

УДК 539.172

К ВОПРОСУ О ФАЗОВОМ АНАЛИЗЕ p - d РАССЕЙЯНИЯ ПРИ МАЛЫХ ЭНЕРГИЯХ

Л. С. Дулькова, Е. В. Кузнецова

Рассмотрены две существенные проблемы описания трехнуклонного взаимодействия при низких энергиях: вопрос о положении полюса модифицированной функции эффективного радиуса для дублетной S -фазы p - d рассеяния и вопрос о расхождении экспериментальных векторных анализирующих способностей с теорией (так называемая "загадка A_y "). Делается вывод о необходимости дальнейших экспериментальных исследований, проведения строгого фазового анализа всех имеющихся экспериментальных данных и новых теоретических расчетов.

Исследования процессов, происходящих в малонуклонных системах, продолжают оставаться актуальной проблемой в ядерной физике, т.к. они предоставляют весьма существенные данные для понимания ядерных взаимодействий. В частности, они позволяют уточнить наше представление о виде NN потенциала, роли трехчастичных сил в ядре и дают возможность описать сложную систему на основе современных представлений о взаимодействии между нуклонами. Особый интерес вызывает изучение процессов в зеркальных системах ppn и npn в связи с проверкой зарядовой симметрии ядерных сил.

Для описания p - d рассеяния необходимо правильно учесть кулоновское взаимодействие в трехчастичных уравнениях. Точная теория трехчастичного взаимодействия существует более тридцати лет и выполнено большое количество расчетов параметров этого рассеяния разными методами и для большого количества NN потенциалов (как модельных, так и реалистических), а также с учетом трехчастичных сил и влияния дальнедействующей поляризационной силы между протоном и дейтроном. Тем не менее, результаты вычислений заметно различаются в зависимости от метода расчета

и используемых потенциалов. Даже расчеты, проведенные одним и тем же методом (решение модифицированных уравнений Фаддеева в конфигурационном пространстве) с одним и тем же потенциалом (МТ I-III [1]), но выполненные при разных энергиях, дали значения дублетной длины рассеяния ${}^2a_{pd}$, отличающиеся в десять раз [2, 3]. Некоторые расчеты [4 – 6] указывали на вероятность нелинейного поведения функции эффективного радиуса для дублетного p - d рассеяния, которое могло бы быть описано введением полюса, связанного с существованием трехнуклонного виртуального состояния. Но точность этих расчетов была невелика. Так в работе [4] использовалось модельное приближение, в котором кулоновские поправки учитывались недостаточно строго, а в работе [6], приведенные авторами погрешности расчета при $E_{lab} < 0.5 \text{ МэВ}$, по нашему мнению, не позволяют сделать однозначный выбор параметров.

Давно экспериментально установлено наличие полюса в функции эффективного радиуса $k \cdot \text{ctg}^2 \delta_0$ в области отрицательной энергии для n - d рассеяния. Следует ожидать существования полюса также для p - d рассеяния (зеркальная система), но положение его должно быть другим из-за присутствия кулоновского взаимодействия.

Ранее работы по достаточно точному измерению дифференциальных сечений p - d рассеяния были выполнены только для $E_p \geq 1 \text{ МэВ}$ ($E_{c.m.} \geq 670 \text{ кэВ}$) и поэтому не могли дать информацию о существовании полюса при более низкой энергии [7]. Значения величин ${}^2a_{pd}$, полученные в этих работах, расходятся с теоретическими оценками.

Нашей группой были измерены дифференциальные сечения d - p рассеяния в интервале энергий $E_{c.m.} = 267 - 477 \text{ кэВ}$ [8]. На основе этих экспериментальных данных, а также с учетом данных работы [7] при более высокой энергии, мы провели зависящий от энергии фазовый анализ [9], используя в качестве энергетической зависимости фаз рассеяния функцию эффективного радиуса, содержащую полюса для дублетных фаз. При этом впервые экспериментальным путем было показано наличие полюса в выражении для эффективного радиуса $k \cdot \text{ctg}^2 \delta_0$ дублетной S -фазы p - d рассеяния. Этот полюс находится в физической области ($E_{c.m.} = 473 \text{ кэВ}$), а значение длины рассеяния отрицательно (${}^2a_0 = -5.1 \pm 0.8 \text{ ф.м.}$). Можно отметить недостаточность экспериментальных результатов для точного определения положения полюса в данном случае, отсутствуют измерения поляризационных наблюдаемых. Но прохождение фазы ${}^2\delta_0$ через нуль, что требуется для подтверждения существования полюса в положительной области энергии, при $E_{c.m.} < 470 \text{ кэВ}$ следует считать доказанным. Однако опубликованная вслед за нами работа [10] не подтвердила существование полюса.

Как отмечено выше, строгих теоретических расчетов, доказывающих существование

полюса и указывающих на его положение, долгое время не было. Результаты вычислений, проведенных австрийской группой [5, 6] с использованием уравнений Фаддеева в импульсном пространстве с сепарабельными потенциалами, не могут считаться достаточно точными.

Для описания расхождения между разными теоретическими и экспериментальными результатами группа в Лос-Аламосе [11] сделала предположение, что единственным возможным источником разногласий является полюс в функции эффективного радиуса при энергии близкой к нулю. Это приводит к значительной кривизне функции при малой энергии, что делает ненадежной ее экстраполяцию к нулю для определения ${}^2a_{pd}$. В этой работе впервые были строго рассчитаны, используя уравнения Фаддеева в конфигурационном пространстве с локальным потенциалом МТ I-III, возможные положения полюсов как для $n-d$, так и для $p-d$ рассеяния: $E_{c.m.} \sim -160$ кэВ и $E_{c.m.} \sim -25$ кэВ, соответственно.

Таким образом показано, что учет кулоновского взаимодействия сдвигает полюс по направлению к физической области. При этом ${}^2a_{pd} = 0.17$ ф.м.

Далее группа итальянских и американских физиков [12], используя вариационный принцип Кона с реалистическим аргонским потенциалом AV18 [13] и трехнуклонным взаимодействием Урбана (UR) [14], рассчитала дублетную S -фазу для нескольких энергий в области $E_{c.m.} < 450$ кэВ. На основании этого расчета был получен полюс в функции эффективного радиуса при $E_{c.m.} = -3.13$ кэВ и значение ${}^2a_{pd} = 0.024$ ф.м.

И, наконец, эта же группа измерила дифференциальные сечения при весьма низких энергиях $E_{c.m.} = 163$ кэВ и $E_{c.m.} = 211$ кэВ [15], что ранее казалось недостижимым, а также поляризационные наблюдаемые при $E_{c.m.} = 432$ кэВ [12, 16] и провела фазовый анализ [17]. При этом использовались также данные других авторов при $E_{c.m.} < 2.0$ МэВ, полученные в последнее время. В результате обнаружен полюс в положительной области при $E_{c.m.} \approx 120$ кэВ, получено отрицательное значение дублетной длины рассеяния ${}^2a_0 = -0.13 \pm 0.04$ ф.м и значительное отклонение дублетной S -фазы от расчетной.

Таким образом, в обоих случаях, когда полюс для $p-d$ рассеяния был определен экспериментально [9, 17], он наблюдался, в отличие от теоретических предсказаний, при положительной энергии. Результаты приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Экспериментальные и теоретические дублетные длины p - d рассеяния при наличии полюса, а также положение полюса

Работа	Эксперимент		Работа	Теория	
	${}^2a_{pd}$	$E_{с.т.}$		${}^2a_{pd}$	$E_{с.т.}$
[9]	$-5.0 \pm 1.0 \text{ ф м}$	$\simeq 473 \text{ кэВ}$	[11]	0.17 ф м	-25 кэВ
[17]	$-0.13 \pm 0.04 \text{ ф м}$	$\simeq 120 \text{ кэВ}$	[12]	0.024 ф м	-3.13 кэВ

Однако, по нашему мнению, последний фазовый анализ [17] не во всем достаточно корректен. Во-первых, несмотря на включение большого числа фаз (все J -расщепленные фазы до $J^\pi = \frac{11^+}{2}$ и $J^\pi = \frac{9^-}{2}$), варьировались только фазы S - и P -волн и параметры смешивания $\eta_{1/2}^+$, $\epsilon_{1/2}^-$, $\epsilon_{3/2}^-$. Остальные фазы были фиксированы теоретическими величинами. Во-вторых, особенностью этой работы является соединение двух методов анализа: зависящего и не зависящего от энергии. В то время как для всех фаз была выбрана энергетическая зависимость в виде функции эффективного радиуса, дублетная S -фаза была оставлена при анализе свободной, чтобы избежать трудности подгонки сингулярной функции.

Кроме этого следует отметить, что в работе [17], к сожалению, не приводятся значения P -фаз и соответствующие полученным фазам расчеты поляризационных наблюдаемых, что представляло бы интерес, т.к. второй важной проблемой как p - d , так и n - d рассеяния является так называемая "загадка A_y ".

Около десяти лет тому назад было установлено, что строгие вычисления, использующие реалистический NN потенциал, дают значения векторной анализирующей способности A_y , полученной в n - d рассеянии при малой энергии, ниже экспериментальной на 25–30% [18]. Это удивительное расхождение окрестили "загадкой $A_y(\theta)$ ". Последующие точные вычисления для p - d рассеяния, например [16, 19], и измерения поляризационных наблюдаемых показали, что этот эффект существует и в данном случае для анализирующих способностей $A_y(\theta)$ и $iT_{11}(\theta)$. При малых энергиях он может достигать 40% [16]. Величина эффекта уменьшается с увеличением энергии.

Анализирующие способности A_y и iT_{11} в N - d упругом рассеянии при малой энергии зависят в основном от J -расщепленных P -волновых фаз и параметров смешивания $\epsilon_{1/2}^-$ и $\epsilon_{3/2}^-$. Эти величины очень малы и трудно определяются экспериментально. Так, например, для согласия с экспериментом при $E_{с.т.} = 432 \text{ кэВ}$ надо уменьшить расчетную фазу ${}^4P_{1/2}$ на 1.6% и увеличить $\epsilon_{3/2}^-$ на 15% [16]. При этом хорошее согласие для T_{20} и T_{21} не расстраивается. Но существует строгая корреляция между 4P_J фазами для

N - d рассеяния и фазами 3P_j NN рассеяния. Таким образом, величина анализирующей способности в N - d рассеянии регулируется сложными соотношениями между фазами 3P_0 , 3P_1 , 3P_2 NN взаимодействия, которые также ответственны за величину NN анализирующей способности $A_y(\theta)$. Однако, $A_y(\theta)$ для p - d рассеяния имеет величину на два порядка большую, чем $A_y(\theta)$ для p - p рассеяния. Поэтому данные по n - d и p - d рассеянию могут являться как бы "увеличительным стеклом" для определения 3P_j NN взаимодействия.

Можно выдвинуть две версии, объясняющие существование "загадки $A_y(\theta)$ ".

Во-первых, вполне возможно, что современные реалистические потенциалы, полученные на основе глобального фазового анализа NN рассеяния, не могут быть известны с необходимой точностью при малых энергиях. Точность экстраполяционной процедуры, используемой в глобальном фазовом анализе для получения фазовых сдвигов при малых энергиях, невелика [18]. Была сделана попытка ввести феноменологические множители (S -факторы) для матричных элементов 3P_j AV18 взаимодействия, чтобы получить новые фазы 4P_J , лучше согласующиеся с экспериментом [18]. Однако, оказалось, что этот набор 3P_j фаз полностью отличается как от набора, определенного из полного фазового анализа NN данных, так и от наборов из NN потенциальных моделей. В работе [20] авторы оценили эффект влияния 3P_j волн, вызываемый изменением различных частей потенциала (центральная сила, тензорная сила и т.д.), на двухчастичные наблюдаемые и трехчастичную анализирующую способность. И получили, что нет возможности разумного изменения NN потенциала, чтобы, с одной стороны, увеличить трехчастичную A_y , а с другой стороны, удержать неизменными двухчастичные наблюдаемые.

Во-вторых, используемые в настоящее время в расчетах трехчастичные силы, основанные на двухпионном обмене, вызывают малое изменение фазовых сдвигов, как правило, увеличивают расхождение теории с экспериментом. Только введение трехчастичного взаимодействия Урбана (UR) уменьшает расхождение, но на малую величину. Незначительное влияние, оказываемое введением UR взаимодействия, на величину A_y и iT_{11} при низкой энергии связано с тем, что оно содержит феноменологический отталкивающий короткодействующий член. При малой энергии p - d рассеяния вероятность нахождения нуклонов с $l = 1$ (P -волны) близко друг к другу мала из-за влияния центробежного и кулоновского барьеров. Включение других процессов, таких как π - ρ и ρ - ρ обмены, должно дать еще меньшую коррекцию. Поэтому по мнению многих исследователей, занимающихся этим кругом проблем, должен быть рассмотрен новый тип 3N взаимодействия. Одной из возможностей является включение спин-орбитального 3N потенциала, кото-

рый мог бы существенно влиять на вклад P -волн N - d рассеяния [21].

Таким образом, несмотря на то, что трехнуклонное рассеяние изучается долгое время, сравнение его измеренных наблюдаемых с теоретическими вычислениями продолжает оставаться актуальной проблемой ядерной физики, т.к. дает строгие тесты для обоснования нуклон-нуклонной модели и модели трехнуклонных взаимодействий.

Из совокупности имеющихся в научной литературе сведений можно сделать вывод, что необходимо как дальнейшее проведение экспериментов по p - d рассеянию, особенно при еще более низких энергиях, так и проведение нового фазового анализа всех имеющихся экспериментальных данных. Тогда можно будет сделать более надежные выводы о положении полюса функции эффективного радиуса для дублетной S -фазы и, соответственно, о положении виртуального состояния ${}^3\text{He}$. А также получить данные по P -фазам, что представляет интерес для определения поляризационных наблюдаемых. Необходимы дальнейшие теоретические расчеты с учетом изменения потенциальной модели для 3P_0 , 3P_1 и 3P_2 фазовых сдвигов, т.к. именно они определяют отклонения $3N$ вычислений от эксперимента. Только тогда можно будет ответить на вопрос: найдено ли правильное 3P_j NN взаимодействие при низких энергиях, или при малых энергиях разрушается мезообменная картина NN взаимодействия, или существует в природе значительно большая величина трехнуклонного взаимодействия при малых энергиях, чем принято было считать до сих пор.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Malfliet R. A. and Tjon J. A. Nucl. Phys., **A127**, N 1, 161 (1969).
- [2] Квицинский А. А. Письма в ЖЭТФ, **36**, вып. 10, 375 (1982).
- [3] Friar J. L., Gibson V. F., and Payne G. L. Phys. Lett., **B124**, N 5, 287 (1983).
- [4] Euge D., Phillips A. C., and Roig F. Nucl. Phys., **A275**, 13 (1977).
- [5] Zankel H. and Mathelitsch L. Phys. Lett., **B132**, N 1, 2, 3, 27 (1983).
- [6] Berthold G. H. and Zankel H. Phys. Rev., **C34**, N 4, 1203 (1986).
- [7] Arvieux J. Nucl. Phys., **A221**, N 2, 253 (1974).
- [8] Барит И. Я., Балашко Ю. Г., Дулькова Л. С., Заварзина В. П. Изв. АН СССР, сер. физ., **42**, N 7, 1549 (1978).
- [9] Барит И. Я., Дулькова Л. С., Кузнецова Е. В., Соболевский Н. М. В сб.: Тезисы докладов XXXIII совещ. по яд. спектроскопии и структуре атом. ядра. Ленинград, Наука, 316. (1983). Украинский физический

- журнал, **30**, N 11, 1630 (1985). В сб.: Физика атомного ядра и элементарных частиц, ч. 2. М., ЦНИИ атоминформ, 109 (1983).
- [10] H u t t e l E. et al. Nucl. Phys., **A406**, 443 (1983).
- [11] C h e n C. R. et al. Phys. Rev., **C39**, N 4, 1261 (1989).
- [12] K i e v s k y A. et al. Phys. Lett., **B406**, N 4, 292 (1997).
- [13] W i r i n g a R. B., S t o k s V. G. J., and S c h i a v i l l a R. Phys. Rev., **C51**, 38 (1995).
- [14] W i r i n g a R. B., private communication.
- [15] B l a c k T. C. Doctoral dissertation, Univ. of North Carolina at Chapel Hill.
- [16] B r u n e C. R. et al. Phys. Lett., **B428**, N 1, 13 (1998).
- [17] B l a c k T. C. et al. Phys. Lett., **B471**, N 2 – 3, 103 (1999).
- [18] T o r n o w W. et al. Phys. Rev., **C57**, N 2, 555 (1998).
- [19] K i e v s k y A. et al. Nucl. Phys., **A607**, N 4, 402 (1996).
- [20] H u b e r D. and F r i a r J. L. Phys. Rev., **C58**, N 2, 674 (1998).
- [21] W i r i n g a R. B. Invited talk at the XV International Conference on Few-Body Problems in Physics, Groningen, The Netherlands, 1997 (unpublished).