

УДК 539.172

## ПРЯМОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ S-ВОЛНОВЫХ ФУНКЦИЙ ЭФФЕКТИВНОГО РАДИУСА ИЗ ФАЗОВОГО АНАЛИЗА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ СЕЧЕНИЙ $p$ - $d$ РАССЕЯНИЯ

Л. С. Дулькова, Е. В. Кузнецова

*Проведен фазовый анализ экспериментальных данных по дифференциальным сечениям  $p$ - $d$  рассеяния в интервале энергий дейтронов  $E_d = 0.800 - 2.010$  МэВ, включающий результаты последних измерений и учитывающий вклад  $D$ -волн. Энергетическая зависимость в анализе задавалась соотношениями теории эффективного радиуса. Подтверждено наличие полюса в функции эффективного радиуса для  $S$ -фазы при малой положительной энергии ( $21 \pm 10$  кэВ) и получена отрицательная дублетная длина рассеяния ( $-0.13 \pm 0.05$  ф м) в соответствии с результатами предыдущей работы авторов. Одновременно был создан банк экспериментальных данных по  $p$ - $d$  рассеянию в интервале энергий  $E_d = 0.800 - 6.000$  МэВ для всех видов наблюдаемых величин.*

Анализ экспериментальных данных по  $p$ - $d$  и  $n$ - $d$  рассеяниям при низких энергиях дает ценную информацию о свойствах трехнуклонных сил, которая, в свою очередь, может быть сопоставлена с результатами теоретических расчетов для различных вариантов потенциалов взаимодействия между нуклонами. Необходимость исследования этих процессов подробно обоснована в ряде работ, в том числе и в обзоре авторов [1]. В частности, определение характеристик рассеяния в дублетном  ${}^2S$  состоянии дает дополнительные возможности для изучения роли трехнуклонных ядерных сил, которые были введены в теорию, чтобы получить наблюдаемые энергии связи ядер  ${}^3H$  и  ${}^3He$ . Оказалось, что учет трехнуклонных сил существенно влияет на величину дублетной длины  $n$ - $d$  рассеяния, которая становится близкой к экспериментальной величине.

Особенностью  $p$ - $d$  рассеяния по сравнению с  $n$ - $d$  рассеянием является наличие кулоновского взаимодействия. Это осложняет расчеты и приводит к трудностям измерения сечений при очень малой энергии. Данное обстоятельство также затрудняет анализ полученных экспериментальных результатов, так как наличие кулоновского взаимодействия сдвигает полюс функции эффективного радиуса, определяющей энергетическую зависимость  ${}^2S$  фазы, к физической области [2].

Еще в раннем фазовом анализе 1983 года [3] нами было установлено наличие полюса при положительной энергии в модифицированной функции эффективного радиуса  $p$ - $d$  рассеяния и получено значение длины рассеяния  ${}^2a_{pd} < 0$ . Это стало возможным благодаря измерениям дифференциальных сечений  $p$ - $d$  рассеяния при очень малой энергии  $E_{сч.м} = 267 - 477$  кэВ [4]. Такой результат находится в противоречии с теоретическими вычислениями, большая часть которых дают величину  ${}^2a_{pd} \geq 0$  и, соответственно, полюс при отрицательной энергии. Поэтому мы провели более полный фазовый анализ [5] экспериментальных данных по дифференциальным сечениям  $p$ - $d$  рассеяния [4, 6 - 10] в интервале энергий  $E_d = 0.8 - 2.0$  МэВ ( $E_{сч.м} = 0.267 - 0.667$  МэВ) и широком диапазоне углов рассеяния  $\Theta_{см} = 22.5 - 149.3^\circ$ . Всего использовались  $N = 234$  экспериментальные точки. Учитывался вклад  $S$ - и  $P$ -волн.

Как и в работе [3], в процессе фазового анализа непосредственно определялись параметры обобщенной функции эффективного радиуса. В общем виде функция эффективного радиуса для заряженных частиц имеет вид:

$${}^{2S+1}K_L^J(k^2) = C_L^2 k^{2l+1} \left[ \text{ctg}({}^{2S+1}\delta_L^J) + \frac{2\eta h(\eta)}{C_L^0} \right] = -\frac{1}{a_L} + \frac{1}{2}r_L k^2 + p_L k^4 \dots,$$

где  $a_L$  - длина рассеяния,  $r_L$  - эффективный радиус,  $p_L$  - параметр формы потенциала,  $k = \mu v / \hbar$  - импульс относительного движения,  $\eta$ ,  $C_L^2$ ,  $C_L^0$ ,  $h(\eta)$  - кулоновские параметры [11],  $\mu$  - приведенная масса.

В предположении существования полюса при положительной энергии эта функция для  ${}^2S$ -фазы записывается в виде:

$${}^2K_0(k^2) = \frac{\left(-\frac{1}{a_0}\right) + \frac{1}{2}r_0 k^2 + p_0 k^4}{1 - \left(\frac{k}{k_0}\right)^2}.$$

Следует отметить, что при наших энергиях ( $E_{сч.м} < 1$  МэВ) разложение числителя функции по степеням  $k^2$  хорошо сходится [12].

Таким образом, при проведении фазового анализа непосредственно определялись величины  $a_0$ ,  $r_0$ ,  $p_0$ ,  $k_0^2$ . Для других фаз существование полюса не предполагалось. Было

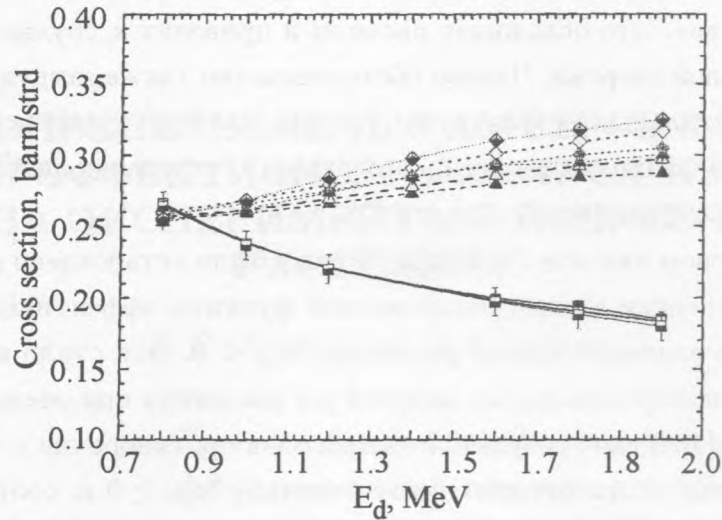


Рис. 1. Энергетические зависимости дифференциальных сечений  $p$ - $d$  рассеяния для разных углов, полученные в настоящем фазовом анализе с учетом и без учета  $D$ -волн, в сравнении с экспериментом; заштрихованные квадраты, треугольники и ромбы – для углов  $\Theta_{с.м.} = 98^\circ$ ;  $142^\circ$ ;  $149.3^\circ$ , соответственно, без учета  $D$ -волн; незаштрихованные – с учетом  $D$ -волн; заштрихованные наполовину – экспериментальные данные работы [6] с ошибками для этих же углов.

подтверждено существование полюса дублетной  ${}^2S$ -фазы в физической области, определено его положение ( $E_{с.м.} \cong 19$  кэВ) и, соответственно, получено отрицательное значение длины рассеяния  ${}^2a_{pd} = -0.12$  ф.м. Это значение длины рассеяния практически совпало с результатом работы [13] группы американских и итальянских физиков, которые получили величину дублетной длины  ${}^2a_{pd} = -0.13 \pm 0.04$  ф.м. Такое согласие является существенным, поскольку оба результата были получены разными методами фазовых анализов.

После опубликования наших результатов в периодике появилась статья той же группы с новыми экспериментальными данными при  $E_d = 2.010$  МэВ ( $E_{с.м.} = 0.667$  МэВ) [14]. Это обстоятельство послужило стимулом для проведения нами фазового анализа с включением вышеуказанных экспериментальных данных в наш банк данных (БД), в котором содержатся все типы наблюдаемых по  $p$ - $d$  рассеянию в интервале энергий  $E_d = 0.8 - 6.0$  МэВ (1348 точек). Таким образом, фазовый анализ экспериментальных дифференциальных сечений  $p$ - $d$  рассеяния был проведен на наборе данных, состоящем из 281 точки. В итоге ухудшилось описание сечений при больших энергиях в интервале

$E_d = 1.80 - 2.010 \text{ МэВ}$ , что, по-видимому, связано с использованием в анализе только  $S$ - и  $P$ -волн. В работе [14] показано, что учет  $D$ -волн существенно улучшает согласие с экспериментальными наблюдаемыми, причем чем выше энергия, тем этот учет существеннее.

В настоящей работе введение  $D$ -волны отрабатывалось нами на старом массиве экспериментальных сечений с числом точек  $N = 234$ . На рис. 1 показаны энергетические зависимости дифференциальных сечений, полученные в фазовом анализе, для разных углов рассеяния с учетом и без учета  $D$ -волн в сравнении с экспериментальными данными работы [6]. Из рисунка видно улучшение описания энергетической зависимости для больших углов рассеяния с введением в анализ этих фазовых сдвигов. При этом показатель качества описания экспериментальных данных  $\chi^2/\text{ст.св.}$  (степень свободы) улучшается от  $\chi^2/\text{ст.св.} = 5.82$  до  $\chi^2/\text{ст.св.} = 4.7$ . Параметры функции эффективного радиуса  $D$ -фаз, а, следовательно, и их величины согласуются с результатами фазового анализа [15], полученными с использованием экспериментальных данных [6]. Сравнение параметров низкоэнергетической зависимости фаз для  $D$ -волн, полученных в настоящей работе, с параметрами фазового анализа работы [15] приведено в табл. 1. В табл. 2, соответственно, даны величины  $D$ -фаз (в градусах), относящихся к этим работам. Из табл. 1 и 2 видно существенное согласие между результатами обеих работ.

Т а б л и ц а 1

Сравнение параметров низкоэнергетических зависимостей для  $D$ -фаз, полученных в настоящей работе, с параметрами, приведенными в работе [15]<sup>1</sup>

$^{2s+1}\delta_2$	Настоящая работа	Работа [15]
$^2\delta_2$	$a_0 = 0.0000$	$a_0 = -0.0020$
	$a_1 = 0.3006$	$a_1 = 0.3200$
	$a_2 = 0.0000$	$a_2 = 0.0000$
$^4\delta_2$	$a_0 = 0.0000$	$a_0 = -0.0020$
	$a_1 = -1.1873$	$a_1 = 0.0000$
	$a_2 = 0.0000$	$a_2 = -2.2000$

<sup>1</sup>Величины параметров приведены в обозначениях работы [15].



Т а б л и ц а 2

Величины  $D$ -фаз (в градусах) при  $E_p^{lab} = 1.0$  МэВ ( $E_d^{lab} = 2.0$  МэВ)

$2s+1\delta_2$	Настоящая работа	Работа [15]
$^2\delta_2$	$0.77 \div 0.26$	0.40
$^4\delta_2$	$-0.19 \div -0.12$	-1.00

В качестве нулевого приближения далее при проведении фазового анализа полного массива экспериментальных дифференциальных сечений ( $N = 281$  точка) использовались параметры низкоэнергетических зависимостей, полученные для массива с  $N = 234$  точки (вариант с учетом  $D$ -волн). При этом наилучшими результатами можно считать два результата: с  $\chi^2/ст.св. = 6.19$  и с  $\chi^2/ст.св. = 4.73$ . Оба варианта отличаются только значениями  $P$ -фаз. Поэтому в обоих вариантах получены одинаковые величины  $^2a_{pd} = -0.12$  ф м и  $E_{пол.сцм} = 26$  кэВ. Эти значения близки к величинам, представленным в работе [5]. Тем не менее, основным вариантом, по-видимому, надо считать вариант с  $\chi^2/ст.св. = 6.19$ , так как он лучше описывает недавно опубликованные данные работы [14] для больших углов рассеяния и данные, приведенные в работе [6] для  $E_d = 1.60$  и  $1.8$  МэВ.

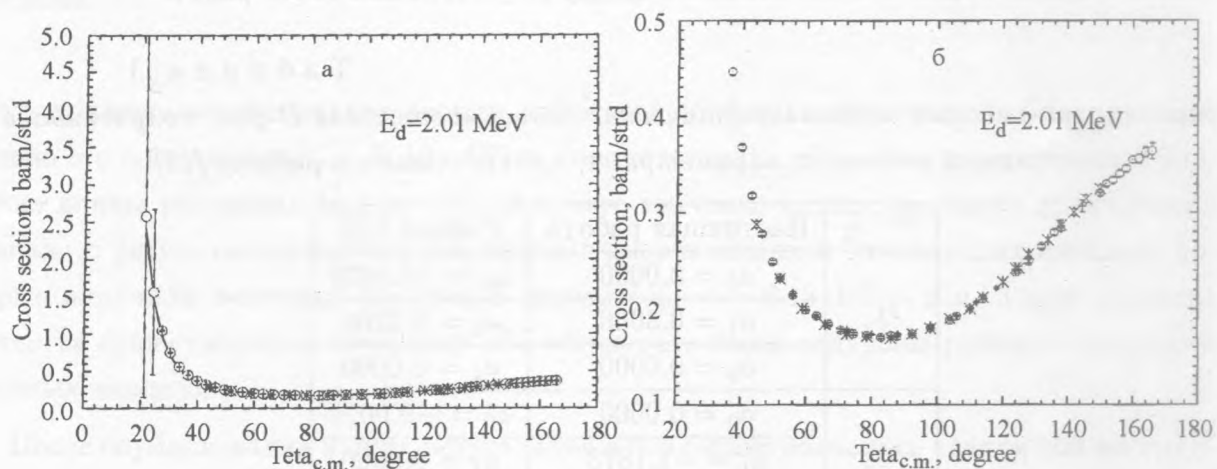


Рис. 2. а) Угловые распределения дифференциальных сечений  $p$ - $d$  рассеяния, полученные в нашем фазовом анализе, и экспериментальные данные при  $E_d = 2.01$  МэВ: кривая – расчет по фазовому анализу; кружки – [14]; прямые кресты – [8]; косые кресты – [6]. Величины экспериментальных ошибок нанесены на рисунках, значительная часть которых находится в пределах маркеров.

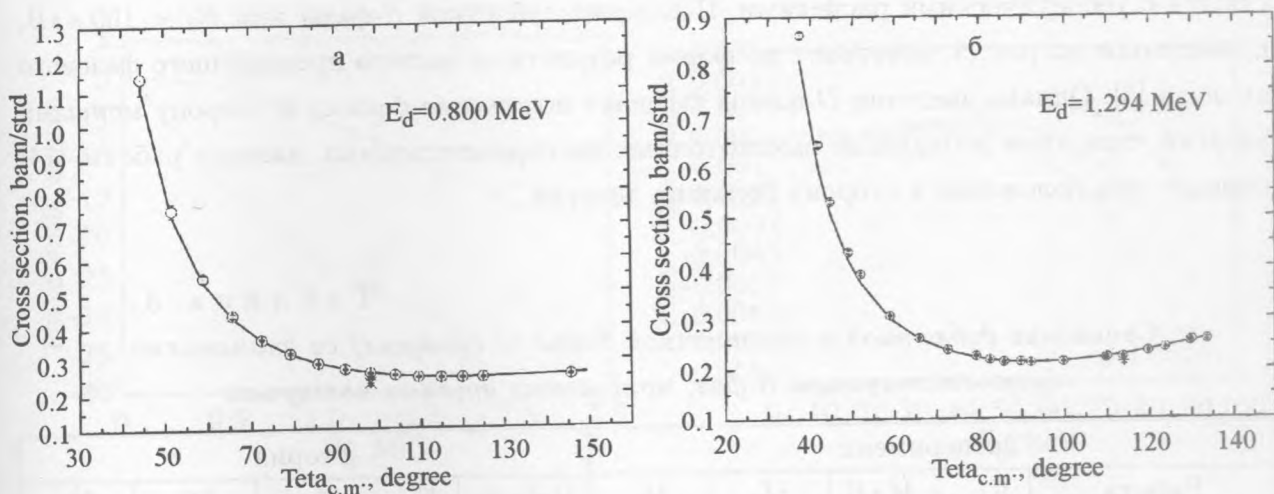


Рис. 3. а) Угловые распределения дифференциальных сечений  $p$ - $d$  рассеяния, полученные в нашем фазовом анализе, и экспериментальные данные при  $E_d = 0.800$  МэВ. Кривая – расчет по фазовому анализу; кружки – [6]; прямые кресты – [4]; косой крест – [4] при  $E_d = 0.817$  МэВ. Величины экспериментальных ошибок нанесены на рисунке, значительная часть из них находится в пределах маркеров; б) то же при  $E_d = 1.294$  МэВ. Кривая – расчет по результатам анализа, кружки – [7], прямые кресты – [4]. Величины экспериментальных ошибок нанесены на рисунке, значительная часть из них находится в пределах маркеров.

На рис. 2 приведено сравнение полученной угловой зависимости дифференциальных сечений при  $E_d = 2.00 \div 2.01$  МэВ с экспериментальными данными. На рис. 3а и 3б дано сравнение с экспериментом полученной угловой зависимости дифференциальных сечений для энергий дейтронов 0.8 МэВ и 1.294 МэВ. Видно, что с уменьшением энергии расхождение расчета с экспериментом тоже уменьшается. Скорее всего, это связано с отсутствием экспериментальных данных при низких энергиях для очень больших углов рассеяния. Сравнение величин  $S$ -фаз настоящего анализа с предыдущим нашим анализом [5] и с фазовыми анализами других авторов [14 – 16], а также с теоретическими расчетами [2, 14, 17] приведено в табл. 3 и на рис. 4, 5.

Из табл. 3 и рис. 4 видно, что полученные в настоящей работе результаты для  $S$ -фазы при  $E_d = 1.294$  МэВ близки к результатам нашей предыдущей работы [5] и работы [14]. При  $E_d = 2.000$  МэВ осталось, хотя и уменьшилось, существенное расхождение с работой [14]. При данной энергии полученное нами значение  ${}^2\delta_0$  ближе к величине  ${}^2\delta_0$  из работы [15]. Что касается квартетной  $S$ -фазы ( ${}^4\delta_0$ ), то введение в фазовый анализ новых экспериментальных данных практически ничего не изменило, т.е. все экспериментальные квартетные фазовые сдвиги близки между собой и хорошо согла-

суются с теоретическими расчетами. Поведение дублетной  $S$ -фазы при  $E_d < 100$  кэВ, приведенное на рис. 5, повторяет по форме результаты нашего предыдущего фазового анализа [5]. Однако введение  $D$ -волны смещает положение полюса в сторону меньших энергий, при этом добавление высокоточных экспериментальных данных работы [14] смещает его положение в сторону больших энергий.

Т а б л и ц а 3

Сравнение дублетной и квартетной  $S$ -фаз (в градусах) со значениями соответствующих  $S$ -фаз, полученных другими авторами

Эксперимент				Теория			
Работа	$E_{d,лаб}, МэВ$	${}^2\delta_0$	${}^4\delta_0$	Работа	$E_{d,лаб}, МэВ$	${}^2\delta_0$	${}^4\delta_0$
Данная работа	1.294	-8.30	-26.87	[14]	1.294	-5.81	-28.08
[5]	1.294	-8.90	-26.60				
[14]	1.294	-7.64	-27.48				
Данная работа	2.000	-16.30	-33.90	[14]	2.010	-10.00	-36.93
[5]	2.000	-19.10	-33.60	[2]	2.000	-10.60	-37.30
[14]	2.010	-10.53	-36.81	[17]	2.000	-10.00	-37.00
[15]	2.000	-14.10	-35.10				
[16]	2.000	-12.60	-36.60				

Что же касается  $P$ -фаз, то ошибки их определения очень велики. К тому же к проведению настоящего фазового анализа не были привлечены поляризационные наблюдаемые, включение которых в фазовый анализ позволило бы существенно уточнить поведение этих нечетных фазовых сдвигов. Наличие больших ошибок определения  $P$ -фаз не дает возможности сделать выводы об их величине.

Для улучшения согласия между результатами фазового анализа и экспериментом были проделаны различные процедуры фильтрации экспериментальных данных, которые проводились двумя способами. Во-первых, обычным образом отбраковывались из массива точки с  $\chi^2 \geq 10$ . Во-вторых, оставлялись для проведения анализа только те экспериментальные данные из трех основных работ [6, 7, 14], которые согласовались между собой. Во всех этих случаях  $\chi^2$  становился меньше, однако при этом отбраковывалось большое количество высокоточных измерений работ [7] и [14], в том числе и для тех углов рассеяния, где данные других авторов отсутствуют. Поэтому процедуры фильтрации мы сочли недопустимыми.

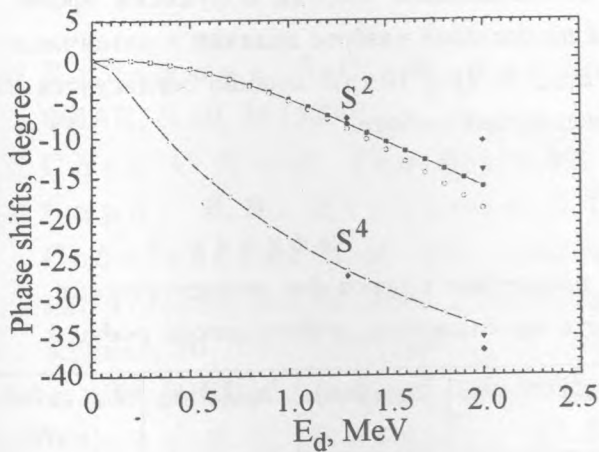


Рис. 4. Энергетические зависимости дублетной и квартетной  $S$ -фаз в градусах. Квадраты – данный анализ, кружки – наш предыдущий анализ [5], ромбы – [14], треугольники – [15].

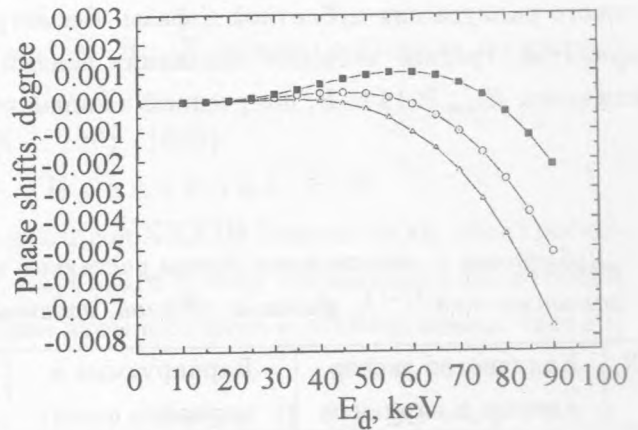


Рис. 5. Энергетические зависимости дублетной  ${}^2S_{1/2}$ -фазы в градусах, полученные в данном анализе при очень малых энергиях. Квадраты – результат данного анализа, кружки – наш предыдущий анализ [5] и треугольники – анализ с введением  $D$ -волн для  $N = 234$ . Величины параметров приведены в обозначениях работы [15].

Тем не менее, во всех рассмотренных вариантах отмечалось существование полюса в физической области в энергетической зависимости для дублетной  $S$ -фазы; определялось его положение, а также значение длины рассеяния  ${}^2a_{pd} < 0$ . Подробные результаты расчетов представлены в табл. 4. Ошибки длины рассеяния определялись из стандартных отклонений, полученных в процессе работы программы FUMILI [18]. За ошибку в положении полюса  ${}^2\delta_0$ -фазы принимались наибольшие отклонения от средней величины.

Итак, было проведено семь вариантов фазового анализа всех имеющихся к настоящему времени экспериментальных данных по дифференциальным сечениям  $p$ - $d$  рассеяния при  $E_d < 2.010$  МэВ. Из них – шесть вариантов с учетом  $S$ -,  $P$ -,  $D$ -волн. Полученные значения  $S$ - и  $D$ -фаз, в основном, согласуются с фазами нашей предыдущей работы [5] и с фазовым анализом работ [14] и [15]. Найденная длина дублетного  $S$ -рассеяния отрицательная  ${}^2a_{pd} = -0.13 \pm 0.05$  ф м и отлично согласуется как с нашим предыдущим результатом [5]  ${}^2a_{pd} = -0.12$  ф м, так и с результатом работы [13]  ${}^2a_{pd} = -0.13 \pm 0.04$  ф м. Длина квартетного рассеяния  ${}^4a_{pd} = 14.5 \pm 0.2$  ф м также хорошо согласуется с работой [13].



Еще раз подтверждено наличие полюса при положительной энергии в функции эффективного радиуса для дублетной  $S$ -фазы. Несмотря на большой разброс величин в различных вариантах, среднее значение положения полюса  $E_{сцм} \cong 21 \pm 10 \text{ кэВ}$  хорошо согласуется с величиной  $E_{сцм} \cong 19 \text{ кэВ}$ , полученной в нашей предыдущей работе.

Т а б л и ц а 4

*Дублетные и квартетные длины рассеяния и положение полюса для энергетических зависимостей  $^{2s+1}\delta_0$  фазовых сдвигов, заданных в приближении эффективного радиуса*

N	Количество экспер. данных в варианте	Варьируемые в варианте фазы	$\chi^2/ст.св.$	$^2a_{pd}(\text{ф м})$	$^4a_{pd}(\text{ф м})$	$E_{d,пол. lab.}$ (кэВ)	
1	N = 234	S, P	5.82	-0.12	14.5	58	
2		S, P, D	4.70	-0.084	14.5	42	
3	N=281	S, P, D закреплено от варианта N 2	6.15	-0.080	14.5	43	
4		S, P, D	6.19	-0.16	14.5	78	
5		S и D закр. от варта N 4. P вар-ся	4.73	-0.16	14.5	78	
6	N = 250 фильтрация $\chi^2$ по I-му способу	S, P, D	2.3	-0.22	14.6	97	
7	N=241 фильтрация $\chi^2$ по II-му способу	S, P, D	4.36	-0.085	14.5	43	
	Средние значения величин и их ошибки.				-0.13 $\pm 0.05$	14.5 $\pm 0.2$	62+35 62-24

Таким образом, несмотря на большое количество теоретических работ, посвященных этому вопросу, и наличие высокоточных экспериментальных данных, параметры функции эффективного радиуса для  $^2S$ -фазы, полученные в последних фазовых анализах дифференциальных сечений  $p-d$  рассеяния, все еще отличаются от величин, найденных с помощью теоретических расчетов ( $^2a_{pd} = 0.024 \text{ ф м}$ ,  $E_0 = -3.13 \text{ кэВ}$  [19]). Это различие нельзя считать значительным, потому что существуют неопределенности теории и погрешности фазового анализа. Тем не менее, остается постоянный интерес к дальнейшему уточнению рассматриваемых выше характеристик  $p-d$  рассеяния, поскольку имеется довольно сильная зависимость результатов расчетов от типа и параметров сил, действующих между нуклонами в трехнуклонной системе.

Авторы благодарят Карла Бруне за любезное предоставление экспериментального материала, а также В. А. Сергеева и Б. А. Бенецкого за полезные и стимулирующие обсуждения.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Дулькова Л. С., Кузнецова Е. В. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 10, 39 (2000).
- [2] Chen C. R. et al. Phys. Rev., **C39**, N 4, 1261 (1989).
- [3] 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., ЦНИИатоминформ, 109 (1983).
- [4] Барит И. Я., Балашко Ю. Г., Дулькова Л. С., Заварзина В. П. Изв. АН СССР, сер. Физ., **42**, N 7, 1549 (1978).
- [5] Дулькова Л. С., Кузнецова Е. В. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 7, 14 (2002).
- [6] Huttel E. et al. Nucl. Phys., **A406**, N 3, 435 (1983).
- [7] Brune C. R. et al. Phys. Rev., **C63**, N 4, 044013 (2001).
- [8] Kocher D. C., Clegg T. B. Nucl. Phys., **A132**, 455 (1969).
- [9] Sherr R., Blair J. M. et al. Phys. Rev., **72**, N 8, 662 (1947).
- [10] Brown R. J. S. et al. Phys. Rev., **88**, N 2, 253 (1952).
- [11] Friar J. L., Gibson V. F., Payne G. L. Phys. Rev., **C28**, 983 (1983).
- [12] Орлов Ю. В., Оревков Ю. П. Изв. АН, сер. физ., **68**, N 2, 259 (2004).
- [13] Black T. C. et al. Phys. Lett., **B471**, N 2-3, 103 (1999).
- [14] Wood M. H. et al. Phys. Rev., **C65**, N 3, 034002 (2002).
- [15] Huttel E. et al. Nucl. Phys., **A406**, N 3, 433 (1983).
- [16] Arvieux J. Nucl. Phys., **A221**, N 2, 253 (1974).
- [17] Kievsky A. et al. Nucl. Phys., **A607**, N 4, 402 (1996).
- [18] Силин И. Н. Статистические методы в экспериментальной физике, под ред. Тяпкина А. А., М., Атомиздат, 1976.
- [19] Kievsky A. et al. Phys. Lett., **B406**, N 4, 292 (1997).