

УДК 539.172.4

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ $np$ -ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В РЕАКЦИИ $nd$ -РАЗВАЛА ПРИ ЭНЕРГИИ НЕЙТРОНОВ 5 МэВ

© 2024 г. А. А. Каспаров<sup>1,\*</sup>, М. В. Мордовской<sup>1</sup>, А. А. Афонин<sup>1</sup>, Д. Г. Цветкович<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований  
Российской академии наук, Москва, Россия

\* e-mail: kasparov200191@gmail.com

Поступила в редакцию 15.03.2024

После доработки 24.03.2024

Принята к публикации 29.04.2024

Предложен эксперимент по определению низкоэнергетических параметров  $np$ -взаимодействия в реакции  $nd$ -развала при энергии нейтронов 5 МэВ канала РАДЭКС ИЯИ РАН. Значения энергии виртуального  $^1S_0$  состояния и длины  $np$ -рассеяния могут быть получены из экспериментальной зависимости выхода реакции от относительной энергии движения “развальных” нейтрона и протона в кинематической области, где наиболее сильно проявляется  $np$ -взаимодействие в конечном состоянии. Выполнено моделирование событий реакции, на основе которого выбираются оптимальные условия будущего эксперимента.

**Ключевые слова:** нуклон-нуклонное взаимодействие, трехнуклонные силы, реакции нескольких тел, реакции распада, длина рассеяния, энергия виртуального состояния

DOI: 10.31857/S0367676524080097, EDN: ORBBFQ

### ВВЕДЕНИЕ

Одна из наиболее фундаментальных и традиционных задач ядерной физики — объяснение свойств атомных ядер с точки зрения элементарных взаимодействий между нуклонами. Для этого очень важным является изучение нуклон-нуклонного ( $NN$ ) взаимодействия. За прошедшее столетие накоплено огромное количество данных о протон-протонном ( $pp$ ), нейтрон-протонном ( $np$ ) и нейтрон-нейтронном ( $nn$ ) взаимодействиях. Тщательный анализ этих данных привел к построению различных реалистических моделей ядерных сил, описывающих большое число экспериментальных данных с хорошей точностью [1, 2].

Исследование и сравнение всех типов взаимодействия также являются важными в связи с проверкой гипотезы о зарядовой независимости и более слабого утверждения — зарядовой симметрии ядерных сил. Нарушение зарядовой независимости ( $N3N$ ) и зарядовой симметрии ( $N3C$ ) ядерных сил согласно современным представлениям связано с различием масс  $u$ - и  $d$ -кварков, их зарядов и магнитных моментов [3]. Особую роль в определении меры  $N3N$  и  $N3C$  ядерных сил играет исследование низкоэнергетических характеристик  $NN$ -взаимодействия в спиновом синглетном состоянии — длин рассеяния и энергий виртуального  $^1S_0$  уровня. Так,

авторы работы [4] назвали длину  $NN$ -рассеяния “мощным увеличительным стеклом для изучения  $NN$ -взаимодействия”. Но если данные о длинах  $pp$ - и  $np$ -рассеяния можно извлечь из прямых экспериментов по  $pp$ - или  $np$ -рассеянию, соответственно, то данные о длине  $nn$ -рассеяния, ввиду отсутствия чисто нейтронных мишеней, получают в основном в реакциях  $n + d \rightarrow p + n + n$  и  $\pi^- + d \rightarrow \gamma + n + n$  при исследовании взаимодействия в конечном состоянии (ВКС) двух нейтронов, имеющих малую относительную энергию.

Однако полученные данные о  $nn$ -взаимодействии в реакции  $nd$ -развала при различных энергиях нейтронов имеют большой разброс значений, превышающий экспериментальные ошибки [5–11]. Так, недавний анализ [11] полученных в реакциях  $nd$ -и  $dd$ -развала значений длин  $nn$ -рассеяния [5–12] в значительной мере подтвердил гипотезу [13] о влиянии  $3N$ -сил на величины извлекаемых параметров  $nn$ -взаимодействия в реакциях с малонуклонными системами.

Можно предположить, что аналогичное влияние на извлекаемую величину нейтрон-протонной длины рассеяния (или энергии синглетного  $np$ -состояния) в реакциях с образованием пары протон-нейтрон в конечном состоянии, например  $n + ^2\text{H} \rightarrow n + p + n$  или  $d + ^1\text{H} \rightarrow p + n + p$ , может

оказать нейтрон или протон, соответственно. В недавней работе [14] в кинематически полном эксперименте по исследованию реакции  $nd$ -развала при энергиях нейтронов 9 и 11 МэВ канала РАДЭКС ИЯИ РАН были получены значения  $^1S_0$  длины  $np$ -рассеяния, которые существенно отличаются от значения, полученного в эксперименте по свободному  $np$ -рассеянию. Причина такого расхождения также может быть связана со значительным влиянием трехнуклонных ( $3N$ ) сил. Для проверки данного предположения в ИЯИ РАН планируется исследование реакции  $nd$ -развала при более низких энергиях нейтронов.

### ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

На нейтронном канале РАДЭКС ИЯИ РАН планируется проведение кинематически полного эксперимента по исследованию реакции  $n + ^2\text{H} \rightarrow n + (np) \rightarrow n + n + p$  при энергии нейтронов 5 МэВ в геометрии отдачи. Цель эксперимента — определение низкоэнергетических параметров  $np$ -взаимодействия — энергии виртуального  $^1S_0$  состояния ( $\epsilon_0$ ) и длины  $np$ -рассеяния ( $a_{np}$ ). В эксперименте будут измерены в совпадении энергетические спектры нейтронов от развала виртуального синглетного состояния  $np$ -системы и нейтронов отдачи при углах регистрации в кинематической области, отвечающей малой энергии  $\epsilon$  относительного движения “развальных” нейтрона и протона, где наиболее сильно проявляется нейтрон-протонное ВКС.

Для определения  $\epsilon_0$  (и связанную с этим значением величину  $a_{np}$ ) нужно измерить кинетические энергии “развальных” нейтрона и протона  $E_1$  и  $E_2$ , а также угол между ними  $\Delta\Theta$ . Нейтрон-протонное ВКС в такой постановке эксперимента проявляется в виде максимума в распределении выхода реакции от относительной энергии  $\epsilon$

$$\epsilon = (E_1 + E_2 - 2\sqrt{E_1 E_2} \cos \Delta\Theta) / 2,$$

форма которого чувствительна к величине энергии виртуального  $^1S_0$  состояния  $\epsilon_0$ .

### МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для кинематических расчетов этой реакции использовалась программа DVKIN [15]. В программе учитывается выполнение законов сохранения энергии и импульса по произвольно заданным или частично определенным значениям кинематических переменных вторичных частиц (кинетические энергии и углы вылета).

Проведенное кинематическое моделирование позволило определить оптимальные условия будущего эксперимента. На первом этапе квазибинарной реакции  $n + ^2\text{H} \rightarrow (np) + n$  образуется

$np$ -система с эффективной инвариантной массой  $M_{np} = (m_n + m_p) \cdot c^2 + \epsilon$ . Зависимость выхода реакции от  $\epsilon$  будет учитываться количеством разыгрываемых событий с разными  $\epsilon$  согласно кривым, рассчитанным по формуле Мигдала—Ватсона [16, 17] с определенным значением  $\epsilon_0$ , которая в приближении нулевого радиуса действия ядерных сил имеет вид

$$F_{\text{МВ}} = A \frac{\sqrt{\epsilon}}{\epsilon + \epsilon_0}.$$

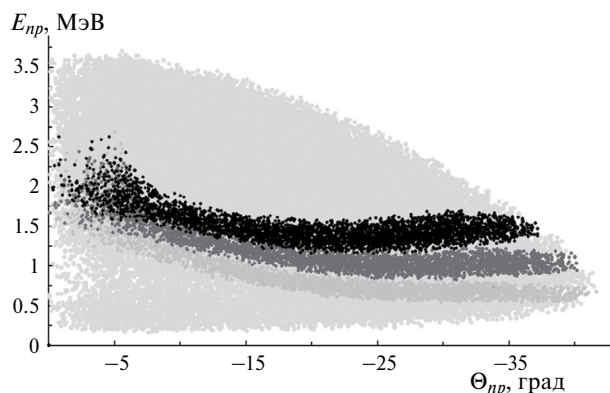
Здесь,  $\epsilon_0$  — абсолютное значение энергии виртуального  $^1S_0$  состояния  $np$ -системы,  $\sqrt{\epsilon}$  — множитель, связанный с фазовым объемом,  $A$  — нормировочный коэффициент.

В результате работы программы рассчитываются углы вылета и кинетические энергии ( $\Theta_{n_1}$  и  $E_{n_1}$ ) нейтрона отдачи и центра масс  $np$ -пары ( $\Theta_{np}$  и  $E_{np}$ ) в лабораторной системе (л. с. к.). Так, на рис. 1 можно видеть результат моделирования реакции  $n + ^2\text{H} \rightarrow (np) + n_1$  в виде двумерной диаграммы  $E_{np} - \Theta_{np}$  (светло-серые точки), а также кинематические области для трех различных углов регистрации нейтрона отдачи  $\Theta_{n_1}$ :  $25^\circ \pm 2.5^\circ$  (серые точки),  $35^\circ \pm 2.5^\circ$  (темно-серые точки) и  $45^\circ \pm 2.5^\circ$  (черные точки).

Исходя из экспериментальных условий установки на нейтронном канале РАДЭКС ИЯИ РАН и близости детекторов к трубе нейтроновода, минимальный угол регистрации нейтрона отдачи  $\Theta_{n_1} \geq 20^\circ$ . При этом минимальная суммарная кинетическая энергия “развальных” нейтрона и протона обеспечивается углом регистрации нейтрона отдачи под углами близкими к оси пучка.

В эксперименте планируется использовать  $\text{C}_6\text{D}_6$ -сцинтиллятор как в качестве дейтериевой мишени, так и детектора вторичных протонов. Энергии вторичных нейтронов будут определяться по времени пролета до детекторов, при этом стартовым сигналом времяпролетной системы будет служить временной сигнал от активной сцинтилляционной мишени. Сигналы со всех детекторов будут подаваться на вход цифрового сигнального процессора DT5742 (CAEN S.p.A.), имеющего малый шаг временной развертки 0.2 нс (цена канала времяпролетного спектра). Регистрация осциллограмм поданных на него сигналов происходит в доступном диапазоне записи по времени 200 нс после срабатывания внутреннего триггера по сигналу от активной сцинтилляционной мишени. Таким образом, при возможной длине времяпролетной базы  $\sim 1.5$  м, нейтроны с энергиями ниже 0.3 МэВ зарегистрированы не будут, так как их время пролета будет более доступного для записи временного интервала. Кроме того, протоны в мишени-детекторе также имеют порог около 0.3 МэВ, обусловленный качеством разделения тяжелой частицы и гамма-кванта по форме импульса.

При введении указанных порогов по кинетическим энергиям всех вторичных частиц общее



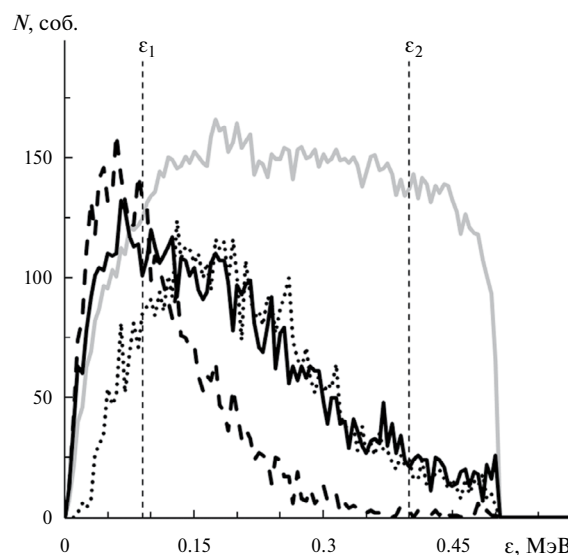
**Рис. 1.** Двумерная диаграмма  $E_{np}$  —  $\Theta_{np}$  реакции  $n + {}^2\text{H} \rightarrow (np) + n_1$  при энергии нейтронов  $5 \pm 1$  МэВ без отбора по углу регистрации нейтрона отдачи  $\Theta_{n_1}$  (светло-серые точки) и трех различных значений углов  $\Theta_{n_1}$ :  $25^\circ \pm 2.5^\circ$  (серые точки),  $35^\circ \pm 2.5^\circ$  (темно-серые точки) и  $45^\circ \pm 2.5^\circ$  (черные точки). Отрицательным и положительным углам соответствует вылет частицы в левую и правую полуплоскости относительно оси первичного пучка соответственно.

количество отбираемых на первом этапе событий для угла регистрации нейтрона отдачи  $\Theta_{n_1} = 25^\circ \pm 2.5^\circ$  уменьшается примерно на 50%, а при  $\Theta_{n_1} = 35^\circ \pm 2.5^\circ$  или  $\Theta_{n_1} = 45^\circ \pm 2.5^\circ$  уменьшается на  $\approx 25\%$ . В результате этого на первом этапе моделирования выбран  $\Theta_{n_1} = 45^\circ \pm 2.5^\circ$ .

На втором этапе рассматривается развал  $np \rightarrow n_2 + p$  и рассчитываются кинетические энергии ( $E_{n_2}$ ,  $E_p$ ) и углы вылета ( $\Theta_{n_2}$ ,  $\Theta_p$ ) “развальных” нейтрона и протона в л. с. к. Затем строится распределение выхода реакции от их относительной энергии  $\epsilon$  (см. серую кривую на рис. 2). Видно, что форма этого распределения имеет достаточно равномерный характер. При фиксации угла вылета “развального” нейтрона происходит уменьшение исследуемой области возбуждения  $np$ -системы и соответствующий сдвиг ее в область малых энергий возбуждения, изучение которой и входит в задачу эксперимента (см. черные кривые на рис. 2).

Для выбора оптимального угла регистрации  $\Theta_{n_2}$  распределения выхода реакции от относительной энергии  $np$ -системы  $\epsilon$  сравнивались при различных значениях  $\Theta_{n_2}$  (рис. 2), а для количественной оценки сравнения распределений мы использовали величину фактора формы (Shape Factor — SF), определяемого как отношение суммы событий, которые захватывают всю область пика при малых  $\epsilon$  от 0 до  $\epsilon_1$ , к сумме событий по широкой области  $\epsilon$  от 0 до  $\epsilon_2$  [11].

В результате была получена зависимость величины моделированного SF от угла регистрации “развального” нейтрона  $\Theta_{n_2}$  в диапазоне от  $-40^\circ$  до  $-10^\circ$  с шагом  $2.5^\circ$  при значениях  $\Theta_{n_1} = 45^\circ \pm 2.5^\circ$ , а значения  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$  были взяты 0.09 и 0.4 МэВ, соответственно. Эта зависимость использовалась для определения

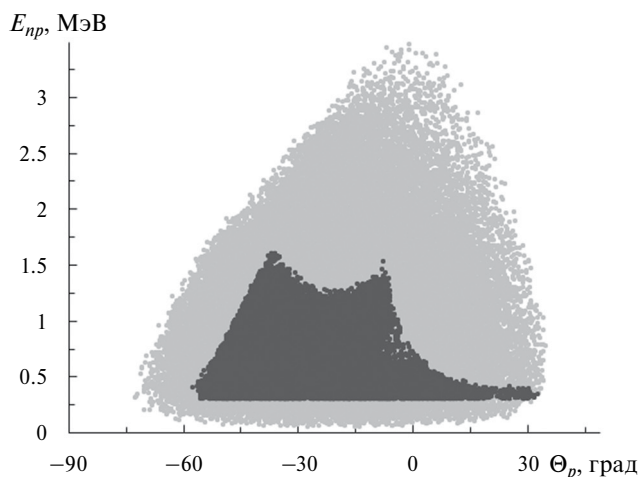


**Рис. 2.** Сравнение моделированных зависимостей выхода реакции  $nd$ -развала от  $\epsilon$  при следующих параметрах моделирования:  $E_0 = 5 \pm 1$  МэВ,  $\epsilon_0 = 0.04$  МэВ,  $\Theta_{n_1} = 45^\circ \pm 2.5^\circ$  и различных значений  $\Theta_{n_2}$ :  $-20^\circ \pm 50^\circ$  (серая кривая),  $-37^\circ \pm 2.5^\circ$  (черная сплошная кривая),  $-25^\circ \pm 2.5^\circ$  (черная пунктирная кривая) и  $-10^\circ \pm 2.5^\circ$  (черная точечная кривая). Штриховыми прямыми показаны границы суммирования событий для вычисления величины SF:  $\epsilon_1 = 0.09$  МэВ,  $\epsilon_2 = 0.4$  МэВ.

оптимального угла регистрации “развального” нейтрона  $\Theta_{n_2} \approx -25^\circ$ , а критерием его выбора является большее значение величины SF, что соответствует наибольшему количеству моделированных событий в области, где наиболее сильно проявляется нейтрон-протонное ВКС.

Затем учитываются все условия планируемого эксперимента — расположение и количество детекторов нейтронов, их энергетическое и угловое разрешения. В эксперименте будут регистрироваться в совпадении нейтроны отдачи и нейтроны от развала  $np$ -системы, а кинетическая энергия и угол вылета “развального” протона, как и энергия первичного пучка будут восстановлены из кинематики реакции. На рис. 3 показана двумерная диаграмма  $E_p$  —  $\Theta_p$  реакции  $n + {}^2\text{H} \rightarrow n_1 + (np) \rightarrow n_1 + n_2 + p$  с учетом всех условий планируемого эксперимента.

Из рис. 3 видна кинематическая область вылета “развального” протона. Из всех полученных в планируемом эксперименте данных будут отобраны только те события, которые попадут в эту область и для них будет рассчитана зависимость выхода реакции  $nd$ -развала от относительной энергии  $np$ -системы  $\epsilon$ . Эта зависимость будет сравниваться с моделированными для различных значений энергии виртуального  ${}^1S_0$  состояния  $\epsilon_0$  (длины  $np$ -рассеяния  $a_{np}$ ) и позволит получить эту важную фундаментальную величину.



**Рис. 3.** Двумерная диаграмма  $E_p - \Theta_p$  реакции  $n + {}^2\text{H} \rightarrow n_1 + (np) \rightarrow n_1 + n_2 + p$ . Параметры моделирования:  $E_0 = 5 \pm 1$  МэВ,  $\varepsilon_0 = 0.04$  МэВ,  $\Theta_{n_1} = 45^\circ \pm 2.5^\circ$  (серые точки) и  $E_0 = 5 \pm 1$  МэВ,  $\varepsilon_0 = 0.04$  МэВ,  $\Theta_{n_1} = 45^\circ \pm 2.5^\circ$ ,  $\Theta_{n_2} = -25^\circ \pm 2.5^\circ$ ,  $E_{n_1} \geq 0.3$  МэВ,  $E_{n_2} \geq 0.3$  МэВ,  $E_p \geq 0.3$  МэВ (темно-серые точки).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в недавней работе [14] значения  ${}^1S_0$  длины  $np$ -рассеяния в реакции  $nd$ -развала при энергиях нейтронов 9 и 11 МэВ существенно отличаются от значения, полученного в эксперименте по свободному  $np$ -рассеянию. Причина такого расхождения также может быть связана со значительным влиянием  $3N$ -сил. Для проверки данного предположения в ИЯИ РАН планируется проведение кинематически полного эксперимента по исследованию реакции  $nd$ -развала в геометрии отдачи при более низких энергиях нейтронов канала РАДЭКС. Проведено кинематическое моделирование реакции  $n + {}^2\text{H} \rightarrow p + n + n$  при энергии нейтронов 5 МэВ, на основе которого выбраны оптимальные условия будущего эксперимента по определению низкоэнергетических параметров  $np$ -взаимодействия (синглетной  $np$ -длины рассеяния и энергии виртуального  ${}^1S_0$  состояния  $E_{np}$ ).

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

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Machleidt R., Sammarruca F., Song Y. // Phys. Rev. C. 1996. V. 53. No. 4. Art. No. R1483.
2. Stoks V.G.J., Klomp R.A.M., Terheggen C.P.F. et al. // Phys. Rev. C. 1994. V. 49. No. 6. Art. No. 2950.
3. Miller G.A., Nefkens B.M.K., Slaus I. // Phys. Reports. 1990. V. 194. No. 1–2. P. 1.
4. Dumbrajs O., Koch R., Pilkuhn H. et al. // Nucl. Phys. B. 1983. V. 216. No. 277. P. 277.
5. Gonzalez Trotter D.E., Salinas F., Chen Q. et al. // Phys. Rev. Lett. 1999. V. 83. No. 19. P. 3788.
6. Huhn V., Watzold L., Weber Ch. et al. // Phys. Rev. C. 2000. V. 63. No. 1. Art. No. 014003.
7. Gonzalez Trotter D.E., Salinas Meneses F., Tornow W. et al. // Phys. Rev. C. 2006. V. 73. No. 3. Art. No. 034001.
8. Von Witsch W., Ruan X., Witala H. // Phys. Rev. C. 2006. V. 74. No. 1. Art. No. 014001.
9. Конобеевский Е.С., Бурмистров Ю.М., Зуев С.В. и др. // Ядерн. физика. 2010. Т. 73. № 8. С. 1343; Konobeevski E.S., Burmistrov Yu.M., Zuyev S.V. et al. // Phys. Atom. Nucl. 2010. V. 73. No. 8. P. 1302.
10. Конобеевский Е.С., Афонин А.А., Зуев С.В. и др. // Ядерн. физика. 2020. Т. 83. № 4. С. 288; Konobeevski E.S., Afonin A.A., Zuyev S.V. et al. // Phys. Atom. Nucl. 2020. V. 83. No. 4. P. 523.
11. Конобеевский Е.С., Каспаров А.А., Мордовской М.В. и др. // Ядерн. физика. 2022. Т. 85. № 3. С. 216; Konobeevski E.S., Kasparov A.A., Mordovskoy M.V. et al. // Phys. Atom. Nucl. 2022. V. 85. No. 3. P. 289.
12. Konobeevski E., Kasparov A., Mordovskoy M. et al. // Few-Body Syst. 2017. V. 58. Art. No. 107.
13. Конобеевский Е.С., Зуев С.В., Каспаров А.А. и др. // Ядерн. физика. 2018. Т. 85. № 5. С. 555; Konobeevski E.S., Zuyev S.V., Kasparov A.A. et al. // Phys. Atom. Nucl. 2018. V. 81. No. 5. P. 595.
14. Каспаров А.А., Мордовской М.В., Афонин А.А. и др. // Ядерн. физика. 2023. Т. 86. № 1. С. 245; Kasparov A.A., Mordovskoy M.V., Afonin A.A. et al. // Phys. Atom. Nucl. 2023. V. 86. No. 1. P. 44.
15. 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.
16. Migdal A.B. // ЖЭТФ. 1955. Т. 28. № 1. С. 10; Migdal A.B. // JETP. 1955. V. 1. No. 1. P. 2.
17. Watson K.M. // Phys. Rev. 1952. V. 88. No. 5. P. 1163.

## **Simulation and selection of the optimal experimental conditions to determine the low-energy parameters of the $np$ interaction in the $nd$ breakup reaction at a neutron energy of 5 MeV**

**A. A. Kasparov<sup>1,\*</sup> M. V. Mordovskoy<sup>1</sup>, A. A. Afonin<sup>1</sup>, D. G. Tsvetkovich<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117312, Russia*

*\*e-mail: kasparov200191@gmail.com*

An experiment to determine the low-energy parameters of  $np$  interaction in the  $nd$  breakup reaction at a neutron energy of 5 MeV of the RADEX channel of the INR RAS is proposed. The energy of the virtual  $^1S_0$  state and the  $np$  scattering length can be obtained from the experimental dependence of the reaction yield on the relative energy of motion of the “breakup” neutron and proton in the kinematic region, where the  $np$  interaction in the final state is most pronounced. The reaction events were simulated, based on which the optimal conditions for the future experiment were selected.

*Keywords:* nucleon-nucleon interaction, three-nucleon forces, few-body reactions, breakup reactions, scattering length, energy of virtual state