

В. А. Бабенко, Н. М. Петров

*Институт теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова НАН Украины, Киев***О ЗАРЯДОВОЙ ЗАВИСИМОСТИ КОНСТАНТЫ ПИОН-НУКЛОННОЙ СВЯЗИ**

В предположении, что ядерные силы в системе двух нуклонов при низких энергиях обусловлены в основном обменом виртуальными  $\pi$ -мезонами, на основе потенциала Юкавы исследуются константы пион-нуклонной связи для нейтральных и заряженных  $\pi$ -мезонов. Используя рекомендованные на данный момент экспериментальные значения низкоэнергетических синглетных параметров  $pp$ - и  $np$ -рассеяния, а также значение псевдовекторной пион-нуклонной константы связи для нейтральных  $\pi$ -мезонов  $f_{\pi^0}^2 = 0,0749(7)$ , получено значение зарядовой псевдовекторной пион-нуклонной константы связи  $f_{\pi^\pm}^2 = 0,0804(7)$ , которому соответствует псевдоскалярная пион-нуклонная константа  $g_{\pi^\pm}^2 / 4\pi = 14,55(13)$ . Рассчитанное нами значение псевдоскалярной пион-нуклонной константы связи для заряженных  $\pi^\pm$ -мезонов полностью согласуется с экспериментальной константой  $g_{\pi^\pm}^2 / 4\pi = 14,52(26)$ , которая была определена Уппсальской группой нейтронных исследований. Полученные результаты свидетельствуют о существенной зарядовой зависимости пион-нуклонной константы связи.

*Ключевые слова:* ядерные силы,  $\pi$ -мезоны,  $pp$ - и  $np$ -рассеяния, пион-нуклонные константы.

1. Константы пион-нуклонной связи являются фундаментальными физическими характеристиками сильного ядерного взаимодействия. Имеются два вида пион-нуклонных констант связи – псевдовекторная  $f_\pi$  и псевдоскалярная  $g_\pi$ , которые связаны соотношением  $g_\pi^2 / 4\pi = (2M_N / m_\pi)^2 f_\pi^2$ , где  $M_N$  и  $m_\pi$  – массы нуклона и  $\pi$ -мезона соответственно. Пион-нуклонные константы связи играют важную роль в исследованиях нуклон-нуклонного и пион-нуклонного рассеяния, в связи с чем их изучению и уточнению их значений уделяется большое внимание на протяжении многих десятилетий [1 - 17]. Особенно важными пион-нуклонные константы связи являются для ядерной физики низких энергий. Важность этих физических величин связана прежде всего с тем фактом, что  $\pi$ -мезоны являются самыми легкими из мезонов и вследствие этого обмен  $\pi$ -мезонами определяет наиболее хорошо известную, самую далекодействующую часть нуклон-нуклонного взаимодействия – его однопионный «хвост».

Таким образом, поскольку  $\pi$ -мезон является наиболее важным мезоном для объяснения ядерных сил, то вследствие этого понимание и точное количественное объяснение связи и взаимодействия  $\pi$ -мезона с нуклоном является ключевым и существенно важным для построения теории сильного ядерного взаимодействия в целом [1 - 3]. Если при этом в 70 - первой половине 80-х гг. прошлого века наблюдалось некоторое согласие относительно величины константы пион-нуклонной связи, которая в основном считалась зарядово-

независимой и равной  $g_\pi^2 / 4\pi \approx 14,5$  [2 - 5], то в дальнейшем ситуация существенно изменилась и перестала быть столь однозначной [6 - 14]. Так, в 90-х гг. прошлого столетия Ниймегенской группой был опубликован ряд работ [6 - 8], в которых на основе энергетически зависимого парциально-волнового анализа (РВА) данных нуклон-нуклонного рассеяния для нейтральной и зарядовой пион-нуклонных констант связи были получены значения  $g_{\pi^0}^2 / 4\pi = 13,47(11)$  и  $g_{\pi^\pm}^2 / 4\pi = 13,54(5)$ , которые оказались на 7 % меньше полученных ранее.

При этом нейтральная и зарядовая константы в работах Ниймегенской группы практически совпадают между собой в пределах погрешности, что в определенной степени подтверждает зарядовую независимость этих величин. Аналогичные более низкие значения зарядовой константы пион-нуклонной связи  $g_{\pi^\pm}^2 / 4\pi \sim 13,7 \div 13,8$  были получены также в ряде других работ [10 - 13]. В то же время группой нейтронных исследований в Уппсале [14] было получено намного большее значение зарядовой пион-нуклонной константы связи  $g_{\pi^\pm}^2 / 4\pi = 14,52(26)$ , что существенно превышает общепринятое значение нейтральной пион-нуклонной константы связи  $g_{\pi^0}^2 / 4\pi = 13,55(13)$ , полученное в работе [6] на основе фазового анализа протон-протонного рассеяния при энергиях в области  $T_{lab} \leq 350$  МэВ. Таким образом, на данный момент крайне важным и фундаментальным вопросом является вопрос о возможной зарядовой зависимости пион-нуклонной константы связи или, иначе говоря, об отли-

© В. А. Бабенко, Н. М. Петров, 2015

чий друг от друга констант пион-нуклонной связи для нейтральных и заряженных  $\pi$ -мезонов.

В данной работе константы пион-нуклонной связи для нейтральных и заряженных  $\pi$ -мезонов исследуются нами с использованием данных о нуклон-нуклонном взаимодействии при низких энергиях. В настоящее время для описания  $NN$ -взаимодействия часто используются полуфеноменологические потенциальные модели однобозонного обмена, которые включают обмен различными мезонами. При этом обмен более легкими  $\pi$ -мезонами определяет в основном дальнюю часть  $NN$ -потенциала, а обмен более тяжелыми  $\rho$ - и  $\omega$ -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 этого в предположении, что ядерные силы в  $NN$ -системе при низких энергиях обусловлены в основном обменом виртуальными  $\pi$ -мезонами, в настоящей работе для описания  $NN$ -взаимодействия используется хорошо известный потенциал Юкавы, непосредственно следующий из мезонной теории поля [1 - 3]. При этом параметры используемого потенциала – глубина  $V_0$  и радиус  $R$  – согласованы с низкоэнергетическими параметрами  $NN$ -рассеяния в синглетном спиновом состоянии  $^1S_0$ . С использованием параметров потенциала Юкавы для  $pp$ - и  $np$ -взаимодействия в работе получено соотношение, которое связывает зарядовую  $f_{\pi^\pm}^2$  и нейтральную  $f_{\pi^0}^2$  изовекторные пион-нуклонные константы связи.

2. Согласно мезонной теории поля сильное ядерное взаимодействие между двумя нуклонами обусловлено в основном обменом виртуальными  $\pi$ -мезонами, которые определяют дальнюю действующую часть  $NN$ -взаимодействия и соответственно нуклон-нуклонное рассеяние при самых низких энергиях. Нуклон-нуклонный потенциал, следующий из мезонной теории поля – потенциал Юкавы, имеет вид [1 - 3]

$$V(r) = -V_0 \frac{e^{-\mu r}}{\mu r}. \quad (1)$$

В формуле (1)  $r$  является расстоянием между двумя нуклонами, а величина  $\mu$  связана с массой  $\pi$ -мезона  $m_\pi$  соотношением

$$\mu = \frac{m_\pi c}{\hbar}, \quad (2)$$

где  $c$  – скорость света;  $\hbar$  – приведенная постоянная Планка. При этом радиус действия ядерных сил  $R$  обратно пропорционален массе  $\pi$ -мезона и является малой величиной

$$R \equiv \frac{1}{\mu} = \frac{\hbar}{m_\pi c} \sim 1,4 \text{ Фм}. \quad (3)$$

Фактически радиус действия ядерных сил  $R$  совпадает с комптоновской длиной волны  $\pi$ -мезона.

Глубина потенциала (1)  $V_0$  связана с безразмерной псевдовекторной пион-нуклонной константой связи  $f_\pi$  простым соотношением [1 - 3, 9, 15]

$$V_0 = m_\pi c^2 f_\pi^2. \quad (4)$$

Таким образом, масса  $\pi$ -мезона  $m_\pi$  и пион-нуклонная константа связи  $f_\pi$  являются основными характеристиками пион-нуклонного взаимодействия, которые играют существенную роль в исследованиях нуклон-нуклонного и пион-ядерного взаимодействия [1, 3, 9, 17].

Два заряженных протона при взаимодействии обмениваются нейтральным  $\pi^0$ -мезоном. В этом случае параметры потенциала Юкавы (1)  $\mu_{pp}$  и  $V_0^{pp}$  в соответствии с формулами (2) и (4) определяются массой нейтрального  $\pi^0$ -мезона  $m_{\pi^0}$  и константой связи  $f_{\pi^0}$ . В случае же взаимодействия нейтрона с протоном обмен происходит как нейтральным  $\pi^0$ -мезоном, так и заряженными  $\pi^\pm$ -мезонами. В последнем случае при определении параметров потенциала (1)  $\mu_{np}$  и  $V_0^{np}$  следует использовать [16] усредненные значения массы  $\pi$ -мезона

$$\bar{m}_\pi = \frac{1}{3}(m_{\pi^0} + 2m_{\pi^\pm}) \quad (5)$$

и квадрата пион-нуклонной константы связи

$$\bar{f}_\pi^2 = \frac{1}{3}(f_{\pi^0}^2 + 2f_{\pi^\pm}^2). \quad (6)$$

Приведем здесь экспериментальные значения масс нуклонов и мезонов, а также значение величины  $\hbar c$ , которыми будем пользоваться в дальнейшем при следующих расчетах:

$$M_p = 938,272046 \text{ МэВ}/c^2, \quad M_n = 939,565379 \text{ МэВ}/c^2, \quad (7)$$

$$m_{\pi^0} = 134,9766 \text{ МэВ}/c^2, \quad m_{\pi^\pm} = 139,57018 \text{ МэВ}/c^2, \quad (8)$$

$$\hbar c = 197,3269718 \text{ МэВ} \cdot \text{Фм}, \quad (9)$$

где  $M_p$  и  $M_n$  – массы протона и нейтрона соответственно;  $m_{\pi^0}$  и  $m_{\pi^\pm}$  – массы нейтрального и заряженного  $\pi^\pm$ -мезона соответственно. Все значения физических величин в формулах (7) - (9) взяты нами из последнего обзора [18] международной группы Particle Data Group.

Для нахождения параметров потенциала (1) будем использовать данные по взаимодействию двух нуклонов при низких энергиях в синглетном спиновом состоянии  $^1S_0$ . Протон-протонные параметры  $\mu_{pp}$  и  $V_0^{pp}$  определим по длине рассеяния  $a_{pp}$  и эффективному радиусу  $r_{pp}$ . При этом из экспериментальных значений ядерно-кулоновских низкоэнергетических параметров  $pp$ -рассеяния необходимо исключить поправки, обусловленные электромагнитным взаимодействием. После исключения этих поправок значения чисто ядерных длины рассеяния  $a_{pp}$  и эффективного радиуса  $r_{pp}$  для протон-протонного рассеяния оказываются равными [17]

$$a_{pp} = -17,3(4) \text{ Фм}, \quad (10)$$

$$r_{pp} = 2,85(4) \text{ Фм}. \quad (11)$$

Используя метод фазовых функций [19] и значения параметров  $pp$ -рассеяния (10), (11) в случае протон-протонного взаимодействия получим следующие значения параметров потенциала Юкавы (1):

$$\mu_{pp} = 0,8393(4) \text{ Фм}^{-1}, \quad (12)$$

$$V_0^{pp} = 44,8295 \text{ МэВ}. \quad (13)$$

В соответствии с формулами (2), (4), (12) и (13) масса и пион-нуклонная константа связи для нейтрального  $\pi^0$ -мезона в случае потенциала Юкавы для протон-протонного взаимодействия оказались равными

$$m_{\pi^0}^Y = 165,6108 \text{ МэВ}/c^2, \quad (14)$$

$$(f_{\pi^0}^Y)^2 = 0,2707, \quad (15)$$

что гораздо больше их экспериментальных значений

$$m_{\pi^0} = 134,9766 \text{ МэВ}/c^2 [18], \quad (16)$$

$$f_{\pi^0}^2 = 0,0749(7) [6]. \quad (17)$$

Таким образом,

$$m_{\pi^0}^Y = b m_{\pi^0}, \quad (18)$$

$$(f_{\pi^0}^Y)^2 = d f_{\pi^0}^2, \quad (19)$$

где  $b$  и  $d$  – постоянные, в общем случае зависящие от формы нуклон-нуклонного взаимодействия. Для потенциала Юкавы, в соответствии с формулами (14) - (17), эти постоянные равны

$$b = 1,2270, \quad (20)$$

$$d = 3,6142. \quad (21)$$

Вполне естественным является предположение, что соотношения, аналогичные формулам (18) и (19), выполняются для масс и пион-нуклонных констант связи заряженных пионов, а следовательно, и для усредненных масс и пион-нуклонных констант связи  $\pi$ -мезонов

$$m_{\pi^\pm}^Y = b m_{\pi^\pm}, \quad (22)$$

$$(f_{\pi^\pm}^Y)^2 = d f_{\pi^\pm}^2, \quad (23)$$

$$\overline{m_{\pi^\pm}^Y} = b \overline{m_{\pi^\pm}}, \quad (24)$$

$$\overline{(f_{\pi^\pm}^Y)^2} = d \overline{f_{\pi^\pm}^2}. \quad (25)$$

В связи с вышеизложенным нейтрон-протонные параметры потенциала (1)  $\mu_{np}$  и  $V_0^{np}$  в соответствии с формулами (2), (4), (18), (19), (24) и (25) следующим образом связаны с аналогичными параметрами протон-протонного взаимодействия  $\mu_{pp}$  и  $V_0^{pp}$ :

$$\mu_{np} = \frac{\overline{m_{\pi^\pm}}}{m_{\pi^0}} \mu_{pp}, \quad (26)$$

$$V_0^{np} = \frac{\overline{m_{\pi^\pm}}}{m_{\pi^0}} \frac{\overline{f_{\pi^\pm}^2}}{f_{\pi^0}^2} V_0^{pp}. \quad (27)$$

Отношение средней массы  $\pi$ -мезона  $\overline{m_{\pi^\pm}}$  к массе нейтрального  $\pi^0$ -мезона  $m_{\pi^0}$  в соответствии с формулами (5) и (8) составляет величину

$$\frac{\overline{m_{\pi^\pm}}}{m_{\pi^0}} = 1,0227. \quad (28)$$

Используя формулы (12), (26), (28) и экспериментальное значение синглетной длины  $np$ -рассеяния в состоянии  $^1S_0$  [20, 21]

$$a_{np} = -23,71(2) \text{ Фм} \quad (29)$$

для нейтрон-протонного взаимодействия в виде потенциала Юкавы, получим следующие значения параметров  $\mu_{np}$  и  $V_0^{np}$ :

$$\mu_{np} = 0,8584 \text{ Фм}^{-1}, \quad (30)$$

$$V_0^{np} = 48,0742 \text{ МэВ}. \quad (31)$$

Для расчетов мы, как и ранее, использовали метод фазовых функций [19]. Отметим при этом, что зафиксированное экспериментальное значение (29) фундаментального низкоэнергетического параметра – синглетной длины  $np$ -рассеяния  $a_{np}$  – было использовано нами для расчета глубины потенциала Юкавы синглетного нейтрон-протонного взаимодействия  $V_0^{np}$ , в то время как радиус этого потенциала и соответствующий ему параметр  $\mu_{np}$  был найден по формуле (26) с учетом формул (12) и (28). Далее рассчитанное нами таким образом значение глубины потенциала Юкавы  $V_0^{np}$  будет использовано для нахождения усредненной пион-нуклонной константы связи  $\underline{f}_{\pi}^2$  в соответствии с формулой (27) и псевдовекторной пион-нуклонной константы связи  $f_{\pi^{\pm}}^2$  для заряженных  $\pi$ -мезонов.

Эффективный радиус  $np$ -рассеяния  $r_{np}$ , найденный с использованием потенциала Юкавы с параметрами (30) и (31)

$$r_{np} = 2,695 \text{ Фм}, \quad (32)$$

находится в полном согласии с его экспериментальным значением [20 - 22]

$$r_{np} = 2,70(9) \text{ Фм}. \quad (33)$$

Значения синглетных длины  $np$ -рассеяния (29) и эффективного радиуса (32) очень хорошо согласуются со значениями  $a_{np} = -23,7154(80) \text{ Фм}$  и  $r_{np} = 2,706(67) \text{ Фм}$ , которые недавно были получены нами [22, 23] с использованием экспериментальных сечений  $np$ -рассеяния в области кэВных энергий и экспериментальных значений характеристик дейтрона. Таким образом, использование экспериментальных значений масс нейтрального и заряженного  $\pi$ -мезонов (8) приводит к согласованному описанию протон-протонных и нейтрон-протонных экспериментальных данных в области низких энергий.

Из формул (6) и (27) следует важное соотношение, связывающее псевдовекторные пион-нук-

лонные константы связи заряженных и нейтральных  $\pi$ -мезонов

$$f_{\pi^{\pm}}^2 = \frac{1}{2} \left( 3 \frac{V_0^{np}}{V_0^{pp}} \frac{\mu_{pp}}{\mu_{np}} - 1 \right) f_{\pi^0}^2. \quad (34)$$

В соответствии с формулой (34) с использованием пион-нуклонной константы связи для нейтрального  $\pi^0$ -мезона (17), а также протон-протонных параметров (12) и (13) и нейтрон-протонных параметров (30) и (31) для псевдовекторной зарядовой пион-нуклонной константы связи  $f_{\pi^{\pm}}^2$  получим значение

$$f_{\pi^{\pm}}^2 = 0,0804(7). \quad (35)$$

Псевдоскалярные пион-нуклонные константы связи  $g_{\pi^0}^2$  и  $g_{\pi^{\pm}}^2$  связаны с псевдовекторными константами связи  $f_{\pi^0}^2$  и  $f_{\pi^{\pm}}^2$  соотношениями [9]

$$\frac{g_{\pi^0}^2}{4\pi} = \left( \frac{2M_p}{m_{\pi^{\pm}}} \right)^2 f_{\pi^0}^2, \quad (36)$$

$$\frac{g_{\pi^{\pm}}^2}{4\pi} = \left( \frac{M_p + M_n}{m_{\pi^{\pm}}} \right)^2 f_{\pi^{\pm}}^2. \quad (37)$$

Таким образом, в соответствии с формулами (36) и (37), с использованием псевдовекторных констант связи для нейтрального  $\pi^0$ -мезона (17) и для заряженного  $\pi^{\pm}$ -мезона (35), а также масс протона и нейтрона (7) и массы заряженного  $\pi^{\pm}$ -мезона (8) для псевдоскалярных пион-нуклонных констант связи получим следующие значения:

$$\frac{g_{\pi^0}^2}{4\pi} = 13,55(13), \quad (38)$$

$$\frac{g_{\pi^{\pm}}^2}{4\pi} = 14,55(13). \quad (39)$$

Найденное нами значение псевдоскалярной пион-нуклонной константы связи заряженного  $\pi^{\pm}$ -мезона (39) полностью согласуется с экспериментальной константой

$$\frac{g_{\pi^{\pm}}^2}{4\pi} = 14,52(26), \quad (40)$$

которая определена группой нейтронных исследований в Уппсале [14].

Значения пион-нуклонных констант связи для нейтральных и заряженных  $\pi$ -мезонов (38) и (39)

находятся в хорошем согласии со значениями этих величин

$$\frac{g_{\pi^0}^2}{4\pi} = 13,6, \quad (41)$$

$$\frac{g_{\pi^\pm}^2}{4\pi} = 14,4, \quad (42)$$

полученными в обзорной работе [9] (модель E) на основе анализа экспериментальных характеристик дейтрона и анализирующих способностей протон-протонного рассеяния. Столь хорошее согласие, по-видимому, не является случайным, а характеризует согласованность всей совокупности используемых экспериментальных данных по нуклон-нуклонному и пион-нуклонному взаимодействию. Отметим при этом, что значения (41) и (42) констант пион-нуклонной связи были получены в обзоре [9] на основе предположения о зарядовом расщеплении этой величины или, иначе говоря, об отличии друг от друга констант пион-нуклонной связи для нейтральных и заряженных  $\pi$ -мезонов.

Таким образом, полученное в настоящей работе значение зарядовой константы пион-нуклонной связи (39) ощутимо отличается от значения пион-нуклонной константы связи для нейтральных  $\pi^0$ -мезонов (38). В относительных единицах это отличие составляет  $\sim 7\%$ , что свидетельствует о существенной зарядовой зависимости пион-нуклонной константы связи.

3. С учетом того, что ядерные силы в нуклон-нуклонной системе обусловлены в основном обменом виртуальными  $\pi$ -мезонами, в настоящей работе изучена связь между величинами, характеризующими пион-нуклонное и нуклон-нуклонное взаимодействие. Получено соотношение, связывающее изовекторные пион-нуклонные константы связи для заряженных и нейтральных  $\pi$ -мезонов с глубиной потенциалов, описывающих  $np$ - и  $pp$ -взаимодействие. Используя рекомендованные на данный момент значения чисто ядерных длины  $pp$ -рассеяния  $a_{pp} = -17,3(4)$  Фм и эффективного радиуса  $r_{pp} = 2,85(4)$  Фм, а также экспериментальное значение синглетной длины  $np$ -рассеяния  $a_{np} = -23,71(2)$  Фм и значение псевдоскалярной пион-нуклонной константы связи для нейтральных  $\pi$ -мезонов  $g_{\pi^0}^2 / 4\pi = 13,55(13)$  [6] нами получено значение зарядовой пион-нуклонной константы связи  $g_{\pi^\pm}^2 / 4\pi = 14,55(13)$ . Это значение хорошо согласуется с экспериментальными значениями

$g_{\pi^\pm}^2 / 4\pi = 14,52(26)$  [14] и  $g_{\pi^\pm}^2 / 4\pi = 14,74(33)$  [24], а также с найденным ранее значением  $g_{\pi^\pm}^2 / 4\pi = 14,28(18)$  [4, 25]. В то же время полученное нами значение находится в противоречии со значением  $g_{\pi^\pm}^2 / 4\pi = 13,54(5)$  [7, 8], найденным с использованием данных  $NN$ -рассеяния, и значением  $g_{\pi^\pm}^2 / 4\pi = 13,76(1)$  [10, 11], определенным из данных  $\pi N$ -рассеяния. Следует, однако, заметить, что заниженные по сравнению с  $g_{\pi^\pm}^2 / 4\pi = 14,55(13)$  значения зарядовой пион-нуклонной константы связи приводят к ослаблению нейтрон-протонного потенциала, а следовательно, и к заниженному по абсолютной величине значению синглетной длины  $np$ -рассеяния по сравнению с ее экспериментальным значением  $|a_{np}| = 23,71(2)$  Фм.

Следует особо отметить, что основные результаты работы получены в соответствии с нашим главным предположением о том, что использованные нами для соответствующих величин коэффициенты пропорциональности  $b$  и  $d$  имеют в точности одни и те же значения для нейтральных и заряженных  $\pi$ -мезонов. С нашей точки зрения это предположение является вполне разумным и приводит к весьма разумным теоретическим результатам расчетов, которые очень хорошо согласуются с рядом соответствующих экспериментальных значений рассматриваемых величин.

В настоящее время нами проводится ряд расчетов пион-нуклонных констант связи на основе более современных и реалистичных ядерных нуклон-нуклонных потенциалов, чем использованный в настоящей работе потенциал Юкавы. Предварительные результаты этих расчетов свидетельствуют о том, что результаты получаются полностью аналогичными и близкими полученным в данной статье, но уже без использования вышеуказанного предположения о коэффициентах пропорциональности  $b$  и  $d$ . Результаты этих расчетов будут опубликованы в наших последующих работах. Главной же целью настоящей работы было показать, что уже простейший наиболее известный и широко применяемый классический потенциал ядерной физики – потенциал Юкавы – дает очень хорошие и разумные результаты для рассматриваемых и рассчитываемых констант пион-нуклонной связи в рамках весьма разумного и логичного теоретического предположения об одинаковых значениях используемых коэффициентов пропорциональности  $b$  и  $d$  для нейтральных и заряженных  $\pi$ -мезонов. В связи с вышеизложенным отметим также, что вопрос о выборе и

использовании наиболее адекватного и обоснованного ядерного потенциала взаимодействия двух нуклонов, как и вопрос о соответствующих экспериментальных нуклон-нуклонных данных, продолжает оставаться одним из наиболее сложных, актуальных и фундаментальных вопросов теоретической ядерной физики при рассмотрении и описании малонуклонных систем при низких энергиях, а также процессов в этих системах [1, 2, 9, 22, 26 - 29]. Вследствие этого использование простого классического потенциала Юкавы всегда является, с нашей точки зрения, интересным и наглядным, особенно ввиду особой сложности и громоздкости современных реалистических нуклон-нуклонных потенциалов.

Полученные в работе результаты свидетельствуют о зарядовой зависимости пион-нуклонных констант связи. Совместный анализ пион-нуклонных и нуклон-нуклонных низкоэнергетических

параметров позволяет сделать вывод о том, что нарушение зарядовой независимости ядерных сил в основном является следствием различия масс и пион-нуклонных констант связи для нейтральных и заряженных  $\pi$ -мезонов. Определенные указания на эффекты, вызванные различием масс нейтральных и заряженных  $\pi$ -мезонов, которые приводят к нарушению зарядовой независимости ядерных сил, содержатся в работах [1, 15]. Полученные нами результаты показывают, что отличие масс на 3,4 % и пион-нуклонных констант связи на 7 % для нейтральных и заряженных  $\pi$ -мезонов приводит к разнице в длинах  $pp$ - и  $np$ -рассеяния  $\Delta a_{\text{СВ}} \equiv a_{pp} - a_{np} = 6,45 \text{ Фм}$ , что в относительных единицах составляет  $\sim 30\%$ . Разность протон-протонного и нейтрон-протонного эффективных радиусов рассеяния в этом случае составляет  $\Delta r_{\text{СВ}} \equiv r_{pp} - r_{np} = 0,15 \text{ Фм}$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хюльтен Л., Сугавара М. Проблема взаимодействия двух нуклонов // Стрoение атомного ядра / Пер. с англ.; Под ред. А. С. Давыдова. - М.: ИЛ, 1959. - С. 7 - 165.
2. Бор О., Моттельсон Б. Структура атомного ядра. Т. 1. - М.: Мир, 1971. - 456 с.
3. Эрикссон Т., Вайзе В. Пионы и ядра. - М.: Наука, 1991. - 512 с.
4. Koch R., Pietarinen E. Low-Energy  $\pi N$  Partial Wave Analysis // Nucl. Phys. - 1980. - Vol. A336, No. 3. - P. 331 - 346.
5. Kroll P. Phenomenological Analysis of Nucleon-Nucleon Scattering // Physics Data. Vol. 22-1 / Ed. H. Behrens and G. Ebel. - Karlsruhe: Fachinformationszentrum, 1981. - P. 1.
6. Bergervoet J.R., van Campen P.C., Klomp R.A.M. et al. Phase Shift Analysis of All Proton-Proton Scattering Data Below  $T_{\text{lab}} = 350 \text{ MeV}$  // Phys. Rev. - 1990. - Vol. C41, No. 4. - P. 1435 - 1452.
7. Stoks V., Timmermans R., de Swart J.J. Pion-Nucleon Coupling Constant // Phys. Rev. - 1993. - Vol. C47, No. 2. - P. 512 - 520.
8. de Swart J.J., Rentmeester M.C.M., Timmermans R.G.E. The Status of the Pion-Nucleon Coupling Constant. - arXiv:nucl-th/9802084, 1998. - 19 p.
9. Machleidt R., Slaus I. The Nucleon-Nucleon Interaction // J. Phys. - 2001. - Vol. G27, No. 5. - P. R69 - R108.
10. Arndt R.A., Briscoe W.J., Strakovsky I.I. et al. Dispersion Relation Constrained Partial Wave Analysis of  $\pi N$  Elastic and  $\pi N \rightarrow \eta N$  Scattering Data: The Baryon Spectrum // Phys. Rev. - 2004. - Vol. C69, No. 3. - P. 035213.
11. Arndt R.A., Briscoe W.J., Strakovsky I.I., Workman R.L. Extended Partial-Wave Analysis of  $\pi N$  Scattering Data // Phys. Rev. - 2006. - Vol. C74, No. 4. - P. 045205.
12. Bugg D.V. The Pion Nucleon Coupling Constant // Eur. Phys. J. - 2004. - Vol. C33, No. 4. - P. 505 - 509.
13. Baru V., Hanhart C., Hoferichter M. et al. Precision Calculation of Threshold  $\pi^- d$  Scattering,  $\pi N$  Scattering Lengths, and the GMO Sum Rule // Nucl. Phys. - 2011. - Vol. A872, No. 1. - P. 69 - 116.
14. Rahm J., Blomgren J., Condé H. et al.  $np$  Scattering Measurements at 162 MeV and the  $\pi NN$  Coupling Constant // Phys. Rev. - 1998. - Vol. C57, No. 3. - P. 1077 - 1096.
15. Слив Л.А. Зарядовая независимость и зарядовая симметрия ядерных сил // Изв. АН СССР. Сер. физ. - 1974. - Т. 38, вып. 1. - С. 2 - 14.
16. Ericson T.E.O., Rosa-Clot M. The Deuteron Asymptotic D-state as a Probe of the Nucleon-Nucleon Force // Nucl. Phys. - 1983. - Vol. A405, No. 3. - P. 497 - 533.
17. Miller G.A., Nefkens B.M.K., Šlaus I. Charge Symmetry, Quarks and Mesons // Phys. Rept. - 1990. - Vol. 194, No. 1-2. - P. 1 - 116.
18. Beringer J. et al. (Particle Data Group). Review of Particle Physics // Phys. Rev. - 2012. - Vol. D86, No. 1. - P. 010001.
19. Бабиков В.В. Метод фазовых функций в квантовой механике. - М.: Наука, 1976. - 288 с.
20. Ситенко А.Г., Тартаковский В.К. Лекции по теории ядра. - М.: Атомиздат, 1972. - 352 с.
21. Локк В., Миздей Д. Физика частиц промежуточных энергий. - М.: Атомиздат, 1972. - 288 с.
22. Бабенко В.А., Петров Н.М. Определение низкоэнергетических параметров  $np$ -рассеяния из современных экспериментальных данных фазового анализа // Ядерная физика. - 2007. - Т. 70, вып. 4. - С. 699 - 705 [Babenko V.A., Petrov N.M. Determination of Low-Energy Parameters of Neutron-Proton Scattering on the Basis of Modern Experimental Data from Partial-Wave Analyses // Physics of Atomic Nuclei. - 2007. - Vol. 70, No. 4. - P. 669 - 675].

23. *Бабенко В.А., Петров Н.М.* Определение низко-энергетических параметров  $np$ -рассеяния в приближении параметра формы из современных экспериментальных данных при низких энергиях // *Ядерная физика.* - 2010. - Т. 73, вып. 9. - С. 1545 – 1553. [*Babenko V.A., Petrov N.M.* Determination of Low-Energy Parameters of Neutron-Proton Scattering in the Shape-Parameter Approximation from Present-Day Experimental Data // *Physics of Atomic Nuclei.* - 2010. - Vol. 73, No. 9. - P. 1499 - 1506].
24. *Rahm J., Blomgren J., Condé H. et al.*  $np$  Scattering Measurements at 96 MeV // *Phys. Rev.* - 2001. - Vol. C63, No. 4. - P. 044001.
25. *Bugg D.V., Carter A.A., Carter J.R.* New Values of Pion-Nucleon Scattering Lengths and  $f^2$  // *Phys. Lett.* - 1973. - Vol. B44, No. 3. - P. 278 - 280.
26. *Haidenbauer J.* The Nucleon-Nucleon Interaction // *Braz. J. Phys.* - 2004. - Vol. 34, No. 3A. - P. 845 - 849.
27. *Naghdi M.* Nucleon-Nucleon Interaction: A Typical/Concise Review // *Physics of Particles and Nuclei* - 2014. - Vol. 45, No. 5. - P. 924 - 971.
28. *Бабенко В.А., Петров Н.М.* Описание рассеяния и связанного состояния в системе двух нуклонов на основе баргмановского представления S-матрицы // *Ядерная физика.* - 2005. - Т. 68, вып. 2. - С. 244 - 258. [*Babenko V.A., Petrov N.M.* Description of Scattering and of a Bound State in the Two-Nucleon System on the Basis of the Bargmann Representation of the S Matrix // *Physics of Atomic Nuclei.* - 2005. - Vol. 68, No. 2. - P. 219 - 233].
29. *Hackenburg R.W.* Neutron-Proton Effective Range Parameters and Zero-Energy Shape Dependence // *Phys. Rev.* - 2006. - Vol. C73, No. 4. - P. 044002.

**В. О. Бабенко, М. М. Петров**

*Институт теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова НАН України, Київ*

### ПРО ЗАРЯДОВУ ЗАЛЕЖНІСТЬ КОНСТАНТИ ПІОН-НУКЛОННОГО ЗВ'ЯЗКУ

У припущенні, що ядерні сили в системі двох нуклонів при низьких енергіях обумовлені в основному обміном віртуальними  $\pi$ -мезонами, на основі потенціалу Юкави досліджуються константи піон-нуклонного зв'язку для нейтральних та заряджених  $\pi$ -мезонів. Використовуючи рекомендовані на даний момент експериментальні значення низькоенергетичних синглетних параметрів  $pp$ - та  $np$ -розсіяння, а також значення псевдовекторної піон-нуклонної константи зв'язку для нейтральних  $\pi$ -мезонів  $f_{\pi^0}^2 = 0,0749(7)$ , отримано значення зарядової псевдовекторної піон-нуклонної константи зв'язку  $f_{\pi^\pm}^2 = 0,0804(7)$ , якому відповідає псевдоскалярна піон-нуклонна константа  $g_{\pi^\pm}^2 / 4\pi = 14,55(13)$ . Розраховане нами значення псевдоскалярної піон-нуклонної константи зв'язку для заряджених  $\pi^\pm$ -мезонів повністю узгоджується з експериментальною константою  $g_{\pi^\pm}^2 / 4\pi = 14,52(26)$ , яка була визначена Уппсальською групою нейтронних досліджень. Отримані результати свідчать про суттєву зарядову залежність піон-нуклонної константи зв'язку.

*Ключові слова:* ядерні сили,  $\pi$ -мезони,  $pp$ - и  $np$ -розсіяння, піон-нуклонні константи.

**V. A. Babenko, N. M. Petrov**

*M. M. Bogolyubov Institute for Theoretical Physics, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv*

### CHARGE DEPENDENCE OF THE PION-NUCLEON COUPLING CONSTANT

On the basis of the Yukawa potential we study the pion-nucleon coupling constants for the neutral and charged pions assuming that nuclear forces at low energies are mainly determined by the exchange of virtual pions. We obtain the charged pseudovector pion-nucleon coupling constant  $f_{\pi^\pm}^2 = 0.0804(7)$  by making the use of experimental low-energy scattering parameters for the singlet  $pp$ - and  $np$ -scattering, and also by use of the neutral pseudovector pion-nucleon coupling constant  $f_{\pi^0}^2 = 0.0749(7)$ . Corresponding value of the charged pseudoscalar pion-nucleon coupling constant  $g_{\pi^\pm}^2 / 4\pi = 14.55(13)$  is also determined. This calculated value of the charged pseudoscalar pion-nucleon coupling constant is in fully agreement with the experimental constant  $g_{\pi^\pm}^2 / 4\pi = 14.52(26)$  obtained by the Uppsala Neutron Research Group. Our results show considerable charge splitting of the pion-nucleon coupling constant.

*Keywords:* nuclear forces,  $\pi$ -mesons,  $pp$ - and  $np$ -scattering, pion-nucleon constant.

### REFERENCES

1. *Khyul'ten L., Sugavara M.* The problem of two nucleons interaction // *Structure of the atomic nucleus / Trans. from English; Ed. A. Davydov.* - Moscow: IL, 1959. - P. 7 - 165. (Rus)
2. *Bor O., Mottel'son B.* Structure of the atomic nucleus. Vol. 1. - Moscow: Mir, 1971. - 456 p. (Rus)
3. *Ericson T., Weise W.* Peonies and nucleus. - Moscow: Nauka, 1991 - 512 p. (Rus)
4. *Koch R., Pietarinen E.* Low-Energy  $\pi N$  Partial Wave Analysis // *Nucl. Phys.* - 1980. - Vol. A336, No. 3. -

- P. 331 - 346.
5. *Kroll P.* Phenomenological Analysis of Nucleon-Nucleon Scattering // *Physics Data*. Vol. 22-1 / Ed. H. Behrens and G. Ebel. - Karlsruhe: Fachinformationszentrum, 1981. - P. 1.
  6. *Bergervoet J.R., van Campen P.C., Klomp R.A.M. et al.* Phase Shift Analysis of All Proton-Proton Scattering Data Below  $T_{\text{lab}} = 350$  MeV // *Phys. Rev.* - 1990. - Vol. C41, No. 4. - P. 1435 - 1452.
  7. *Stoks V., Timmermans R., de Swart J.J.* Pion-Nucleon Coupling Constant // *Phys. Rev.* - 1993. - Vol. C47, No. 2. - P. 512 - 520.
  8. *de Swart J.J., Rentmeester M.C.M., Timmermans R.G.E.* The Status of the Pion-Nucleon Coupling Constant. - arXiv:nucl-th/9802084, 1998. - 19 p.
  9. *Machleidt R., Slaus I.* The Nucleon-Nucleon Interaction // *J. Phys.* - 2001. - Vol. G27, No. 5. - P. R69 - R108.
  10. *Arndt R.A., Briscoe W.J., Strakovsky I.I. et al.* Dispersion Relation Constrained Partial Wave Analysis of  $\pi N$  Elastic and  $\pi N \rightarrow \eta N$  Scattering Data: The Baryon Spectrum // *Phys. Rev.* - 2004. - Vol. C69, No. 3. - P. 035213.
  11. *Arndt R.A., Briscoe W.J., Strakovsky I.I., Workman R.L.* Extended Partial-Wave Analysis of  $\pi N$  Scattering Data // *Phys. Rev.* - 2006. - Vol. C74, No. 4. - P. 045205.
  12. *Bugg D.V.* The Pion Nucleon Coupling Constant // *Eur. Phys. J.* - 2004. - Vol. C33, No. 4. - P. 505 - 509.
  13. *Baru V., Hanhart C., Hoferichter M. et al.* Precision Calculation of Threshold  $\pi^- d$  Scattering,  $\pi N$  Scattering Lengths, and the GMO Sum Rule // *Nucl. Phys.* - 2011. - Vol. A872, No. 1. - P. 69 - 116.
  14. *Rahm J., Blomgren J., Condé H. et al.*  $np$  Scattering Measurements at 162 MeV and the  $\pi NN$  Coupling Constant // *Phys. Rev.* - 1998. - Vol. C57, No. 3. - P. 1077 - 1096.
  15. *Sliv L.A.* // *Izv. AN SSSR. Ser. fiz.* - 1974. - Vol. 38, Iss. 1. - P. 2 - 14. (Rus)
  16. *Ericson T.E.O., Rosa-Clot M.* The Deuteron Asymptotic D-state as a Probe of the Nucleon-Nucleon Force // *Nucl. Phys.* - 1983. - Vol. A405, No. 3. - P. 497 - 533.
  17. *Miller G.A., Nefkens B.M.K., Šlaus I.* Charge Symmetry, Quarks and Mesons // *Phys. Rept.* - 1990. - Vol. 194, No. 1-2. - P. 1 - 116.
  18. *Beringer J. et al. (Particle Data Group).* Review of Particle Physics // *Phys. Rev.* - 2012. - Vol. D86, No. 1. - P. 010001.
  19. *Babikov V.V.* Phase method in quantum mechanics. - Moskva: Nauka, 1976 - 288 p. (Rus)
  20. *Sitenko A.G., Tartakovskij V.K.* Lectures on the nucleus theory. - Moscow: Atomizdat, 1972. - 352 p. (Rus)
  21. *Lokk V., Mizdej D.* Particle physics of intermediate energies. - Moskva: Atomizdat, 1972. - 288 p. (Rus)
  22. *Babenko V.A., Petrov N.M.* // *Yadernaya fizika*. - 2007. - Vol. 70, Iss. 4. - P. 699 - 705. (Rus) [*Babenko V.A., Petrov N.M.* Determination of Low-Energy Parameters of Neutron-Proton Scattering on the Basis of Modern Experimental Data from Partial-Wave Analyses // *Physics of Atomic Nuclei*. - 2007. - Vol. 70, No. 4. - P. 669 - 675].
  23. *Babenko V.A., Petrov N.M.* // *Yadernaya fizika*. - 2010. - Vol. 73, Iss. 9. - P. 1545 - 1553. (Rus) [*Babenko V.A., Petrov N.M.* Determination of Low-Energy Parameters of Neutron-Proton Scattering in the Shape-Parameter Approximation from Present-Day Experimental Data // *Physics of Atomic Nuclei*. - 2010. - Vol. 73, No. 9. - P. 1499 - 1506].
  24. *Rahm J., Blomgren J., Condé H. et al.*  $np$  Scattering Measurements at 96 MeV // *Phys. Rev.* - 2001. - Vol. C63, No. 4. - P. 044001.
  25. *Bugg D.V., Carter A.A., Carter J.R.* New Values of Pion-Nucleon Scattering Lengths and  $f^2$  // *Phys. Lett.* - 1973. - Vol. B44, No. 3. - P. 278 - 280.
  26. *Haidenbauer J.* The Nucleon-Nucleon Interaction // *Braz. J. Phys.* - 2004. - Vol. 34, No. 3A. - P. 845 - 849.
  27. *Naghdi M.* Nucleon-Nucleon Interaction: A Typical/Concise Review // *Physics of Particles and Nuclei* - 2014. - Vol. 45, No. 5. - P. 924 - 971.
  28. *Babenko V.A., Petrov N.M.* // *Yadernaya fizika*. - 2005. - Vol. 68, Iss. 2. - P. 244 - 258. (Rus) [*Babenko V.A., Petrov N.M.* Description of Scattering and of a Bound State in the Two-Nucleon System on the Basis of the Bargmann Representation of the S Matrix // *Physics of Atomic Nuclei*. - 2005. - Vol. 68, No. 2. - P. 219 - 233].
  29. *Hackenburg R.W.* Neutron-Proton Effective Range Parameters and Zero-Energy Shape Dependence // *Phys. Rev.* - 2006. - Vol. C73, No. 4. - P. 044002.

Надійшла 09.10.2014

Received 09.10.2014