

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

4587/2-80

22/9-80

P1-80-449

А.А.Бельков, С.А.Бунятов

ПИОН-ПИОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ  
В РЕАКЦИЯХ ОДНОПИОННОГО РОЖДЕНИЯ  
ПРИ НИЗКИХ ЭНЕРГИЯХ

Направлено в ЯФ

1980

Бельков А.А., Бунятов С.А.

PI-80-449

Пион-пионное взаимодействие в реакциях  
однопионного рождения при низких энергиях

Показана самосогласованность экспериментальных данных и киральной теории процессов  $\pi\pi \rightarrow \pi\pi$  и  $\pi N \rightarrow \pi\pi N$  при вайнберговском нарушении киральной симметрии и малых длинах  $\pi\pi$ -рассеяния. С помощью расчетов в рамках киральной теории реакции  $\pi N \rightarrow \pi\pi N$  обосновано применение метода Чу-Лоу к реакции  $\pi^- p \rightarrow \pi^+ \pi^- n$  при низких энергиях. Учет подпорогового нуля позволяет уточнить значение длины  $s$ -волнового  $\pi\pi$ -рассеяния  $a_0^0$  из экстраполяции к порогу фаз  $\delta_0^0$  в широком интервале энергий, полученных из реакции  $\pi^- p \rightarrow \pi^+ \pi^- n$ . Фазы  $\pi\pi$ -рассеяния  $\delta_0^0$  описываются при значении длины рассеяния  $a_0^0 = (0,23 \pm 0,03) m_\pi^{-1}$  и положении подпорогового нуля  $q_0^2 = (-0,7 \pm 0,3) m_\pi^2$ .

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1980

Bel'kov A.A., Bunyatov S.A.

PI-80-449

Pion-Pion Interaction in Single-Pion Production  
Reactions at Low Energies

В работе <sup>/1/</sup> методом Чу-Лоу был проведен анализ фотоэмульсионных данных <sup>/2/</sup> по реакции  $\pi^- p \rightarrow \pi^+ \pi^- n$  в интервале кинетических энергий налетающего пиона  $200 \text{ МэВ} \leq T_\pi \leq 260 \text{ МэВ}$ . Были определены фазы  $s$ -волнового  $\pi\pi$ -рассеяния  $\delta_0^0$  в интервале значений масс дипиона от порога до  $m_{\pi\pi} = 320 \text{ МэВ}$ . Полученные экспериментальные фазы  $\delta_0^0$  хорошо согласуются с результатами анализа  $K_{e4}$ -распадов <sup>/3/</sup>.

В работе <sup>/4/</sup> в рамках теории нарушенной киральной симметрии с вайнберговским значением параметра нарушения ( $\beta=1/2$ ) были рассчитаны полные сечения реакций  $\pi N \rightarrow \pi\pi N$  вблизи порога. В этой работе был проведен последовательный учет пион-нуклонных диаграмм древесного вида /рис.1а-г/ и унитаризации борновской амплитуды  $\pi\pi$ -рассеяния, возникающей при суммировании диаграмм /рис.1а,б/. Кроме того, были учтены диаграммы /рис.1д/ с обменом изобарой  $\Delta_{33}$ .

Метод Чу-Лоу основан на предположении, что при малых передачах импульса нуклону  $\Delta^2$  вклад от диаграммы однопионного обмена /рис.1б/ доминирует над вкладом других диаграмм благодаря наличию в амплитуде реакции  $\pi N \rightarrow \pi\pi N$  особенности  $(\Delta^2 - m_\pi^2)^{-1}$ , связанной с пропагатором обменного пиона. В работе <sup>/4/</sup> было показано, что каждая из амплитуд для диаграмм /рис.1а,б/ в отдельности зависит от представления эффективных киральных лагранжианов, в то время как их сумма от представлений лагранжианов уже не зависит. Если выделить из этой суммы члены, содержащие пропагатор обменного пиона, то соответствующая часть полной амплитуды реакции  $\pi N \rightarrow \pi\pi N$  может быть записана в виде <sup>/4/</sup>

$$T = g_{\Delta} f_{\pi} \bar{u}^{\mu(+)}(q) \frac{\hat{p} - \hat{q}}{\Delta^2 - m_{\pi}^2} \times \\ \times [(r_a)_{fe} \delta_{bc} A_{\pi\pi}^U(s, t, u) + (r_b)_{fe} \delta_{ac} A_{\pi\pi}^U(t, s, u) + \\ + (r_c)_{fe} \delta_{ab} A_{\pi\pi}^U(u, t, s)] \gamma_5 u^{\nu(-)}(p).$$

Здесь  $p$  и  $q$  - 4 импульса начального и конечного нуклонов;  $s, t, u$  - переменные Мандельштама для  $\pi\pi$ -рассеяния с одним пионом вне массовой поверхности;  $u^{\mu(\pm)}$  - нуклонные спиноры;  $f, e$  - поляризации нуклонов в начальном и конечном состояниях;  $a$  - изотопический индекс начального пиона;  $b, c$  -

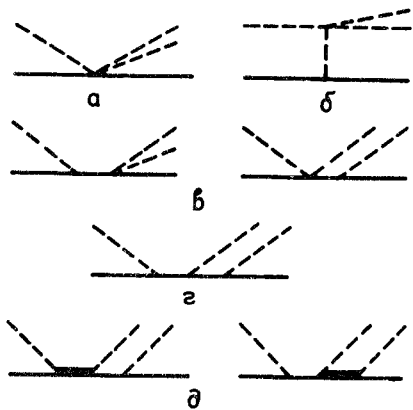


Рис.1. Диаграммы процесса  $\pi N \rightarrow \pi \pi N$  в древесном приближении. Пунктирные линии соответствуют пионам, сплошные тонкие - нуклонам, сплошные жирные - изобарам  $\Delta_{33}$ .

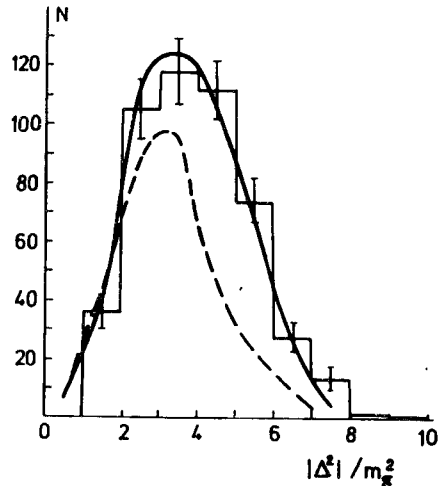


Рис.2. Результаты моделирования распределения числа событий по инвариантному переданному импульсу нуклона  $\Delta^2$ . Гистограмма - экспериментальное распределение для всех событий в интервале  $200 \text{ МэВ} \leq T_\pi \leq 260 \text{ МэВ}$ .

изотопические индексы пионов в конечном состоянии. Выражение для унитаризованной амплитуды  $\pi\pi$ -рассеяния  $A_{\pi\pi}^U$  можно найти в работе /4/.

Как показали расчеты, проведенные в работе /4/, в интервале  $200 \text{ МэВ} \leq T_\pi \leq 260 \text{ МэВ}$  нельзя пренебречь вкладом изобары  $\Delta_{33}$  в полное сечение реакции  $\pi^- p \rightarrow \pi^+ \pi^- n$ . Поэтому возможность применения метода Чу-Лоу при низких энергиях нуждается в дополнительном обосновании. С этой целью в рамках теории нарушенной киральной симметрии было проведено моделирование распределения числа событий реакции  $\pi^- p \rightarrow \pi^+ \pi^- n$  по инвариантному переданному импульсу нуклона  $\Delta^2$ .

Соответствующее экспериментальное распределение, построенное по всем событиям в интервале  $200 \text{ МэВ} \leq T_\pi \leq 260 \text{ МэВ}$ , приведено на рис.2. Сплошной кривой показано распределение, рассчитанное в теории нарушенной киральной симметрии с учетом экспериментального разброса событий по кинетической энергии налетающего пиона  $T_\pi$ . Вклад амплитуды  $T$  в полное распределение событий по инвариантному переданному импульсу  $\Delta^2$  пока-

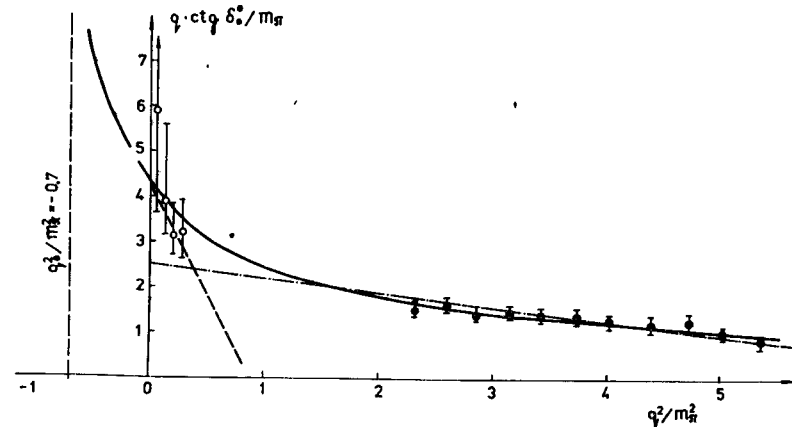


Рис.3. Экстраполяции к порогу фаз  $\delta_0^0$ : экспериментальные точки  $\circ$  и  $\bullet$  - из работ /1, 5/ соответственно; пунктирная и штрих-пунктирная прямые - экстраполяции к порогу точек из разных работ в приближении эффективного радиуса; сплошная кривая - совместный фит с экстраполяционной формулой, учитывающей подпороговый нуль в амплитуде  $\pi$ -волнового  $\pi\pi$ -рассеяния.

зан пунктиром и при  $-\Delta^2 < 3m_\pi^2$  составляет  $\sim 80\%$ . Таким образом, при малых  $|\Delta^2|$  ( $-\Delta^2 < 3m_\pi^2$ ) амплитуда  $T$  действительно доминирует над вкладами других диаграмм /рис.1 в-д/. Поэтому применение метода Чу-Лоу вблизи порога реакции  $\pi^- p \rightarrow \pi^+ \pi^- n$  можно считать вполне обоснованным.

Метод Чу-Лоу позволил с хорошей точностью получить фазы  $\delta_0^0$  рассеяния пионов из анализа реакции  $\pi^- p \rightarrow \pi^+ \pi^- n$ . На рис.3 показаны экспериментальные значения функции  $F(q) = q \text{ctg} \delta_0^0$  для фаз  $\delta_0^0$ , полученных как из анализа реакции  $\pi^- p \rightarrow \pi^+ \pi^- n$  при  $200 \text{ МэВ} \leq T_\pi \leq 260 \text{ МэВ}$  /1/, так и из анализа этой же реакции при  $p_\pi = 17 \text{ ГэВ}/c$  /5/. Экстраполяция к порогу точек /1/ ( $q^2/m_\pi^2 < 0,5$ ) в приближении эффективного радиуса:

$$q \text{ctg} \delta_0^0 = \frac{1}{a_0^0} + \frac{1}{2} r_0^0 q^2$$

дает для длины рассеяния пионов  $a_0^0$  и эффективного радиуса следующие значения:

$$a_0^0 = (0,24 \pm 0,07) m_\pi^{-1}, \quad r_0^0 = (-9,6 \pm 10,1) m_\pi^{-1}.$$

При экстраполяции точек /5/ ( $q^2/m_\pi^2 > 2$ ) к порогу в приближении эффективного радиуса получим

$$a_0^0 = (0,40 \pm 0,02) m_\pi^{-1}, \quad r_0^0 = (-0,64 \pm 0,06) m_\pi^{-1}.$$

Таким образом, при одном и том же значении  $a_0^0$  и  $r_0^0$  /см. рис.3/ экспериментальные данные по фазам не могут быть описаны во всем интервале энергии формулой эффективного радиуса.

Как впервые было показано в работе <sup>/8/</sup>, такое поведение функции  $F(q) = q \operatorname{ctg} \delta_0^0$  подтверждает теоретические указания <sup>/7,8/</sup> на наличие подпорогового нуля в амплитуде  $s$ -волнового  $\pi\pi$ -рассеяния. Экстраполяция к порогу фаз  $\delta_0^0$  <sup>/1,5/</sup> с помощью параметризации, учитывающей подпороговый нуль <sup>/6/</sup>:

$$q \operatorname{ctg} \delta_0^0 = \frac{\sqrt{s}}{2} \frac{1 + B_0 q^2}{D_0 (q^2 - q_0^2)},$$

для положения подпорогового нуля  $q_0^2$ , длины рассеяния пионов  $a_0^0 = -D_0 q_0^2 m_\pi^{-1}$  и коэффициентов  $B_0, D_0$  дает значения

$$a_0^0 = (0,23 \pm 0,03) m_\pi^{-1}, \quad q_0^2 = (-0,7 \pm 0,3) m_\pi^2, \\ B_0 = (-0,04 \pm 0,02) m_\pi^{-2}, \quad D_0 = (0,32 \pm 0,04) m_\pi^{-2}.$$

В работах <sup>/4,8/</sup> был развит полуфеноменологический подход к описанию фаз  $\pi\pi$ -рассеяния в рамках теории нарушенной киральной симметрии, основанный на унитаризации борновской амплитуды рассеяния с помощью унитарного рассеяния однопетлевой пионной диаграммы. Для длины  $a_0^0$  было получено предсказание  $a_0^0 = (0,19 \pm 0,02) m_\pi^{-1}$  при значении параметра нарушения киральной симметрии  $\beta=1/2$ . Положение подпорогового нуля  $q_0^2$  определяется в борновском приближении выражением

$$q_0^2 = -\frac{1}{4}(1 + 5\beta) m_\pi^2.$$

При  $\beta=1/2$  получим  $q_0^2 = -7/8 m_\pi^2 = -0,875 m_\pi^2$ . Полученные нами экспериментальные результаты:

$$a_0^0 = (0,23 \pm 0,03) m_\pi^{-1}, \quad q_0^2 = (-0,7 \pm 0,3) m_\pi^2$$

хорошо согласуются с предсказаниями теории нарушенной киральной симметрии.

Проведенные нами исследования полных сечений реакций  $\pi N \rightarrow \pi\pi N$  <sup>/4/</sup> и  $\pi\pi$ -рассеяния <sup>/9/</sup> показали, что теория нарушенной киральной симметрии может быть успешно применена для описания этих процессов при низких энергиях. Показана самосогласованность экспериментальных данных и киральной теории процессов  $\pi\pi \rightarrow \pi\pi$  и  $\pi N \rightarrow \pi\pi N$  при вайнберговском нарушении киральной симметрии ( $\beta=1/2$ ) и малых длинах  $s$ -волнового  $\pi\pi$ -рассеяния. Таким образом, нами решена проблема, на которую обратил внимание Вайнберг в докладе на Венской конференции в 1968 году <sup>/10/</sup>.

Таблица  
Длины  $s$ - и  $p$ -волнового рассеяния пионов

Длина рассеяния	Экспериментальное значение	Предсказание в теории нарушенной киральной симметрии
$a_0^0$	$0,23 \pm 0,03$ /настоящая работа/ $0,26 \pm 0,05$ <sup>/3,11/</sup>	$0,19 \pm 0,02$ <sup>/9/</sup>
$a_0^2$	$-0,06 \pm 0,07$ <sup>/8/</sup>	$-0,024 \pm 0,004$ <sup>/9/</sup>
$a_1^1$	$0,10 \pm 0,01$ <sup>/12,13/</sup> $0,040 \pm 0,004$ <sup>/14,15/</sup> $0,067$ <sup>/16/</sup>	$0,031$ <sup>/17/</sup> *

\* Полученное нами в работе <sup>/9/</sup> значение  $a_1^1$  можно трактовать как двойной счет диаграмм с  $p$ -резонансом. Авторы благодарны М.К.Волкову, указавшему на это обстоятельство.

За последние три года благодаря новым данным по фазе  $\delta_0^0$  вблизи порога <sup>/3,1/</sup> было существенно уточнено экспериментальное значение длины  $s$ -волнового  $\pi\pi$ -рассеяния  $a_0^0$ . В таблице приведены последние экспериментальные данные по длинам  $s$ - и  $p$ -волнового  $\pi\pi$ -рассеяния. Из таблицы видно, что для дальнейшей экспериментальной проверки теории нарушенной киральной симметрии необходимо уточнение значений  $s$ -волновой длины рассеяния  $a_0^2$  и  $p$ -волновой длины  $a_1^1$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бельков А.А. и др. Письма в ЖЭТФ, 1979, 29, с.652.
2. Батусов Ю.А. и др. ЯФ, 1965, 1, с.526.
3. Rosset L. et al. Phys.Rev., 1977, D15, p.574.
4. Бельков А.А., Бунятов С.А., Первушин В.Н. ОИЯИ, P2-80-67, Дубна, 1980.
5. Estebrooks P., Martin A.D. Nucl.Phys., 1974, D79, p.301.
6. Бельков А.А., Бунятов С.А. ЯФ, 1979, 29, с.1295.
7. Серебряков В.В., Ширков Д.В. ЯФ, 1968, 7, с.170.
8. Гарсеванишвили В.Р., Ширков Д.В. ОИЯИ, P2-6867, Дубна, 1972.

9. Бельков А.А., Бунятов С.А., Первушин В.Н. ОИЯИ, P2-12646, Дубна, 1979.
10. Weinberg S. Proc. of the XIV Conf. on High Energy Phys. Vienna, 1968.
11. Peterson J.L. The  $\pi\pi$ -Interaction. 1977, CERN, 77-04.
12. Maenner W. Experimental Meson Spectroscopy. Proc. of the Boston Conf. C.A.I.P., New York, 1974.
13. Nagels M.M. et al. Nucl.Phys., 1976, B109, p.1.
14. Basdevont J.L., Frogatt C.D., Petersen J.L. Nucl.Phys., 1974, B72, p.413.
15. Ochs W. Preprint MPI-PAE/PTh 32/77.
16. Budnev N.M., Budnev V.M., Serebryakov V.V. Phys.Lett., 1976, 64B, p.307.
17. Волков М.К., Первушин В.Н. ЯФ, 1974, 20, с.762.

## Нет ли пробелов в Вашей библиотеке?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

Д1,2-8405	Труды IV Международного симпозиума по физике высоких энергий и элементарных частиц. Варна, 1974.	2 р. 05 к.
P1,2-8529	Труды Международной школы-семинара молодых ученых. Актуальные проблемы физики элементарных частиц. Сочи, 1974.	2 р. 60 к.
Д6-8846	XIV совещание по ядерной спектроскопии и теории ядра. Дубна, 1975.	1 р. 90 к.
Д13-9164	Международное совещание по методике проволоочных камер. Дубна, 1975.	4 р. 20 к.
Д1,2-9224	IV Международный семинар по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1975.	3 р. 60 к.
Д-9920	Труды Международной конференции по избранным вопросам структуры ядра. Дубна, 1976.	3 р. 50 к.
Д9-10500	Труды II Симпозиума по коллективным методам ускорения. Дубна, 1976.	2 р. 50 к.
Д2-10533	Труды X Международной школы молодых ученых по физике высоких энергий. Баку, 1976.	3 р. 50 к.
Д13-11182	Труды IX Международного симпозиума по ядерной электронике. Варна, 1977.	5 р. 00 к.
Д17-11490	Труды Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1977.	6 р. 00 к.
Д6-11574	Сборник аннотаций XV совещания по ядерной спектроскопии и теории ядра. Дубна, 1978.	2 р. 50 к.
Д3-11787	Труды III Международной школы по нейтронной физике. Алушта, 1978.	3 р. 00 к.
Д13-11807	Труды III Международного совещания по пропорциональным и дрейфовым камерам. Дубна, 1978.	6 р. 00 к.
	Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна 1978. /2 тома/	7 р. 40 к.
Д1,2-12036	Труды V Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна 1978.	5 р. 00 к.
P18-12147	Труды III совещания по использованию ядерно-физических методов для решения научно-технических и народнохозяйственных задач.	2 р. 20 к.

Рукопись поступила в издательский отдел  
30 июня 1980 года.

Д1,2-12450	Труды XII Международной школы молодых ученых по физике высоких энергий. Приморско, НРБ, 1978.	3 р. 00 к.
P2-12462	Труды V Международного совещания по нелокальным теориям поля. Алушта, 1979.	2 р. 25 к.
Д-12831	Труды Международного симпозиума по фундаментальным проблемам теоретической и математической физики. Дубна, 1979.	4 р. 00 к.
Д-12965	Труды Международной школы молодых ученых по проблемам ускорителей заряженных частиц. Минск, 1979.	3 р. 00 к.
Д11-80-13	Труды рабочего совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1979.	3 р. 50 к.
Д4-80-271	Труды Международной конференции по проблемам нескольких тел ядерной физике. Дубна, 1979.	3 р. 00 к.
Д4-80-385	Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1980.	5 р. 00 к.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу:

101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79,

издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

---

Вышел в свет очередной номер журнала "Физика элементарных частиц и атомного ядра", том 11, вып. 4. Подписка на журнал проводится в агентствах и отделениях "Союзпечати", в отделениях связи, а также у общественных распространителей печати.