

УДК 539.172.13

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

© 2023 г. В. В. Мицук<sup>1, \*</sup>, А. А. Афонин<sup>1</sup>, А. А. Каспаров<sup>1</sup>, В. М. Лебедев<sup>2</sup>,  
М. В. Мордовской<sup>1</sup>, А. В. Спасский<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт ядерных исследований Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

“Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”,

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

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

Поступила в редакцию 29.07.2022 г.

После доработки 15.08.2022 г.

Принята к публикации 22.08.2022 г.

Рассмотрен метод определения энергии синглетного квазисвязанного  $pp$ -состояния в реакции  $d + {}^1\text{H} \rightarrow n + p + p$ . Представлены процедура получения экспериментальных данных по измерению длины  $pp$ -рассеяния, а также процедура извлечения из экспериментальных данных величины энергии протон-протонного состояния с использованием метода минимума  $\chi^2$ .

DOI: 10.31857/S0367676522120237, EDN: JGLINF

### ВВЕДЕНИЕ

Важной проблемой для современной ядерной физики является изучение нарушения зарядовой симметрии (НЗС). Примером НЗС является различие синглетных длин  $nn$ - и  $pp$ -рассеяния. Протон-протонную длину рассеяния получают из прямого эксперимента по рассеянию протонов на водородной мишени [1]. Нейтрон-нейтронную длину рассеяния из-за отсутствия нейтронной мишени получают только из реакций с двумя нейтронами в конечном состоянии, например  $d + {}^2\text{H} \rightarrow p + p + n + n$  и  $d + {}^1\text{H} \rightarrow n + n + p$ . Однако в работе [2] показано, что на извлекаемую величину длины  $nn$ -рассеяния может влиять взаимодействие  $nn$ -пары с протоном и протонной парой. Можно предположить, что аналогичное влияние на извлекаемую величину протон-протонной длины рассеяния (или энергии синглетного  $pp$ -состояния) в реакциях с тремя или четырьмя частицами  $d + {}^2\text{H} \rightarrow p + p + n + n$  и  $d + {}^1\text{H} \rightarrow n + p + p$  может оказать нейтрон или нейтронная пара. В ИЯИ РАН в настоящее время проводятся работы по исследованию реакции  $d + {}^1\text{H} \rightarrow n + p + p$ , целью которых является исследование влияния  $3N$ -сил на извлекаемые величины низкоэнергетических характеристик  $pp$ -состояния (длины рассеяния и энергии виртуального  ${}^1S_0$  уровня)

[3–5]. Данное исследование проводится в рамках изучения нуклон-нуклонных корреляций в нескольких реакциях [6–8]. В настоящей работе мы рассмотрим процедуру получения экспериментальных данных по измерению длины  $pp$ -рассеяния, а также процедуру извлечения из экспериментальных данных низкоэнергетических характеристик протон-протонного взаимодействия с использованием метода минимума  $\chi^2$  при сравнении экспериментальных данных с результатами моделирования.

### КИНЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для определения оптимальных параметров эксперимента было проведено кинематическое моделирование реакции  $d + {}^1\text{H} \rightarrow n + p + p$ . Моделирование реакции проведено в два этапа. На первом этапе при энергии пучка дейтронов 15 МэВ рассматривалась двухчастичная реакция  $d + {}^1\text{H} \rightarrow (pp) + n$  с затравочной массой двухпротонной системы  $m_{2p} = 2m_p + E_{pp}$ . Поскольку искомого значения энергии виртуального уровня в рассматриваемой реакции неизвестно, при моделировании оно бралось в широком интервале  $E_{pp} = 0.2\text{--}0.6$  МэВ. С учетом экспериментальных условий (угол установки детектора заряженных частиц должен быть не менее  $15^\circ$ ) были определе-

ны оптимальные углы вылета нейтрона ( $38^\circ \pm 2^\circ$ ) и  $pp$ -пары ( $-18^\circ \pm 1.5^\circ$ ), соответствующие максимально возможным в эксперименте энергиям протонов. Положительным и отрицательным углам соответствуют углы вылета налево и направо от оси пучка, соответственно.

На втором этапе рассматривалась трехчастичная реакция  $d + {}^1\text{H} \rightarrow n + p + p$ , при этом углы регистрации протона и нейтрона берутся близкими к значениям углов вылета нейтрона и  $pp$ -пары, определенными на первом этапе моделирования. Для каждого моделированного события относительная энергия системы двух протонов  $\epsilon$ , т.е. превышение полной энергии  $pp$ -системы над ее массой, рассчитывается через кинетические энергии вторичных протонов и угол их разлета в лабораторной системе [9]. Отбор событий со значениями относительной энергии  $pp$ -системы  $\epsilon$  в интервале  $E_{pp} \pm \Delta E_{pp}$  приводит к структуре в энергетическом спектре протонов (рис. 1). Величина  $\Delta E_{pp}$  определяет ширину интервала энергии  $\epsilon$  и выбирается таким образом, чтобы разбить рассматриваемый диапазон величины  $\epsilon$  на несколько равных промежутков (отбор событий производится для каждого такого промежутка).

Наличие двух пиков в энергетическом спектре протонов объясняется тем, что в реакциях с образованием и развалом виртуального  $pp$ -состояния при условии детектирования 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 пиками в энергетическом спектре зависит от энергии  $pp$ -состояния. Кинематическое моделирование показало, что при определенных кинематических условиях имеется прямая зависимость формы энергетического распределения “развальной” частицы от энергии квазисвязанного состояния, позволяющая определить эту важную характеристику нуклон-нуклонного взаимодействия. Поэтому сравнение энергетических спектров протонов, полученных в ходе моделирования со спектрами, полученными из эксперимента, должно позволить определить энергию квазисвязанного  $pp$ -состояния в трехчастичной реакции. Кинематическое моделирование позволило определить диапазон измерения энергии протонов (0.5–8 МэВ), доступный для исследования  $E_{pp}$  в интервале 200–600 кэВ.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ СХЕМА

По результатам моделирования была создана экспериментальная установка для исследования реакции  $d + {}^1\text{H} \rightarrow n + p + p$  (рис. 2). Измерения

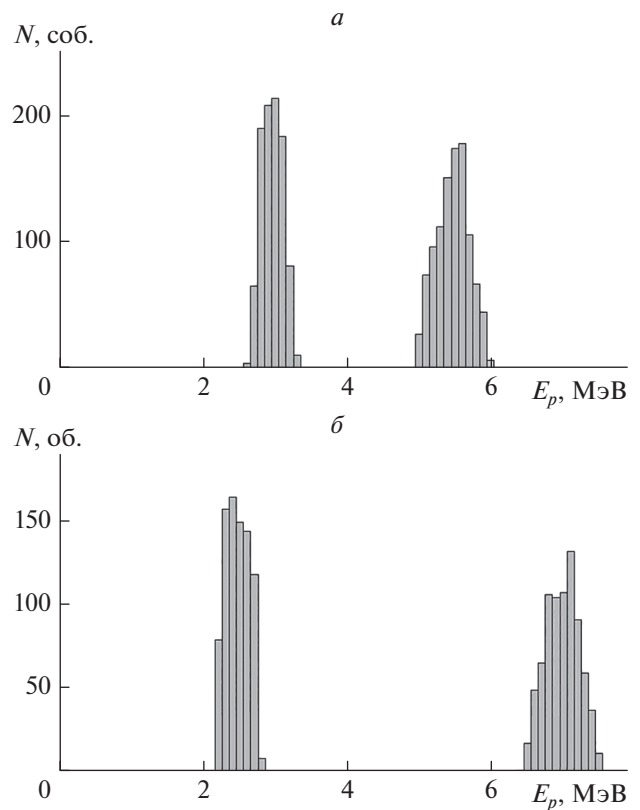
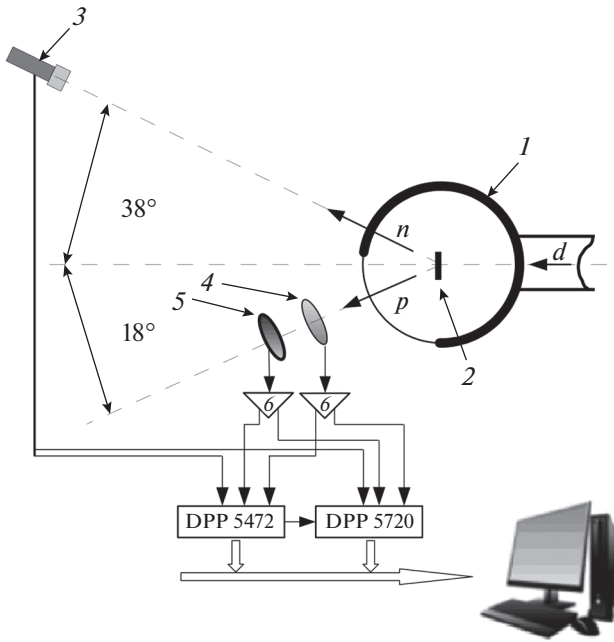


Рис. 1. Энергетические спектры протонов, образующиеся в реакции  $d + {}^1\text{H} \rightarrow n + p + p$  для различных значений  $\epsilon$ :  $200 \pm 50$  (а),  $600 \pm 50$  кэВ (б).

проводятся совместно с НИИЯФ МГУ на пучке дейтронов ускорителя У-120 при энергии 15 МэВ. Схема включает в себя вакуумную камеру рассеяния, мишень  $\text{CH}_2$ , нейтронный детектор, кремниевые  $\Delta E$ - и  $E$ -детекторы с толщинами 24 и 500 мкм, соответственно, а также систему, состоящую из предусилителя и усилителя для каждого детектора, и цифровые сигнальные процессоры (ЦСП) ДТ 5720 и ДТ 5742, используемые для оцифровки медленных (амплитудных) и быстрых (временных) сигналов, соответственно.

В данном эксперименте пучок дейтронов облучает водородосодержащую мишень, помещенную в вакуумную камеру диаметром  $\sim 23$  см с выходным окном из лавсана толщиной  $\sim 20$  мкм. Наличие тонкого выходного окна позволяет устанавливать детекторы заряженных частиц снаружи камеры.

В эксперименте будут регистрироваться в совпадении один из протонов и нейтрон под углами близкими к углам вылета двухпротонной системы и нейтрона в двухчастичной реакции. Для определения типа и измерения энергии заряженной частицы используется телескоп кремниевых  $\Delta E$ – $E$  детекторов. Второе плечо регистрации со-



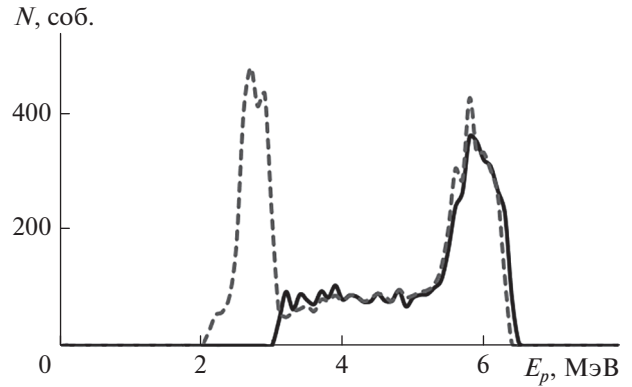
**Рис. 2.** Схема экспериментальной установки для исследования реакции  $d + {}^1\text{H} \rightarrow n + p + p$ : 1 – вакуумная камера рассеяния, 2 – мишень  $\text{CH}_2$ , 3 – детектор нейтронов, 4 – кремниевый тонкий  $\Delta E$ -детектор (24 мкм), 5 – кремниевый  $E$ -детектор (500 мкм), 6 – усилительные тракты.

держит жидкий водородсодержащий сцинтилляционный детектор нейтронов EJ-301.

Сигналы с детекторов подаются через соответствующие тракты усиления на ЦСП DT 5720 и DT 5742. В качестве стартового сигнала времяпролетной системы используется быстрый сигнал предусилителя  $E$ -детектора заряженных частиц. Через буферную память ЦСП оцифрованные сигналы передаются в основной компьютер. Обработка информации ведется в режиме off-line и заключается в определении амплитуд и площадей импульсов, определении времен возникновения сигналов в детекторах, определении энергии нейтрона по времени пролета, цифровом анализе формы импульсов для  $n$ - $\gamma$  разделения, отборе совпадающих событий и получении энергетических и временных спектров.

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ ПРОТОНОВ ЧЕРЕЗ ДЕТЕКТИРУЮЩУЮ СИСТЕМУ И ВОССТАНОВЛЕНИЕ СПЕКТРА ПРОТОНОВ

Рассмотрим моделирование прохождения протонов через  $\Delta E$ - $E$ -систему. Заряженные частицы проходят ряд слоев вещества: мишень  $\text{CH}_2$  (30 мкм), пленка из лавсана (20 мкм), слой воздуха между пленкой и  $\Delta E$ -детектором (22.5 мм),



**Рис. 3.** Пунктирная линия – исходный энергетический спектр протонов, соответствующий  $\epsilon = 300 \pm 50$  кэВ с добавлением событий из фоновых реакций; сплошная линия – восстановленный спектр.

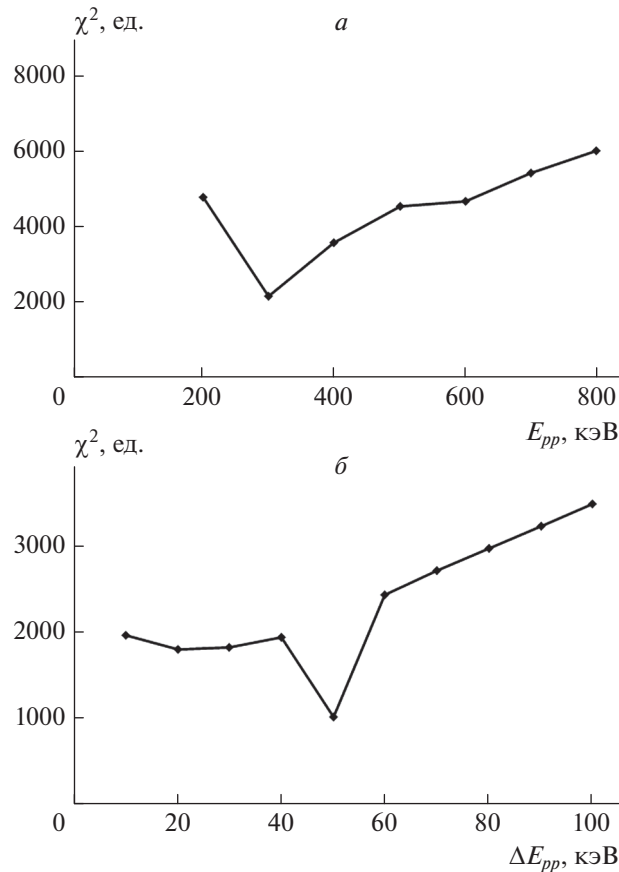
кремниевый  $\Delta E$ -детектор (24 мкм), слой воздуха между  $\Delta E$ - и  $E$ -детектором (10 мм), кремниевый  $E$ -детектор (500 мкм). Последовательно рассчитываются ионизационные потери частиц в каждом из слоев, а затем восстанавливается исходная энергия частиц по формуле  $E_0 = f(\Delta E + E)$ , где  $E_0$  – энергия налетающих частиц,  $\Delta E$  и  $E$  – потери частиц в  $\Delta E$ - и  $E$ -детекторах, соответственно.

На рис. 3 представлен результат восстановления энергетического спектра протонов с  $\epsilon = 300 \pm 50$  кэВ после прохождения  $\Delta E$ - $E$ -системы. При этом в исходный спектр добавлена часть событий из фоновых реакций  $d + {}^1\text{H} \rightarrow n + p + p$  (без отбора по  $E_{pp}$ ) и  $d + {}^{12}\text{C} \rightarrow n + p + {}^{12}\text{C}$ .

Из рис. 3 видно, что для извлечения величины  $E_{pp}$  будет использован только правый пик восстановленного энергетического спектра, поскольку протоны с энергиями меньше 3 МэВ не долетают до  $E$ -детектора.

Полученный в результате восстановления спектр  $E_p$  был использован для процедуры определения величины  $E_{pp}$  по методу минимума  $\chi^2$ . Процедура заключается в сравнении восстановленного энергетического спектра протонов, соответствующего  $\epsilon = 300 \pm 50$  кэВ с добавлением событий из фоновых реакций, и различных исходных энергетических спектров для разных значений  $\epsilon = E_{pp} \pm \Delta E_{pp}$ . На рис. 4а показана зависимость величины  $\chi^2$  от различных  $E_{pp}$  при  $\Delta E_{pp} = 50$  кэВ, а на рис. 4б показана зависимость величины  $\chi^2$  от различных  $\Delta E_{pp}$  при  $E_{pp} = 300$  кэВ.

Диаграммы на рис. 4а и 4б показывают, что из экспериментального спектра, полученного в реальных измерениях, можно извлечь значение энергии синглетного виртуального  $pp$ -состояния.



**Рис. 4.** Зависимость величины  $\chi^2$  от различных  $E_{pp}$  при  $\Delta E_{pp} = 50$  кэВ (а); зависимость величины  $\chi^2$  от различных  $\Delta E_{pp}$  при  $E_{pp} = 300$  кэВ (б).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрен метод определения энергии синглетного квазисвязанного  $pp$ -состояния в реакции  $d + {}^1\text{H} \rightarrow n + p + p$ . Проведенное кинематическое моделирование реакции показало, что при определенных кинематических условиях имеется прямая зависимость формы энергетического распределения “развальшой” частицы от энергии квазисвязанного синглетного  $pp$ -состояния. Спроектирована схема экспериментальной установки для исследования реакции  $d + {}^1\text{H} \rightarrow n + p + p$ . Проведено моделирование прохождения протонов через детектирующую  $\Delta E-E$  систему с учетом всех слоев веществ (мишень, выходное окно камеры рассеяния, воздух, кремний). Проведено рассмотрение процедуры извлечения энергии виртуального  $pp$ -состояния с использованием метода минимума  $\chi^2$ .

Можно предполагать, что анализ полученных в ходе проводимых измерений данных позволит судить о влиянии  $3N$ -сил на низкоэнергетические характеристики  $pp$ -взаимодействия, извле-

каемые в реакции с тремя частицами в конечном состоянии.

## 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. Конобеевский Е.С., Зуев С.В., Каспаров А.А. и др. // ЯФ. 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.
3. Мицук В.В., Мордовской М.В. // Ядерн. физ. и инжиниринг. 2017. Т. 8. № 6. С. 552; Mitcuk V.V., Mor-dovskoy M.V. // Phys. Atom. Nucl. 2018. V. 81. No. 10. P. 1471.
4. 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.
5. 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.

6. Конобеевский Е.С., Зуев С.В., Каспаров А.А. и др. // ЯФ. 2015. Т. 78. № 7–8. С. 687; Konobeevski E.S., Zuyev S.V., Kasparov A.A. et al. // Phys. Atom. Nucl. 2015. V. 78. No. 5. P. 643.
7. Зуев С.В., Каспаров А.А., Конобеевский Е.С. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2016. Т. 80. № 3. С. 254;
8. Конобеевский Е.С., Кукулин В.И., Зуев С.В. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2014. Т. 78. № 5. С. 521; Konobeevski E.S., Zuyev S.V., Mordovskoy M.V. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2014. V. 78. No. 5. P. 341.
9. Robson D. // Nucl. Phys A. 1973. V. 204. No. 3. P. 523.

## Features of data processing of the study experiment of proton-proton correlations in the $d + {}^1\text{H} \rightarrow n + p + p$ reaction

V. V. Mitsuk<sup>a,\*</sup>, A. A. Afonin<sup>a</sup>, A. A. Kasparov<sup>a</sup>, V. M. Lebedev<sup>b</sup>, M. V. Mordovskoy<sup>a</sup>, A. V. Spassky<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117312 Russia

<sup>b</sup>Skobeltsyn Research Institute of Nuclear Physics, Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

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

A method for determining the energy of a singlet quasibound  $pp$ -state in the  $d + {}^1\text{H} \rightarrow n + p + p$  reaction is considered. Procedures for obtaining experimental data on the measurement of the  $pp$ -scattering length and extracting of the proton-proton state energy from the experimental data using the  $\chi^2$  minimum method are presented.