

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^{1, *}, А. А. Афонин¹, А. А. Каспаров¹, В. М. Лебедев²,
М. В. Мордовской¹, А. В. Спасский²

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт ядерных исследований Российской академии наук, Москва, Россия

²Федеральное 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 χ^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 χ^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°) 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 ϵ , 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 ϵ в интервале $E_{pp} \pm \Delta E_{pp}$ приводит к структуре в энергетическом спектре протонов (рис. 1). Величина ΔE_{pp} определяет ширину интервала энергии ϵ и выбирается таким образом, чтобы разбить рассматриваемый диапазон величины ϵ 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

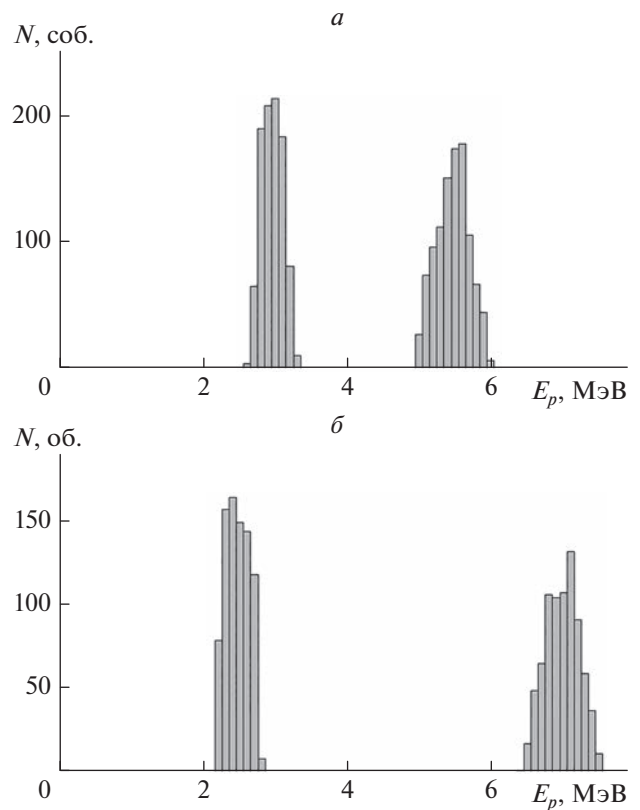


Рис. 1. Энергетические спектры протонов, образующиеся в реакции $d + {}^1\text{H} \rightarrow n + p + p$ для различных значений ϵ : 200 ± 50 (а), 600 ± 50 кэВ (б).

проводятся совместно с НИИЯФ МГУ на пучке дейтронов ускорителя У-120 при энергии 15 МэВ. Схема включает в себя вакуумную камеру рассеяния, мишень CH_2 , нейтронный детектор, кремниевые ΔE - 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 ~ 23 см с выходным окном из лавсана толщиной ~ 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 ΔE – E детекторов. Второе плечо регистрации со-

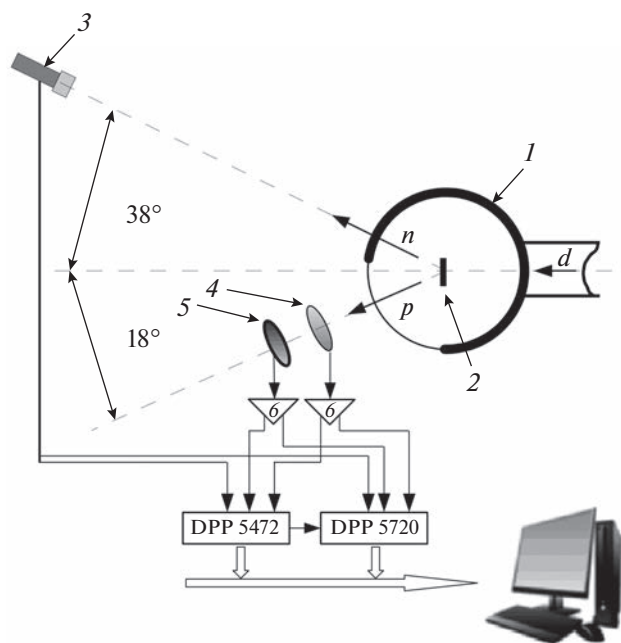


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для исследования реакции $d + {}^1\text{H} \rightarrow n + p + p$: 1 – вакуумная камера рассеяния, 2 – мишень CH_2 , 3 – детектор нейтронов, 4 – кремниевый тонкий ΔE -детектор (24 мкм), 5 – кремниевый E -детектор (500 мкм), 6 – усилительные тракты.

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 - γ 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 ΔE - E -систему. Заряженные частицы проходят ряд слоев вещества: мишень CH_2 (30 мкм), пленка из лавсана (20 мкм), слой воздуха между пленкой и ΔE -детектором (22.5 мм),

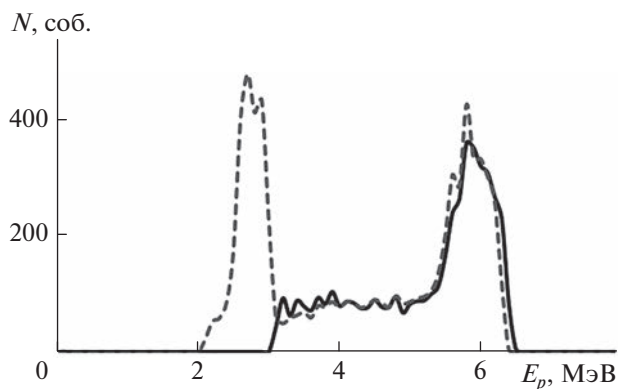


Рис. 3. Пунктирная линия – исходный энергетический спектр протонов, соответствующий $\epsilon = 300 \pm 50$ кэВ с добавлением событий из фоновых реакций; сплошная линия – восстановленный спектр.

кремниевый ΔE -детектор (24 мкм), слой воздуха между ΔE - 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, ΔE и E – потери частиц в ΔE - и E -детекторах, соответственно.

На рис. 3 представлен результат восстановления энергетического спектра протонов с $\epsilon = 300 \pm 50$ кэВ после прохождения ΔE - 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 χ^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 χ^2 от различных E_{pp} при $\Delta E_{pp} = 50$ кэВ, а на рис. 4б показана зависимость величины χ^2 от различных ΔE_{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.

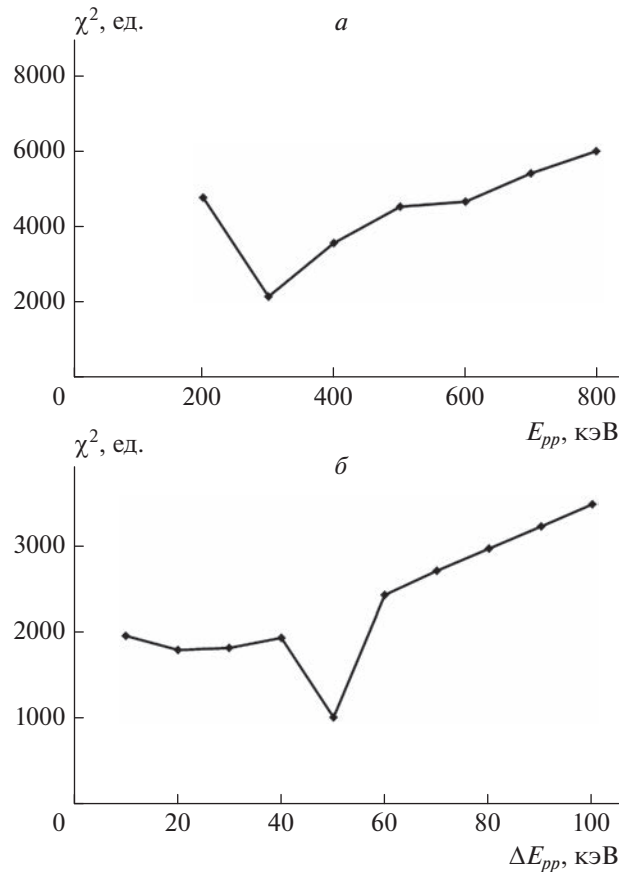


Рис. 4. Зависимость величины χ^2 от различных E_{pp} при $\Delta E_{pp} = 50$ кэВ (а); зависимость величины χ^2 от различных ΔE_{pp} при $E_{pp} = 300$ кэВ (б).

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 χ^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^{a,*}, A. A. Afonin^a, A. A. Kasparov^a, V. M. Lebedev^b, M. V. Mordovskoy^a, A. V. Spassky^b

^aInstitute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117312 Russia

^bSkobeltsyn 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 χ^2 minimum method are presented.