

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



СЗ46.46
Б-821

28/x-74
P1 - 8164

4255/2-74

К.Г.Боресков, В.В.Глаголев, В.Н.Емельяненко,
Р.М.Лебедев, Л.А.Пономарев, И.Паточка, И.С.Саитов

ОПИСАНИЕ РЕАКЦИИ $\pi^- p \rightarrow p \pi^+ \pi^- \pi^-$
В МОДЕЛИ РЕДЖЕЗОВАННОГО
ОДНОПИОННОГО ОБМЕНА ПРИ 5 И 16 ГЭВ/С

1974

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

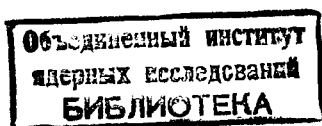
К.Г.Боресков,¹ В.В.Глаголев, В.Н.Емельяненко,
Р.М.Лебедев, Л.А.Пономарев,¹ И.Паточка,² И.С.Саитов

ОПИСАНИЕ РЕАКЦИИ $\pi^- p \rightarrow p \pi^+ \pi^- \pi^-$
В МОДЕЛИ РЕДЖЕЗОВАННОГО
ОДНОПИОННОГО ОБМЕНА ПРИ 5 И 16 ГЭВ/С

Направлено на IV Международный симпозиум по физике
высрких энергий и элементарных частиц, Варна, 1974

¹ Институт теоретической и экспериментальной
физики, Москва.

² Университет в Кошице (ЧССР).



S u m m a r y

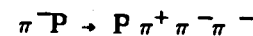
The $M_{\pi^+\pi^-}$, $M_{\pi^-\pi^-}$, $M_{P\pi^+}$, $M_{P\pi^-}$, $M_{\pi^+\pi^-\pi^-}$ -distributions for the reaction $\pi^-P \rightarrow P\pi^+\pi^-\pi^-$, obtained in experiments at 5 and 16 GeV/c, at the t -distributions for the same reaction at 5 GeV/c are compared to the predictions of the OPER model with the following form-factor

$$F_2 = \exp\left\{[R_2^2 + a_\pi' \ln\left(\frac{s}{s_0} \frac{\kappa_1^2}{s_1} \frac{\kappa_2^2}{s_2}\right)](t-\mu^2)\right\}$$

The corresponding distributions were calculated by the OPER model at fixed parameters whose values were determined from the analysis of double-pion production for the reaction $PP \rightarrow PP \pi^+\pi^-$. Using the same parameters, we have calculated the dependence of the cross section of the given reaction on the momentum of the incident particle in the region between 2 and 205 GeV. The proposed model satisfactorily describes, using the same parameters, the characteristics of the reaction $\pi^-P \rightarrow P\pi^+\pi^-\pi^-$ in a wide range of energies.

1. Введение

Реакция



/1/

относится к числу наиболее изученных. Она была одним из первых адронных процессов, к описанию которых стали применяться количественные модели и, в первую очередь, модель однопионного обмена (ОРЕ).

В работе /1/ показано, что ОРЕ-модель хорошо воспроизводит некоторые распределения, в том числе по массам пар рождающихся частиц. Однако этот вариант модели плохо описывает полное сечение реакции /1/ и его ход с энергией.

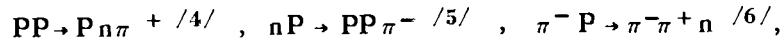
Как дальнейший шаг в развитии ОРЕ в работе /2/ было предложено ввести реджезацию обмениваемого π -мезона. Этот вариант ОРЕ-модели позволил лучше описать квазитрехчастичные /двухреджеонные/ области реакции /1/. Однако область применения модели /2/ ограничивалась большими значениями масс нерезонансных комбинаций частиц, т.е. требовала достаточно больших энергий.

Другой вариант модели реджезованного однопионного обмена был предложен в работе /3/ для описания реакции /1/ при сравнительно низкой энергии /4,5 ГэВ/. Авторам /3/ удалось получить правильную величину сечения этой реакции.

Можно считать, что варианты /2/ и /3/ дополняют друг друга в разных областях энергии. Различные варианты ОРЕ-модели достаточно хорошо применимы либо при фиксированной энергии, либо в ограниченных областях фазового объема.

2. Формулировка модели

В работах /4-9/ предложена OPER-модель, пригодная для описания различных процессов с образованием π -мезонов в πN и NN -столкновениях в широкой области энергий. Эта модель позволила описать качественно и количественно процессы



дать анализ множественному рождению пионов в $(\pi\pi)$ -столкновениях и качественную картину инклюзивных спектров в πN - и NN -столкновениях /7,8/. Были вычислены также отдельные распределения и энергетический ход сечений процессов рождения двух пионов в πN - и NN -столкновениях /9/.

В настоящей работе с помощью OPER-модели /варианта, несколько отличающегося от /9/ / описываются основные характеристики реакции /1/, наблюдавшейся в экспериментах /10/ и /11/ при 5 и 16 ГэВ/с соответственно. Выбраны достаточно далекие значения энергии, чтобы проверить способность предлагаемой модели описать качественно и количественно основные черты реакции /1/ в широком диапазоне энергий с одним и тем же набором фиксированных параметров, определявшихся при описании реакции



Предлагаемый нами анализ реакции /1/ частично пересекается с результатами анализа, проведенного в работе /3/ при близкой энергии /4,5 ГэВ/с/.

Отметим также, что при сравнении экспериментальных данных, полученных в работе /10/, с расчетами по OPER-модели, экспериментальные распределения перенормировывались на сечение, соответствующее значению гладкой кривой, фитированной к множеству экспериментальных точек в работе /14/.

Однопионному обмену в реакции /1/ отвечают две диаграммы /рис. 1/*/. Соответствующие им матричные элементы содержат двухчастичные амплитуды $\pi\pi$ и πp -рассеяния вне массовой поверхности обменяемого π -мезона. Сход с массовой поверхности этих амплитуд описывается феноменологическим формфактором, соответствующим обмену π -полусом Редже. В данной работе пренебрегается интерференцией различных графиков. Оценки показывают, что вклад интерференции в полное сечение реакции /1/ не превышает нескольких процентов. При этом условии сечение определяется суммой квадратов диаграмм 1а и 1б.

Введем обозначения: p_1 и p_2 - импульсы протона до и после соударения; q_1, q_2, q_3, q_4 - импульсы налетающего, двух рожденных π^- и одного π^+ -мезонов

$$s = (p_1 + q_1)^2, \quad s_1 = (q_2 + q_3)^2, \quad s_2 = (q_4 + p_2)^2, \quad s_3 = (q_3 + q_4)^2$$

$$t_2 = (p_1 - p_2)^2, \quad t_1 = (q_1 - q_2)^2, \quad t = (q_1 - q_2 - q_3)^2 = (p_1 - p_2 - q_1)^2$$

Тогда матричный элемент для графика 1а имеет вид:

$$M_a = \frac{1}{t - \mu^2} F_2(t, s_1, s_2, \dots) T_{\pi\pi} (s_1, t_1, t) T_{\pi p} (s_2, t_2, t) /3/,$$

где $\frac{1}{t - \mu^2}$ - пропагатор π -мезона, пропорциональный в области малых $|t|$ сигнатурному множителю; F_2 - формфактор, описывающий сход амплитуд $T_{\pi\pi}$ и $T_{\pi p}$ с массовой поверхности; $T_{\pi\pi}$ и $T_{\pi p}$ - амплитуды $\pi\pi$ - и πp -рассеяния вне массовой поверхности. F_2 в OPER-модели имеет вид:

$$F_2 = \exp \left\{ \left[R_2^2 + a'_\pi \ln \left(\frac{s}{s_0} \frac{\kappa_1^2}{s_1} \frac{\kappa_2^2}{s_2} \right) \right] (t - \mu^2) \right\}, \quad /4/$$

где $s_0 = 1 \text{ ГэВ}^2$, a'_π - наклон π -мезонной траектории.

*Две другие получаются перестановкой двух тождественных π^- -мезонов.

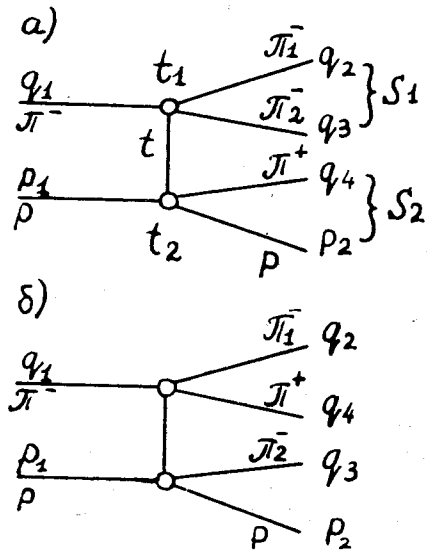


Рис. 1

Пусть $q_{1\perp}^2$ - квадраты поперечных составляющих импульсов π -мезонов в общей с.ц.и., а Z - косинус угла рассеяния π -мезона в системе покоя двух рождающихся π^- -мезонов, тогда

$$M = \begin{cases} \kappa_1^2 = q_{3\perp}^2 + \mu^2 - c(t - \mu^2), & \text{если } Z > 0, \\ = q_{2\perp}^2 + \mu^2 - c(t - \mu^2), & \\ \kappa_2^2 = q_{4\perp}^2 + \mu^2 - c(t - \mu^2). & \text{если } Z < 0. \end{cases}$$

Амплитуды $T_{\pi^-\pi^-}(s_1, t_1, t)$ и $T_{\pi^+\rho}(s_2, t_2, t)$ содержат дополнительную зависимость от t вклада вакуумных полюсов $T_{\pi\pi}^P$ и $T_{\pi\rho}^P$ в виде:

$$T_{\pi^-\pi^-}^P(s_1, t_1, t) = \exp[R_p^2(t - \mu^2)] T_{\pi^-\pi^-}^P(s_1, t_1, \mu^2) \quad /4/$$

$$T_{\pi^+\rho}^P(s_2, t_2, t) = \exp[R_p^2(t - \mu^2)] T_{\pi^+\rho}^P(s_2, t_2, \mu^2).$$

Кроме того, при записи P -волновой амплитуды $\pi\pi$ -рассеяния вне массовой поверхности учитывалась также зависимость от t :

$$T_{\pi\pi}^{\ell=1}(\tilde{s}, \tilde{t}, t) = T_{\pi\pi}^{\ell=1}(\tilde{s}, \tilde{t}, \mu^2) \frac{Q(\tilde{s}, \tilde{t}, t)}{Q(\tilde{s}, \tilde{t}, \mu^2)} \frac{(1 + C_\rho)}{(1 + C_\rho \frac{Q(\tilde{s}, \tilde{t}, t)}{Q(\tilde{s}, \tilde{t}, \mu^2)})}, \quad /5/$$

где $Q(x, y, z)$ - модуль трехмерного импульса π -мезона в системе покоя двух пионов. Свободные параметры модели определялись при описании реакции /2/ и в нашем случае равны:

$$R_p^2 = 0,8 \text{ ГэВ}^{-2}, R_p^2 = 1,3 \text{ ГэВ}^{-2}, C = 0,08 \text{ при } a_{\pi\rho}^2 = 0,7 \text{ ГэВ}^{-2}.$$

Следует заметить, что параметры сильно коррелированы и поэтому выбор определенного набора неоднозначен.

При описании реакции /1/ в нашем случае C_ρ - единственный свободный параметр, который был выбран равным $0,7 \text{ ГэВ}^{-2}$ из условий лучшего описания данных при импульсе $5 \text{ ГэВ}/c$. Это значение сохранялось во всех расчетах.

При вычислениях амплитуда $\pi\pi$ -рассеяния на массовой поверхности табулировалась в соответствии с работой /6/. Для записи амплитуды πN -рассеяния в области масс $M_{\pi N} < 2 \text{ ГэВ}$ использовался фазовый анализ /12/, а в области больших масс использовалась полюсная редже-параметризация /13/. Все расчеты проводились на ЭВМ БЭСМ-6 и CDC-6200 по специальной программе с применением для генерации событий метода Монте-Карло.

Результаты расчетов выводились на печать в виде таблиц и распределений в единицах абсолютных сечений.

Точность вычисления распределений составляла около 10%.

2. Зависимость сечения реакции /1/ от энергии

Наиболее общей характеристикой реакции /1/, которая должна описываться моделью, является энергетический ход сечений этой реакции. В работах /14,15/ приводится экспериментальный ход сечения реакции /1/ в интервале $1 \div 27$ ГэВ/с /рис. 2/. При этом отмечено

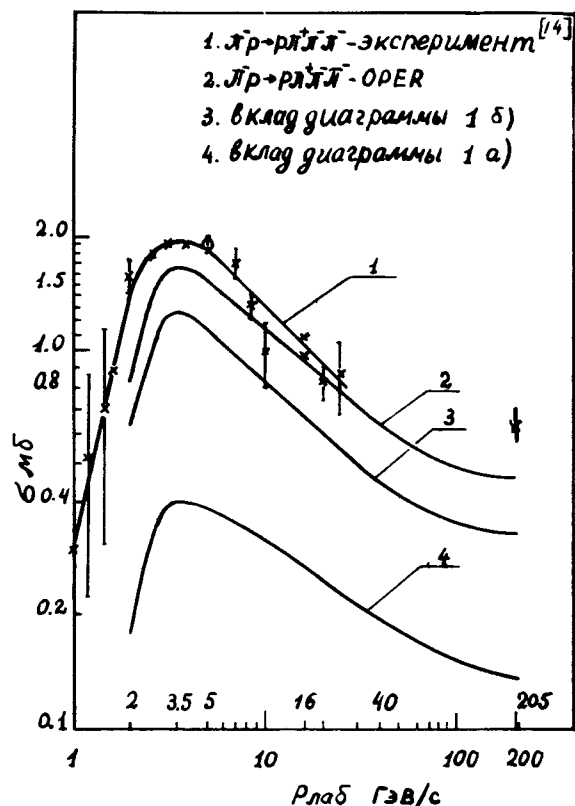


Рис. 2. Зависимость сечения реакции /1/ от импульса исходной частицы.

но /14/, что в области больших энергий /5 ГэВ/с/ падение сечения этой реакции описывается эмпирической формулой $\sigma = C \cdot P^{-\nu}$, где $\nu = 0,5 \pm 0,2$. По данным работы /16/, где было измерено сечение реакции /1/ при $P = 205$ ГэВ/с /рис. 2/, видно, что приведенная формула приближенно описывает ход сечения реакции /1/ с энергией в ограниченной области, не далее 40 ГэВ/с. На том же рисунке показаны кривые, рассчитанные с помощью OPER-модели, предсказывающей энергетический ход сечения реакции /1/ в области высоких энергий, отличный от того, который дается упомянутой формулой. Видно, что OPER-модель вполне удовлетворительно описывает ход сечения реакции /1/ во всем диапазоне энергий от 2 до 205 ГэВ. Систематическое отклонение расчетной кривой от экспериментальной, достигающее в максимуме кривых 1 и 2 примерно 15%, можно объяснить тем, что в реакцию /1/ дают вклад процессы, на описание которых данная модель не претендует /например, рождение A_2 -резонанса/.

Скорость убывания сечений в области больших энергий обусловлена тем, что здесь значительный вклад дают области фазового объема, соответствующие рождению резонансов на вакуумном полюсе. Вклад вакуумных полюсов учитывался при параметризации $\pi\pi$ и πP -расщепления в области больших масс.

4. Описание распределений эффективных масс для реакции /1/ с помощью OPER-модели

Распределения эффективных масс $\pi^+ \pi^-$, $\pi^- \pi^-$, $P \pi^+$, $P \pi^-$, $\pi^+ \pi^- \pi^-$ комбинаций, полученных в эксперименте /10/, при 5 ГэВ/с и в эксперименте /11/ при 16 ГэВ/с сравниваются на рис. 3-9 с теоретическими распределениями, предсказываемыми OPER-моделью. В случае эксперимента при 5 ГэВ/с все теоретические распределения нанесены с учетом рождения A_2 -мезона /140 мкб/.

Вклад от распада A_2 -мезона вычислялся для состояния 2^+ с шириной $\Gamma = 80$ МэВ. Модель удовлетворительно описывает распределения тождественных частиц ($M_{\pi^+ \pi^-}$) при 16 ГэВ/с /рис. 3/. При 5 ГэВ/с /штрихпунктирная

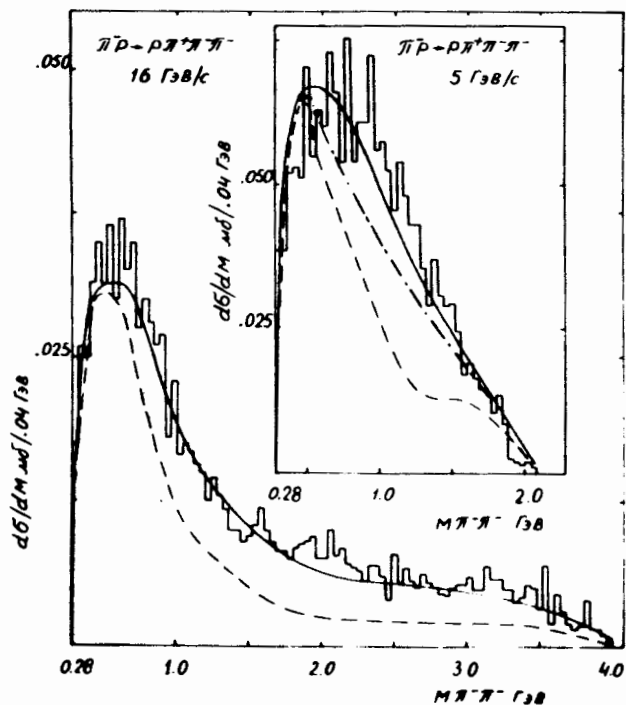


Рис. 3. Распределения $M_{\pi^+\pi^-}$. Пунктирная линия показывает вклад диаграмм 1б, сплошная - /верхний рисунок/ - предсказание OPER - модели с учетом вклада A_2 -мезона.

линия/ модель дает систематически меньшие сечения в области масс $\pi^+\pi^-$ -пар от 0,6 до 1,5 ГэВ.

Если учесть вклад в это распределение от A_2 -мезона /сплошная линия/, то согласие заметно улучшается.

Хорошее согласие предсказаний модели с экспериментом наблюдается для распределений $M_{\pi^+\pi^-}$ /рис.4/. При 5 ГэВ/с модель с учетом вклада от A_2 -мезона полностью описывает пик ρ_0 -мезона. В области эффективных масс f_0 -мезона в обоих случаях модель дает значения сечений на 10-12% ниже, чем в эксперименте.

Следует обратить внимание на то, что модель хорошо описывает область малых эффективных масс ($M_{\pi^+\pi^-} <$

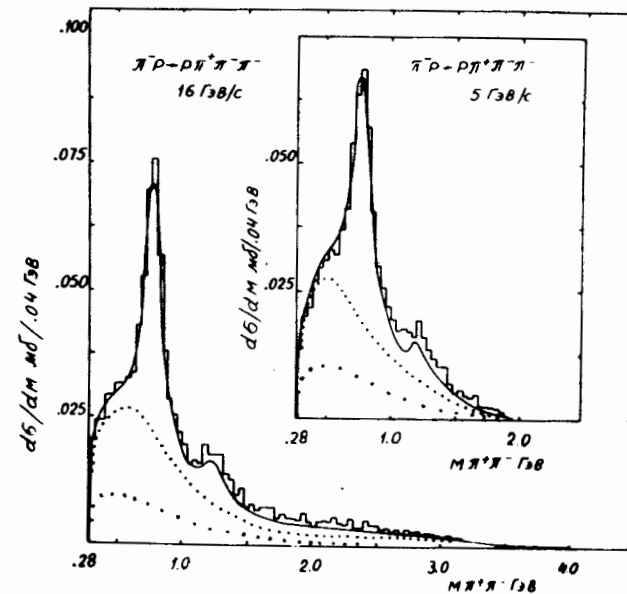


Рис. 4. Распределения $M_{\pi^+\pi^-}$. Верхняя линия, изображенная точками, показывает вклад фонов, т.е. комбинаций частиц из разных вершин диаграмм, нижняя - вклад фона из диаграммы 1а.

$< 0,6$ ГэВ, как фон, главную часть которого составляет вклад от диаграммы, в которой рождается ρ_0 -резонанс.

В распределениях масс $M_{\rho\pi^+}$ как при 16, так и при 5 ГэВ/с /при 5 ГэВ/с учтен вклад фона от распада A_2 -мезона/ рис. 5/ наблюдается превышение экспериментальных значений над предсказаниями OPER - модели в узкой области масс Δ^{++} -пика, которое составляет /по площади/ около 15%. Частично это может быть, по-видимому, объяснено тем, что модель не должна описывать части распределения $M_{\rho\pi^+}$, обусловленной распадом Δ_{1480}^{+*} и Δ_{1710}^{+*} . В работе /16/ была сделана попытка объяснить избытки в распределении эффективной массы $M_{\rho\pi^+}$ при 4,5 ГэВ/с как Декк-эффект, однако полностью исключить рождение указанных резонансов не удалось.

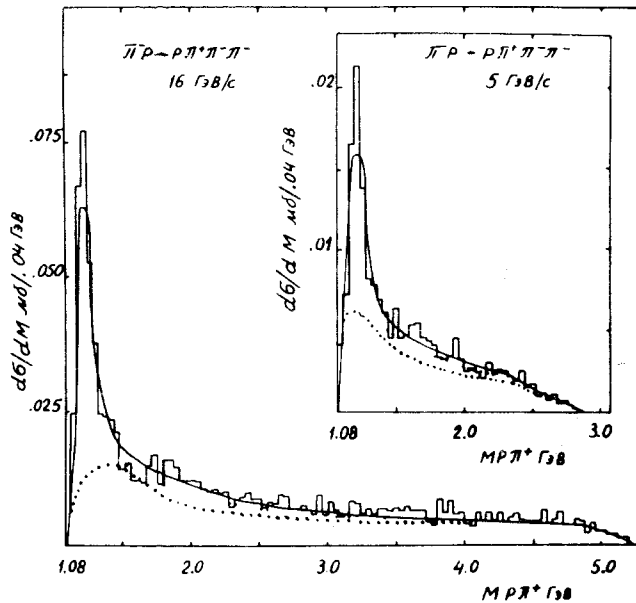


Рис. 5. Распределения $M_{p\pi^+}$. Кривая, изображенная точками, показывает вклад фона из диаграммы 1б.

Интересно отметить, что по модели фон под изобарой уменьшается с ростом энергии, поскольку вклад в сечение реакции /1/ изобарной диаграммы в интервале 2-40 $\text{ГэВ}/\text{с}$ возрастает.

В распределениях эффективных масс $M_{p\pi^-}$ /рис. 6/ модель четко воспроизводит образование трех резонансов. Экспериментальная картина менее очевидна, поскольку сечения процессов невелики, а резонансы расположены довольно близко.

Важно, что модель предсказывает резкий подъем фона в околопороговой области.

Весьма интересным фактом является то, что модель очень хорошо описывает фон в распределении масс $\pi^+\pi^-\pi^-$ в области A_1 -мезона, как Декк-эффект, не оставляя фактически места для его рождения /рис. 7/. При 5 $\text{ГэВ}/\text{с}$ в области больших значений эффективной массы $M_{3\pi^-} > 1,5 \text{ ГэВ}/$ в экспериментальном распределении наблю-

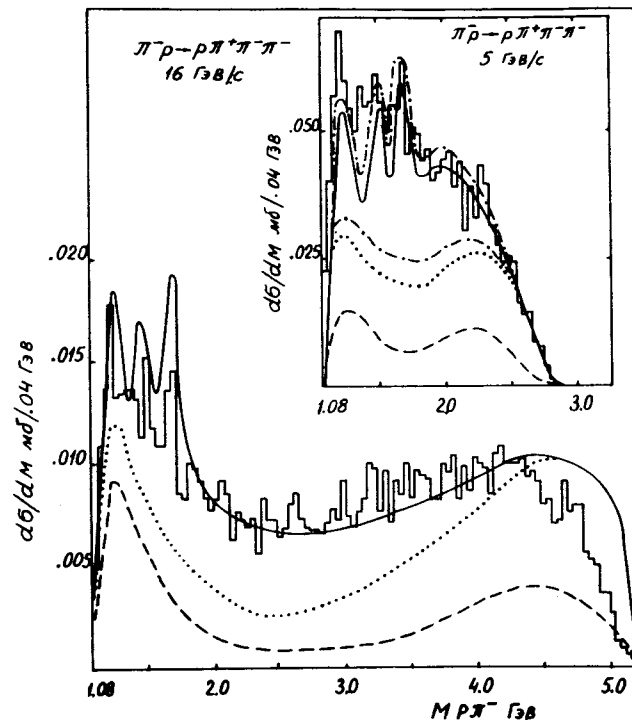


Рис. 6. Распределения $M_{p\pi^-}$ - вклад фонов, - - - - - вклад фона из диаграммы 1б. - - - - - результат расчетов по OPER-модели с учетом вклада от распада A_2 .

дается заметный избыток событий по сравнению с предсказаниями модели /этот избыток виден и при 16 $\text{ГэВ}/\text{с}$, но он "размазан" по более широкому интервалу фазового объема/. Возможно, что это является указанием на необходимость учитывать другие механизмы, дающие вклад в реакцию /1/.

5. Распределения квадрата переданного 4-импульса

На рис. 8 /а,б/ показаны распределения квадратов 4-импульса. Видно, что модель дает несколько более

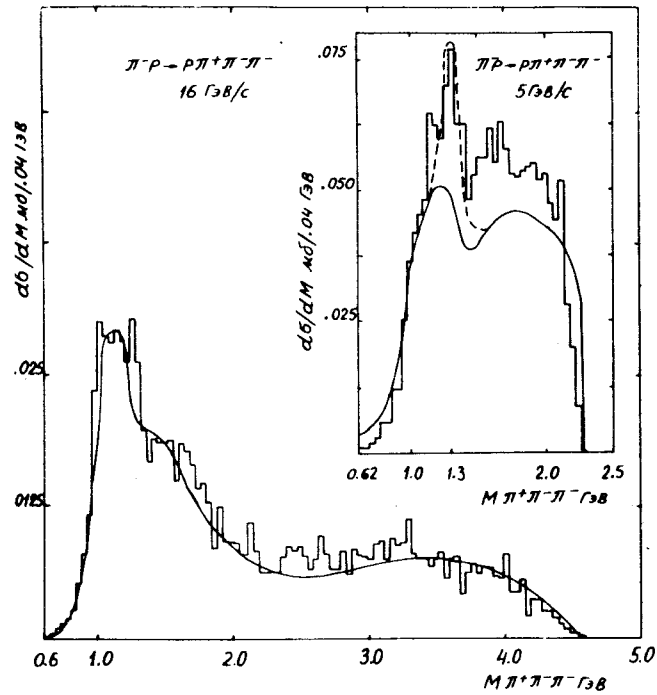


Рис. 7. Распределения $M_{\pi^+\pi^-\pi^-}$. Сплошная линия - результаты расчета по OPER-модели. Пунктирная /верхний рисунок/ - расчетный вклад от рождения A_2 -мезона.

острые распределения, чем эксперимент. Учет вклада от A_2 -мезона в данном случае не улучшает согласия эксперимента с предсказаниями модели*.

* Следует отметить, что в теоретических и экспериментальных распределениях не делалось обрезания по импульсам частиц, не наблюдаемых в эксперименте из-за малого пробега /протоны с $P < 150$ МэВ/с/. Эффект хотя и не ожидается заметным, но может давать сосредоточенный вклад в области малых передач 4-импульса.

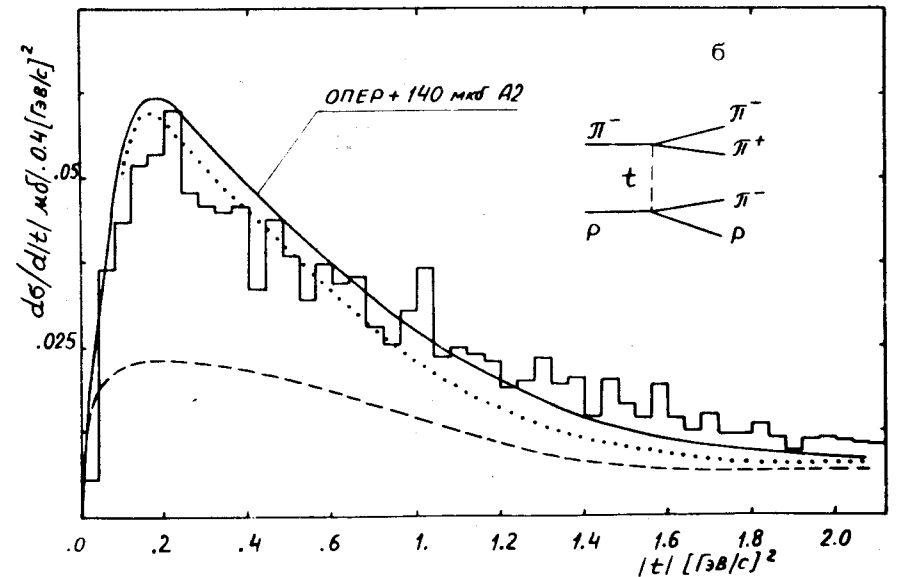
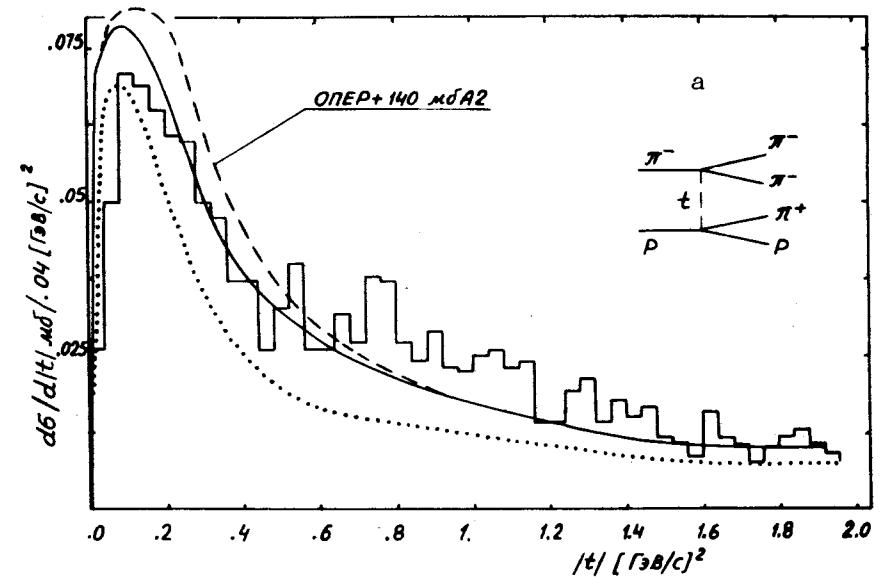


Рис. 8. а/ $|t|$ для комбинаций $\pi^-\pi^-\pi^-$. Пунктирная линия изображает вклад диаграммы 1б; б/ $|t|$ для комбинаций $\pi^+\pi^-\pi^-$. Кривая, изображенная точками, показывает вклад диаграммы 1а.

6. Распределения частиц по их продольным импульсам

Распределение частиц по продольному импульсу в общей системе центра инерции обычно наглядно иллюстрирует периферический характер взаимодействия. В случае, когда в реакции образуются только заряженные частицы, еще более наглядную картину дает распределение суммарного заряда образующихся частиц по продольному импульсу. На рис. 9 даны распределения по продольному импульсу протонов и π^{\pm} -мезонов. На этом же рисунке главными линиями нанесены соответствующие распределения, предсказываемые OPER-моделью для реакции /1/. Сечения для положительно заряженных частиц отложены вверх, а сечения для отрицательно заряженных частиц - вниз. Если для каждого интервала продольного импульса просуммировать вклады сечений, приписав им знак заряда, то получится распределение суммарного заряда по $P_{//}$ в реакции /1/. Экспериментальное распределение суммарного заряда заштриховано. Его вид свидетельствует о сильно периферическом поведении протонов в реакции /1/. Расчеты по модели в целом хорошо описывают качественную картину этих распределений. Некоторая особенность около $P_{//} = 0$ в распределении по продольному импульсу или в распределении суммарного заряда, заметная в модели, после учета вклада от A_2 -мезона выравнивается, однако не полностью.

В заключение отметим, что предлагаемая модель OPER позволяет с одними и теми же фиксированными параметрами описать: качественно и количественно поведение сечения реакции /1/ в широком диапазоне энергий /от 2 до 205 ГэВ/; качественно и количественно спектры эффективных масс при энергиях 5 и 16 ГэВ; распределения по квадрату передачи четырех-импульса, а также распределения продольных импульсов частиц, образующихся в реакции /1/. Анализ реакции /1/ с помощью модели OPER показывает, что около 15-20 процентов в этой реакции могут составлять процессы, которые нельзя описать простыми диаграммами однопионного обмена.

Авторам приятно поблагодарить К.Г.Кайдалова, С.П.Кручинина, И.Каржавину, А.В.Никитина, В.Рудь за плодотворные дискуссии.

Литература

1. G.Wolf. *Phys.Rev.*, 182, p. 1538, 1969.
2. E.L.Berger. *Phys.Rev.Lett.*, 21, p. 701, 1968.
3. Г.В.Бекешов и др. *Препринт ИТЭФ-68*, 1973.
4. К.Г.Боресков и др. *ЯФ*, 15, вып. 2, 1972, с. 361.
5. К.Г.Боресков и др. *ЯФ*, 15, вып. 3, 1972, с. 567.
6. К.Г.Боресков и др. *ЯФ*, 17, вып. 6, 1973, с. 1285.
7. К.Г.Боресков и др. *Препринт ИТЭФ-950*, 1972.
8. К.Г.Боресков и др. *ИТЭФ-92*, 1973.
9. К.Г.Боресков и др. *ИТЭФ-49*, 1973.
10. В.В.Глаголев и др. *Сообщение ОИЯИ, P1-6846*, Дубна, 1972.
11. *ABVCH-Collaboration. Nucl.Phys.*, B50, p. 157 (1972).
12. *NAL conf.-73/30-EXP. 7200.137, D.Bogert and others.*
13. В.Ю.Глебов и др. *ЯФ*, 10, 1969, с. 1065.
14. *ABVCH-Collaboration. Nuclear Physics*, B50, p. 157 (1972).
15. К.Г.Боресков и др. *ИТЭФ-92*, 1973.
16. Г.В.Бекешов и др. *ИТЭФ-835*, 1970.

Рукопись поступила в издательский отдел
1 августа 1974 года.