

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИНГЛЕТНОЙ ДЛИНЫ nn-РАССЕЯНИЯ ИЗ ДАННЫХ О ВЗАИМОДЕЙСТВИИ В КОНЕЧНОМ СОСТОЯНИИ В РЕАКЦИИ $nd \rightarrow pnn$

Е. С. Конобеевский, М. В. Мордовской, С. И. Поташев, В. А. Сергеев, С. В. Зуев

Институт ядерных исследований РАН (ИЯИ), Москва, Россия

Предлагается эксперимент по определению синглетной длины nn-рассеяния в реакции nd -развала на нейтронном канале Московской мезонной фабрики ИЯИ. В эксперименте предполагается определение длины рассеяния из зависимости выхода реакции nd -развала от величины энергии относительного движения $\epsilon_{nn} = (E_1 + E_2 - 2(E_1 E_2)^{1/2} \cos \theta) / 2$ двух нейтронов в кинематической области, отвечающей малым значениям этой энергии, где наиболее сильно проявляется nn-взаимодействие в конечном состоянии. В эксперименте будут регистрироваться в совпадении два нейтрона, вылетающие в узком конусе углов относительно направления движения их центра масс, измеряться энергии этих нейтронов E_1 и E_2 и угол θ между ними. В ноябре 2005 г. на нейтронном канале РАДЭКС Экспериментального комплекса Московской мезонной фабрики ИЯИ был проведен тестовый эксперимент с использованием многодетекторного время-пролетного спектрометра. Полученные спектры протонов и нейтронов из реакций $nd \rightarrow pnn$ и $pr \rightarrow pr$ дали оценку потока и энергетического спектра быстрых нейтронов (40 - 140 МэВ) канала РАДЭКС и позволяют надеяться на получение статистически обеспеченных данных в эксперименте по определению длины nn-рассеяния.

1. Введение

Задача достаточно точного определения синглетной длины нейтрон-нейтронного рассеяния их экспериментальных данных остается актуальной несмотря на большое число работ, выполненных в этом направлении (см. например, [1, 2]. С одной стороны, существуют трудности экспериментального исследования реакций с тремя частицами в конечном состоянии и связанная с ними неоднозначность результатов, а также неопределенности теоретических моделей, используемых при анализе данных. С другой стороны, фундаментальный характер проблемы нарушения зарядовой симметрии (НЗС) ядерных сил и развитие новых теоретических подходов [3] стимулируют продолжение подобных исследований.

Синглетные длины nn- и pp-рассеяния a_{nn} и a_{pp} являются очень важными характеристиками нуклон-нуклонного взаимодействия, позволяющими в принципе определить меру нарушения НЗС ядерных сил. НЗС, обусловленное согласно современным представлениям различием между u и d кварками, является малым эффектом и для теоретического анализа требуются точные данные о длинах рассеяния. Так как синглетное s -состояние двух нуклонов почти связано (существует виртуальное состояние с энергией, близкой к нулю), длины рассеяния a_{nn} и a_{pp} (после исключения кулоновских эффектов) велики по абсолютной величине и весьма чувствительны к небольшим различиям nn- и pp-потенциалов.

Протон-протонная длина рассеяния находится из экспериментов по pp-рассеянию ($a_{pp} = -17,3 \pm \pm 0,4$ фм); ее погрешность связана главным образом с использованием теоретических моделей для исключения кулоновских эффектов. В настоящее время единственной реальной возможностью для определения длины nn-рассеяния является изучение взаимодействия двух нейтронов в конечном состоянии при малой относительной энергии в трехчастичных реакциях [4 - 8].

Далее будет проведено сравнение результатов различных работ по определению a_{nn} , рассмотрена схема нового эксперимента по исследованию реакции $n + d \rightarrow p + n + n$ на нейтронном пучке Московской мезонной фабрики ИЯИ, изложены результаты компьютерного моделирования этой реакции в условиях планируемого эксперимента.

2. Сравнение результатов экспериментов по определению a_{nn}

Реакция развала дейтрона уже давно используется для определения нейтрон-нейтронной синглетной длины рассеяния по данным о взаимодействии в конечном состоянии (ВКС). Однако работы, в которых кинематически полный эксперимент с одновременным определением a_{nn} и a_{np} сочетается с достаточно строгим теоретическим анализом реакции выполнены лишь в последние годы [2, 3]. Оказалось, что в кинематически полных экспериментах форма кривой ВКС в области максимума не чувствительна к деталям NN-взаимодействия, а определяется исключительно величиной a_{nn} , как в приближении Мигдала - Ватсона.

В работе [5] (ISK, Universitat Bonn) нейтрон-нейтронное ВКС исследовалось при энергии падающих нейтронов $E_n = 25,3$ и $16,6$ МэВ путем детектирования в совпадении одного из нейтронов и протона отдачи и было получено значение $a_{nn} = (-16,2 \pm 0,3)$ фм.

В тоже время эксперимент [4] (TUNL, Durham) при $E_n = 13,6$ МэВ, выполненный в другой геометрии, дал значение $a_{nn} = (-18,7 \pm 0,6)$ фм.

Близкий к этому результат был получен в PSI и LAMPF [6] по исследованию реакции $\pi^- + d \rightarrow \gamma + n + n$: среднее значение $a_{nn} = (-18,6 \pm 0,4)$ фм. Данная реакция имеет то преимущество, что выходной канал содержит только две сильно взаимодействующие частицы. Вместе с тем результаты работы [8] указывают на то, что из-за существующей неопределенности теоретических расчетов сечения этой реакции, используемых при определении длины рассеяния, погрешность величины a_{nn} должна быть увеличена.

В опубликованной недавно работе [7] (KVI, Groningen) изучалась реакция $d + d \rightarrow {}^2\text{He} + n + n$ при $E_d = 171$ МэВ и углах вылета системы ${}^2\text{He}$ близких к нулю. Информацию о нейтрон-нейтронном ВКС получали путем измерения импульса каждого из протонов несвязанной системы ${}^2\text{He}$. Анализ данных на основе простой модели реакции, включающей адиабатическое приближение, позволил найти верхний предел на длину рассеяния: $a_{nn} \leq -18,3$ фм.

Таким образом, длина рассеяния a_{nn} , полученная в [5], существенно отличается от значений, полученных в [4, 6, 7] (почти на четыре стандартных ошибки), что может указывать на другую интерпретацию эффекта нарушения зарядовой симметрии. Как видно из сравнения приведенных данных о a_{nn} и a_{pp} , в настоящее время неизвестен даже знак разности $a_{nn} - a_{pp}$, которая определяет количественную меру НЗС ядерных сил. Для того чтобы устранить неопределенность в величине нейтрон-нейтронной длины рассеяния, необходимы новые эксперименты.

3. Постановка эксперимента

Настоящий проект предполагает проведение кинематически полного эксперимента по исследованию реакции $n + d \rightarrow p + n + n$ и определение синглетной длины рассеяния a_{nn} . В эксперименте впервые будут измерены энергетические спектры и углы разлета двух нейтронов в кинематической области, отвечающей малой энергии их относительного движения ε , где наиболее сильно проявляется нейтрон-нейтронное ВКС. Для определения a_{nn} необходимо регистрировать в совпадении два нейтрона, вылетающие в узком конусе углов относительно направления движения их центра масс, измерять энергию каждого нейтрона E_1 и E_2 и угол Θ между ними. В этой постановке эксперимента нейтрон-нейтронное ВКС проявляется в виде распределения выхода реакции от относительной энергии двух нейтронов

$$\varepsilon = (E_1 + E_2 - 2(E_1 E_2)^{1/2} \cos \Theta) / 2, \quad (1)$$

форма которого чувствительна к величине a_{nn} . Для описания этого распределения используется формула Мигдала - Ватсона (МВ) [9, 10], которая в упрощенном виде имеет вид $F_{MB} = \frac{\sqrt{\varepsilon}}{\varepsilon + \varepsilon_0}$ (рис. 1).

При этом существует простое соотношение $\varepsilon_0 = 41,5/a_{nn}^2$ (a_{nn} в фм; ε_0 в МэВ).

Использование формулы МВ в значительной степени оправдано тем, что в планируемом эксперименте выполнены формальные условия их применимости. Относительная энергия протона и центра масс pp-пары велика по сравнению с относительной энергией нейтронов [9], а переданный импульс достаточно велик, чтобы обеспечить малость эффективного радиуса области реакции [10, 11]. Кроме того, применимость формулы МВ была продемонстрирована на конкретном примере в работе [2]. В ней было вычислено дифференциальное сечение реакции $n + d \rightarrow p + n + n$ при энергии $22,7$ МэВ с помощью решения уравнения Фаддеева с реалистическими NN-силами. Затем для описания расчетной кривой, полученной с $a_{nn} = -17,6$ фм, $r_0 = 2,8$ фм, использовали формулу МВ, подгоняя ее параметры таким образом, чтобы наилучшим образом воспроизвести форму пика ВКС пары нейтронов. Оказалось, что определенная в результате этой процедуры длина рассеяния отличается от исходной не более чем на $0,5$ фм, а при определенном выборе кинематики (большой переданный импульс) дает исходную величину $-17,6$ фм.

Для планирования эксперимента очень важно выяснить вопрос о зависимости формы пика ВКС в реальных условиях (т.е. с учетом конечности и эффективности детекторов, энергетического разрешения). С этой целью было проведено компьютерное моделирование реакции nd-развала.

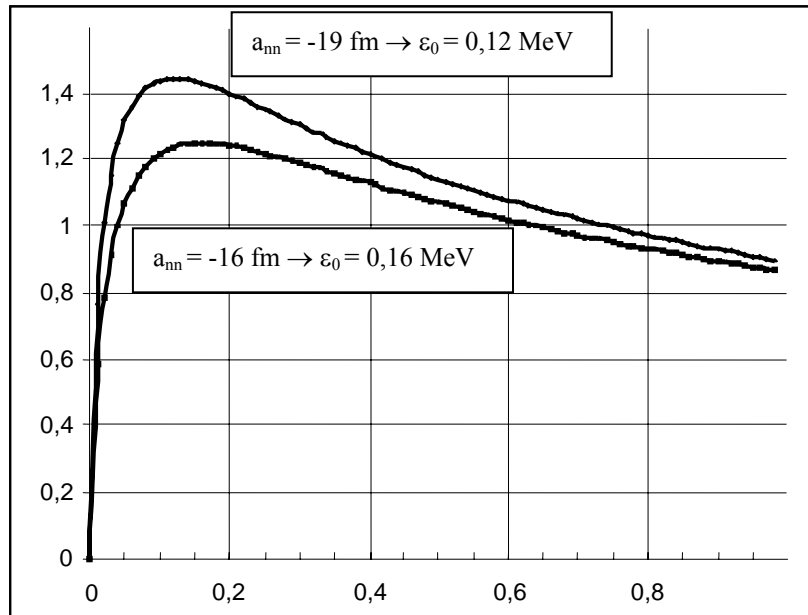


Рис. 1. Зависимость выхода реакции $nd \rightarrow pnn$ от относительной энергии двух нейтронов для двух значений длины nn -рассеяния.

4. Моделирование эксперимента

Трехчастичная кинематика реакции $n+d \rightarrow p+n+n$ моделируется в два этапа:

1. $n + d \rightarrow p + (nn)$; $M_{nn} = M_n + M_n + \varepsilon$; рассчитываются Θ_p, E_p и Θ_{nn}, E_{nn} ;
2. $(nn) \rightarrow n_1 + n_2$; $M_{nn} = M_n + M_n + \varepsilon$ на выходе + $\Theta_{n1}, \Theta_{n2}, E_{n1}, E_{n2}$.

При этом разыгрывается энергия налетающего нейтрона и углы вылета частиц в системе центра масс. Зависимость выхода реакции от ε закладывается количеством разыгрываемых событий с разными ε согласно кривым, сосчитанным по формуле МВ с определенным значением параметра ε_0 . Таким образом вводится зависимость формы распределения выхода реакции от длины nn -рассеяния. Затем закладывается экспериментальная схема (рис. 2): расположение и количество детекторов и их энергетическое и угловое разрешение.

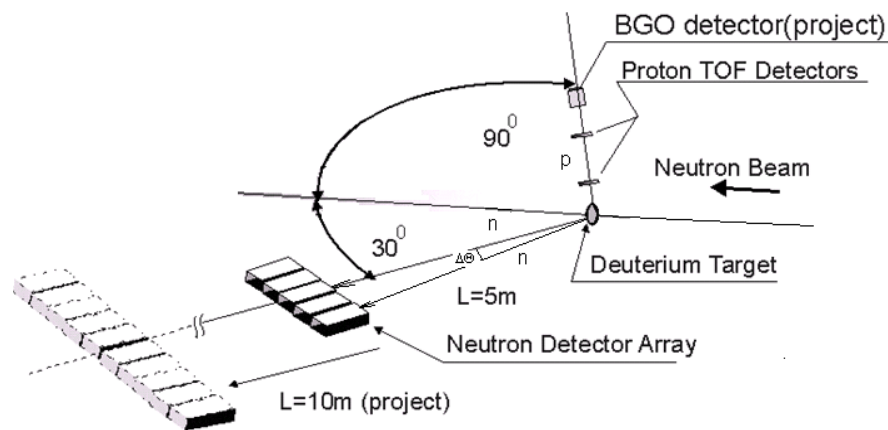


Рис. 2. Экспериментальная схема установки для определения длины nn рассеяния в реакции $nd \rightarrow pnn$.

С учетом разрешения детектора и при условии попадания частицы (протона или нейтрона) в детектор определяется ее энергия (импульс) по времени пролета частицы от мишени до детектора. Угол вылета определяется с учетом углового разрешения по номеру детектора, в который попадает частица. Затем при условии, что два нейтрона от одного события попали в два нейтронных детектора, а протон попал в протонный детектор, вычисляется относительная энергия двух нейтронов по формуле (1) и строится распределение числа событий от величины ε .

Полученное в результате моделирования распределение (рис. 3) будет отличаться от входного (истинного) распределения, вследствие конечного размера детектирующей системы, исключающей определенное количество истинных событий из процесса детектирования, а также вследствие конечного энергетического и углового разрешения детекторов приводящего к ошибке в определении величины ε .

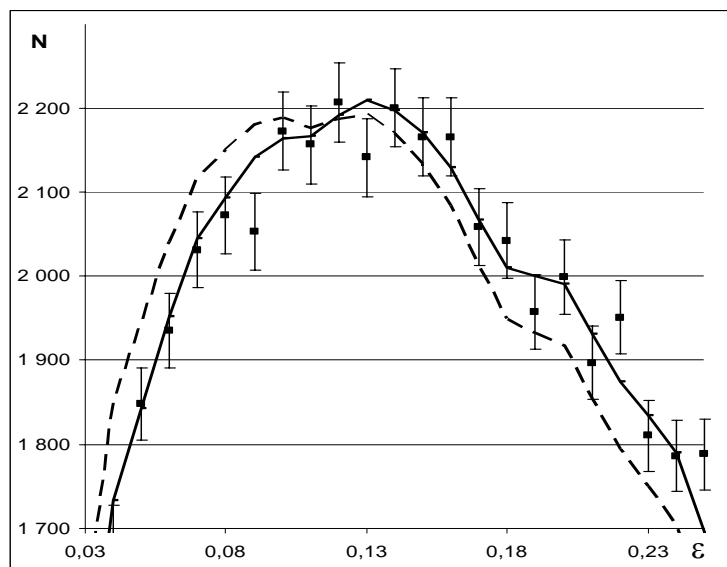


Рис. 3. Сравнение результатов численного эксперимента и подгонки с использованием формулы МВ и рассчитанных аппаратных функций. Условия эксперимента: угловой захват нейтронного годоскопа $\Delta\Theta = 12^\circ$, пролетное расстояние 20 м, временное разрешение 0,5 нс. Экспериментальные точки – моделированная зависимость выхода реакции $pn \rightarrow pnp$ от относительной энергии двух нейтронов ε для длины pn -рассеяния -16 фм. Сплошная кривая – результат подгонки (полученная длина pn -рассеяния -16,2 фм), пунктирная кривая - подгонка для зафиксированной длины pn -рассеяния -19 фм.

Чтобы решить проблему восстановления исходного распределения, т.е. определения величины длины рассеяния, необходимо решение обратной задачи с применением аппаратных функций (АФ) учитывающих экспериментальные условия для различных значений ε . Представляя искомую функцию $Y_{in}(E)$ как суперпозицию монохромных $\delta(E_i)$ -функций в точках E_i с амплитудой K_i , параметризованной в виде кривой МВ, можно представить измеренное значение распределения $Y_{out}(E)$ в виде суперпозиций аппаратных функций

$$Y_{out}(E_i) = \sum_{j=1}^N K_j \cdot \varphi_j(E_i), \quad (2)$$

где N – число экспериментальных точек.

Система уравнений (2) решалась методом подгонки, используя значения погрешностей измеряемых величин и критерий χ^2 -Пирсона, а параметры A и ε_0 величин $K_j = \frac{A\sqrt{\varepsilon}}{\varepsilon + \varepsilon_0}$ в качестве параметров подгонки.

Из рис. 3 видно, что результаты численного эксперимента, полученного для длины pn -рассеяния -16 фм, хорошо согласуются с результатами подгонки параметров A и ε_0 . При этом полученное значение параметра ε_0 соответствует величине длины pn -рассеяния $-16,11 \pm 0,3$ фм. Кривая подгонки при фиксированном параметре ε_0 , отвечающем длине pn -рассеяния -19 фм, дает худшее согласие с результатами численного эксперимента и соответственно большее значение χ^2 . Полученные результаты показывают возможность извлечения значений синглетной длины рассеяния a_{nn} с точностью $\sim 0,3$ фм, что может позволить устранить существующую неоднозначность в определении величины a_{nn} .

5. Экспериментальная установка

Дейтериевая мишень будет облучена на нейтронном пучке канала РАДЕКС Московской мезонной фабрики ИЯИ при энергии нейтронов ~ 70 МэВ. Энергии протонов и нейтронов, образующихся в реакции, будут измерены методом времени пролета, используя детектирующую систему двухплечевого

спектрометра TAMS (см. рис.2) . В эксперименте будут детектироваться три частицы, при этом два нейтрона будут регистрироваться при небольшом относительном угле (геометрия ВКС). Третья частица (протон) будет детектироваться под углом, соответствующим кинематике двухчастичной реакции ($n + d \rightarrow p + (nn)$). В ноябре 2005 г. на нейтронном канале РАДЭКС Экспериментального комплекса Московской мезонной фабрики ИЯИ был проведен тестовый эксперимент с использованием многодетекторного время-пролетного спектрометра. Полученные спектры протонов и нейтронов из реакций $nd \rightarrow pnn$ и $np \rightarrow pr$ дали оценку потока и энергетического спектра быстрых нейтронов (40 - 140 МэВ) канала РАДЭКС (рис. 4) и позволяют надеяться на получение статистически обеспеченных данных в эксперименте по определению длины nn -рассеяния.

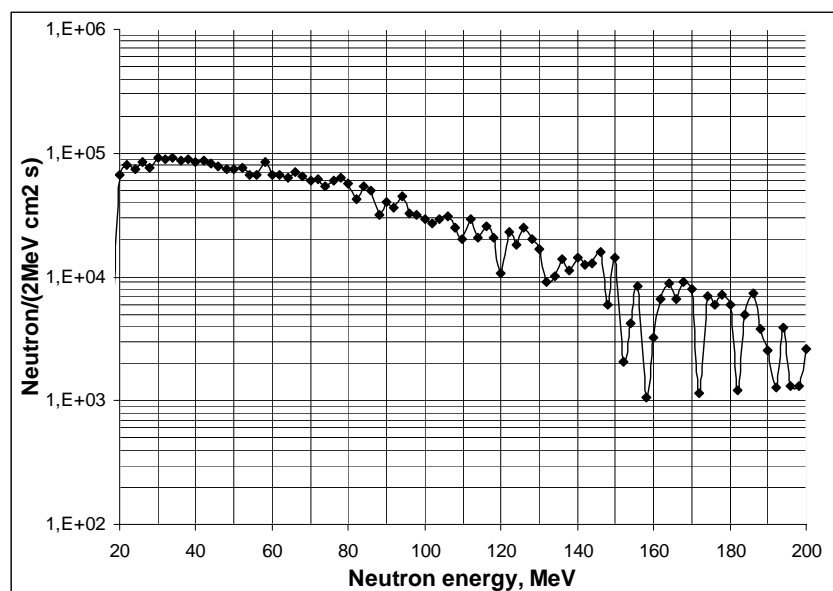


Рис. 4. Спектр быстрых нейтронов канала РАДЭКС Московской мезонной фабрики на расстоянии 12 м от нейтронообразующей мишени. Энергия протонного пучка на вольфрамовой мишени 209 МэВ, ток протонов 5 мкА.

Работа поддержана РФФИ, грант № 06-02-17462а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Miller G.A., Nefkens B.M.K., Šlaus I. Charge symmetry, quarks and mesons // Phys. Rep. - 1990. - Vol. 194. - P. 1 - 116.
2. Glöckle W., Witala H., Hüber D. et al. The three-nucleon continuum: achievements, challenges and applications// Phys. Rep. - 1996. - Vol. 274. - P. 107 - 285.
3. Entem D.R., Fernandez F., Valcarel A. Charge dependence and charge a symmetry of nuclear forces in chiral quark cluster models // Phys. Lett. - 1999. - Vol. B463. - P. 153 - 158.
4. Gonzales Trotter D.E., Salinas F., Chen Q. et al. New measurement of the 1S_0 neutron-neutron scattering length using the neutron-proton scattering length as a standard // Phys. Rev. - 1999. - Vol. C83. - P. 3788 - 3791.
5. Huhn V., Wätzold L., Weber Ch. et al. New investigation of the neutron-neutron and neutron-proton final state interaction in the n-d breakup reaction // Phys. Rev. - 2000. - Vol. C63. - P. 014003 (1 - 12).
6. Howell C. R., Chen Q., Carman T.S. et al. Toward a resolution of the neutron-neutron scattering length issue // Phys. Lett. - 1998. - Vol. B444. - P. 252 - 259.
7. Bäumer C., Frekers D., Grewe E.-W. et al. Measurement of the $^2\text{H}(d,^2\text{He})2n$ reaction at $E_d = 171$ MeV and implications for the neutron-neutron scattering length // Phys. Rev. - 2005. - Vol. C71. - P. 044003 (1 - 12).
8. Gårdestig A., Phillips D.R. Using chiral perturbation theory to extract the neutron-neutron scattering length from $\pi - d \rightarrow nn\gamma$ // Phys. Rev. - 2006. - Vol. C73. - P. 0140023 (1 - 14).
9. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Квантовая механика. - М.: Физматгиз, 1963.
10. Гольдбергер М., Ватсон К. Теория столкновений. - М.: Мир, 1967.
11. Okamura H. Three body treatment of the $(d,^2\text{He})$ reaction on the basis of the adiabatic approximation // Phys. Rev. - 1999. - Vol. C60. - P. 064602 (1 - 8).

DETERMINATION OF SINGLET nn-SCATTERING LENGTH FROM DATA ON nn-FINAL STATE INTERACTION IN $n + d \rightarrow p + n + n$ REACTION

E. S. Konobeevski, M. V. Mordovskoy, S. I. Potashev, V. A. Sergeev, S. V. Zuev

An experiment is proposed for the high-precision determination of the neutron-neutron scattering length investigating the nn final state interaction in the nd breakup reaction. In this experiment neutron-neutron scattering length is determined by measuring the yield of the nd breakup reaction as a function of the relative energy ϵ_{nn} of two neutrons. The theory of reactions in 3N system predicts the ϵ_{nn} dependence of the FSI cross section being sensitive to the value of a_{nn} . The measurements will be made using the neutron channel RADEX at Moscow meson factory of the Institute for Nuclear Research. The momenta and angles of the two emitted neutrons and the energy of the proton will be measured for each breakup event. The measured dependence of the reaction yield on the relative energy of the two neutrons will be compared to results of the Monte Carlo simulation that includes the finite geometry and resolution of the experimental setup as well as rigorous three-body calculations of the nd breakup reaction.

ВИЗНАЧЕННЯ СИНГЛЕТНОЇ ДОВЖИНИ nn-РОЗСІЯННЯ З ДАНИХ ПРО ВЗАЄМОДІЮ В КІНЦЕВОМУ СТАНІ В РЕАКЦІЇ $nd \rightarrow pnn$

Е. С. Конобєєвський, М. В. Мордовської, С. І. Поташев, В. А. Сергєєв, С. В. Зуєв

Запропоновано експеримент по визначенню синглетної довжини nn-розсіяння в реакції nd-розвалу на нейтронному каналі Московської мезонної фабрики Інституту ядерних досліджень РАН (ІЯД). В експерименті передбачається визначення довжини розсіяння із залежності виходу реакції nd-розвалу від величини енергії відносного руху $\epsilon_{nn} = (E_1 + E_2 - 2(E_1 E_2)^{1/2} \cos \theta) / 2$ двох нейтронів у кінематичній області, що відповідає малим значенням цієї енергії, де найбільш сильно проявляється nn-взаємодія в кінцевому стані. В експерименті будуть реєструватися в збігу два нейтрони, що вилітають у вузькому конусі кутів відносно до напрямку руху їх центра мас, вимірятися енергії цих нейтронів E_1 і E_2 та кут θ між ними. У листопаді 2005 р. на нейтронному каналі РАДЕКС Експериментального комплексу Московської мезонної фабрики ІЯД було проведено тестовий експеримент із використанням багатодетекторного час-пролітного спектрометра. Отримані спектри протонів і нейтронів з реакцій $nd \rightarrow pnn$ і $pr \rightarrow pr$ дали оцінку потоку й енергетичного спектра швидких нейтронів (40 – 140 Мев) каналу РАДЕКС і дають змогу сподіватися на одержання статистично забезпечених даних в експерименті по визначенню довжини nn-розсіяння.