



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

97-45
На правах рукописи

Кондашов Андрей Александрович

**ИССЛЕДОВАНИЕ $\pi^0\pi^0$ -СИСТЕМЫ
НА СПЕКТРОМЕТРЕ ГАМС-2000**

01.04.23 — физика высоких энергий

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Протвино 1997

Работа выполнена в Институте физики высоких энергий (г. Протвино).

Научные руководители: академик Ю.Д.Прокошкин, кандидат физико-математических наук С.А.Садовский.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук А.Н.Васильев, кандидат физико-математических наук В.Д.Лаптев.

Ведущая организация – Институт теоретической и экспериментальной физики, (г.Москва).

Защита диссертации состоится “_____” 1997 г. в
_____ часов на заседании диссертационного Совета при Институте физики высоких энергий (142284, г.Протвино Московской обл.).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФВЭ.

Автореферат разослан “_____” 1997 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета

Ю.Г.Рябов

© Государственный научный центр
Российской Федерации
Институт физики высоких энергий, 1997

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы. Система двух нейтральных π -мезонов весьма привлекательна для экспериментального изучения. Ее квантовые числа ограничены рядом $J^{PC} = 0^{++}, 2^{++}, 4^{++}, \dots$, что существенно облегчает проведение парциально-волнового анализа (ПВА). Большое количество событий реакции $\pi^- p \rightarrow \pi^0 \pi^0 n$, зарегистрированных в описываемом эксперименте, позволяет детально изучить разнообразные эффекты, наблюдаемые в $\pi^0 \pi^0$ -системе.

Большой интерес вызывает $\pi^0 \pi^0$ -система в связи с поисками низшего состояния скалярного глюболя. Кандидаты на эту роль наблюдались в нескольких экспериментах, но однозначно идентифицировать глюбольное состояние пока не удалось. Исследование S -волны в $\pi^0 \pi^0$ -системе дает важную информацию, необходимую для классификации скалярных мезонов и идентификации среди них глюболя.

Представляет интерес изучение тензорных мезонов и поиски мезонов с высокими спинами, условия для наблюдения которых в $\pi^0 \pi^0$ -системе особенно благоприятны из-за отсутствия нечетных волн.

Цель работы — экспериментальное изучение $\pi^0 \pi^0$ -системы, образующейся в зарядовообменной реакции



на качественно более высоком, чем в предыдущих работах, уровне точности. Для этого выполнен детальный парциально-волновой анализ в области $\pi^0 \pi^0$ -масс до 2,5 ГэВ и в интервале значений квадрата переданного 4-импульса до 1 ($\text{ГэВ}/c$)².

Научная новизна. Высокая статистическая обеспеченность эксперимента (около 1,5 млн. $\pi^0 \pi^0$ -событий) позволила изучить механизм образования различных резонансов ($f_0(980)$, $f_2(1270)$, $f_4(2050)$) при малых и больших передачах импульса,

с высокой точностью измерить сечения их образования. Получено верхнее ограничение на сечение образования $f_2(1810)$ -резонанса в $\pi^0\pi^0$ -системе. Детально исследована структура S -волны в широком диапазоне масс, от порога до 2 ГэВ, ее анализ совместно с данными других экспериментов указывает на существование скалярного глюбала в области масс $1,2 \div 1,6$ ГэВ.

Практическая ценность работы. Создан комплекс программ парциально-волнового анализа систем двух псевдоскалярных мезонов, в котором реализованы все основные алгоритмы, начиная с аппроксимации многомерной эффективности регистрации и кончая восстановлением парциальных амплитуд и нахождением всех нетривиальных решений ПВА. Изучены различные способы сшивки решений ПВА в соседних массовых бинах, создана процедура, позволяющая однозначно идентифицировать все нетривиальные решения. Разработанная методика анализа данных, созданные в ходе работы программы нашли свое применение в дальнейших физических исследованиях.

Апробация работы В основу диссертации положены работы [1–5], выполненные автором в 1992–1996 гг. Работы опубликованы в виде статей в журналах "Доклады Академии Наук", "Ядерная физика", "Physical Letters" и "Zeitschrift für Physik C", препринтов ИФВЭ, Петербургского института ядерной физики и ЦЕРН, а также доложены на научных семинарах ИФВЭ и на международных конференциях HADRON'93 (Комо, Италия), ICHEP'94 (Глазго, Англия), NAN'95 (Москва).

Структура диссертации. Работа состоит из введения, шести глав и заключения, включает 43 рисунка и 4 таблицы.

Содержание работы

В первой главе дан обзор экспериментальных данных по мезонной спектроскопии, при этом особое внимание уделено состояниям, которые могут распадаться на два нейтральных пиона.

Подробно рассмотрен скалярный сектор ($I^G J^{PC} = 0^+ 0^{++}$). Особое место здесь занимает $f_o(980)$ -мезон, природа которого остается загадкой с начала 70-х годов. Он по-разному проявляется в различных процессах: часто возникает как пик в массовом спектре, иногда как плечо, а в некоторых случаях наблюдается провал в районе 1 ГэВ. В различных теоретических моделях предлагаются разные интерпретации $f_o(980)$ -мезона (кварк-антикварковое состояние, $K\bar{K}$ -молекула, четырехкварковое состояние, глюбол и т.д.), однако ни одна из этих моделей не получила окончательного подтверждения.

Значительный интерес исследователей вызывает в последнее время другой скалярный резонанс — $f_o(1500)$ -мезон. Впервые он возник при изучении сотрудничеством ГАМС $\eta\eta$ -, $\eta\eta'$ - и $4\pi^0$ -систем, образующихся в зарядовообменных реакциях

$(f_o(1590)/G$ -мезон). Затем это состояние наблюдалось в процессах центрального рождения на Омега-спектрометре и при аннигиляции антипротонов в покое в эксперименте Crystal Barrel. Необычные свойства делают $f_o(1500)$ -мезон весьма вероятным кандидатом в скалярные глюболы.

Приведены экспериментальные данные и по другим скалярным резонансам — $f_o(1300)$, $f_o(400\text{--}1200)$, $f_o(1710)$.

Ситуация в секторе скалярных мезонов в настоящее время весьма запутанная. Число известных 0^+0^{++} -состояний больше, чем предсказывается в рамках простой кварковой модели. Избыточное состояние является кандидатом в скалярные глюболы. Для его однозначной идентификации необходимо дальнейшее изучение скалярных мезонов, образующихся в различных процессах. S -волновая амплитуда $\pi\pi$ -рассеяния как нельзя лучше подходит для этой цели, поскольку, если скалярный резонанс достаточно сильно связан с $\pi\pi$ -каналом, то он должен четко проявляться в этой амплитуде.

В конце главы обсуждаются неразрешенные вопросы в секторе тензорных мезонов ($I^G J^{PC} = 0^+2^{++}$). Весьма противоречивы данные о сечении образования $f_2(1270)$ -мезона. Это сечение, измеренное на основании моды распада $\pi^0\pi^0$, в три раза меньше сечения, полученного для $\pi^+\pi^-$ -моды, и в четыре раза меньше предсказания модели однопионного обмена (OPE). Еще одна проблема связана с $f_2(1810)$ -резонансом, который наблюдался ранее в $\pi^0\pi^0$ -системе Н. Кэйсоном и др. при анализе реакции $\pi^+p \rightarrow \pi^0\pi^0\Delta^{++}$. Однако в других работах, посвященных изучению $\pi\pi$ -систем, этот резонанс не обнаружен.

Во второй главе описаны постановка эксперимента и аппаратура. Эксперимент проводился в условиях большой загрузки, за один цикл ускорителя через жидколоводородную мишень проходило до $10^7 \pi^-$ -мезонов. Система нейтрального триггера установки выделяла зарядово-обменные процессы с нейтральными конечными состояниями, среди которых были и события изучаемой реакции (1). Для регистрации γ -квантов использовался многофотонный черенковский спектрометр ГАМС-2000, состоящий из 1535 черенковских счетчиков полного поглощения. Сигналы с элементов ГАМС проходили амплитудный анализ, и измеренные амплитуды записывались на магнитную ленту.

При записи физической информации вводились отборы по суммарному энерговыделению в ГАМС (на уровне $1/3$ от энергии первичного пучка) и по радиальному моменту. Второй отбор позволил подавить регистрацию не представляющего интереса в данном эксперименте процесса $\pi^-p \rightarrow \pi^0n$, практически не затронув эффективность регистрации изучаемой реакции в области масс выше $600 \div 800$ МэВ. Расстояние между жидколоводородной мишенью и спектрометром обеспечивало оптимальную эффективность регистрации событий реакции (1) в области $\pi^0\pi^0$ -масс вплоть до 3 ГэВ.

В конце главы описана программа геометрической реконструкции, предназначенная для поиска γ -квантов в ГАМС, определения их множественности, координат и энергий. Рассмотрена процедура кинематического анализа, на основе которой

процесс (1) выделялся из других возможных каналов с четырьмя γ -квантами в конечном состоянии, подавлялись фоновые процессы и уточнялись кинематические параметры события.

В третьей главе подробно рассмотрены основные стадии парциально-волнового анализа.

Сначала проводится вычисление эффективности регистрации событий изучаемого процесса. Эффективность была определена методом Монте-Карло с использованием банка реальных фотонных ливней, с учетом характеристик пучка и геометрии установки. События Монте-Карло обрабатывались теми же программами, что и физические события. Это позволило детально учесть параметры установки, условия измерения и все этапы отбора событий, которые использовались при анализе физических данных. Эффективность регистрации параметризована в виде ряда Фурье как функция четырех существенных динамических переменных: инвариантной массы $\pi^0\pi^0$ -системы $M_{\pi\pi}$, квадрата переданного нейтрону 4-импульса t и двух углов распада в системе Готтфрида-Джексона, θ_{GJ} и ϕ_{TY} .

При ПВА учитывались S -, D - и G -волны с проекцией углового момента на ось z равную 0 и 1 (вклад других волн в изучаемой области масс пренебрежимо мал). Угловое распределение реакции (1) в системе Готтфрида-Джексона может быть записано в виде суммы двух неинтерферирующих слагаемых:

$$4\pi I(\Omega) = |h_o(\theta_{GJ}) + h_-(\theta_{GJ}) \cos \phi_{TY}|^2 + |h_+(\cos_{GJ}) \sin \phi_{TY}|^2, \quad (2)$$

где

$$h_o(\theta_{GJ}) = SP_0^0(\cos \theta_{GJ}) + \sqrt{5}D_oP_2^0(\cos \theta_{GJ}) + \sqrt{9}G_oP_4^0(\cos \theta_{GJ}), \quad (3)$$

$$h_{\pm}(\theta_{GJ}) = \sqrt{3/5}D_{\pm}P_2^1(\cos \theta_{GJ}) + \sqrt{9/10}G_{\pm}P_4^1(\cos \theta_{GJ}), \quad (4)$$

$\Omega = [\theta_{GJ}, \phi_{TY}]$, $P_l^m(\cos \theta_{GJ})$ — присоединенные функции Лежандра; S , D_o , D_{\pm} , G_o , G_{\pm} — комплексные парциальные амплитуды. Первое слагаемое в (2) описывает обмен в t -канале реакции (1) с аномальной спин-четностью, второе соответствует обмену с естественной спин-четностью.

Амплитуды парциальных волн определяются из угловых распределений неоднозначно. Показано, что в случае S - и D -волн существуют два нетривиальных решения ПВА. При добавлении трех G -волн число решений возрастает до восьми. Описан алгоритм, позволяющий восстановить все нетривиальные решения ПВА по одному решению, найденному при фитировании угловых распределений.

В конце главы описана процедура фитирования угловых распределений. Фитирование выполнялось независимо в каждом массовом бине с использованием классического метода максимума правдоподобия. В качестве параметров фита были выбраны модули амплитуд и относительные фазы парциальных волн. Функционал минимизации записывался в виде

$$F = - \sum_i \ln I(\Omega_i) + \sum_{\lambda} t_{\lambda} \varepsilon_{\lambda}. \quad (5)$$

Суммирование в первом слагаемом ведется по всем событиям, попавшим в данный массовый бин, t_λ и ε_λ — моменты углового распределения $I(\Omega)$ и эффективности, вычисленные в центре рассматриваемого бина по массе и проинтегрированные по t в изучаемом t -интервале, моменты t_λ выражены через амплитуды парциальных волн.

В четвертой главе представлены результаты, полученные при изучении реакции (1) в области $\pi^0\pi^0$ -масс до 1,9 ГэВ.

Вначале описана процедура отбора событий реакции (1). Для выделения этой реакции рассматривались события с четырьмя γ -квантами в конечном состоянии. Был введен ряд отборов, подобранных так, чтобы максимально подавить аппаратурный и физический фон без существенной потери эффективности регистрации. Окончательное выделение процесса (1) было проведено на основе кинематического анализа, всего отобрано около 1,5 млн. $\pi^0\pi^0$ -событий.

В спектре $\pi^0\pi^0$ -масс при малых передачах импульса четко виден $f_2(1270)$ -мезон, в районе 1 ГэВ наблюдается провал, связанный с проявлением $f_o(980)$ -мезона (рис. 1). Выше $f_2(1270)$ -мезона массовый спектр в районе 1,7 и 2 ГэВ обнаруживает два плеча, последнее из которых отождествляется с $f_4(2050)$ -мезоном. С переходом к большим передачам импульса $f_2(1270)$ -пик по-прежнему хорошо виден, на месте провала около 1 ГэВ возникает плечо.

Далее представлены результаты ПВА в области масс ниже 1,9 ГэВ в нескольких t -интервалах от 0 до 1 ($\text{ГэВ}/c$)². ПВА выполнен с учетом S -, D_o -, D_- и D_+ -волн. Одно из двух нетривиальных решений ПВА характеризуется нефизическими поведением D -волн: их интенсивности около порога заметно больше нуля и сравнимы с интенсивностью S -волн. В дальнейшем учитывалось только физическое решение.

При $|t| < 0,2$ ($\text{ГэВ}/c$)² в районе $f_2(1270)$ -мезона и выше для удовлетворительного описания угловых распределений необходимо учитывать также вклад G_o -волн, модуль амплитуды которой был зафиксирован в соответствии с табличными значениями параметров $f_4(2050)$ -мезона, фаза оставлена свободной.

Поведение D -волн в районе $f_2(1270)$ -мезона при малых $|t|$ (рис. 2) хорошо описывается моделью однопионного обмена с поглощением (модель Окса-Вагнера): интенсивности D_- и D_+ -волн примерно равны между собой, они на порядок меньше интенсивности D_o -волн, D_o - и D_- -волны когерентны по фазе. В D_o -волне отсутствует сигнал от $f_2(1810)$ -резонанса, который наблюдался при ПВА реакции $\pi^+p \rightarrow \pi^0\pi^0\Delta^{++}$. Сечение образования этого резонанса не превышает 1/10 от сечения $f_2(1270)$ -мезона.

Измеренные значения параметров $f_2(1270)$ -мезона хорошо согласуются с табличными. Сечения образования $f_2(1270)$ -мезона $\sigma(\pi^-p \rightarrow f_2(1270)n) \times \text{BR}(f_2(1270) \rightarrow \pi^0\pi^0)$ равны $(2,31 \pm 0,18)$ мкбн (D_o -волна), $0,167 \pm 0,013$ мкбн (D_- -волна) и $(0,134 \pm 0,010)$ мкбн (D_+ -волна). Полное сечение с учетом $\text{BR}(f_2(1270) \rightarrow \pi^0\pi^0)$ составляет

$$\sigma(\pi^-p \rightarrow f_2(1270)n) = (9,2 \pm 0,8) \text{ мкбн.} \quad (6)$$

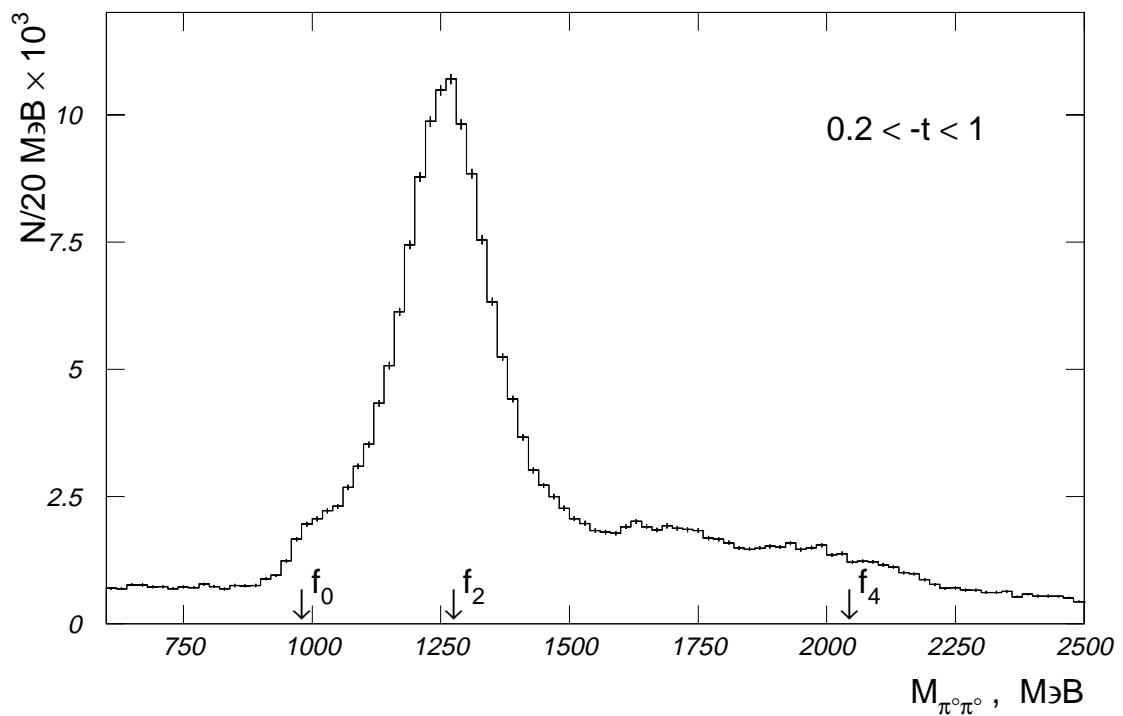
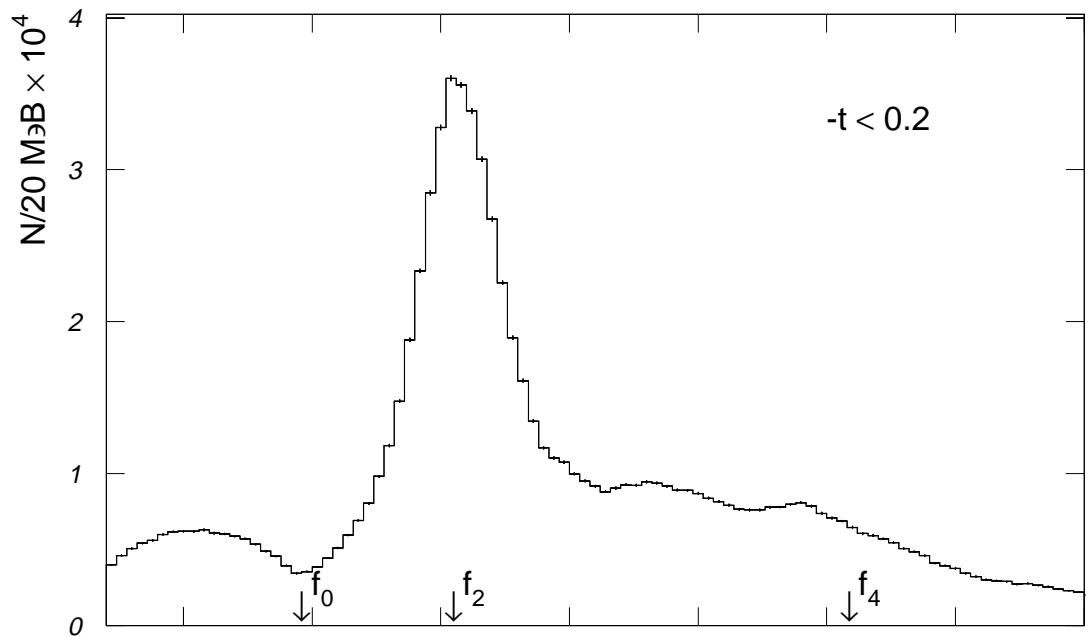


Рис. 1. Спектры масс $\pi^0\pi^0$ -системы, полученные после 3С-фильтра, при малых и больших значениях $|t|$. Стрелками показаны табличные значения масс $f_0(980)$ - $f_2(1270)$ - и $f_4(2050)$ -мезонов.

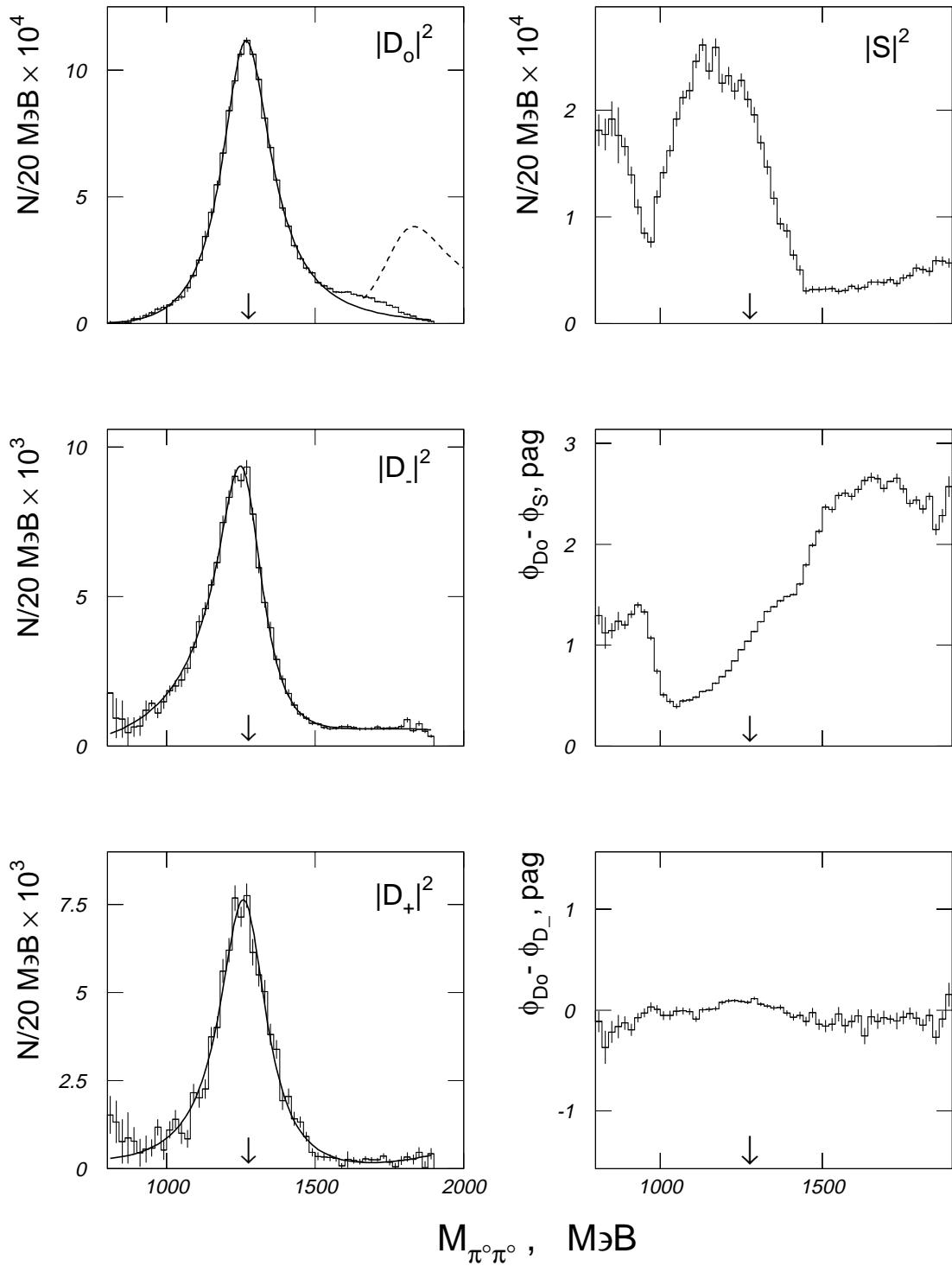


Рис. 2. Квадраты модулей и относительные фазы S - и D -амплитуд, $|t| < 0, 2$ ($\text{ГэВ}/c^2$). Сплошные кривые — результаты фита суммами брейт-вигнеровых резонансов и полиномиального фона с учетом интерференции. Пунктирная кривая — ожидаемый вклад $f_2(1810)$ -резонанса по данным Н.Кэйсона и др. (нормировано на $f_2(1270)$ -мезон). Стрелками показано табличное значение массы $f_2(1270)$ -мезона.

Изучена зависимость сечения образования $f_2(1270)$ -мезона в трех D -волнах от переданного импульса. Вклад обмена с аномальной спин-четностью в сечение образования $f_2(1270)$ -мезона падает с ростом переданного импульса, при $|t| > 0,3$ ($\text{ГэВ}/c$) 2 доминирует обмен с естественной спин-четностью. t -зависимость сечения образования $f_2(1270)$ -мезона в D_o -волне имеет характерное для ОРЭ экспоненциальное падение

$$\frac{d\sigma}{dt} \sim \frac{te^{bt}}{(t - m_\pi^2)^2} \quad (7)$$

с параметром наклона $b = (8,2 \pm 0,4)$ ($\text{ГэВ}/c$) $^{-2}$.

Пятая глава посвящена исследованию S -волны в районе 1 ГэВ при разных передачах импульса. В спектре $\pi^0\pi^0$ -масс при малых $|t|$ наблюдается провал около 1 ГэВ, с переходом к большим $|t|$ на месте провала возникает плечо. В массовом спектре, полученном по данным сеанса 1982 г., где аппаратурное разрешение значительно лучше, при больших передачах импульса виден четкий пик с массой (995 ± 10) МэВ и шириной (50 ± 10) МэВ (рис. 3).

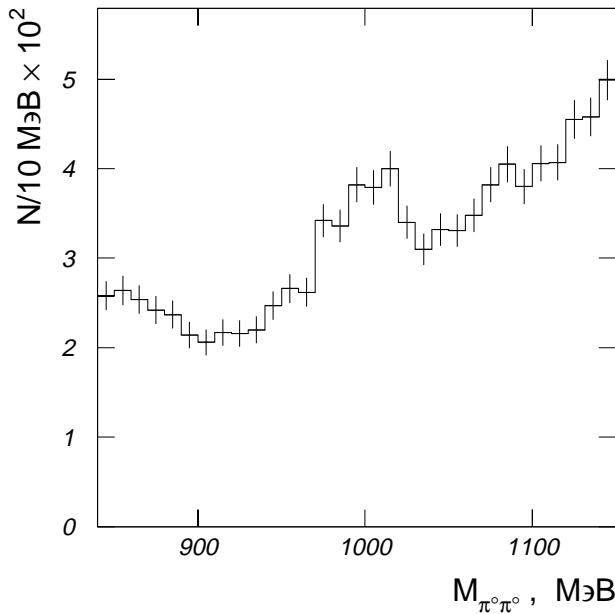


Рис. 3. Спектр масс $\pi^0\pi^0$ -системы, полученный после ЗС-фита, при $|t| > 0,2$ ($\text{ГэВ}/c$) 2 , сеанс 1982 г.

Амплитуда S -волны в различных t -интервалах была получена на основе ПВА с учетом S -, D_o -, D_- и D_+ -волн. Для определения параметров и сечения образования наблюдаемого состояния квадраты модулей S -амплитуд для физического решения в каждом t -интервале фитировались когерентными суммами релятивистских брейт-вигнеровых резонансов и полиномиального фона (рис. 4).

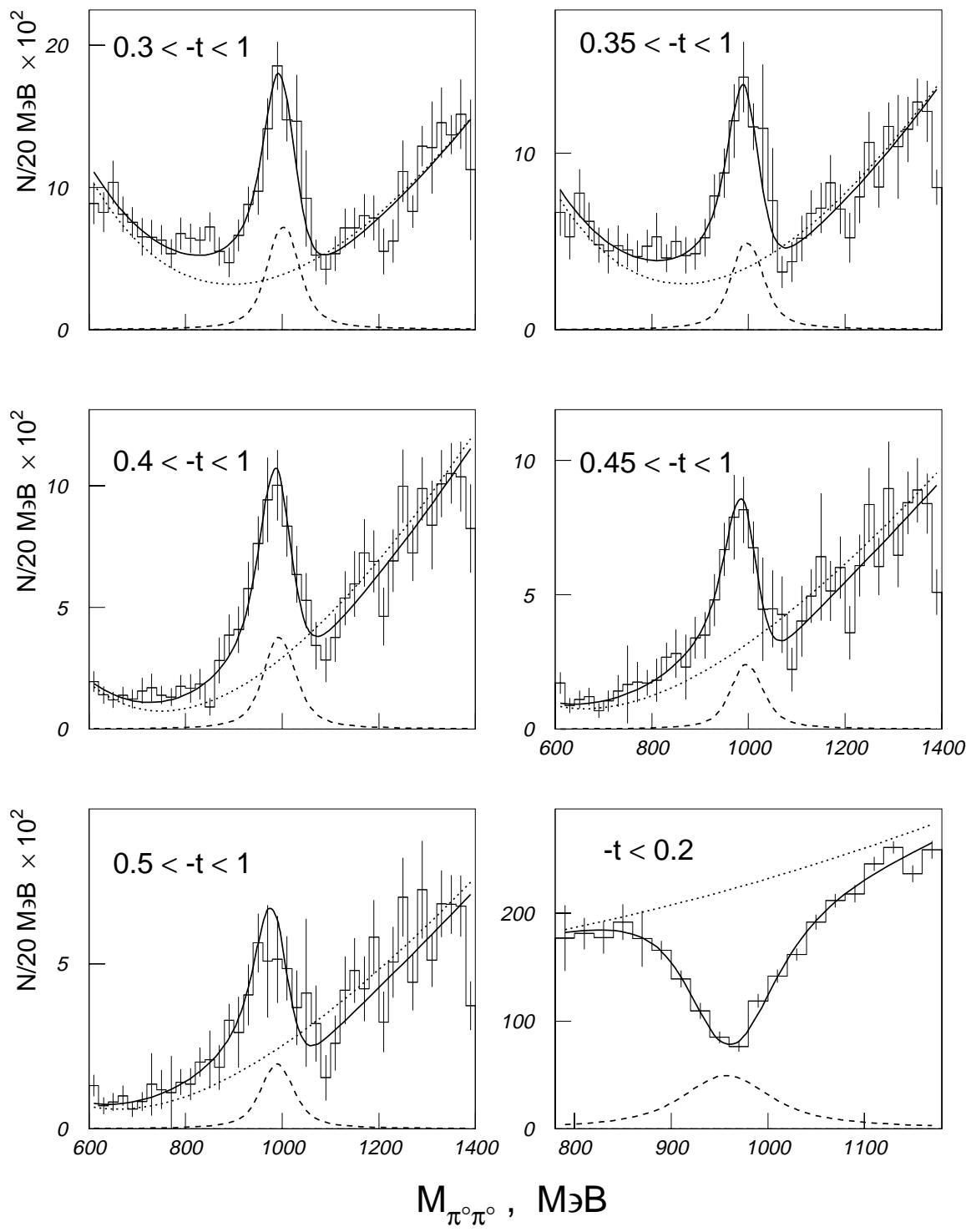


Рис. 4. Квадраты модулей S -амплитуд для физического решения в разных t -интервалах. Сплошные кривые — фит когерентными суммами брейт-вигнеровых функций и полиномиального фона; штриховые кривые — брейт-вигнеровы функции; пунктирные кривые — фон.

При этом делалась свертка с функцией, описывающей разрешение спектрометра по массе. Масса и ширина пика, наблюдаемого в S -волне при больших $|t|$, равны

$$\begin{aligned} M &= (997 \pm 5) \text{ МэВ}, \\ \Gamma &= (48 \pm 10) \text{ МэВ}, \end{aligned} \quad (8)$$

что согласуется с табличными значениями параметров $f_o(980)$ -мезона.

При малых передачах импульса, $|t| < 0,2 (\text{ГэВ}/c)^2$, масса и ширина $f_o(980)$ -мезона равны (960 ± 10) МэВ и (95 ± 20) МэВ, соответственно, а сечение образования составляет $\sigma(\pi^- p \rightarrow f_o(980)n) \times \text{BR}(f_o(980) \rightarrow \pi^0\pi^0) = (64 \pm 8)$ нбн, что соответствует $\sigma \times \text{BR} = (75 \pm 10)$ нбн для всего t -интервала с учетом t -зависимости, предсказываемой моделью OPE. Сечение образования, измеренное как при малых, так и при больших $|t|$, хорошо описывается моделью OPE:

$$\sigma(\pi^- p \rightarrow f_o(980)n) = C \int_{t_{min}}^{t_{max}} \frac{te^{-bt}}{(t + m_\pi^2)^2} dt \quad (9)$$

с параметром наклона $b = 4,7 (\text{ГэВ}/c)^{-2}$, t_{min} и t_{max} — границы t -интервала.

Во второй части главы представлены результаты K -матричного анализа S -волны, полученной в настоящей работе, совместно с другими данными, являющимися основными источниками информации о $I^G J^{PC} = 0^+ 0^{++}$ состояниях в районе 1 ГэВ (фаза и параметр неупругости S -волновой $\pi\pi$ -амплитуды с нулевым изоспином по данным эксперимента CERN-Munich; спектры мезонов, рождающихся при аннигиляции антiproтонов в покое, по данным Crystal Barrel).

При анализе учитывались два канала, $\pi\pi$ и $K\bar{K}$. Стандартные формулы K -матричного представления для процесса $\pi\pi \rightarrow \pi\pi$ были модифицированы с учетом того, что один из пионов в начальном состоянии является виртуальным:

$$\hat{A} = \hat{K}(t)(I - i\hat{\rho}\hat{K})^{-1}, \quad (10)$$

где \hat{A} и \hat{K} — матрицы 2×2 , описывающие переходы в каналах $\pi\pi$ и $K\bar{K}$, $\hat{\rho}$ — диагональная матрица, описывающая фазовый объем. Элементы K -матрицы были параметризованы в двухполюсной форме. Амплитуда реакции (1) выражается через амплитуду двухпионного рассеяния, модифицированную с учетом пропагатора пиона и пион-нуклонного формфактора. При фитировании квадрата модуля S -амплитуды делалась свертка с функцией, описывающей разрешение спектрометра по массе.

Проведенный анализ выявил два физических состояния вблизи 1 ГэВ, которым соответствуют полюса амплитуды рассеяния, расположенные на II и III листах комплексной плоскости. Полюса первого состояния находятся вблизи $K\bar{K}$ -порога: $M - i\Gamma/2 = (987 \pm 6) - i(40 \pm 6)$ МэВ — на II листе и $(973 \pm 10) - i(74 \pm 10)$ МэВ — на III листе, это состояние идентифицируется с $f_o(980)$ -мезоном. Полюса второго резонанса расположены далеко от физической области, ближайший полюс находится на III листе: $(1165 \pm 50) - i(460 \pm 40)$ МэВ.

Показано, что формирование узкого резонанса $f_o(980)$ вблизи $K\bar{K}$ -порога обусловлено смешиванием двух голых состояний, которым соответствуют полюса K -матрицы. При отсутствии смешивания полюс, соответствующий $f_o(980)$ -мезону, имеет нормальную адронную ширину $\Gamma = 240$ МэВ, он заметно удален от $K\bar{K}$ -порога.

Оба физических состояния весьма слабо связаны с $K\bar{K}$ -каналом. При отключении этого канала положение полюсов меняется лишь незначительно. Отношение квадратов констант связи обоих состояний с $K\bar{K}$ - и $\pi\pi$ -каналами составляет около 1/6. Это обстоятельство, а также существование в $f_o(980)$ -резонансе жесткой компоненты (узкий пик при больших $|t|$) делают маловероятной интерпретацию этого мезона как $K\bar{K}$ -молекулы.

В шестой главе представлены результаты ПВА в области масс до 2,5 ГэВ. Анализ выполнен с учетом S -, D_o -, D_- , D_{+-} , G_o -, G_- и G_+ -волн. Найдены все восемь нетривиальных решений ПВА.

Для подавления “перекачки” событий между различными волнами при ПВА был введен ряд естественных физических требований. Модули G -амплитуд ниже 1,5 ГэВ были зафиксированы в форме плавно спадающих кривых. При $|t| < 0,2$ (ГэВ/с)² использовалось требование $|G_+| = |G_-|$ (в соответствии с моделью Окса-Вагнера), позволившее устраниТЬ “перекачку” событий из G_+ -волны в D_+ -волну в районе $f_4(2050)$ -мезона. При этом амплитуда доминирующей G_o -волны практически не изменилась.

Подробно описана процедура сшивки решений ПВА в соседних массовых бинах. Для сшивки используются действительные и мнимые части корней полинома, коэффициенты которого выражаются через амплитуды парциальных волн, соответствующих одному из решений. Зная эти корни, легко восстановить остальные решения. Соответствие между решениями в соседних бинах можно установить, если потребовать непрерывности действительных и мнимых частей и их производных как функций массы. Статистические ошибки корней, которые необходимо знать для сшивки решения, были определены методом Монте-Карло. Данная процедура позволяет однозначно идентифицировать все нетривиальные решений ПВА во всей изучаемой области масс.

При малых передачах импульса восемь нетривиальных решений ПВА заметно отличаются друг от друга. Четыре решения были отброшены из-за нефизического поведения G -волн при малых массах (пики в области $f_2(1270)$ -мезона). Далее, два решения не удовлетворяют условию фазовой когерентности G_o - и G_- -волн, а также D_o - и D_- -волн. Они также были исключены из дальнейшего рассмотрения. Два решения, удовлетворяющие физическим требованиям, практически совпадают в области масс ниже 1,5 ГэВ. Небольшое различие между решениями наблюдается выше 1,5 ГэВ, однако качественно оба ведут себя одинаково. При больших передачах импульса все восемь решений лишь незначительно отличаются друг от друга, что естественно, так как при больших $|t|$ доминирует обмен с естественной спин-четностью.

Определены параметры и сечения образования $f_4(2050)$ -мезона в трех G -волнах. При малых $|t|$ он образуется в основном за счет однопионного обмена. Полное сечение образования $f_4(2050)$ -мезона при $0,01 < |t| < 0,2$ ($\text{ГэВ}/c^2$) с учетом $\text{BR}(f_4(2050) \rightarrow \pi^0\pi^0)$ составляет $(13,2 \pm 1,9)$ мкбн. С ростом переданного импульса вклад обмена с естественной спин-четностью усиливается и при $|t| > 0,3$ ($\text{ГэВ}/c^2$) этот обмен доминирует в механизме образования $f_4(2050)$ -мезона. Это свидетельствует о схожести механизмов образования $f_2(1270)$ - и $f_4(2050)$ -мезонов.

Обсуждается поведение S -волны при малых передачах импульса. В ней наблюдаются три бампа, разделенные двумя провалами, около 1 и 1,45 ГэВ (рис. 5). Фаза S -волны, измеренная относительно фазы D_o -волны, меняется резонансным образом в районе каждого из провалов (рис. 6). Это указывает на существование двух или более скалярных резонансов в области масс ниже 1,9 ГэВ. Один из этих резонансов — хорошо известный $f_o(980)$ -мезон. Провал в районе 1,45 ГэВ наблюдается в $\pi^0\pi^0$ -системе впервые. Он связан с проявлением $f_o(1500)$ -мезона, кандидата в низшее состояние скалярного глюбала.

В D_o -волне отсутствует какая-либо статистически значимая резонансная структура выше $f_2(1270)$ -пика (рис. 7). Это позволяет установить верхнее ограничение на сечение образования $f_2(1810)$ -резонанса (уровень достоверности 95%):

$$\frac{\sigma_{D_o}(\pi^- p \rightarrow f_2(1810)n) \times \text{BR}(f_2(1810) \rightarrow \pi^0\pi^0)}{\sigma_{D_o}(\pi^- p \rightarrow f_2(1270)n) \times \text{BR}(f_2(1270) \rightarrow \pi^0\pi^0)} < \frac{1}{50}. \quad (11)$$

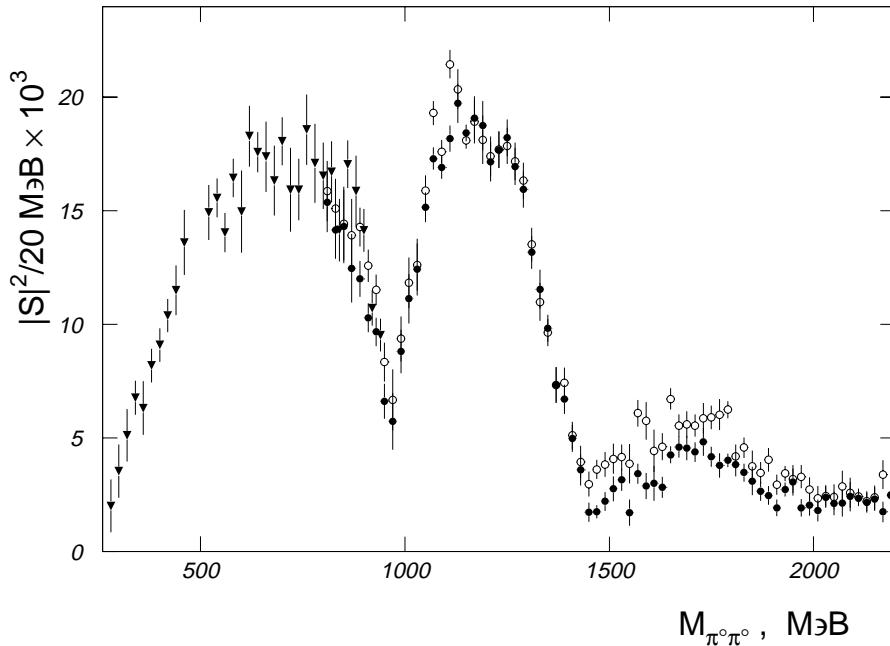


Рис. 5. Квадраты модулей S -амплитуды в интервале $0,01 < |t| < 0,2$ ($\text{ГэВ}/c^2$) для двух решений, удовлетворяющих физическим требованиям. Ниже 0,8 ГэВ показаны значения $|S|^2$, полученные по данным сеанса 1980 г., нормированные на данные настоящей работы.

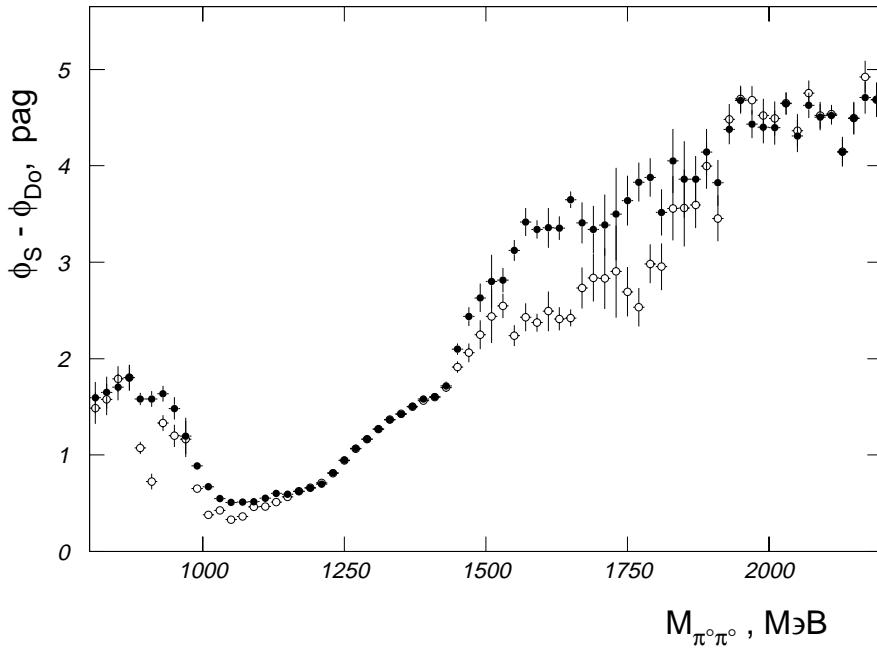


Рис. 6. Относительная фаза S - и D_o -волн для двух решений, удовлетворяющих физическим требованиям.

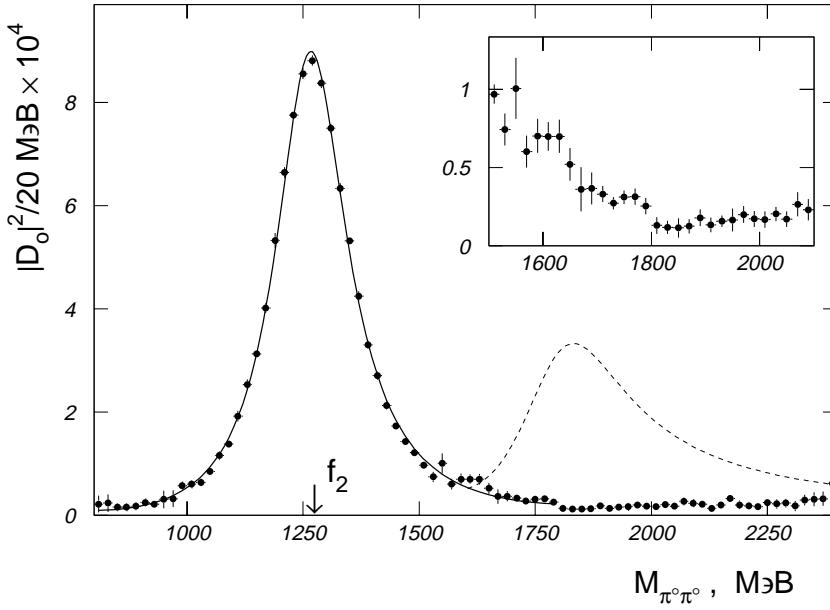


Рис. 7. Квадрат модуля D_o -амплитуды в интервале $0,01 < |t| < 0,2$ ($\text{ГэВ}/\text{с}$) 2 для одного из решений, удовлетворяющих физическим требованиям (значения $|D_o|^2$ для другого решения идентичны в пределах статистических ошибок). Сплошная кривая показывает фит брейт-вигнеровой функцией и полиномом с учетом интерференции. Штриховая кривая — ожидаемый вклад $f_2(1810)$ -резонанса по данным Н.Кэйсона и др. (нормировано на $f_2(1270)$). На вставке показана область масс около 1,8 ГэВ.

В конце главы обсуждается схема классификации скалярных изоскалярных резонансов, основанная на результатах совместного анализа данных об S -волне, полученных в настоящей работе и в ряде других экспериментов. Согласно этому анализу, в области масс ниже 1,9 ГэВ существуют пять скалярных резонансов, тогда как кварковая модель предсказывает только четыре. Лишнее состояние является кандидатом в глюболы. Это состояние в результате смешивания через мезонные пересечения оказывается распределенным по трем физическим резонансам: $f_o(1300)$, $f_o(1500)$ и $f_o(1530)$.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации:

1. Выполнен парциально-волновой анализ $\pi^0\pi^0$ -системы в широком интервале значений масс и передач импульса на основе 1,5 млн. $\pi^0\pi^0$ -событий. Найдены все нетривиальные решения ПВА, среди них выделены решения, удовлетворяющие физическим требованиям.
2. Исследованы различные процедуры сшивки решений ПВА в соседних массовых бинах. Разработана процедура, позволяющая однозначно идентифицировать все нетривиальные решения ПВА.
3. Определены сечения образования и параметры $f_2(1270)$ - и $f_4(2050)$ -мезонов в реакции $\pi^- p \rightarrow \pi^0\pi^0 n$.
4. Исследованы механизмы образования $f_2(1270)$ - и $f_4(2050)$ -мезонов при разных передачах импульса. Показана схожесть механизмов образования этих мезонов.
5. Изучен $f_o(980)$ -мезон при малых и больших передачах импульса.
6. Проведен анализ S -волновой амплитуды $\pi\pi$ -рассеяния в районе 1 ГэВ. Результаты анализа делают маловероятной интерпретацию $f_o(980)$ -мезона как $K\bar{K}$ -молекулы.
7. Получено верхнее ограничение на сечение образования $f_2(1810)$ -резонанса в $\pi^0\pi^0$ -системе ($< 1/50$ от сечения образования $f_2(1270)$ -мезона, уровень достоверности 95%).
8. Изучена структура S -волны в области масс ниже 1,9 ГэВ. В ней наблюдаются три бампа, разделенные двумя провалами, что указывает на существование двух или более скалярных резонансов. Один из этих резонансов является кандидатом в скалярные глюболы.

Список литературы

- [1] Прокошкин Ю.Д., Кондашов А.А. **Парциально-волновой анализ реакции $\pi^- p \rightarrow \pi^0 \pi^0 n$ при импульсе 38 ГэВ/с в интервале масс до 1,9 ГэВ**, ДАН, **336** (1994) 613–616; Proc. Fifth Intern. Conf. on Hadron Spectroscopy HADRON'93, Como, 1993, in Nuovo Cimento **107A** (1994) 1903–1910.
- [2] Прокошкин Ю.Д., Кондашов А.А., Садовский С.А. **Экспериментальное изучение S-волны в $\pi^0 \pi^0$ -системе**. ДАН, **342** (1995) 473–476; Proc. XXVII Intern. Conf. on High Energy Physics, Glasgow, (1994) 1407–1408.
- [3] Alde D., Binon F.G., Boutemeur M., Bricman C., Donskov S.V., Gouanere M., Inyakin A.V., V.A. Kachanov, G.V. Khaustov, E.A. Knapp, Kondashov A.A., Kulik A.V., Landsberg G.L., A.A. Lednev, V.A. Lishin, Peigneux J.P., Polovnikov S.A., Polyakov V.A., Poulet M., Prokoshkin Yu.D., S.A. Sadovsky, V.D. Samoylenko, Shagin P.M., Shtannikov A.V., Singovsky A.V., Stroot J.P., Sugonyaev V.P. **Study of the $f_0(980)$ resonance in the $\pi^0 \pi^0$ channel**. // Zeit. Phys., **C66** (1995) 375–378; Preprint CERN-PPE/94-157, Geneva, 1994.
- [4] Anisovich V.V., Kondashov A.A., Prokoshkin Yu.D., Sadovsky S.A., Sarantsev A.V. **Two-resonance structure of the ($IJ^{PC} = 00^{++}$) $\pi\pi$ -amplitude in a mass region around 1 GeV**. // Phys. Lett., **B355** (1995) 363–373; Preprint PNPI 2046, TH-19-1995, Gatchina, 1995.
- [5] Kondashov A.A., Prokoshkin Yu.D., Sadovsky S.A. **Further study of the $\pi^0 \pi^0$ -system produced in 38 GeV/c $\pi^- p$ charge exchange collisions**: Preprint IHEP 95-137, Protvino, 1995; Proc. NAN'95 Intern. Conf., Moscow, 1995, in Phys. Atom. Nucl. **59** (1996) 1680–1685.

Рукопись поступила 7 июля 1997 г.

А.А. Кондашов.

Исследование $\pi^o\pi^o$ -системы на спектрометре ГАМС-2000.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы L^AT_EX.

Редактор Н.В.Ежела.

Технический редактор Н.В.Орлова.

Подписано к печати 9.07.97. Формат 60 × 84/8. Офсетная печать.

Печ.л. 1,87. Уч.-изд.л. 1,44. Тираж 100. Заказ 1038. Индекс 3649.

ЛР №020498 17.04.97.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий
142284, Протвино Московской обл.

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т 97-45, И Ф В Э, 1997
