый ΔE -детектор (25 мкм), 5 – кремниевый E -детектор (1000 мкм), 6 – система, включающая в себя предустановленный и/или усиливший элемент, 7 – формирователь со следящим порогом, 8 – времязадающий преобразователь.

АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Накопленные в результате нескольких пучковых сеансов на ускорителе У-120 НИИЯФ МГУ экспериментальные данные представляют собой набор из четырех совпадающих по времени осциллографм сигналов от детекторов заряженных частиц, нейтронов и времязадающего преобразователя (ВАП), соответствующих входам ЦСП 5720. Они составляют событие. Обработка происходит по следующему алгоритму:

- 1) В осциллографмах фиксируются параметры формы сигналов: амплитуды, длительность фронтов и спадов, площади импульсов, время возникновения сигналов с привязкой по доле амплитуды (метод формирователя со следящим порогом). Для канала, соответствующего регистрации сигналов сцинтилляционного детектора, по форме импульса в осциллографмах маркируются сигналы, предположительно отвечающие регистрации нейтрона или γ -кванта (процедура PSD, от англ. pulse shape discrimination — разделение по форме импульса) [10]. В случае нескольких сигналов в осциллографмах по калибровочным данным отбраковываются неподходящие сигналы. Из полученных таким образом данных строятся энергетические и временные спектры.

2) Отбор событий на основе анализа спектров амплитуд, времен и разниц времен сигналов от детекторов и ВАП.

3) Отбор событий с участием нейтронов от событий с участием γ -квантов. Энергия нейтронов определяется по времязпролетной методике, рас-

соответствует интервалу потерь протонов в E -детекторе от 1 до 8 МэВ. На рис. 2 также отмечены области, соответствующие некоторым фоновым реакциям: $d + p \rightarrow p + d$, $d + {}^{12}\text{C} \rightarrow d + {}^{12}\text{C}$ (g.s.) и $d + {}^{12}\text{C} \rightarrow p + {}^{13}\text{C}$. В результате моделирования были получены величины энергий, соответствующих этим областям, что позволило использовать их для дополнительной калибровки ΔE - и E -детектора.

Дальнейшая обработка экспериментальных данных производилась по следующему алгоритму:

1) Восстановление энергий протонов, образующихся в CH_2 -мишени. Для этого было проведено моделирование прохождения протонов через все слои поглощающих слоев веществ $\Delta E-E$ -системы (мишень, выходное окно камеры рассеяния, воздух, вещество детекторов).

2) Отбор по массе и углу вылета нерегистрируемой частицы, вычисляемым по законам сохранения энергии и импульса. При этом масса недетектируемой частицы должна соответствовать массе протона, а ее угол вылета находиться в пределах $-18^\circ \pm 2^\circ$.

3) Анализ спектров восстановленных энергий регистрируемых и нерегистрируемых протонов

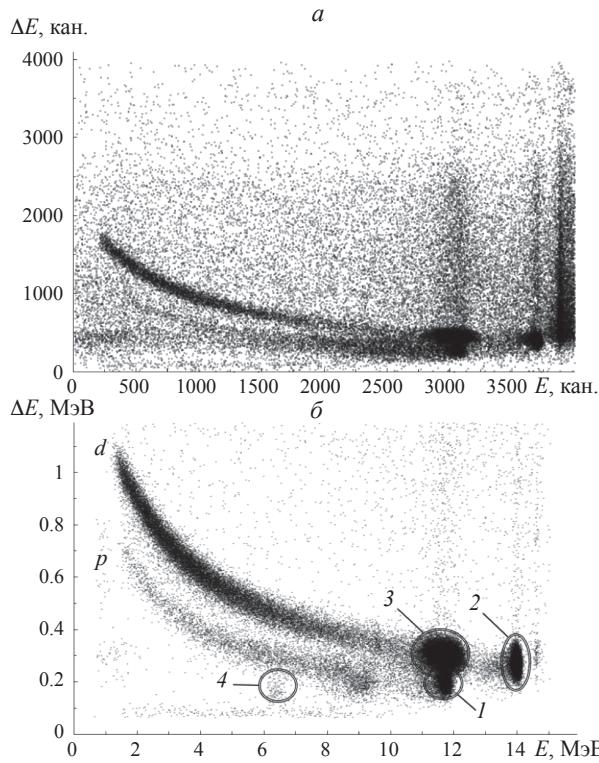


Рис. 2. ΔE - E -диаграммы, отражающие результаты эксперимента до обработки экспериментальных данных (а) и после предварительной обработки (б). Области соответствуют заряженным частицам, образовавшимся в реакциях: 1 – протонам в $d + p \rightarrow p + d$; 2 – дейтронам в $d + {}^{12}\text{C} \rightarrow d + {}^{12}\text{C}$ (g.s.); 3 – дейтронам в $d + p \rightarrow d + p$, 4 – протонам в $d + {}^{12}\text{C} \rightarrow p + {}^{13}\text{C}$.

стояние от камеры рассеяния до детектора нейтронов составляет ~ 120 см.

4) Выделение событий, соответствующих протонам на ΔE - E -диаграмме (см рис. 2). ΔE - E -система размещена вплотную к вакуумной камере.

В результате обработки экспериментальных данных становится возможным отделить события с протонами от событий с дейтронами в конечном состоянии. Далее необходимо отобрать события с протонами в конечном состоянии в интервале энергий 0.5 – 9 МэВ. С учетом энергетических порогов детекторов и ионизационных потерь протонов в ΔE - E -системе (с учетом всем поглощающих слоев веществ на пути в детекторы) можно сделать вывод, что интересующая нас область

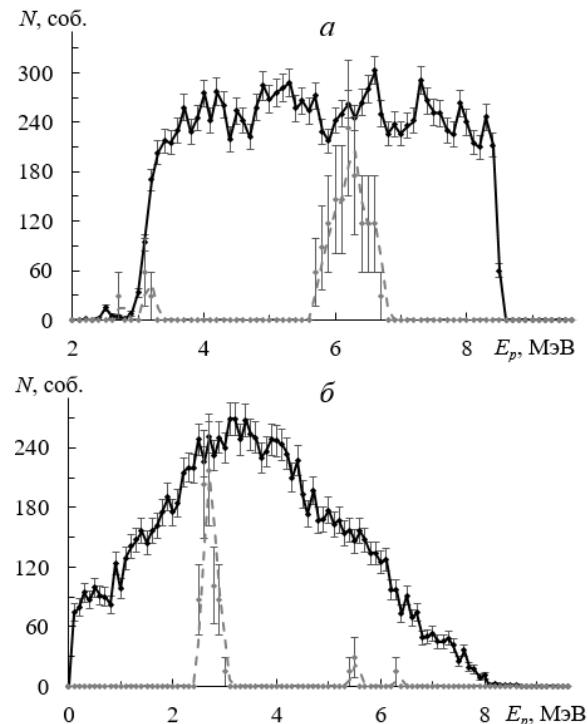


Рис. 3. Экспериментальные спектры: восстановленный экспериментальный спектр энергии протонов до (сплошная черная линия) и после (серая пунктирная линия) отбора по массе и углу вылета второй заряженной частицы (а); аналогичный восстановленный экспериментальный спектр энергии нерегистрируемой частицы (б). Спектры после отбора построены по вспомогательной оси Y .

и сравнение данных спектров с результатами моделирования.

Рассмотрим подробно пункт 3 алгоритма обработки. Из рис. 3 видно, что спектр, обозначенный сплошной линией на рис. 3а имеет выраженный пик в районе ~ 6.5 МэВ. Лишь несколько экспериментальных точек лежат в области второго пика ~ 2.5 МэВ. Это связано с тем, что протоны с энергиями менее 3 МэВ не долетают до E -детектора. Однако в энергетическом спектре второго нерегистрируемого протона наблюдается обратная ситуация, практически все события лежат области низкоэнергетичного пика. Поэтому к энергетическому спектру регистрируемых протонов можно добавить точки низкоэнергетичного пика нерегистрируемых протонов (использовать сумму этих спектров) для извлечения предварительного значения энергии pp -состояния.

На рис. 4 представлено сравнение полученного в эксперименте предварительного энергетического спектра протонов с несколькими моделями спектрами, отобранных при различных интервалах энергии pp -состояния: 100 ± 10 , 400 ± 90 и 600 ± 120 кэВ. Предварительно наилучшее согласие

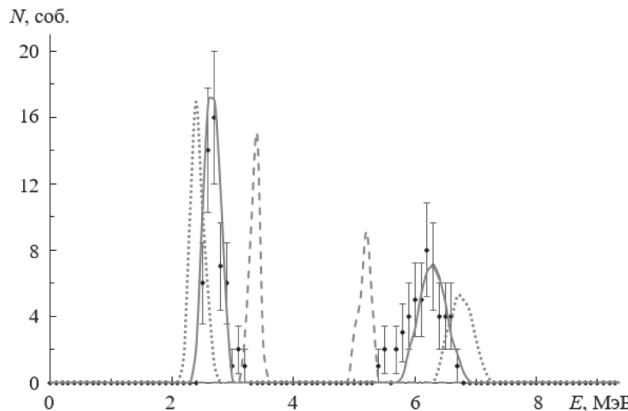


Рис. 4. Сравнение полученного предварительного экспериментального спектра протонов (точки) с моделями спектрами, отобранным при значении $E_{pp} \pm \Gamma = 100 \pm 10$ (пунктирная линия), 400 ± 90 (сплошная линия), 600 ± 120 кэВ (точечная линия).

экспериментального спектра с моделированным происходит при значении энергии виртуального синглетного pp -состояния 400 кэВ, но с достаточно большой шириной отбора $\Gamma \approx 90$ кэВ моделированных событий по E_{pp} .

Сравнить полученные предварительно данные по E_{pp} можно с результатом исследовательской группы из Шанхайского института ядерных исследований, опубликованным в 1992 г. [11]. В работе исследовалась

реакция $d + {}^2\text{H} \rightarrow p + p + n + n$ при энергии дейтронов 15.7 МэВ и было получено среднее значение величины $E_{pp} = 450 \pm 50$ кэВ. Как результат настоящей работы, так и работы [11] не согласуются со значением величины энергии $E_{pp} \approx 510$ кэВ, которое соответствует измеренному в свободном pp -рассеянии значению длины рассеяния $a_{pp} = -7.8063 \pm 0.0026$ Фм (Институт теоретической физики Университета Неймегена, [12]). Стоит отметить, что наблюдается усиление pp -взаимодействия в конечном состоянии в реакциях $d + {}^1\text{H}$ и $d + {}^2\text{H}$. Одной из причин такого усиления может быть влияние $3N$ -сил. Для получения статистически обеспеченных данных необходимо проведение дополнительных измерений, что даст возможность однозначного и более точного извлечения величины E_{pp} .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного кинематического моделирования реакции $d + {}^1\text{H} \rightarrow p + p + n$ установлено, что анализ формы энергетического спектра «разваленных» протонов при определенных условиях эксперимента может дать информацию о величине E_{pp} . В результате нескольких пучковых сеансов, проведенных на ускорителе У-120 НИИЯФ МГУ извлечена предварительная величина энергии виртуального синглетного pp -состояния $E_{pp} \approx 400 \pm 90$ кэВ в реакции $d + {}^1\text{H} \rightarrow p + p + n$ при энергии дейтронов 15.3 МэВ. Однако данные получены с плохой статистической значимостью, что не дает возможности на данном этапе сделать окончательный вывод.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Stoks V.G.J., Klomp R.A.M., Terheggen C.P.F. et al. // Phys. Rev. C. 1994. V. 49. No. 6. P. 2950.
2. Haddok R.P., Salter R.M., Zeller Jr. M. et al. // Phys. Rev. Lett. 1965. V. 14. No. 9. P. 318.
3. Salter R.M., Haddok R.P., Zeller M. et al. // Nucl. Phys. A. 1975. V. 254. P. 241.
4. Baumer C., Frekers D., Grewe E.W. et al. // Phys. Rev. C. 2005. V. 71. No. 4. Art. No. 044003.
5. Конобеевский Е.С., Зуев С.В., Мордовской М.В. и др. // Ядерн. физ. 2013. Т. 76. № 11. С. 1479; Konobeevski E.S., Zuyev S.V., Mordovskoy M.V. et al. // Phys. Atom. Nucl. 2013. V. 76. No. 11. P. 1398.
6. Конобеевский Е.С., Зуев С.В., Каспаров А.А. и др. // Ядерн. физ. 2018. Т. 81. № 5. С. 555; Konobeevski E.S., Zuyev S.V., Kasparov A.A. et al. // Phys. Atom. Nucl. 2018. V. 81. No. 5. P. 595.

7. Конобеевский Е.С., Афонин А.А., Зуев С.В. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2020. Т. 84. № 4. С. 492; Konobeevski E.S., Afonin A.A., Zuyev S.V. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2020. V. 84. No. 4. P. 378.
8. Robson D. // Nucl. Phys A. 1973. V. 204. No. 3. P. 523.
9. Конобеевский Е.С., Афонин А.А., Каспаров А.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 5. С. 685; Konobeevski E.S., Afonin A.A., Kasparov A.A. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 5. P. 530.
10. Зуев С.В., Конобеевский Е.С., Мордовской М.В. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2013. Т. 77. № 7. С. 919; Zuyev S.V., Konobeevski E.S., Mordovskoy M.V. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2013. V. 77. No. 7. P. 834.
11. Ying-ji Z., Jin-qing Y., Jie Z. et al. // Phys. Rev. C. 1992. V. 45. No. 2. P. 528.
12. Bergervoet J.R., van Campen P.C., van der Sanden W.A. et al. // Phys. Rev. C. 1988. V. 38. No. 1. P. 15.

Simulation and analysis of preliminary data of the experiment to study proton-proton correlations in the $d + {}^1\text{H} \rightarrow p + p + n$ reaction

A. A. Kasparov¹, M. V. Mordovskoy¹, V. V. Mitsuk¹, *, V. M. Lebedev², A. V. Spassky²

¹*Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117312, Russia*

²*Skobeltsyn Research Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russia*

* e-mail: vyacheslav.mitsuk@phystech.edu

The procedure for extracting the energy value of a virtual singlet proton-proton state from experimental data is considered. From a comparison of experimental data with simulation results, a preliminary value of E_{pp} in the $d + {}^1\text{H} \rightarrow p + p + n$ reaction at a deuteron energy of 15.3 MeV was obtained.