

С 346.48
Б-287

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



1044 / 2-23

19/III-

P1 - 6906

Ю.А.Батусов, С.А.Бунятов, Г.Р.Гулканян,
В.М.Сидоров

НЕУПРУГИЕ π^+ р - ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ПРИ ЭНЕРГИИ 230 МЭВ

1973

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

P1 - 6906

Ю.А.Батусов, С.А.Бунятов, Г.Р.Гулканян,
В.М.Сидоров

НЕУПРУГИЕ π^+p - ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ПРИ ЭНЕРГИИ 230 МЭВ

Направлено в ЯФ

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Батусов Ю.А., Бунятов С.А., Гулкарян Г.Р., Сидоров В.М. P1 - 6906

Неупругие π^+p -взаимодействия при энергии 230 Мэв

Измерено сечение реакции $\pi^+p \rightarrow \pi^+\pi^+n$ при $T_\pi = 230$ Мэв. Это позволяет исключить одно из наиболее вероятных значений параметра ξ , определяющего вид лагранжиана взаимодействия для процессов $\pi\pi \rightarrow \pi\pi$, $\pi N \rightarrow \pi\pi N$ вблизи порога в теории "мягких" пионов. Найдены два возможных значения отношения изотопически инвариантных амплитуд реакций $\pi N \rightarrow \pi\pi N$ на пороге в состояниях P_{11} и P_{31} . Оценены сечения реакций $\pi^+p \rightarrow \pi^+\pi^0p$ и $\pi^+p \rightarrow \pi^+\gamma p$ ($E_\gamma > 50$ Мэв) при энергии $T_\pi = 230$ Мэв.

Препринт Объединенного института ядерных исследований.
Дубна, 1973

Batusov Yu.A., Bunyatov S.A.,
Gulkaryan H.R., Sidorov V.M.

P1 - 6906

Inelastic π^+p Interactions at 230 MeV

The cross section of the reaction $\pi^+p \rightarrow \pi^+\pi^+n$ at $T_\pi = 230$ MeV was measured, which allows one to exclude one of the most probable values of parameter ξ , determining the type of the interaction Lagrangian for $\pi\pi \rightarrow \pi\pi$, $\pi N \rightarrow \pi\pi N$ processes near the threshold in soft pion theory.

Two possible values are found for the ratio of isotopically invariant amplitudes of the reactions $\pi N \rightarrow \pi\pi N$ on the threshold in the states P_{11} and P_{31} .

The cross sections of the reactions $\pi^+p \rightarrow \pi^+\pi^0p$ and $\pi^+p \rightarrow \pi^+\gamma p$ ($E_\gamma > 50$ MeV) at the energy $T_\pi = 230$ MeV are estimated.

Preprint. Joint Institute for Nuclear Research.
Dubna, 1973

Реакции $\pi N \rightarrow \pi\pi N$ вблизи порога рождения одиночного π^- -мезона представляют собой один из важнейших процессов, содержащих информацию о $\pi\pi$ -взаимодействии. Однако изучение таких реакций, сечение которых вблизи порога на 3-4 порядка ниже сечения упругого πN -рассеяния, связано с большими экспериментальными трудностями. В настоящее время экспериментальные данные в области энергий налетающего π^- -мезона в лабораторной системе ниже 300 Мэв существуют практически только для одного канала $\pi^-p \rightarrow \pi^+\pi^-n$, в то время как различные теоретические предсказания относительно низкоэнергетического $\pi\pi$ -взаимодействия, которое проявляется в процессах $\pi N \rightarrow \pi\pi N$, требуют изучения и других каналов реакций. Наиболее точные данные по реакции

$\pi^-p \rightarrow \pi^+\pi^-n$

/1/

получены в Дубне ^{1,1'} при помощи фотоэмульсионной методики. В этой работе применялся эффективный способ регистрации событий, принадлежащих реакции /1/: эмульсионные камеры, облученные π^- -мезонами, просматривались с целью поиска остановок π^- -мезонов противоположного знака - π^+ -мезонов, однозначно идентифицируемых по характерному $\pi \rightarrow \mu + e$ -распаду. Практически каждый найденный случай остановки π^+ -мезона соответствовал реакциям рождения π^+ -мезона на протонах и на ядрах фотоэмульсии, либо двойной перезарядке π^- -мезонов на ядрах. В работе ¹ удалось зарегистрировать ~ 560 событий, принадлежащих реакции /1/.

Методика, примененная в работе ^{1,1'}, позволяет изучать также неупругие π^+p -взаимодействия, хотя при этом значительно возрастает трудность поиска событий. В этом случае только небольшая доля зарегистрированных остановок π^+ -мезонов соответствует реакциям рождения π^+ -мезона, и это сильно затрудняет набор исследуемых событий. Однако полное отсутствие экспериментальных данных по неупругим каналам взаимодействия π^- -мезона с протоном ниже $T_\pi = 300$ Мэв делает важной и интересной задачу получения таких данных.

Цель настоящей работы - определить сечения реакций неупругого взаимодействия π^+ -мезона с протоном



при энергии налетающего мезона в лабораторной системе $T_{\pi} = 230$ Мэв.

Работа выполнена фотоэмульсионной методикой. Четыре камеры размерами $10 \times 10 \times 6,5$ см³ облучались π^+ -мезонами с энергией $/245 \pm 8/$ Мэв на синхроциклотроне Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ. Средняя плотность облучения была равна $3,6 \cdot 10^5$ 1/см². Поиск событий $\pi^+ p$ -взаимодействий проводился по остановкам π^+ -мезонов. При таком поиске полностью исключались реакции упругого $\pi^+ p$ -взаимодействия, а также реакции квазиупругого выбивания протонов из ядер фотоэмульсии, поскольку при таких взаимодействиях вторичные π^+ -мезоны выходили за пределы камеры. После просмотра 53 см³ объема эмульсии было зарегистрировано 12 000 остановок π^+ -мезонов. Найденные по остановкам следы π^+ -мезонов прослеживались до точки взаимодействия. Для ускорения поиска реакций $/2/$ и $/3/$, в которых значительная доля вторичных π^+ -мезонов в лабораторной системе летит вперед, часть найденных следов π^+ -мезонов прослеживалась до точки взаимодействия только в том случае, когда угол между направлением следа и направлением первичного π^+ -мезона не превышал 90° .

При прослеживании было зарегистрировано 8 000 неупругих взаимодействий π^+ -мезонов с протонами и ядрами фотоэмульсии. На первом этапе из них отбирались события без видимого следа ядра отдачи и содержащие, помимо π^+ -мезона, еще один луч /"водородоподобные события"/. Далее для измерения отбирались события, в которых второй след оканчивался в камере. Эти события анализировались при помощи программы для анализа ядерных реакций в фотоэмульсионных камерах ⁵.

В результате анализа 8 000 неупругих взаимодействий π^+ -мезонов с протонами и ядрами было идентифицировано 7 событий с двумя вторичными π^+ -мезонами. 6 из них удовлетворяют кинематике реакции $\pi^+ p \rightarrow \pi^+ \pi^+ n$.

Было отобрано и проанализировано также 260 двухлучевых звезд с одним вторичным π^+ -мезоном и вторым следом, который оканчивался в камере и имел длину, превышающую 1 мм /последнее требование было введено для уменьшения вклада фоновых

событий на ядрах фотоэмульсии/. Оказалось, что 4 из этих событий удовлетворяют кинематике реакции $\pi^+ p \rightarrow \pi^+ \pi^0 p$, а 21 - реакции $\pi^+ p \rightarrow \pi^+ \gamma p$ / $E_{\gamma} > 50$ Мэв/.

Для определения сечений реакций $/1/-/3/$ учитывались поправки, связанные с эффективностью поиска остановок π^+ -мезонов, прослеживания треков и определения первичного потока π^+ -мезонов. Для каждого типа реакций определялась геометрическая эффективность камер по методу Монте-Карло.

При определении сечений одним из важных вопросов является учет вклада взаимодействий на ядрах фотоэмульсии в исследуемые нами процессы. Для оценки фона мы пользовались методикой, примененной в работе ¹¹. В этой работе анализ "фоновых" событий /событий с видимым следом ядра отдачи/ показал, что их вклад в реакцию $/1/$ составляет $20 \pm 3\%$. Эти события соответствуют реакциям рождения π^+ -мезона на квазисвободном протоне ядер, которые имитируют реакцию на свободном протоне. Аналогичный процесс является фоновым и для реакции $\pi^+ p \rightarrow \pi^+ \pi^+ n$. Величина фона определяется, с одной стороны, импульсом и разбросом в импульсе налетающего π^+ -мезона и квазисвободного протона в ядре, а с другой - вероятностью взаимодействия конечных частиц внутри ядра. Поскольку сечение взаимодействия π^+ -мезонов с ядром значительно меньше, чем сечение взаимодействия нейтронов с небольшой энергией, присутствующих в обеих реакциях $/1/$ и $/2/$, то следует ожидать, что относительные величины фона в реакциях $/1/$ и $/2/$ при одинаковых энергиях первичного π^+ -мезона будут одинаковы.

Вклад фона в реакции $/3/$ и $/4/$ из-за малости статистики фоновых событий определяется менее точно. Для реакции $/4/$ он оказался равным $/44 \pm 23\%$. Для реакции $\pi^+ p \rightarrow \pi^+ \pi^0 p$ фон определяется еще с меньшей точностью, поэтому мы приводим верхнюю границу сечения этой реакции, определенную по 4 событиям, и оценку сечения в предположении, что вклад фона в реакцию $/3/$ такой же, что и в реакцию $/4/$.

Сечения реакций $/2/-/4/$ приведены в таблице. В указанных ошибках учтена неопределенность в оценке фона.

Для сравнения в таблице приведены значения сечений реакций $/2/-/4/$ при энергии 300 Мэв ⁶, которые до настоящего времени были единственными данными, относящимися к неупругим процессам $\pi^+ p$ -взаимодействия при энергиях ниже $T_{\pi} = 350$ Мэв.

На рис. 1 и 2 приведены имеющиеся данные по сечениям реакций $/2/$ и $/3/$ до энергии 470 Мэв. Можно отметить, что полученные нами оценки сечений подтверждают тот факт, что с уменьшением энергии сечение $\sigma(\pi^+ \pi^+ n)$ уменьшается значительно медленнее, чем сечение $\sigma(\pi^+ \pi^0 p)$.

Таблица

Реакция	Дубна (230±13) Мэв, фотоэмпульс. камера		ЦЕРН (300 Мэв), водород. пузырьковая камера	
	Число событий	сечение, мкб	Число событий	сечение, мкб
$\pi^+p \rightarrow \pi^+\pi^+n$	6	33 ⁺²⁰ ₋₁₃	2	25 ⁺³¹ ₋₁₆
$\pi^+p \rightarrow \pi^+\pi^0p$	4	20 ^{+17*} ₋₁₃	9	110±40
$\pi^+p \rightarrow \pi^+\gamma p$ ($E_\gamma > 50$ мэв)	21	580±280	18	220±50

*). Верхняя граница сечения этой реакции, оцененная по 4 событиям, равна 37 мкб.

Знание сечения реакции $\pi^+p \rightarrow \pi^+\pi^+n$ имеет важное значение для проверки низкоэнергетических теорий процессов $\pi\pi \rightarrow \pi\pi$ и $\pi N \rightarrow \pi\pi N$. Например, разные варианты теории "мягких" пионов предсказывают различное поведение сечений реакций $\pi N \rightarrow \pi\pi N$ вблизи порога. Различие в этих предсказаниях при низких энергиях сводится к различным выборам одного единственного пара-

метра ξ /11/, который определяет вклад нарушающих киральную симметрию членов /содержащих массу пиона/ в лагранжиан процессов $\pi\pi \rightarrow \pi\pi$, $\pi N \rightarrow \pi\pi N$ и который не может быть вычислен в рамках этой теории. Ранее в работе Олсона и Тернера /11/, экспериментальные данные по реакции $\pi^-p \rightarrow \pi^+\pi^-n$, полученные в Дубне /11/, сравнивались с результатами теоретических расчетов /рис. 3/. Как видно из рисунка, кривая, полученная на основе лагранжиана Швингера / $\xi=1$ /, проходит существенно ниже экспериментальных точек, и, таким образом, значение $\xi=1$ может быть исключено. Экспериментальные данные хорошо согласуются с предсказанием Вайнберга / $\xi=0$ /. Однако знание сечения только одного канала $\pi^-p \rightarrow \pi^+\pi^-n$ не снимает неопределенности в ξ : величины сечений этого канала при значениях $\xi=0$ и $\xi=4,5$ совпадают. Для того, чтобы разрешить эту неопределенность, необходимо знание сечений других каналов. Из рис. 1 видно, что определенное нами сечение $\sigma(\pi^+\pi^+n)$ снимает эту неопределенность, исключая $\xi=4,5$.

Отметим, что один из интересных результатов теории "мягких" пионов - предсказание длин $\pi\pi$ -рассеяния - также требует знания параметра ξ . В рамках этой теории s -волновые длины $\pi\pi$ -рассеяния a_0 и a_2 в изотопических состояниях $T=0$ и $T=2$ связаны следующими соотношениями:

$$a_0' a_2 = \left(\frac{5\xi - 7}{2}\right) (\xi + 2), \quad /5/$$

$$2a_0 = 5a_2 + (68 \cdot f_\pi)^2 m_\pi^{-1},$$

где f_π - константа ($\pi \rightarrow \mu + \nu$)-распада. При значении $\xi=0$ и $f_\pi=82$ Мэв из соотношений /5/ следует известный результат алгебры токов, полученный Вайнбергом /13/:

$$a_0 = 0,2 m_\pi^{-1}, \quad a_2 = -0,06 m_\pi^{-1}.$$

Знание сечений реакций $\pi^+p \rightarrow \pi^+\pi^+n$ и $\pi^-p \rightarrow \pi^+\pi^-n$ /11/ вблизи порога позволяет определить важный параметр пион-нуклонного взаимодействия - отношение модулей изотопически

инвариантных амплитуд $x = F_{11}/|F_{31}|$ реакций $\pi N \rightarrow \pi\pi N$ в состояниях P_{11} и P_{31} на пороге рождения мезона. Этот параметр играет существенную роль в низкоэнергетической теории реакций $\pi N \rightarrow \pi\pi N$ /Грибов, Ансельм, Анисович /¹⁴/; им определяется вклад членов, содержащих длины рассеяния конечных частиц, в матричный элемент реакции. Вблизи порога реакций $\pi N \rightarrow \pi\pi N$ полный орбитальный момент конечных частиц $L = 0$, поэтому в начальном состоянии можно пренебречь всеми волнами за исключением P_{11} и P_{31} . Тогда сечения реакций /1/, /2/ выражаются через изотопически инвариантные амплитуды F_{11} и F_{31} следующим образом:

$$\sigma_1 = \frac{2}{9} \left\{ |F_{11}|^2 - \sqrt{\frac{2}{5}} |F_{11}| |F_{31}| \cos\phi + \frac{1}{10} |F_{31}|^2 \right\} E^2,$$

$$\sigma_2 = \frac{2}{5} |F_{31}|^2 E^2,$$

где ϕ с точностью до π равна /15/ разности фаз $\phi_{\text{упр}} = \delta_{31} - \delta_{11}$ упругого πN -рассеяния в состояниях P_{31} и P_{11} . Разность фаз $\phi_{\text{упр}}$ по результатам различных фазовых анализов /16/, мала и составляет $\sim -5^\circ$ с неопределенностью $1^\circ - 2^\circ$. E - полная выделенная энергия в реакции $\pi N \rightarrow \pi\pi N$ в системе центра масс сталкивающихся частиц.

Используя значение $\sigma_1 = 27 \pm 5$ мкб при $T_\pi = 222$ Мэв, полученное в работе /14/, и значение $\sigma_2 = 33 \pm 20$ мкб при $T_\pi = 230$ Мэв, полученное в настоящей работе, находим допустимые области для параметра x :

$$x = 1,7 \pm 0,4 \quad \text{при } \phi = \phi_{\text{упр}} = -5^\circ,$$

$$x = 1,1 \pm 0,4 \quad \text{при } \phi = \phi_{\text{упр}} + \pi = 175^\circ.$$

На рис. 4 приведены сечения пяти каналов реакций $\pi N \rightarrow \pi\pi N$ в относительных единицах / в зависимости от параметра x . Из рисунка видно, что знание сечения реакции $\pi^- p \rightarrow \pi^0 p^0 n$ вблизи порога позволит однозначно определить x . Полученное нами значение параметра x /при $\phi = -5^\circ$ / согласуется с оценками, следующими из модели Олсона-Йодха /17/. В этой модели для отношения сечений $\pi N \rightarrow \pi\pi N$ вблизи порога в изотопических состояниях $T=1/2$ и $T=3/2$ было получено значение

$$\sigma(T=1/2)/\sigma(T=3/2) = \frac{2}{5} R^2,$$

где $R = -2,8 \pm 0,3$. Отсюда следует, что

$$x = -\sqrt{\frac{2}{5}} R = 1,8 \pm 0,2.$$

При указанных значениях параметра x и разности фаз ϕ можно оценить вклад членов, содержащих длины рассеяния частиц, в матричный элемент реакций $\pi N \rightarrow \pi\pi N$. Вычисления, проведенные с учетом членов третьего порядка по относительным импульсам конечных частиц, показали, что влияние этих членов на одномерные распределения реакции /1/ мало и не превышает /5-8%/ при $|a_0| \leq 1, a_2 = 0, T_\pi = 235$ Мэв/.

Полученная нами оценка сечения реакции $\pi^+ p \rightarrow \pi^+ \gamma p$ / $E_\gamma > 50$ Мэв/ показала, что радиационное рассеяние с испусканием жестких γ -квантов является главным неупругим каналом $\pi^+ p$ -взаимодействия при энергии 230 Мэв. На рис. 5 эта оценка сравнивается с результатами теоретических расчетов /при $E_\gamma > 50$ Мэв/ по статической модели нуклона /18/, по алгебре токов /19/, с использованием эффективного лагранжиана /20/, а также с результатом проведенного нами расчета с учетом диаграмм*, изображенных на рис. 6. На рис. 5 приведено значение сечения реакций $\pi^+ p \rightarrow \pi^+ \gamma p$ при 300 Мэв /8/, которое согласуется с предсказанием работы /18/ и противоречит результатам расчета, проведенного в работе /20/, и результатам нашего расчета. Хотя ошибка в оценке сечения $\pi^+ p \rightarrow \pi^+ \gamma p$ при 230 Мэв велика, можно сказать, что полученное нами экспериментальное значение, напротив, лучше согласуется с результатами двух последних расчетов. Поэтому представляет интерес более точное измерение сечения реакции $\pi^+ p \rightarrow \pi^+ \gamma p$.

Выводы

1. Измерено сечение реакции $\pi^+ p \rightarrow \pi^+ \pi^+ n$ при энергии $T_\pi = 230$ Мэв.
2. Исключено одно из двух наиболее вероятных значений параметра $\xi / \xi = 4,5$, определяющего вид лагранжиана взаимодействия для процессов $\pi\pi \rightarrow \pi\pi, \pi N \rightarrow \pi\pi N$ вблизи порога в теории "мягких" пионов.

* Такой же расчет для реакции $\pi^- p \rightarrow \pi^- \gamma p$ проведен в работе /21/.

3. Определены допустимые значения отношения изотопически инвариантных амплитуд реакций $\pi N \rightarrow \pi\pi N$ в состояниях P_{11} и P_{31} на пороге рождения мезона и тем самым выяснены возможности низкоэнергетической теории реакций $\pi N \rightarrow \pi\pi N$ /Грибов, Ансельм, Анисович/ в определении длин пион-пионного рассеяния.

4. Оценены сечения реакций $\pi^+ p \rightarrow \pi^+ \pi^0 p$ и $\pi^+ p \rightarrow \pi^+ \gamma p$ / $E_\gamma > 50$ Мэв/ при энергии $T_\pi = 230$ Мэв. Показано, что главным неупругим каналом при этой энергии является радиационное рассеяние с испусканием жестких γ -квантов.

Литература

1. Ю.А. Батусов, С.А. Бунятов, В.М. Сидоров, В.А. Ярба. ЖЭТФ, 39, 1850 /1960/; ЖЭТФ, 43, 2015 /1962/; ЖЭТФ, 45, 913 /1963/; Препринт ОИЯИ, Р-1823, Дубна, 1964; Препринт ОИЯИ, Р-1838, Дубна, 1964.
2. T.Deahl et al. Phys.Rev., 124, 198 (1961).
3. W.Perkins et al., Phys.Rev., 118, 1364 (1968).
4. Т.Д. Блохинцева и др. ЖЭТФ, 42, 913 /1962/.
5. Н.М. Агабабян и др. Сообщение ОИЯИ, 10-5891, Дубна, 1971.
6. V.Barnes et al. CERN Report 63-27 (unpublished).
7. J.Kirz, J.Schwartz, R.Tripp. Phys.Rev., 126, 763 (1962).
8. C.Poirier et al. Phys.Rev., 143, 1092 (1966).
9. M.Bowler and R.Cashmor. Nucl.Phys., B17, 331 (1970).
10. J.Detoef et al. Phys.Rev.Letters, 16, 860 (1966).
11. M.Olsson and Leaf Turner. Phys.Rev.Letters, 20, 1127 (1968); Phys.Rev., 181, 2141 (1969).
12. E.Lomon. LASL Report. LA-4535-MS, pp 45 and 46 (Oct. 1970).
13. S.Weinberg. Phys.Rev.Letters, 17, 616 (1966).
14. А.А. Ансельм, В.Н. Грибов. ЖЭТФ, 37, 501 /1959/; В.В. Анисович, А.А. Ансельм, В.Н. Грибов. ЖЭТФ, 42, 2244 /1962/; В.В. Анисович, А.А. Ансельм. УФН, 88, 287 /1966/.
15. В.Н. Грибов. ЖЭТФ, 33, 1431 /1957/.
16. H.Nielsen, G.Oades. Препринт Аргусского университета, 1972.
17. M.Olsson and G.Yodh. Phys.Rev., 145, 1309 (1966).
18. P.Carruthers. Phys.Rev., 134, B638 (1964).
19. S.C.Bhargava. Nuovo Cimento, 58, 815 (1968).
20. R.Baier et al., Nucl.Phys., B27, 589 (1971).
21. В.А. Мещеряков, Л.Л. Неменов и др. ЯФ, 2, 124 /1965/; Ф.Г. Ткебучава. Препринт ОИЯИ, Р2-3931, Дубна, 1968.

Рукопись поступила в издательский отдел
22 января 1973 года.

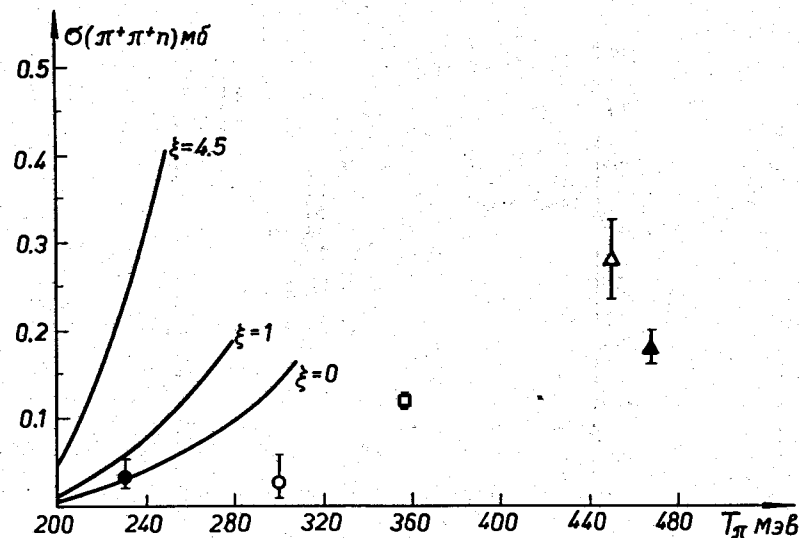


Рис. 1. Полные сечения реакции $\pi^+ p \rightarrow \pi^+ \pi^+ n$. Теоретические кривые получены по формулам работы /15/ с учетом арифметической поправки /множителя $\sqrt{2}$ /, указанной Ломоном /16/. ● - настоящая работа, ○ - работа /6/, □ - работа /7/, ▲ - работа /9/.

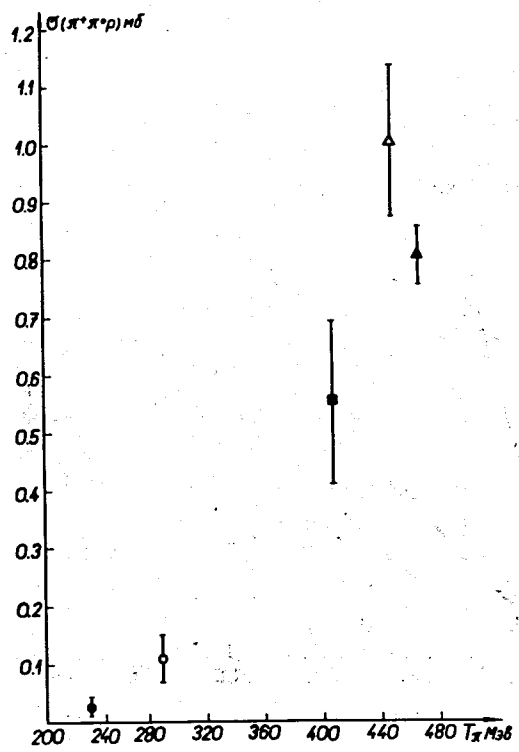


Рис. 2. Полные сечения реакции $\pi^+ p \rightarrow \pi^+ \pi^0 p$. ● - настоящая работа, ○ - работа [6], ■ - работа [10], Δ - работа [8], ▲ - работа [9].

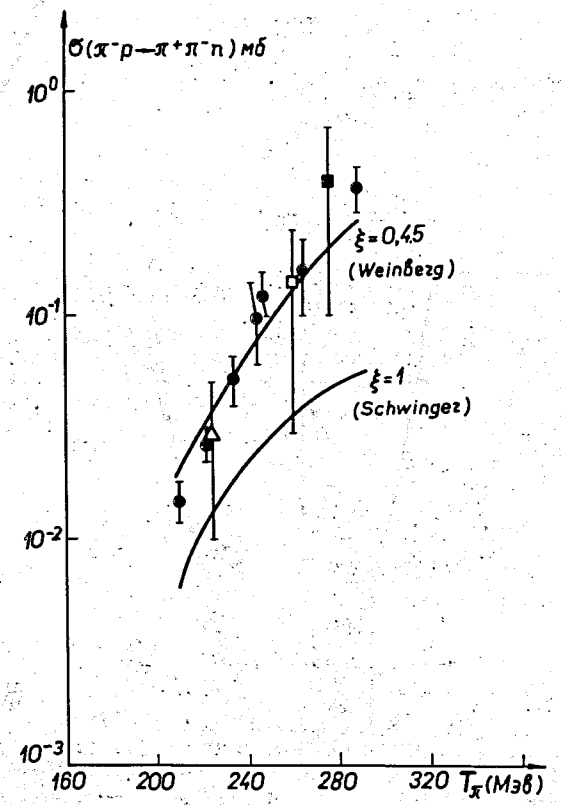


Рис. 3. Полные сечения реакции $\pi^- p \rightarrow \pi^+ \pi^- n$. Теоретические кривые взяты из работы [11] с учетом арифметической поправки /множителя $\sqrt{2}$ /, указанной Ломоном [12]. ● - работа [1], Δ - работа [2], □ - работа [3], ■ - работа [4].

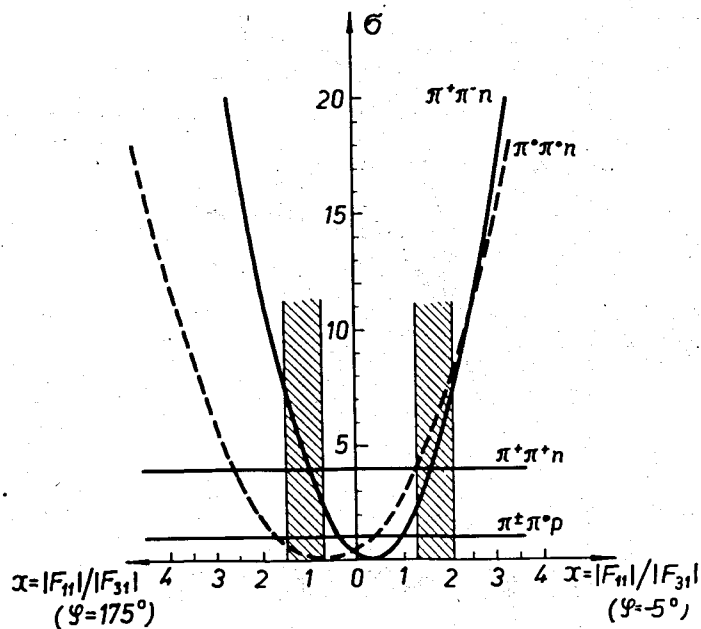


Рис. 4. Зависимость сечений реакций $\pi N \rightarrow \pi \pi N$ от параметра x . За единицу принято сечение реакций $\pi^{\pm} p \rightarrow \pi^{\pm} \pi^0 p$. Правая часть графика соответствует разности фаз $\phi = -5^{\circ}$, левая часть - $\phi = 175^{\circ}$ /см. текст/.

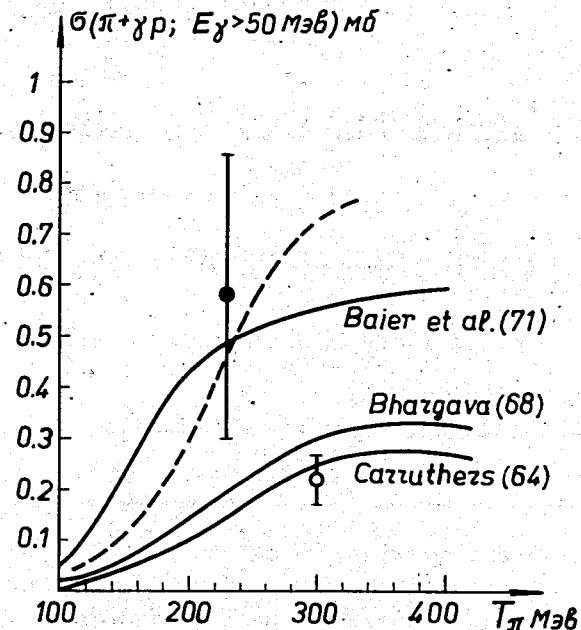


Рис. 5. Сечения реакции $\pi^+ p \rightarrow \pi^+ \gamma p$ / $E_{\gamma} > 50$ Мэв/. Кривыми показаны результаты расчетов в работах^{18-20/}, пунктиром - результат расчета с учетом диаграмм, изображенных на рис. 6. ● - настоящая работа, ○ - работа^{16/}.

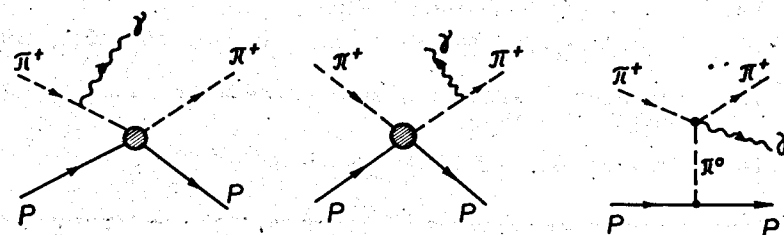


Рис. 6. Учтенные диаграммы при вычислении сечения реакции $\pi^+ p \rightarrow \pi^+ \gamma p$ /см. рис. 5, пунктир/.