

ВОЗМОЖНОСТЬ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЭНЕРГИИ ВИРТУАЛЬНОГО pp -СОСТОЯНИЯ В РЕАКЦИИ $d + {}^1\text{H} \rightarrow p + p + n$

© 2021 г. **Е. С. Конобеевский**^{1,3,*}, **А. А. Афонин**¹, **А. А. Каспаров**¹, **В. М. Лебедев**²,
В. В. Мицук^{1,3,*}, **М. В. Мордовской**^{1,3}, **А. В. Спасский**², **С. В. Зуев**¹

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

³Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

“Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)”, Долгопрудный, Россия

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

Поступила в редакцию 20.11.2020 г.

После доработки 28.12.2020 г.

Принята к публикации 27.01.2021 г.

Рассмотрена задача определения энергии виртуального pp -состояния в реакции $d + {}^1\text{H} \rightarrow (p + p) + n$. Приведены результаты выбора основных и дополнительных параметров эксперимента, связанных с детектированием нейтрона: временного разрешения, длины пролетной базы и интервала времени пролета нейтрона при отборе событий. Представлено сравнение результатов моделирования и данных тестового эксперимента.

DOI: 10.31857/S0367676521050148

ВВЕДЕНИЕ

Важной проблемой современной ядерной физики является изучение нарушения зарядовой симметрии (НЗС) ядерных сил. Данный эффект отражается, в частности, в различии протон-протонной и нейтрон-нейтронной синглетных длин рассеяния. Протон-протонную длину рассеяния получают из прямого эксперимента по рассеянию протонов на водородной мишени [1, 2]. В [2] приведено современное значение ядерной части длинны рассеяния, не включающее в себя кулоновский вклад, которое составляет -17.3 ± 0.4 фм. Нейтрон-нейтронную длину рассеяния из-за отсутствия нейтронной мишени получают только из реакций с двумя нейтронами в конечном состоянии, например, $d + d \rightarrow p + p + n + n$ и $n + d \rightarrow n + n + p$ [3–7]. Однако в [8] было показано, что на извлекаемую величину длины рассеяния влияет взаимодействие nn -пары с протоном или протонной парой. Можно предположить, что аналогичное влияние на извлекаемую величину протон-протонной длины рассеяния (и энергии pp -синглетного состояния) в реакции $d + p \rightarrow n + p + p$ может оказать взаимодействие pp -пары с третьей частицей (нейтроном). В ИЯИ РАН в настоящее время проводятся работы по исследованию реакции $d + p \rightarrow n + p + p$, целью которых является

изучение влияния $3N$ -сил на извлекаемую величину энергии виртуального pp -состояния (E_{pp}).

КИНЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕАКЦИИ $d + {}^1\text{H} \rightarrow (pp) + n$

Для определения оптимальных параметров эксперимента было проведено кинематическое моделирование реакции $d + {}^1\text{H} \rightarrow p + p + n$ [9]. Моделирование реакции проведено в два этапа с использованием программ, описанных в [10]. На первом этапе моделировалась двухчастичная реакция $d + {}^1\text{H} \rightarrow (pp) + n$ при энергии пучка дейтронов 15 МэВ. Затравочная масса двухпротонной системы берется в виде $m_{2p} = 2m_p + E_{pp}$. Поскольку искомое значение энергии виртуального уровня, извлекаемое в рассматриваемой реакции неизвестно, при моделировании его брали в широком интервале $E_{pp} = 0.2\text{--}0.8$ МэВ. С учетом условий эксперимента (угол установки детектора заряженных частиц должен быть не менее 15°), были определены оптимальные углы вылета нейтрона ($38^\circ \pm 2^\circ$) и pp -системы ($-18^\circ \pm 1.5^\circ$), соответствующие максимально возможным в эксперименте энергиям вторичных протонов. Положительным и отрицательным углам соответствуют

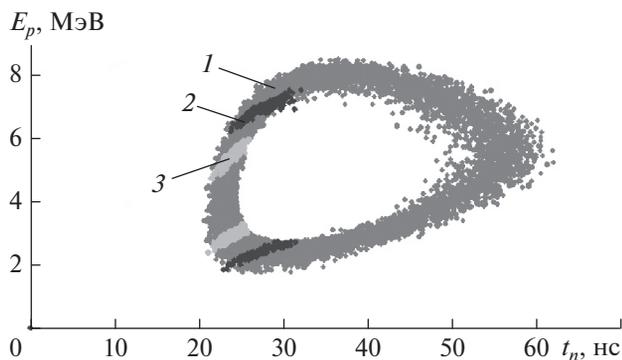


Рис. 1. Диаграмма E_p-t_n , в координатах времени пролета нейтрона (ось абсцисс) и энергии протонов (ось ординат): 1 – события без отбора по E_{pp} , 2 – события с $E_{pp} = 600$ кэВ, 3 – события с $E_{pp} = 200$ кэВ.

углы вылета налево и направо от оси пучка, соответственно.

На втором этапе моделирования рассматривается реакция трехчастичного развала $d + {}^1\text{H} \rightarrow p + p + n$. При этом углы регистрации протона и нейтрона брались близкими к значениям углов вылета нейтрона и pp -системы, определенным на первом этапе моделирования ($38^\circ \pm 2^\circ$ и $-18^\circ \pm 1.5^\circ$, соответственно). Для каждого моделированного события относительная энергия системы двух протонов, т.е. превышение полной энергии pp -системы над ее массой, рассчитывается через кинетические энергии вторичных протонов и угол их разлета в лабораторной системе [11]. При этом для всех событий, разрешенных кинематикой реакции при заданных параметрах эксперимента, два протона могут иметь относительную энергию ϵ в интервале от 0 до ~ 1.4 МэВ. Отбор событий со значениями относительной энергии pp -системы ϵ в интервале $E_{pp} \pm \Gamma$ приводит к структуре в энергетическом спектре протонов. Присутствие двух пиков в 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 энергиями в спектре зависит от энергии pp -состояния. Кинематическое моделирование показывает, 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 спектров протонов, полученных в ходе моделирования со спектрами, полученными из эксперимента, позволяет опреде-

лить энергию квазисвязанного pp -состояния в исследуемой трехчастичной реакции [9].

В ходе кинематического моделирования были получены следующие параметры эксперимента:

- Угол регистрации протона: $18^\circ \pm 2.5^\circ$.
- Диапазон измерения энергии протонов: 0.5–8 МэВ.
- Угол регистрации нейтрона: $38^\circ \pm 2^\circ$.
- Форма энергетического спектра протонов позволяет определить величину E_{pp} в диапазоне от 200 до 600 кэВ.

ВЫБОР ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭКСПЕРИМЕНТА – ДЛИНЫ ПРОЛЕТНОЙ БАЗЫ И ИНТЕРВАЛА ВРЕМЕНИ ПРОЛЕТА НЕЙТРОНА

Рассмотрим выбор дополнительных параметров эксперимента. Расстояние от мишени до нейтронного детектора определяется углами вылета нейтрона, соответствующими углам вылета двухпротонной системы в двухчастичной реакции $d + p \rightarrow (pp) + n$ при E_{pp} в интервале 200–600 кэВ. Возможное расстояние выбирается с учетом диаметра нейтронного детектора. Необходимо учитывать, что увеличение пролетной базы улучшает энергетическое разрешение детектора, но уменьшает его телесный угол (аксептанс). Оптимальная величина, удовлетворяющая данным требованиям, составляет 70 см (при диаметре нейтронного детектора 5 см).

Далее проводился выбор другого дополнительного параметра эксперимента – интервала времени пролета нейтрона, в котором будут отбираться события нейтрон-протонных совпадений. На рис. 1 результаты моделирования представлены диаграммой E_p-t_n , в координатах времени пролета нейтрона и энергии протонов. Из рисунка видно, что события, соответствующие извлечению энергии pp -состояния в интервале 200–600 кэВ, составляют малую часть всех событий с регистрацией $p-n$ совпадений. Поэтому ограничение временного интервала регистрации нейтрона приведет к увеличению доли полезных событий в спектре протонов (проекция событий диаграммы на ось ординат). При этом отсекается ненужный фон протонов (события с относительной энергией, не соответствующей выбранному интервалу).

Выбор интервала времени пролета осуществлялся без учета временного разрешения (для всех E_{pp} в интервале 200–600 кэВ) в соответствии со следующими условиями:

- 1) Максимальное соотношение “эффект/фон”.
- 2) Незначительное уменьшение количества полезных событий.

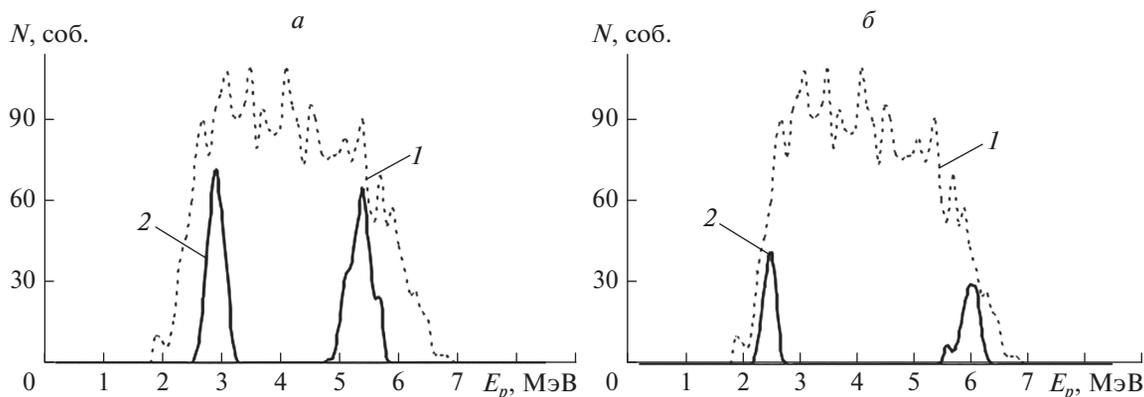


Рис. 2. Спектры энергии протонов E_p для выбранного интервала времени пролета (22–25 нс): *a* – спектр для значения $E_{pp} = 200$ кэВ (2) и фоновый спектр (1); *б* – спектр для значения $E_{pp} = 400$ кэВ (2) и фоновый спектр (1).

3) Несовпадение пиков фона и пиков спектра после отбора.

Указанные требования приводят к необходимости выбрать интервал 22–25 нс.

На рис. 2 для выбранного временного интервала представлены спектры энергии протонов E_p : фоновые спектры (все значения E_{pp}) и спектры для определенных значений энергии E_{pp} .

В результате анализа отбора событий для различных интервалов времени пролета нейтронов показано, что выбранный интервал (22–25 нс) при длине пролетной базы 70 см приводит к наилучшим условиям исследования формы спектра протонов для извлекаемой энергии E_{pp} в интервале 200–600 кэВ.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВРЕМЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ НЕЙТРОННОГО ДЕТЕКТОРА НА СПЕКТРЫ ПРОТОНОВ

Далее рассматривалось влияние временного разрешения на форму спектров протонов: при этом было выбрано конкретное значение $E_{pp} = 200$ кэВ и интервал времени пролета (22–25 нс).

На рис. 3 показаны спектры протонов (“фоновые” и для $E_{pp} = 200$ кэВ) при изменении временного разрешения. Видно, что при ухудшении разрешения изменяется как соотношение “эффект/фон”, так и значительно уменьшается количество полезных событий.

Анализ моделированных спектров для различных величин E_{pp} позволяет сделать вывод, что максимальное допустимое значение временного разрешения составляет 2 нс, так как при больших значениях этой величины уменьшается соотношение “эффект–фон”, уменьшается количество полезных событий.

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ

С использованием параметров, полученных в результате кинематического моделирования, был проведен тестовый эксперимент по исследованию реакции $d + {}^1\text{H} \rightarrow p + p + n$ на пучке дейтронов НИИЯФ МГУ с энергией 15 МэВ. Схема эксперимента представлена в [9], но в данном эксперименте в схеме ΔE – E -система дополнена третьим детектором (кремниевый детектор с толщиной 250 мкм).

В проводимом эксперименте регистрировались в совпадении протон и нейтрон. Для протона измерялись потери в кремниевых детекторах, проводился отбор протонов от дейтронов и других заряженных частиц. Спектр протонов восстанавливался по потерям в детекторах с учетом потерь во всех слоях между мишенью и детекторами. Для нейтронного детектора проводился отбор событий по форме импульса (n – γ разделение). На данном этапе исследования отбор по времени пролета нейтрона не проводился. На рис. 4 представлено сравнение экспериментального спектра протонов и моделированных спектров без отбора по E_{pp} и с отбором $E_{pp} = 300$ кэВ.

Сравнение результатов моделирования с предварительными экспериментальными данными показало:

1) Энергетический интервал полученного спектра протонов достаточен для определения E_{pp} в интервале энергии 200–600 кэВ.

2) Для анализа формы спектра (наличия пиков для определенного значения E_{pp}) необходимы определение времени пролета нейтрона с хорошим разрешением (< 2 нс) и отбор событий в узком временном окне нейтронов.

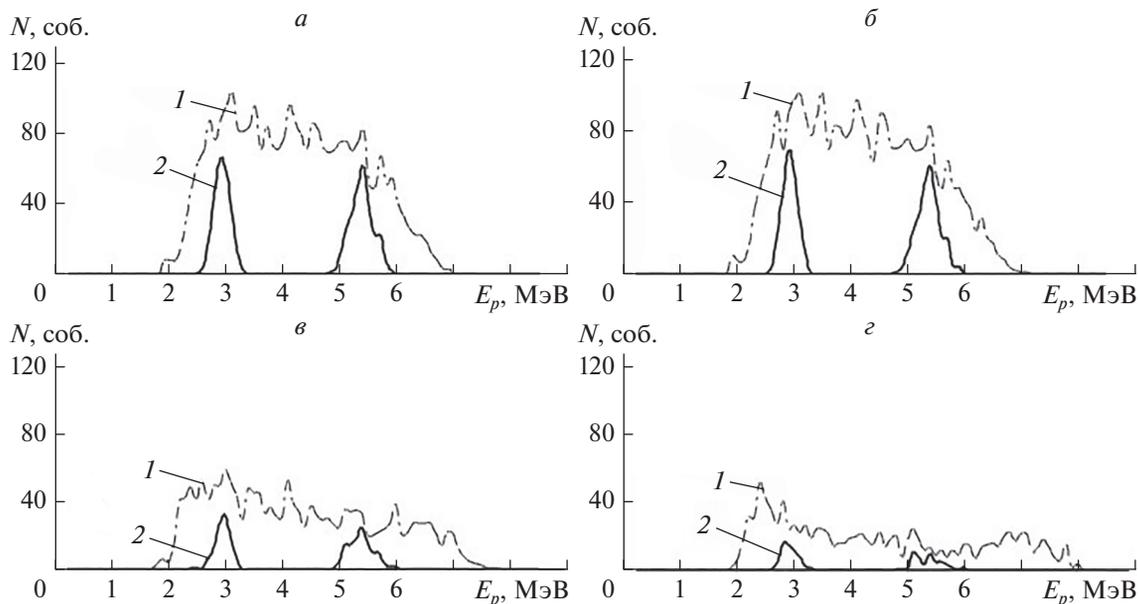


Рис. 3. Спектры протонов, отобранные по времени пролета (22–25 нс), для различного временного разрешения: *a* – 1, *б* – 2, *в* – 4, *г* – 8 нс; 1 – спектр без отбора по E_{pp} , 2 – спектр, соответствующий отбору по $E_{pp} = 200$ кэВ.

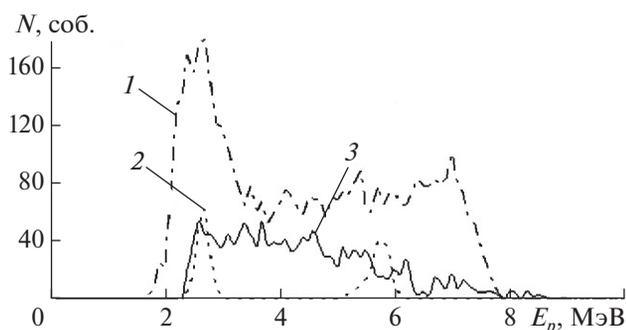


Рис. 4. Сравнение результатов моделирования с предварительными экспериментальными данными: 1 – моделированный спектр протонов без отбора по E_{pp} ; 2 – моделированный спектр протонов для $E_{pp} = 300$ кэВ; 3 – экспериментальный спектр протонов (без отбора по времени пролета).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты кинематического моделирования реакции $d + {}^1\text{H} \rightarrow p + p + n$ показали, что анализ формы спектра протонов при определенных параметрах эксперимента может дать информацию о величине E_{pp} . Определены оптимальные параметры эксперимента – расстояние между мишенью и нейтронным детектором, а также интервал времени пролета нейтронов для отбора экспериментальных данных (22–25 нс). Определена максимально допустимая величина временного

разрешения (2 нс). Проведенное сравнение результатов моделирования и предварительных экспериментальных данных показало, что энергетический интервал полученного спектра протонов достаточен для определения E_{pp} в интервале энергии 200–600 кэВ. Однако, для наилучшего выделения полезных событий необходимо изменение времени пролета нейтрона с хорошим разрешением (<2 нс) и отбор событий в узком временном окне пролета нейтронов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Machleidt R. // Phys. Rev. C. 2001. V. 63. Art. No. 024001.
2. Miller G.A., Nefkens B.M.K., Slaus I. // Phys. Rep. 1990. V. 194. No. 1–2. P. 1.
3. Huhn V., Watzold L., Weber Ch. et al. // Phys. Rev. C. 2000. V. 63. No. 1. Art. No. 014003.
4. von Witsch W., Ruan X., Witala H. // Phys. Rev. C. 2006. V. 74. No. 1. Art. No. 014001.
5. Chen Q., Howell C.R., Carman T.S. et al. // Phys. Rev. C. 2008. V. 77. No. 5. Art. No. 054002.
6. Gonzales Trotter D.E., Salinas F., Chen Q. et al. // Nucl. Rev. Lett. 1999. V. 83. No. 19. P. 3798.
7. Gonzales Trotter D.E., Salinas F., Tornow W. et al. // Phys. Rev. C. 2006. V. 73. No. 3. Art. No. 034001.
8. 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.
9. 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.*
10. *Зуев С.В., Каспаров А.А., Конобеевский Е.С. // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81. № 6. С. 753; Zuyev S.V.,*
- Kasparov A.A., Konobeevski E.S. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2017. V. 81. No. 6. P. 679.*
11. *Robson D. // Nucl. Phys. A. 1973. V. 204. No. 3. P. 523.*

The possibility of extraction of singlet pp -virtual state energy in $d + {}^1\text{H} \rightarrow p + p + n$ reaction

E. S. Konobeevski^{a, c}, **A. A. Afonin**^a, **A. A. Kasparov**^a, **V. M. Lebedev**^b, **V. V. Mitsuk**^{a, c, *},
M. V. Mordovskoy^{a, c}, **A. V. Spassky**^b, **S. V. Zuyev**^a

^a*Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117312 Russia*

^b*Skobeltsyn Research Institute of Nuclear Physics, Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

^c*Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, 141701 Russia*

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

The problem of determining the energy of a virtual pp -state in the reaction $d + {}^1\text{H} \rightarrow (p + p) + n$ is considered. The aim of the study is to study the effect of $3N$ -forces on the values of the low-energy parameters of the NN -interaction, which are extracted in reactions with three nucleons in the final state. The results of the selection of the main and additional parameters of the experiment associated with the detection of the neutron are presented: the temporal resolution, the length of the flight base and the time-of-flight of the neutron in the selection of events. Comparison of simulation results and test experiment data is presented.