

НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ НЕЙТРОН-НЕЙТРОННОГО РАССЕЯНИЯ

Исследовано влияние разности масс заряженного и нейтрального π -мезонов на низкоэнергетические параметры нуклон-нуклонного взаимодействия в состоянии 1S_0 . С использованием экспериментальных значений синглетных параметров np -рассеяния и экспериментального значения энергии виртуального уровня nn -системы в состоянии 1S_0 получены следующие значения нейтрон-нейтронной длины рассеяния и эффективного радиуса: $a_{nn} = -16,59(114)$ фм, $r_{nn} = 2,826(86)$ фм. Рассчитанные значения находятся в согласии с современными экспериментальными результатами.

Ключевые слова: нейтрон-нейтронное рассеяние, нейтрон-нейтронное взаимодействие, зарядовая зависимость ядерных сил, параметры теории эффективного радиуса, нейтрон-нейтронная длина рассеяния.

Введение

Низкоэнергетические характеристики нуклон-нуклонного (NN) взаимодействия являются фундаментальными величинами, играющими существенную роль в исследованиях сильного NN -взаимодействия. Эти величины имеют также важное значение при построении различных реалистических моделей ядерных сил, которые в свою очередь являются основой при изучении структуры ядер и различных ядерных процессов.

Особую роль играют исследования низкоэнергетических характеристик NN -взаимодействия в синглетном спиновом состоянии 1S_0 . Эти исследования являются важными в связи с проверкой гипотезы о зарядовой независимости и зарядовой симметрии ядерных сил. Эта гипотеза в определенной степени подтверждается приблизительным равенством значений энергий связи изобарных ядер. Однако для окончательного решения этой проблемы крайне важными являются экспериментальные и теоретические исследования, связанные с достаточно точным определением низкоэнергетических характеристик нейтрон-протонного (np), протон-протонного (pp) и нейтрон-нейтронного (nn) взаимодействий.

Характеристики np - и pp -системы с высокой степенью точности определяются непосредственно из эксперимента. В то же время ввиду отсутствия нейтронных мишеней прямое изучение рассеяния нейтрона на нейтроне является невозможным. Для экспериментального определения параметров nn -взаимодействия обычно используются ядерные реакции, приводящие к образованию в конечном состоянии двух взаимодействующих нейтронов. Подробный обзор экспериментальных и теоретических методов определения нейтрон-нейтронной длины рассеяния a_{nn} с

использованием этих реакций дан в работе [1]. Невозможность строгого теоретического анализа экспериментов по определению нейтрон-нейтронной длины рассеяния a_{nn} приводит к существенному разбросу ее значений. На основе большого числа экспериментальных данных, полученных до 1974 г., в [1] было определено средневзвешенное значение нейтрон-нейтронной длины рассеяния $a_{nn} = -16,61(54)$ фм, которое находится в согласии с современными значениями $a_{nn} = -16,1(4)$ фм [2] и $a_{nn} = -16,5(9)$ фм [3]. В то же время в работах [4, 5] получено значение $a_{nn} = -18,7(7)$ фм, которое существенно отличается от значений, полученных в [2, 3]. Для устранения существующей на данный момент неопределенности необходима постановка новых экспериментов по определению нейтрон-нейтронной длины рассеяния с использованием реакций по nd -развалу [6, 7], а также экспериментов по прямому измерению нейтрон-нейтронного сечения рассеяния при нулевой энергии $\sigma_{nn}(0) = \pi a_{nn}^2$ [8].

Одной из реакций, приводящих к образованию в конечном состоянии двух взаимодействующих нейтронов, является реакция развала дейтрона $n + d \rightarrow p + n + n$. Моделирование этой реакции с использованием формулы Мигдала - Ватсона [9, 10] позволяет определить значение виртуального уровня nn -системы ϵ_{nn} в состоянии 1S_0 [6, 7].

В настоящее время для описания NN -взаимодействия часто используются полуфеноменологические потенциальные модели однобозонного обмена, которые включают обмен различными мезонами. При этом обмен более легкими π -мезонами определяет в основном дальнедействующую

щую часть NN -потенциала, а обмен более тяжелыми p - и ω -мезонами определяет взаимодействие на средних и малых расстояниях, которое является существенным при более высоких энергиях. При наиболее низких энергиях, которые эффективно соответствуют большим расстояниям, для описания NN -взаимодействия вполне оправданным является использование простейших потенциалов однопионного обмена. С учетом вышеизложенного в настоящей работе в предположении, что ядерные силы в NN -системе при низких энергиях обусловлены в основном обменом виртуальными π -мезонами и описываются сепарабельным потенциалом Ямагучи [11], изучено влияние разности масс заряженного и нейтрального π -мезонов на низкоэнергетические параметры NN -рассеяния в состоянии 1S_0 . Установлена связь низкоэнергетических параметров np -системы с аналогичными параметрами nn -системы, которая позволяет с использованием значения энергии виртуального уровня nn -системы определить значения нейтрон-нейтронной длины рассеяния a_{nn} и эффективного радиуса рассеяния r_{nn} .

Нуклон-нуклонное взаимодействие

Исследование NN -взаимодействия в синглетном спиновом состоянии 1S_0 является важным в связи с проверкой гипотезы о зарядовой независимости и зарядовой симметрии ядерных сил. Для описания NN -взаимодействия будем использовать нелокальный сепарабельный потенциал Ямагучи [11], который в импульсном представлении имеет вид

$$V(k, k') = -\frac{\lambda}{4\pi^2\mu} g(kR)g(k'R), \quad (1)$$

где

$$g(kR) = \frac{1}{1+k^2R^2}. \quad (2)$$

Потенциал (1) описывает связанное состояние двух нуклонов и рассеяние нуклона на нуклоне в области низких энергий (μ - приведенная масса системы двух нуклонов, k - волновое число, соответствующее относительному движению двух нуклонов). Данный потенциал позволяет получить точное решение задачи двух нуклонов в простом аналитическом виде. Взаимодействие (1) характеризуется двумя параметрами – константой связи λ и радиусом R . Формфактор $g(kR)$ при этом определяет форму нуклон-нуклонного взаимодействия и для удобства нормирован таким образом, что при $k = 0$ принима-

ет значение единица ($g(0) = 1$). В координатном представлении формфактор потенциала Ямагучи имеет юкавскую радиальную зависимость

$$g(r) = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{e^{-r/R}}{R^2 r}. \quad (3)$$

В случае, если форма потенциала определяется функцией $g(kR)$ вида (2), функция эффективного радиуса $k \operatorname{ctg} \delta$ является полиномом второй степени относительно величины k^2

$$k \operatorname{ctg} \delta = -\frac{1}{a} + \frac{1}{2} r_0 k^2 + v_2 k^4. \quad (4)$$

При этом для длины рассеяния a , эффективного радиуса r_0 и параметра формы v_2 имеют место следующие формулы:

$$\frac{1}{a} = -\frac{1}{\lambda} + \frac{1}{2R}, \quad (5)$$

$$r_0 = \frac{4R^2}{\lambda} + R, \quad (6)$$

$$v_2 = \frac{R^4}{\lambda}. \quad (7)$$

При $\lambda > 0$ потенциал (1) в состоянии 1S_0 допускает наличие одного виртуального состояния с энергией

$$\varepsilon = \frac{\hbar^2 \alpha^2}{2\mu}, \quad (8)$$

где волновое число системы двух нуклонов $\alpha < 0$. В случае, если форма потенциала определяется функцией (2), волновое число α связано с величинами λ и R соотношением

$$\lambda = 2R(1 + \alpha R)^2. \quad (9)$$

Определение низкоэнергетических параметров протон-протонного и нейтрон-нейтронного рассеяния

Одним из методов проверки гипотез зарядовой независимости и зарядовой симметрии ядерных сил является сравнение длин и эффективных радиусов np , pp и nn -рассеяния. В этом случае для различных пар нуклонов можно сравнивать также значения энергий виртуальных уровней соответствующих систем. При сравнении низкоэнергетических характеристик NN -взаимодей-

ствия следует иметь в виду, что в случае pp -взаимодействия нужно использовать чисто ядерные низкоэнергетические параметры, полученные в результате исключения из экспериментальных параметров электромагнитной компоненты pp -взаимодействия.

Согласно мезонной теории Юкавы сильное ядерное взаимодействие между двумя нуклонами обусловлено в основном обменом виртуальными π -мезонами, который определяет дальнюю действующую часть NN -взаимодействия и соответственно рассеяние при самых низких энергиях. При этом радиус действия ядерных сил обратно пропорционален массе π -мезона и является малой величиной:

$$R \lesssim \frac{\hbar}{m_{\pi}c} \approx 1,4 \text{ фм}. \quad (10)$$

Различие в радиусах действия ядерных сил между двумя нейтронами (либо протонами) и между нейтроном и протоном обусловлено при этом тем, что одинаковые нуклоны обмениваются нейтральным π^0 -мезоном с массой

$$m_{\pi^0} = 134,9766(6) \text{ МэВ}, \quad (11)$$

а нейтрон и протон могут обмениваться как нейтральным π^0 -мезоном, так и заряженными π^{\pm} -мезонами с массой

$$m_{\pi^{\pm}} = 139,57018(35) \text{ МэВ}. \quad (12)$$

В связи с этим естественно предположить, что

$$R_{nn} = R_{pp} = \frac{\bar{m}_{\pi}}{m_{\pi^0}} R_{np}, \quad (13)$$

где $\bar{m}_{\pi} \equiv (m_{\pi^+} + m_{\pi^-} + m_{\pi^0})/3$ — усредненная масса нейтрального и заряженных π -мезонов. Отношение средней массы π -мезона \bar{m}_{π} к массе нейтрального π^0 -мезона составляет в таком случае величину

$$\frac{\bar{m}_{\pi}}{m_{\pi^0}} = 1,0227. \quad (14)$$

В случае описания нейтрон-протонного взаимодействия потенциалом Ямагучи (1), (2) с использованием найденного нами значения полного сечения np -рассеяния при нулевой энергии $\sigma_0 = 20,4288(146) \text{ бн}$ [12], экспериментальных значений когерентной длины np -рассеяния $f = -3,7406(11) \text{ фм}$ [13, 14], энергии связи дей-

трона $\epsilon_d = 2,224575(9) \text{ МэВ}$ [15], а также полных сечений np -рассеяния в области кэвных энергий [16 - 18] нами найдены следующие значения низкоэнергетических параметров np -рассеяния в триплетном и синглетном спиновых состояниях:

$$\begin{aligned} a_{np}^t &= 5,4114(27) \text{ фм}, & r_{np}^t &= 1,7580(35) \text{ фм}, \\ v_{2np}^t &= 0,1321 \text{ фм}^3, \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} a_{np}^s &= -23,7154(80) \text{ фм}, & r_{np}^s &= 2,706(67) \text{ фм}, \\ v_{2np}^s &= 0,3416 \text{ фм}^3. \end{aligned} \quad (16)$$

Параметры (15) и (16) позволяют с высокой степенью точности описать экспериментальные сечения по рассеянию нейтронов протонами в области низких энергий, а также связанное состояние np -системы – дейтрон.

С использованием синглетных длины рассеяния и эффективного радиуса np -взаимодействия из выражений (16) в соответствии с выражениями (5) и (6) для синглетного радиуса действия ядерных сил в случае np -системы получим

$$R_{np} = 0,8604(204) \text{ фм}. \quad (17)$$

С учетом значения синглетного радиуса действия (17), согласно формулам (13) и (14), для радиусов действия ядерных сил в случае nn - и pp -систем получим

$$R_{nn} = R_{pp} = 0,8799(208) \text{ фм}. \quad (18)$$

Используя значение чисто ядерной протон-протонной длины рассеяния [19]

$$a_{pp} = -17,3(4) \text{ фм}, \quad (19)$$

для чисто ядерного эффективного радиуса pp -рассеяния, в соответствии с формулами (5), (6) и (18), получим значение

$$r_{pp} = 2,819(75) \text{ фм}, \quad (20)$$

которое очень хорошо согласуется с рекомендованным на данный момент значением [19]

$$r_{pp} = 2,85(4) \text{ фм}. \quad (21)$$

Для определения низкоэнергетических параметров нейтрон-нейтронного рассеяния воспользуемся недавними экспериментальными результатами по реакции nd -развала, полученными в [6]. Экспериментальная зависимость выхода ре-

акции $n + d \rightarrow p + n + n$ от относительной энергии движения двух нейтронов ϵ в [6] моделировалась с использованием формулы Мигдала - Ватсона [9, 10]

$$F_{MW} = A \frac{\sqrt{\epsilon}}{\epsilon + \epsilon_{nn}}, \quad (22)$$

где параметр A и энергия виртуального уровня системы нейтрон-нейтрон ϵ_{nn} являются параметрами подгонки. Моделирование реакции nd -развала с использованием формулы (22) позволяет непосредственно из эксперимента определить энергию виртуального уровня ϵ_{nn} , которая связана с низкоэнергетическими параметрами нейтрон-нейтронного рассеяния соотношением

$$\frac{1}{a_{nn}} = -\left(\frac{m_n \epsilon_{nn}}{\hbar^2}\right)^{1/2} - \frac{1}{2} r_{nn} \frac{m_n \epsilon_{nn}}{\hbar^2} + v_{2nn} \left(\frac{m_n \epsilon_{nn}}{\hbar^2}\right)^2 \quad (23)$$

(m_n - масса нейтрона), либо в терминах волнового числа виртуального уровня α_{nn}

$$\frac{1}{a_{nn}} = \alpha_{nn} - \frac{1}{2} r_{nn} \alpha_{nn}^2 + v_{2nn} \alpha_{nn}^4. \quad (24)$$

В работе [6] путем сравнения экспериментальных данных и результатов моделирования реакции $n + d \rightarrow p + n + n$ с использованием формулы Мигдала - Ватсона (22) в приближении нулевого радиуса действия ядерных сил ($r_{nn} = 0$) было получено значение нейтрон-нейтронной длины рассеяния

$$a_{nn} = -17,9(10) \text{ фм}. \quad (25)$$

Значению длины a_{nn} (25) соответствуют следующие значения энергии виртуального уровня системы нейтрон-нейтрон

$$\epsilon_{nn} = 0,1293(158) \text{ МэВ} \quad (26)$$

**Низкоэнергетические характеристики NN -взаимодействия в состоянии 1S_0 .
Значения энергий виртуальных уровней np - и pp -систем
были рассчитаны в приближении параметра формы**

| NN -взаимодействие | ϵ , МэВ | α , фм^{-1} | a , фм | r_0 , фм | v_2 , фм^3 |
|----------------------|------------------|-----------------------------|--------------|------------|-----------------------|
| np | 0,06635(2) | -0,04000(6) | -23,7154(80) | 2,706(67) | 0,3416 |
| pp | 0,1198(58) | -0,05373(128) | -17,3(4) | 2,819(75) | 0,3753 |
| nn | 0,1293(158) | -0,05587(331) | -16,59(114) | 2,826(86) | 0,3768 |

Значения эффективных радиусов pp - и nn -рассеяния примерно равны между собой и превышают эффективный радиус np -рассеяния на

и волнового числа

$$\alpha_{nn} = -0,05587(331) \text{ фм}^{-1}. \quad (27)$$

Будем использовать далее значения (26) и (27) в качестве экспериментальных значений энергии и волнового числа виртуального уровня нейтрон-нейтронной системы.

Учтем теперь конечность радиуса действия ядерных сил путем описания нейтрон-нейтронного взаимодействия потенциалом (1), (2). В этом случае в соответствии с формулами (5) - (7), (9) с использованием формул (18) и (27) для низкоэнергетических параметров нейтрон-нейтронного рассеяния получим значения:

$$a_{nn} = -16,59(114) \text{ фм}, \quad (28)$$

$$r_{nn} = 2,826(86) \text{ фм}, \quad (29)$$

$$v_{2nn} = 0,3768 \text{ фм}^3. \quad (30)$$

Таким образом, учет конечности радиуса действия ядерных сил приводит к уменьшению абсолютного значения длины nn -рассеяния, полученной в приближении нулевого радиуса, на величину

$$\Delta a_{nn} \approx 1,3 \text{ фм}, \quad (31)$$

что в относительных единицах составляет 7,3 %.

В таблице приведены значения основных низкоэнергетических характеристик NN -взаимодействия в состоянии 1S_0 . Как видно из таблицы, значения низкоэнергетических параметров np -взаимодействия существенно отличаются от значений низкоэнергетических параметров, соответствующих pp - и nn -взаимодействию. Разность в длинах рассеяния составляет величину порядка 7 фм, что в относительных единицах равно 30 %. Значения же энергий виртуальных уровней pp - и nn -систем превышают значение энергии виртуального уровня np -системы на 80 и 95 % соответственно.

4,8 %, что обусловлено разностью масс нейтрального и заряженного π -мезонов. Следует отметить, что эффективные радиусы нуклон-

нуклонного рассеяния на 90 % определяются радиусом действия ядерных сил R_{NN} . Таким образом, приближенное равенство эффективных радиусов pp - и nn -рассеяния связано с равенством радиусов действия ядерных сил в pp - и nn -взаимодействии ($R_{nn} = R_{pp} = 0,8799$ фм). Поскольку радиусы действия ядерных сил в pp - и nn -взаимодействии больше радиуса действия ядерных сил в np -взаимодействии ($R_{np} = 0,8604$ фм), то эффективные радиусы pp - и nn -рассеяния превышают эффективный радиус np -рассеяния на величину $\approx 0,12$ фм. Погрешность эффективных радиусов pp - и nn -рассеяния определяется в основном погрешностью радиуса действия ядерных сил и практически совпадает с погрешностью эффективного радиуса np -рассеяния.

Значения параметра формы ν_2 для pp - и nn -взаимодействия практически равны между собой и превышают значение параметра формы для np -взаимодействия на $0,035$ фм³, что в относительных единицах составляет ~ 9 %. Следует заметить, что значения безразмерных параметров формы $P = -\nu_2 / r_0^3$ для np -, pp - и nn -взаимодействия соответственно равны $-0,0172$, $-0,0168$ и $-0,0167$, т.е. практически не отличаются друг от друга.

Таким образом, из сравнения значений низкоэнергетических параметров np -системы с аналогичными параметрами pp - и nn -систем следует нарушение зарядовой независимости ядерных сил, которое обусловлено различием масс заряженного и нейтрального π -мезонов. Сделать вывод о нарушении гипотезы зарядовой симметрии ядерных сил, как видно из таблицы, крайне затруднительно ввиду больших погрешностей в значениях длины рассеяния и энергии виртуального уровня нейтрон-нейтронной системы. Улучшение точности эксперимента по определению энергии виртуального уровня нейтрон-нейтронной системы позволило бы сделать более определенное заключение по этому поводу.

Заключение

В предположении, что ядерные силы в нуклон-нуклонной системе обусловлены в основном обменом виртуальными π -мезонами, было изучено влияние разности масс заряженных и нейтральных π -мезонов на низкоэнергетические характеристики NN -взаимодействия в состоянии 1S_0 . Установлена связь низкоэнергетических параметров np -системы с аналогичными параметрами nn -системы, которая позволяет с использованием значения энергии виртуального уровня nn -системы определить значения длины рассея-

ния a_{nn} и эффективного радиуса рассеяния r_{nn} .

В качестве основы для расчетов и сравнений параметров pp - и nn -систем используются низкоэнергетические параметры np -рассеяния: $a_{np}^s = -23,7154(80)$ фм, $r_{np}^s = 2,706(67)$ фм. Для извлеченного из эксперимента значения ядерной длины pp -рассеяния $a_{pp} = -17,3(4)$ фм было рассчитано значение ядерного эффективного радиуса pp -рассеяния $r_{pp} = 2,819(75)$ фм, которое оказалось в очень хорошем согласии с рекомендованным на данный момент значением [19] $r_{pp} = 2,85(4)$ фм.

Используя недавние экспериментальные результаты работы [6] по исследованию реакции $n + d \rightarrow p + n + n$, рассчитаны значения низкоэнергетических параметров nn -рассеяния: $a_{nn} = -16,59(114)$ фм, $r_{nn} = 2,826(86)$ фм. Полученное нами значение нейтрон-нейтронной длины рассеяния $a_{nn} = -16,59(114)$ фм находится в очень хорошем согласии со средневзвешенным значением $a_{nn} = -16,61(54)$ фм [1], со значением $a_{nn} = -16,5(9)$ фм [3], а также со значением $a_{nn} = -16,1(4)$ фм, найденным в [2]. В то же время, рассчитанное нами значение находится в противоречии со значениями $a_{nn} = -18,7(7)$ фм [4, 5] и $a_{nn} = -18,50(53)$ фм [20].

Полученное значение эффективного радиуса нейтрон-нейтронного рассеяния $r_{nn} = 2,826(86)$ фм практически оказалось почти равным значению чисто ядерного эффективного радиуса протон-протонного рассеяния $r_{pp} = 2,819(75)$ фм. Равенство значений эффективных радиусов pp - и nn -рассеяния связано в основном с равенством радиусов действия ядерных сил в pp - и nn -взаимодействии, а их небольшое отличие на величину $\sim 0,01$ фм объясняется отличием длин рассеяния a_{pp} и a_{nn} между собой на величину $\sim 0,7$ фм. Погрешность в значениях эффективных радиусов r_{pp} и r_{nn} определяется в основном погрешностью эффективного радиуса np -рассеяния. Полученное нами в соответствии с формулами (6), (9), (18) и (27) значение нейтрон-нейтронного эффективного радиуса $r_{nn} = 2,826(86)$ фм практически совпадает со значением $r_{nn} = 2,83(11)$ фм, непосредственно определенным из эксперимента [21], а также прекрасно согласуется со значением этой величины $r_{nn} = 2,85(60)$ фм, приведенным в работе [22]. С другими значениями $r_{nn} = 2,69(27)$ фм [23] и $r_{nn} = 2,9(4)$ фм [24] полученное нами значение согласуется несколько хуже, хотя и не противоречит им.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kюн Б.* Измерение длины рассеяния нейтрона на нейтроне и вопрос о зарядовой зависимости ядерных сил // ЭЧАЯ. - 1975. - Т. 6, вып. 2. - С. 347 - 392.
2. *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. - 2001. - Vol. C63, No. 1. - 014003.
3. *von Witsch W., Ruan X., Witala H.* Neutron-Neutron Final-State Interaction in the $^2\text{H}(n,p)2n$ Reaction at $E_n = 17.4$ MeV // Phys. Rev. - 2006. - Vol. C74, No. 1. - 014001.
4. *González 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. Lett. - 1999. - Vol. 83, No. 19. - P. 3788 - 3791.
5. *Gonzalez Trotter D.E., Salinas Meneses F., Tornow W. et al.* Neutron-Deuteron Breakup Experiment at $E_n = 13$ MeV: Determination of the 1S_0 Neutron-Neutron Scattering Length a_{nn} // Phys. Rev. - 2006. - Vol. C73, No. 3. - 034001.
6. *Конобеевский Е.С., Бурмистров Ю.М., Зуев С.В. и др.* Определение 1S_0 нейтрон-нейтронной длины в реакции nd -развала при $E_n = 40 - 60$ МэВ // Ядерная физика. - 2010. - Т. 73, вып. 8. - С. 1343 - 1349.
7. *Конобеевский Е.С., Кукулин В.И., Мордовской М.В. и др.* Определение длины нейтрон-нейтронного рассеяния из экспериментов по nd -развалу: экспериментальные и теоретические аспекты // Изв. РАН. Сер. физ. - 2011. - Т. 75, вып. 4. - С. 478 - 484.
8. *Mitchell G.E., Furman W.I., Lychagin E.V. et al.* A Direct Measurement of the Neutron-Neutron Scattering Length // Braz. J. Phys. - 2005. - Vol. 35, No. 3B. - P. 850 - 853.
9. *Мигдал А.Б.* Теория ядерных реакций с образованием медленных частиц // ЖЭТФ. - 1955. - Т. 28, вып. 1. - С. 3 - 9.
10. *Watson K.M.* The Effect of Final State Interactions on Reaction Cross Sections // Phys. Rev. - 1952. - Vol. 88, No. 5. - P. 1163 - 1171.
11. *Yamaguchi Y.* Two-Nucleon Problem When the Potential Is Nonlocal but Separable. I // Phys. Rev. - 1954. - Vol. 95, No. 6. - P. 1628 - 1634.
12. *Бабенко В.А., Петров Н.М.* Определение низкоэнергетических параметров np -рассеяния в приближении параметра формы из современных экспериментальных данных при низких энергиях // Ядерная физика. - 2010. - Т. 73, вып. 9. - С. 1545 - 1553.
13. *Koester L. and Nistler W.* New Determination of the Neutron-Proton Scattering Amplitude and Precise Measurements of the Scattering Amplitudes on Carbon, Chlorine, Fluorine and Bromine // Z. Phys. - 1975. - Vol. A272, No. 2. - P. 189 - 196.
14. *Sears V.F.* Local-Field Refinement of Neutron Scattering Lengths // Z. Phys. - 1985. - Vol. A321, No. 3. - P. 443 - 449.
15. *Van Der Leun C. and Alderliesten C.* The Deuteron Binding Energy // Nucl. Phys. - 1982. - Vol. A380, No. 2. - P. 261 - 269.
16. *Кирилюк А.Л., Гребнев А.В., Ворона П.Н., Гнидак Н.Л.* Изучение взаимодействия промежуточных нейтронов с тритием и водородом // Нейтронная физика: Материалы I Междунар. конф. (14 - 18 сент. 1987 г., Киев). - М., 1988. - Т. II. - С. 298 - 302.
17. *Koester L., Waschkowski W., Meier J.* Cross Sections for Neutrons of 1970 eV and Contributions to Fundamental Neutron Interactions // Z. Phys. - 1990. - Vol. A337, No. 3. - P. 341 - 348.
18. *Fujita Y., Kobayashi K., Oosaki T., Block R.C.* Measurement of the Neutron-Proton Total Cross Section Using 24 keV Iron Filtered Neutrons // Nucl. Phys. - 1976. - Vol. A258, No. 1. - P. 1 - 9.
19. *Miller G.A., Nefkens B.M.K., Šlaus I.* Charge Symmetry, Quarks and Mesons // Phys. Rep. - 1996. - Vol. 194, No. 1-2. - P. 1 - 116.
20. *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, No. 3-4. - P. 252 - 259.
21. *Gabioud B., Alder J.-C., Joseph C. et al.* n-n Effective Range from the Photon Spectrum of the Reaction $\pi^- d \rightarrow \gamma nn$ // Phys. Lett. - 1981. - Vol. B103, No. 1. - P. 9 - 12.
22. *Šlaus I., Akaishi Y., Tanaka H.* Three-Body Forces and Neutron-Neutron Effective-Range Parameters // Phys. Rev. Lett. - 1982. - Vol. 48, No. 15. - P. 993 - 996.
23. *Guratzsch H., Kühn B., Kumpf H. et al.* Neutron-Neutron Effective Range from Quasifree Scattering $^2\text{H}(n, nn)p$ at 25 MeV // Nucl. Phys. - 1980. - Vol. A342, No. 2. - P. 239 - 251.
24. *Soukup J., Cameron J.M., Fielding H.W. et al.* $^2\text{H}(n, nn)p$ Reaction at 21.5 MeV // Nucl. Phys. - 1979. - Vol. A322, No. 1. - P. 109 - 116.

В. О. Бабенко, М. М. Петров

НИЗЬКОЕНЕРГЕТИЧНІ ПАРАМЕТРИ НЕЙТРОН-НЕЙТРОННОГО РОЗСІЯННЯ

Досліджено вплив різниці мас зарядженого та нейтрального π -мезонів на низькоенергетичні параметри нуклон-нуклонної взаємодії в стані 1S_0 . З використанням експериментальних значень синглетних параметрів np -розсіяння та експериментального значення енергії віртуального рівня nn -системи в стані 1S_0 отримано наступні значення нейтрон-нейтронної довжини розсіяння та ефективного радіуса: $a_{nn} = -16,59(114)$ фм, $r_{nn} = 2,826(86)$ фм. Розраховані значення узгоджуються з сучасними експериментальними результатами.

Ключові слова: нейтрон-нейтронне розсіяння, нейтрон-нейтронна взаємодія, зарядова залежність ядерних сил, параметри теорії ефективного радіуса, нейтрон-нейтронна довжина розсіяння.

V. A. Babenko, N. M. Petrov**LOW-ENERGY PARAMETERS OF NEUTRON-NEUTRON SCATTERING**

The influence of the mass difference between charged and neutral π -mesons on the low-energy parameters of nucleon-nucleon interaction in the 1S_0 spin-singlet state is studied. Using the experimental singlet neutron-proton scattering parameters and the experimental value of neutron-neutron virtual-state energy we obtain the following values for the neutron-neutron scattering length and effective range: $a_{nn} = -16,59(114)$ fm, $r_{nn} = 2,826(86)$ fm. Calculated values of these quantities appear to be in reasonable agreement with the contemporary experimental data.

Keywords: neutron-neutron scattering, neutron-neutron interaction, charge dependence of nuclear forces, effective range parameters, neutron-neutron scattering length.

Надійшла 03.04.2013

Received 03.04.2013