

P1-2008-100

Ю. А. Троян¹, А. П. Иерусалимов, А. В. Беляев, А. Ю. Троян¹,
Е. Б. Плеханов, С. Г. Аракелян²

ПОИСК И ИССЛЕДОВАНИЕ МАЛОМАССОВЫХ
СКАЛЯРНЫХ МЕЗОНОВ В РЕАКЦИИ $np \rightarrow np\pi^+\pi^-$
ПРИ ИМПУЛЬСЕ ПАДАЮЩИХ НЕЙТРОНОВ
 $P_n = (5,20 \pm 0,12) \text{ ГэВ}/c$

Направлено в журнал «Ядерная физика»

¹E-mail: atroyan@jinr.ru

²ФИ РАН им. П. Н. Лебедева, Москва

Троян Ю. А. и др.

P1-2008-100

Поиск и исследование маломассовых скалярных мезонов в реакции $np \rightarrow np\pi^+\pi^-$ при импульсе падающих нейтронов $P_n = (5,20 \pm 0,12)$ ГэВ/с

На материалах облучения однометровой НВС ЛВЭ ОИЯИ пучком квазимонохроматических нейтронов с импульсом $P_n = (5,20 \pm 0,12)$ ГэВ/с, полученным после ускорения дейтронов на синхрофазотроне ЛВЭ ОИЯИ, отобрано 25650 случаев реакции $np \rightarrow np\pi^+\pi^-$. После дополнительного отбора событий с $\cos \Theta_p^* > 0$ в распределении эффективных масс $\pi^+\pi^-$ -комбинаций обнаружено девять особенностей с массами 350, 408, 489, 579, 676, 762, 878, 1036, 1170 МэВ/с², ширинами в несколько десятков МэВ/с². Эффекты от резонансов значительно возрастают после применения критериев отбора по балансу суммарных продольных импульсов π^+ - и π^- -мезонов в общей с.ц.м. реакции. Числа стандартных отклонений от фона превышают пять ошибок.

Произведено прямое измерение спинов резонансов и определены другие квантовые числа. Для всех особенностей $I^G(J^{PC}) = 0^+(0^{++})$.

Таким образом, наблюдается последовательность скаляр-изоскалярных резонансов $f_0(\sigma_0)$ с массами, лежащими в области $M \leq 1200$ МэВ/с², сведения о которых отсутствовали в литературе.

Найдена феноменологическая зависимость масс резонансов от их номера, которая охватывает резонансы, наблюдаемые в данной работе, и все, без исключения, особенности, отмеченные в таблицах мировых данных как имеющие квантовые числа $f_0(\sigma_0)$ -мезонов.

Работа выполнена в Лаборатории физики высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2008

Troyan Yu. A. et al.

P1-2008-100

The Search and Study of Low-Mass Scalar Mesons at the Impulse of Neutron Beam

$P_n = (5.20 \pm 0.12)$ GeV/c in the Reaction $np \rightarrow np\pi^+\pi^-$

Using irradiation of 1 m HBC LHE JINR by quasimonochromatic neutron beam with impulse $P_n = (5.20 \pm 0.12)$ GeV/c which was produced after acceleration of deuterons in the synchrophasotron LHE JINR, 25650 events of reaction $np \rightarrow np\pi^+\pi^-$ were selected. After supplementary sorting out events in which $\cos \Theta_p^* > 0$ in the effective mass spectrum of $\pi^+\pi^-$ -combinations there were found out nine peculiarities at masses 350, 408, 489, 579, 676, 762, 878, 1036, 1170 MeV/c² and with experimental widths not more than several tens of MeV/c².

The resonance effects are significantly increased after using additional criterion — balance of the summary of the longitudinal impulses of π^+ and π^- mesons in general c.m.s. of reaction. By these conditions values of standard derivations from background are more than 5 for all peculiarities.

The direct measurement of the spins of resonances was carried out. Also, other quantum numbers were obtained. All these peculiarities have $I^G(J^{PC}) = 0^+(0^{++})$.

In this way, the sequence of scalar-izoscalar resonances $f_0(\sigma_0)$ with masses in the range $M \leq 1200$ MeV/c² is seen. The information about these resonances was absent in literature.

The phenomenological dependence of mass of resonance on its number was found. This dependence covers not only resonances shown in this paper but also all the resonances with quantum numbers of $f_0(\sigma_0)$ mesons presented in PDG.

The investigation has been performed at the Veksler and Baldin Laboratory of High Energy Physics, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2008

ВВЕДЕНИЕ

Работа посвящена поиску и изучению маломассовых ($M \leq 1,20 \text{ ГэВ}/c^2$) резонансов в системе $\pi^+\pi^-$. Их существование может объяснить свойства скалярных мезонов (так называемых σ_0 -мезонов), исследование которых важно как с точки зрения изучения механизма реализации киральной симметрии и связанного с этим механизма деконфайнмента адронов, так и с точки зрения исследования притягивающей части нуклон-нуклонного потенциала [1].

Как подчеркнуто в статье [2], легкие скалярные мезоны составляют хиггсовский сектор сильных взаимодействий, обеспечивающий конечные массы всех легких адронов разных сортов (с одновременным исчезновением массы у π -мезона).

Для прояснения этих принципиальных вопросов необходимо тщательное изучение свойств σ_0 -мезонов, а также определение их структуры.

Этим вопросам посвящены сотни работ, цитировать которые у нас нет никакой возможности. Мы отсылаем читателя к обзорной статье из PDG [3]. Однако обзор теоретических работ [3] касается кварк-глюонной картины строения скалярных мезонов. В них σ_0 -мезоны рассматриваются как построенные из двух или четырех кварков, как глюболы, как объединение кварков в дикварки и т. д.

Существуют и другие подходы к проблеме. Это — предсказания последовательности и свойств резонансов с точки зрения многомерного пространства [4], предсказания последовательности резонансов, полученные из формул квазиклассического квантования [5], предсказания последовательности резонансов на основе модели Мак-Грегора [6], исследование свойств инстантонного вакуума [7].

Такое многообразие теоретических подходов говорит о том, что понимания свойств и структуры σ_0 -мезонов пока не существует.

Связано это, в первую очередь, с отсутствием экспериментальных данных в районе масс, меньших $1 \text{ ГэВ}/c^2$. Вопрос приобретает еще большую актуальность в связи с появлением статистически богатого материала с установки NADES [8], планированием исследований смешанной фазы в ЛФВЭ ОИЯИ [9] и планированием и проведением таких исследований на других ускорителях мира.

Маломассовый σ_0 -мезон может явиться мощным средством изучения новых состояний вещества. Некоторые предсказания об изменении свойств σ_0 -мезонов в переходных режимах получены в работах [10].

1. РЕАКЦИЯ $nr \rightarrow nr \pi^+ \pi^-$

Эта статья продолжает серию наших работ по исследованию резонансов в системе $\pi^+ \pi^-$ в реакции $nr \rightarrow nr \pi^+ \pi^-$ при $P_n = (5,20 \pm 0,12)$ ГэВ/с [11, 12].

Приводимые данные — результат облучения 1-м НВС ЛВЭ ОИЯИ пучком квазимонохроматических нейтронов ($\Delta P_n/P_n = 2,5\%$; $\Delta \Omega_{\text{канала}} = 10_{\text{ср}}^{-7}$), полученным после ускорения дейтронов на синхрофазотроне ЛВЭ ОИЯИ [13].

Точность измерения вторичных заряженных частиц в реакции $nr \rightarrow nr \pi^+ \pi^-$ равна $\Delta P/P = 2\%$ для протонов и $\Delta P/P = 3\%$ для мезонов. Угловая точность $\leq 0,5^\circ$.

Эксклюзивные каналы реакций выделялись стандартным χ^2 -методом, учитывающим соответствующие уравнения связи [14–16].

В этой работе, по сравнению с предыдущими, был сделан более жесткий отбор по χ^2 для изучаемых случаев: $\chi^2 < 1,5$. Проведено обрезание по восстановленной недостающей массе нейтрона.

Распределение по χ^2 экспериментальных событий показано на рис. 1, а. Там же нанесена теоретическая кривая χ^2 с одной степенью свободы. На рис. 1, б показано распределение недостающих масс в отобранных с $\chi^2 < 1,5$ событиях. Видно, что оно имеет максимум при массе нейтрона с точностью $0,1$ МэВ/с², симметрично относительно центрального значения и имеет полную ширину на полувысоте, равную 20 МэВ/с². После применения всех обрезających процедур отобрано 25650 случаев реакции $nr \rightarrow nr \pi^+ \pi^-$. Отметим, что примесь от других каналов реакций практически отсутствует.

Ранее мы уже исследовали реакцию $nr \rightarrow nr \pi^+ \pi^-$ [17] и показали, что в ней основным механизмом является однопионный обмен. Это приводит к обильному рождению Δ^{++} - и Δ^- -изобар (до 70% сечения реакции). Этот механизм дает основной вклад в случаи, когда нейтрон летит в переднюю полусферу в с.ц.м. реакции.

На рис. 2 изображено распределение эффективных масс $\pi^+ \pi^-$ для случаев с $\cos \Theta_n^* > 0$. Никаких особенностей не видно. Полином девятой степени (сплошная кривая) описывает распределение с $\overline{\chi^2} = 1,02 \pm 0,15$ и $\sqrt{D} = 1,51 \pm 0,11$.

На распределение на рис. 2 наложена также фоновая кривая, полученная с помощью модели однопионного реджезованного обмена ОПЕР (прерывистая кривая). Модель включает в себя процессы рождения основных барионных N^* - и Δ^* -резонансов, а также процессы упругого $\pi\pi \rightarrow \pi\pi$ рассеяния. Дополнительно для описания реакции $nr \rightarrow nr \pi^+ \pi^-$ использовались процессы

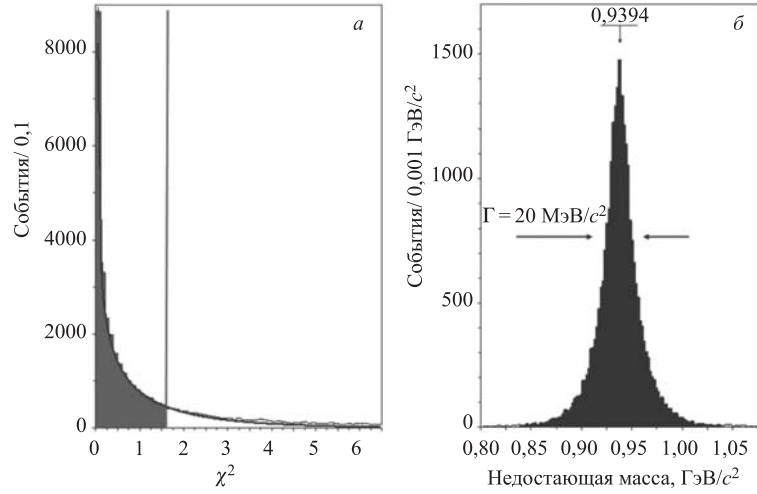


Рис. 1. *a* — распределение по χ^2 экспериментальных событий (гистограмма). Нанесена теоретическая кривая χ^2 с одной степенью свободы. Вертикальная линия — значение $\chi^2 = 1,5$; *б* — распределение недостающих масс в событиях, отобранных с $\chi^2 = 1,5$. Отмечены положение максимума и полная ширина на полувысоте

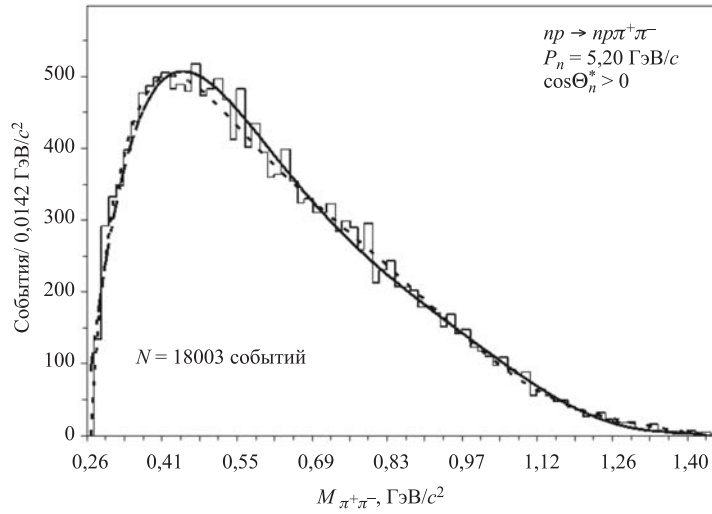


Рис. 2. Распределение эффективных масс $\pi^+\pi^-$ для случаев $\cos \Theta_n^* > 0$. Сплошная серая линия — фоновая кривая, полученная суммой полиномов Лежандра до девятой степени включительно. Прерывистая серая линия — фоновая кривая, полученная с помощью OPER-модели

дифракционного рождения N_{1440}^* , N_{1520}^* и N_{1680}^* -резонансов. Эта кривая описывает распределение с $\chi^2 = 1,07 \pm 0,15$ и $\sqrt{D} = 1,60 \pm 0,11$.

На рис. 3 изображено распределение эффективных масс $\pi^+\pi^-$ для случаев с $\cos\Theta_p^* > 0$, то есть для случаев с протонами, летящими в переднюю полусферу в общей с.ц.м. Полный вклад Δ^{++} - и Δ^- -изобар в такие случаи не превышает 17 % (расчеты по OPER-модели), и следовательно, сильно снижается фон для исследуемых эффектов. Видно сильное отличие распределения на рис. 3 от распределения на рис. 2. После отбора событий с $\cos\Theta_p^* > 0$ осталось 7647 случаев.

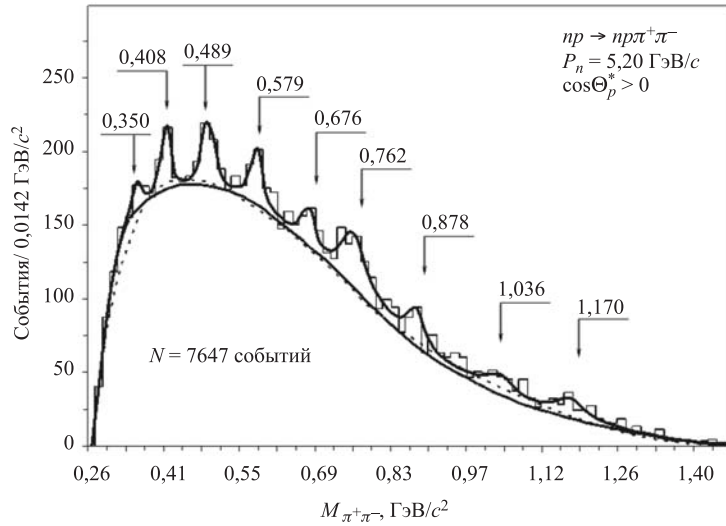


Рис. 3. Распределение эффективных масс $\pi^+\pi^-$ для случаев $\cos\Theta_p^* > 0$. Сплошная кривая — сумма полиномов Лежандра до девятой степени включительно и девяти резонансных кривых в форме Брейта–Вигнера. Стрелками отмечены подобранные фитом центральные значения масс. Сплошная серая линия — фоновая кривая, полученная суммой полиномов Лежандра до девятой степени включительно. Прерывистая серая линия — фоновая кривая, полученная с помощью OPER-модели

Распределение на рис. 3 описывалось суммой полиномов Лежандра до девятой степени включительно и девятью резонансными кривыми, взятыми в форме Брейта–Вигнера (сплошная кривая). Стрелками на графике отмечены подобранные фитом центральные значения масс.

При получении фоновой кривой учитывались требования:

- во-первых, ошибки в определении коэффициентов при полиноме Лежандра соответствующей степени не должны превышать 50 %;

• во-вторых, полином должен описывать распределение, остающееся после «убирания» резонансных областей, с $\overline{\chi^2} = 1,0$ и $\sqrt{D} = 1,41$, что должно быть для χ^2 -распределения с одной степенью свободы.

Фон (сплошная серая кривая) составляет 89 % всего распределения и описывается с $\overline{\chi^2} = 0,97 \pm 0,24$ и $\sqrt{D} = 1,36 \pm 0,17$.

Та же фоновая кривая, нормированная на 100 % событий в графике, описывает распределение с $\overline{\chi^2} = 1,26 \pm 0,15$ и $\sqrt{D} = 1,59 \pm 0,11$ (уровень согласия — 9 %).

На распределение на рис. 3 наложена также фоновая кривая, полученная с помощью OPER-модели (прерывистая кривая). Эта кривая описывает фон с $\overline{\chi^2} = 0,95 \pm 0,24$ и $\sqrt{D} = 1,45 \pm 0,17$, а нормированная на 100 % событий в графике описывает распределение с $\overline{\chi^2} = 1,24 \pm 0,15$ и $\sqrt{D} = 1,87 \pm 0,11$ (уровень согласия — 11 %).

Результат аппроксимации представлен в табл. 1.

Таблица 1

$M_{\text{рез}} \pm \Delta M_{\text{рез}}, \text{ МэВ}/c^2$	$\Gamma_{\text{рез}}^{\text{эксп}} \pm \Delta \Gamma_{\text{рез}}^{\text{эксп}}, \text{ МэВ}/c^2$	$\Gamma_{\text{рез}}^{\text{ист}} \pm \Delta \Gamma_{\text{рез}}^{\text{ист}}, \text{ МэВ}/c^2$	$\sigma_{\mu b}$	S.D.
350 ± 3	11 ± 8	7 ± 9	12 ± 6	3.0
408 ± 3	11 ± 8	7 ± 9	12 ± 6	3.5
489 ± 3	20 ± 10	16 ± 11	20 ± 8	4.0
579 ± 5	17 ± 14	7 ± 14	18 ± 8	3.8
676 ± 7	11 ± 14	16 ± 15	11 ± 6	3.0
762 ± 11	53 ± 33	48 ± 33	26 ± 8	6.1
878 ± 7	30 ± 14	11 ± 16	11 ± 5	3.6
1036 ± 13	61 ± 30	50 ± 33	15 ± 5	5.1
1170 ± 11	65 ± 33	51 ± 35	11 ± 4	5.8

Первая колонка содержит подобранные значения масс резонансов (включая ошибки); вторая — экспериментальные значения ширины резонансов.

Разрешение по массам [18] растет с возрастанием массы, в нашем случае как

$$\Gamma_{\text{разр}}(M) = 4,2 \left[\left(M - \sum_1^2 m_i \right) / 0,1 \right] + 2,8,$$

где M — масса резонанса; m_i — масса покоя i -й частицы, входящей в резонанс; M , m_i и коэффициент 0,1 задаются в $\text{ГэВ}/c^2$, коэффициенты 4,2 и 2,8 — в $\text{МэВ}/c^2$.

Третья колонка содержит истинные значения ширины резонансов, вычисляемые по формуле $\Gamma_{\text{рез}}^{\text{ист}} = \sqrt{\left(\Gamma_{\text{рез}}^{\text{эксп}} \right)^2 - \left(\Gamma_{\text{разр}} \right)^2}$; четвертая — сечения образования соответствующих резонансов.

При вычислении ошибок в сечениях учитывалась ошибка в определении сечения всего канала реакции $np \rightarrow np\pi^+\pi^-$ при $P_n = (5,20 \pm 0,12)$ ГэВ/с ($\sigma_{np \rightarrow np\pi^+\pi^-} = (6,22 \pm 0,28)$ мб) [15].

Пятая колонка содержит число стандартных отклонений эффекта от фона $S.D. = N_{\text{рез}}/\sqrt{N_{\text{фон}}}$.

2. СПИН И ИЗОТОПИЧЕСКИЙ СПИН РЕЗОНАНСОВ

Мы оценили спин наблюдаемых в системе $\pi^+\pi^-$ -резонансов. Для этого были исследованы распределения углов эмиссии π^+ от распада резонанса (случай в области диапазона массы соответствующего резонанса) относительно направления полета резонанса в общей с.ц.м. реакции. Полученные величины переводились в систему покоя резонанса (спиральная система координат) [16]. Фон конструировался из случаев, имеющих массы в диапазонах слева и справа от соответствующего резонансного диапазона. Фоновое распределение вычиталось из резонансного. Результирующее распределение описывалось суммой полиномов Лежандра четных степеней (со степенями $2J$), где J — значение нижней границы спина резонанса. Авторы благодарят В.Л. Любошица за написание соответствующих формул. Все распределения изотропны, что было показано и в предыдущих работах [11, 12]. Отсюда следует, что для всех наблюдаемых особенностей $J \geq 0$.

Мы не наблюдаем особенностей с соответствующими массами ни в системе $\pi^-\pi^0$ из реакции $np \rightarrow pp\pi^-\pi^0$, также исследованной нами [11], ни в системе $\pi^-\pi^-$ из реакции $np \rightarrow pp\pi^+\pi^-\pi^-$, изученной нами ранее [18].

Из вышесказанного можно сделать вывод, что все наблюдаемые нами особенности имеют квантовые числа $I^G(J^{PC}) = 0^+(0^{++})$.

При этом для определения знака C -четности использовался обобщенный принцип Паули $(-1)^{L+S}(-1)^{I_{\text{рез}}}(-1)^{I_{\pi^+}+I_{\pi^-}} = 1$. Известно, что $C = (-1)^{L+S+I_{\text{рез}}}$. Но при $S = 0$ и спине резонанса $J = 0$ $(-1)^{L+S} = +1$, а так как состояний с изотопическим спином 1 (в системе $\pi^-\pi^0$) мы не наблюдаем, то $I_{\text{рез}} = 0$, и значит, $C = +1$.

3. УСИЛЕНИЕ ЭФФЕКТОВ

Для усиления эффектов был использован дополнительный критерий отбора событий — по переменной

$$X_{\pi^+\pi^-}^* = \left(P_{\parallel\pi^+}^* + P_{\parallel\pi^-}^* \right) / P_{\pi \text{ макс}}^*,$$

где $P_{\parallel\pi^{+(-)}}^*$ — экспериментальное значение продольной компоненты импульса $\pi^+(\pi^-)$ в общей с.ц.м.; $P_{\pi \text{ макс}}^*$ — максимально возможное значение

импульса π -мезона для данного события в общей с.ц.м. После применения критерия $\cos \Theta_p^* > 0$ основной фон возникает от диаграммы ОРЕ-обмена, где обменной частицей является π^0 -мезон (диаграмма типа 1 — рис. 4, а) и от процессов дифракционного рождения (обмен помероном): В таких диаграммах основную роль играет процесс $\pi^- p \rightarrow \pi^0 n$ (процесс перезарядки). В сечении этого процесса нет никаких особенностей, кроме максимума при $M_{p\pi^-} = 1236 \text{ МэВ}/c^2$.

Гораздо большую роль начинают играть диаграммы типа 2 — рис. 4, б. Эти диаграммы были ранее сильно замаскированы диаграммами однопионного обмена заряженным мезоном. В диаграммах типа 2 π^+ и π^- — равноправны,

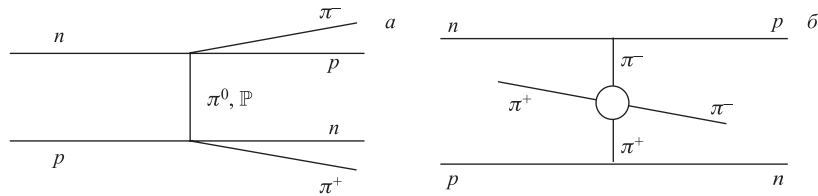


Рис. 4. Пример диаграмм: а — ОРЕ-обмена, где обменной частицей является π^0 -мезон (тип 1); б — $\pi^+\pi^-$ -рассеяния (тип 2)

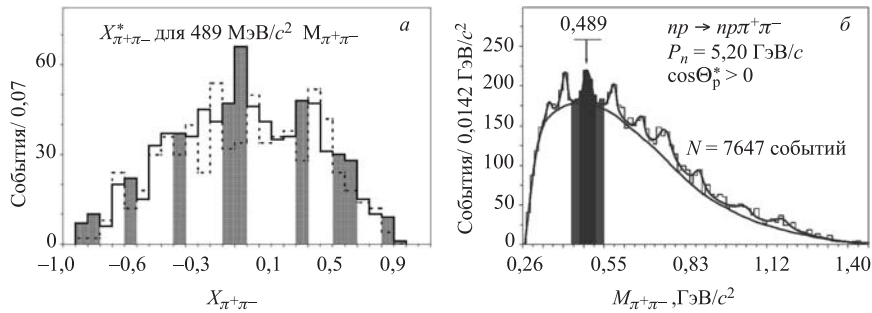


Рис. 5. а — распределения по $X_{\pi^+\pi^-}^*$ для резонанса с массой $489 \text{ МэВ}/c^2$. Сплошная линия — гистограмма распределения для случаев из диапазона массы резонанса, прерывистая линия — гистограмма распределения для случаев, имеющих массы в диапазонах слева и справа от соответствующего резонансного диапазона масс (фонные). Закрашенные полосы гистограммы соответствуют диапазонам по $X_{\pi^+\pi^-}^*$, выбранным для выделения резонанса с массой $489 \text{ МэВ}/c^2$. б — резонансный и фоновые диапазоны масс для резонанса с массой $489 \text{ МэВ}/c^2$. Гистограмма и кривые соответствуют приведенным на рис. 3

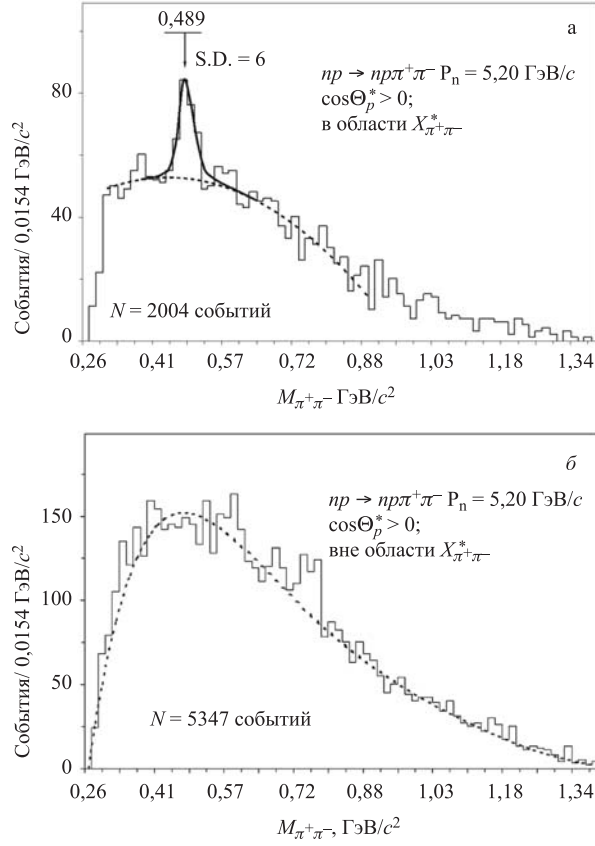


Рис. 6. Распределение эффективных масс $\pi^+\pi^-$ для случаев, когда значение $X_{\pi^+\pi^-}^*$: а — попадает в диапазоны, выделенные на рис. 5, а; б — лежит вне диапазонов, выделенных на рис. 5, а

поэтому можно ожидать, что эффекты возникнут в $\pi^+\pi^-$ -рассеянии, причем система $\pi^+\pi^-$ -мезонов будет близка к симметричной (в переменных $X_{\pi^+\pi^-}^*$) относительно $X_{\pi^+\pi^-}^* \approx 0$.

Рассмотрим применение переменной $X_{\pi^+\pi^-}^*$ для усиления резонансного эффекта с массой $489 \text{ МэВ}/c^2$. Для других представленных эффектов применялась аналогичная процедура. На рис. 5, а даны распределения по $X_{\pi^+\pi^-}^*$. Сплошной линией изображено распределение для случаев из диапазона массы соответствующего резонанса, прерывистой — для случаев, имеющих массы в диапазонах слева и справа от соответствующего резонансного диапазона (фоновые). Резонансный и фоновые диапазоны масс показаны на рис. 5, б. Видно, что в некоторые области по $X_{\pi^+\pi^-}^*$ события от резонанса попадают с боль-

шей вероятностью, чем фоновые. Выбирая полосы по $X_{\pi^+\pi^-}^*$, где вероятность резонансных событий выше, чем вероятность фоновых, можно значительно снизить вклад фона для данного резонанса.

На рис. 6, *a* представлено распределение эффективных масс $\pi^+\pi^-$ для случаев, когда значение $X_{\pi^+\pi^-}^*$ попадает в диапазоны, выделенные на рис. 5, *a* (закрашенные полосы). Видно сильное возрастание эффекта при массе $M_{\pi^+\pi^-} = 489 \text{ МэВ}/c^2$. Статистическая значимость его при этом $S.D. = 6$.

На рис. 6, *б* представлено распределение эффективных масс $\pi^+\pi^-$ для случаев, когда значение $X_{\pi^+\pi^-}^*$ лежит вне диапазонов, выделенных на рис. 5, *a*. Видно полное отсутствие эффекта от резонанса с массой $M_{\pi^+\pi^-} = 489 \text{ МэВ}/c^2$.

Такой же анализ соответствующих распределений по $X_{\pi^+\pi^-}^*$ проделан для всех наблюдаемых нами эффектов.

На рис. 7 обозначены области выборок по $X_{\pi^+\pi^-}^*$ для различных диапазонов масс. Некоторые выбранные области $X_{\pi^+\pi^-}^*$ перекрываются для разных резонансов. Это наблюдение учитывается при проведении фоновых кривых для распределений эффективных масс резонансов. Фон проводится по части графика через точки, не связанные с другими резонансами перекрытиями областей $X_{\pi^+\pi^-}^*$.

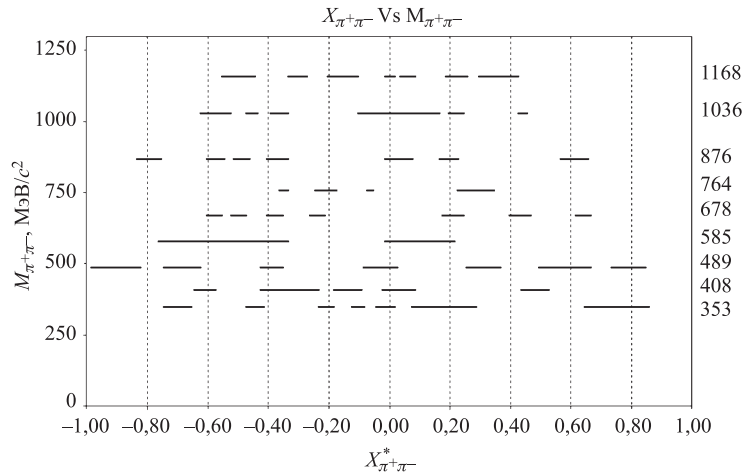


Рис. 7. Области выборок по $X_{\pi^+\pi^-}^*$ для различных диапазонов масс. Значения масс представлены в колонке справа

На рис. 8 представлены распределения по $M_{\pi^+\pi^-}$ (после применения критерия $X_{\pi^+\pi^-}^*$) для всех наблюдаемых нами резонансов. Там же изображены фоновые и резонансные (в форме Брейта–Вигнера) кривые.

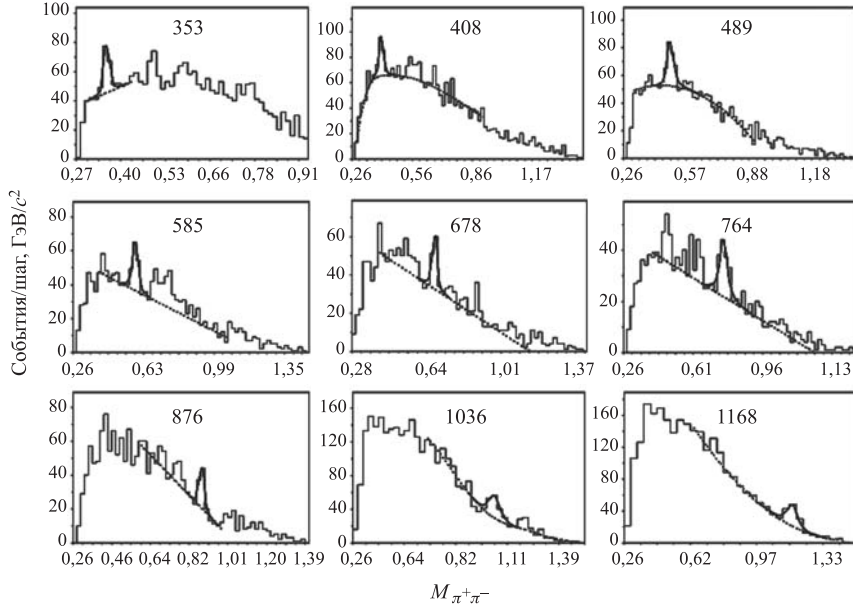


Рис. 8. Распределения по $M_{\pi^+\pi^-}$ для всех наблюдаемых нами резонансов после применения критерия $X_{\pi^+\pi^-}^*$. Прерывистые линии — фоновые кривые, сплошные — резонансные (в форме Брейта-Вигнера)

Таблица 2. Результат аппроксимации распределений, представленных на рис. 8. Первая колонка содержит подобранные значения масс резонансов (включая ошибку), вторая — экспериментальные значения ширины резонансов, третья — число стандартных отклонений эффекта от фона

$(M_{\text{рез}} \pm \Delta M_{\text{рез}}), \text{ МэВ}/c^2$	$(\Gamma_{\text{рез}}^{\text{эксп}} \pm \Delta \Gamma_{\text{рез}}^{\text{эксп}}), \text{ МэВ}/c^2$	S.D.
353 ± 6	12 ± 8	5,
408 ± 5	16 ± 6	5,0
489 ± 4	28 ± 13	6,
585 ± 6	19 ± 7	5,4
678 ± 3	18 ± 9	5,6
764 ± 18	53 ± 18	6,9
876 ± 4	28 ± 10	6,8
1036 ± 10	60 ± 16	6,4
1168 ± 11	70 ± 16	7,5

В табл. 2 приведены значения подобранных масс и ширины резонансов, а также полученные числа стандартных отклонений от фона. Видно, что значения масс и ширины резонансов близки к приведенным в табл. 1, а значения

S.D. значительно выросли и нигде не ниже 5. Это говорит о том, что применение критерия $X_{\pi^+\pi^-}^*$ сильно снижает уровень фона для каждого эффекта, не искажая характеристик резонансов.

На рис. 9 представлены распределения углов эмиссии π^+ от распада резонансов в спиральной системе координат с вычтенными соответствующими фоновыми распределениями, (см. п. 2), полученные для усиленных эффектов, то есть с применением всех перечисленных выше критериев. Видно, что все распределения изотропны. Отсюда следует, что для всех наблюдаемых особенностей $J \geq 0$.

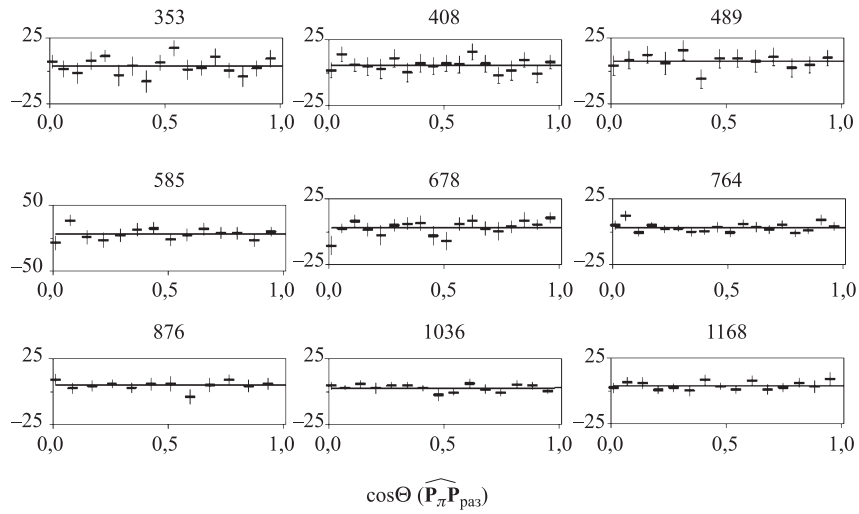


Рис. 9. Штриховые гистограммы с величинами ошибок — распределения углов эмиссии π^+ от распада резонансов в спиральной системе координат с вычтенными соответствующими фоновыми распределениями, полученные для усиленных эффектов. Сплошные линии — полиномы первой степени (прямые)

4. СРАВНЕНИЕ С ДРУГИМИ ЭКСПЕРИМЕНТАМИ

Существует не много экспериментов, с результатами которых можно было бы сравнить наши данные. Во-первых, это эксперимент, в котором был наблюден так называемый АВС-эффект [19]. В нем, в разных ядерных реакциях, был обнаружен пик при массе $M = 350 \text{ МэВ}/c^2$. Подобный эффект найден нами [20] в реакции $np \rightarrow d\pi^+\pi^-$ при $P_n = (1,73 \pm 0,04) \text{ ГэВ}/c$. Обнаруженный нами эффект в системе $\pi^+\pi^-$ лежит в области эффективных масс $M_{\pi^+\pi^-} \approx 400 \text{ МэВ}/c^2$.

Таблица 3. Результаты K -матричного анализа ряда экспериментов по поиску маломассовых $\pi^+\pi^-\pi^0$ -особенностей, представленные в PDG значения масс (слева) и ширины резонансов (справа)

Citation: W.-M. Yao et al. (Particle Data Group), J. Phys. G 33, 1 (2006) and 2007 partial update for edition 2008 (URL: <http://pdg.lbl.gov>)

Citation: W.-M. Yao et al. (Particle Data Group), J. Phys. G 33, 1 (2006) and 2007 partial update for edition 2008 (URL: <http://pdg.lbl.gov>)

$f_0(600)$ BREIT-WIGNER MASS OR K-MATRIX POLE PARAMETERS

VALUE (MeV)	DOCUMENT ID	TECN	COMMENT
(400-1200) OUR ESTIMATE			
513±32	23	MURAMATSU 02	CLEO $e^+e^- \approx 10$ GeV
••• We do not use the following data for averages, fits, limits, etc. •••			
478 ⁺²⁴ ₋₂₃ ±17	AITALA	01B	E791 $D^+ \rightarrow \pi^-\pi^+\pi^+$
563 ⁺⁵⁸ ₋₂₉	24	ISHIDA	01 $\Upsilon(3S) \rightarrow \Upsilon\pi\pi$
555	25	ASNEN	00 CLE2 $\tau^- \rightarrow \pi^-\pi^0\pi^0\nu_\tau$
540±36	ISHIDA	008	008 $p\bar{p} \rightarrow \pi^0\pi^0\pi^0$
750±4	ALEKSEEV	99	SPEC 1.78 $\pi^-\rho$ polar $\rightarrow \pi^-\pi^+n$
744±5	ALEKSEEV	98	SPEC 1.78 $\pi^-\rho$ polar $\rightarrow \pi^-\pi^+n$
759±5	26	TROYAN	98 5.2 $np \rightarrow np\pi^+\pi^-$
780±30	ALDE	97	GAM2 450 $pp \rightarrow pp\pi^0\pi^0$
585±20	27	ISHIDA	97 $\pi\pi \rightarrow \pi\pi$
761±12	28	SVEEC	96 RVUE 6-17 πN polar $\rightarrow \pi^+\pi^-N$
~ 860	29-30	TORNQVIST	96 RVUE $\pi\pi \rightarrow \pi\pi, K\bar{K}, K\pi, \eta\pi$
~ 1165±50	31,32	ANISOVICH	95 RVUE $\pi^-\rho \rightarrow \pi^0\pi^0n, \pi^0\eta, \pi^0\eta\eta$
~ 1000	33	ACHASOV	94 RVUE $\pi\pi \rightarrow \pi\pi$
414±20	28	AUGUSTIN	89 DM2

- 23 Statistical uncertainty only.
 24 A similar analysis (KOMADA 01) finds 526⁺⁴⁸ MeV.
 25 From the best fit of the Dalitz plot.
 26 6 σ effect, no PWA.
 27 Reanalysis of data from HYAMS 73, GRAYER 74, SRINIVASAN 75, and ROSSELET 77 using the interfering amplitude method.
 28 Breit-Wigner fit to S-wave intensity measured in $\pi N \rightarrow \pi^-\pi^+N$ on polarized targets. The fit does not include $f_0(980)$.
 29 Uses data from ASTON 98, OCHS 73, HYAMS 73, ARMSTRONG 91B, GRAYER 74, CASON 83, ROSSELET 77, and BEIER 72B. Coupled channel analysis with flavor symmetry and all light two-pseudoscalars systems.
 30 Also observed by ASNEN 00 in $\tau^- \rightarrow \pi^-\pi^0\pi^0\nu_\tau$ decays.
 31 Uses $\pi^0\pi^0$ data from ANISOVICH 94, AMSLER 94D, and ALDE 95B. $\pi^+\pi^-\pi^0$ data from OCHS 73, GRAYER 74 and ROSSELET 77, and 177 data from ANISOVICH 94.
 32 The pole is on Sheet III. Demonstrates explicitly that $f_0(600)$ and $f_0(1370)$ are two different poles.
 33 Analysis of data from OCHS 73, ESTABROOKS 75, ROSSELET 77, and MUKHIN 80.

$f_0(600)$ BREIT-WIGNER WIDTH

VALUE (MeV)	DOCUMENT ID	TECN	COMMENT
(600-1000) OUR ESTIMATE			
335±67	34	MURAMATSU 02	CLEO $e^+e^- \approx 10$ GeV
••• We do not use the following data for averages, fits, limits, etc. •••			
324 ⁺⁴² ₋₄₀ ±21	AITALA	01B	E791 $D^+ \rightarrow \pi^-\pi^+\pi^+$
372 ⁺²⁹ ₋₉₅	35	ISHIDA	01 $\Upsilon(3S) \rightarrow \Upsilon\pi\pi$
540	36	ASNEN	00 CLE2 $\tau^- \rightarrow \pi^-\pi^0\pi^0\nu_\tau$
372±80	ISHIDA	008	008 $p\bar{p} \rightarrow \pi^0\pi^0\pi^0$
119±13	ALEKSEEV	99	SPEC 1.78 $\pi^-\rho$ polar $\rightarrow \pi^-\pi^+n$
77±22	ALEKSEEV	98	SPEC 1.78 $\pi^-\rho$ polar $\rightarrow \pi^-\pi^+n$
35±12	37	TROYAN	98 5.2 $np \rightarrow np\pi^+\pi^-$
780±60	ALDE	97	GAM2 450 $pp \rightarrow pp\pi^0\pi^0$
385±70	38	ISHIDA	97 $\pi\pi \rightarrow \pi\pi$
290±54	39	SVEEC	96 RVUE 6-17 πN polar $\rightarrow \pi^+\pi^-N$
~ 860	40,41	TORNQVIST	96 RVUE $\pi\pi \rightarrow \pi\pi, K\bar{K}, K\pi, \eta\pi$
~ 460±40	42,43	ANISOVICH	95 RVUE $\pi^-\rho \rightarrow \pi^0\pi^0n, \pi^0\eta, \pi^0\eta\eta$
~ 3200	44	ACHASOV	94 RVUE $\pi\pi \rightarrow \pi\pi$
494±58	39	AUGUSTIN	89 DM2

- 34 Statistical uncertainty only.
 35 A similar analysis (KOMADA 01) finds 301⁺¹⁴⁵ MeV.
 36 From the best fit of the Dalitz plot.
 37 6 σ effect, no PWA.
 38 Reanalysis of data from HYAMS 73, GRAYER 74, SRINIVASAN 75, and ROSSELET 77 using the interfering amplitude method.
 39 Breit-Wigner fit to S-wave intensity measured in $\pi N \rightarrow \pi^-\pi^+N$ on polarized targets. The fit does not include $f_0(980)$.
 40 Uses data from ASTON 98, OCHS 73, HYAMS 73, ARMSTRONG 91B, GRAYER 74, CASON 83, ROSSELET 77, and BEIER 72B. Coupled channel analysis with flavor symmetry and all light two-pseudoscalars systems.
 41 Also observed by ASNEN 00 in $\tau^- \rightarrow \pi^-\pi^0\pi^0\nu_\tau$ decays.
 42 Uses $\pi^0\pi^0$ data from ANISOVICH 94, AMSLER 94D, and ALDE 95B. $\pi^+\pi^-\pi^0$ data from OCHS 73, GRAYER 74 and ROSSELET 77, and 177 data from ANISOVICH 94.
 43 The pole is on Sheet III. Demonstrates explicitly that $f_0(600)$ and $f_0(1370)$ are two different poles.
 44 Analysis of data from OCHS 73, ESTABROOKS 75, ROSSELET 77, and MUKHIN 80.

Резонансная особенность при массе $M_{\gamma\gamma} = 360 \text{ МэВ}/c^2$ была обнаружена в спектре эффективных масс 2γ -квантов в dC -взаимодействиях при импульсе $2,75 \text{ ГэВ}$ на нуклон [21].

В распределении эффективных масс 2γ -квантов в двухметровой пропановой камере обнаружены эффекты при $M_{\gamma\gamma} = 350 \text{ МэВ}/c^2$. В импульсном распределении γ -квантов обнаружены пики, которые можно объяснить, если предположить, что образуются резонансы при массах $M_{\gamma\gamma} = 350 \text{ МэВ}/c^2$, которые распадаются на два γ -кванта [22].

Недавно скалярный полюс при массе $489 \text{ МэВ}/c^2$ был обнаружен при фазовом анализе событий от распада K_s^0 -мезонов на два π -мезона и четыре лептона [23]. Однако ширина резонанса очень большая: $\Gamma/2 = 264 \text{ МэВ}/c^2$. Также наблюдался полюс в системе $\pi^+\pi^-$ при массе $478 \text{ МэВ}/c^2$ в распаде $D^+ \rightarrow \pi^+\pi^+\pi^+$ [24]

Наконец, мы приводим таблицу из PDG (таблицы 3.1, 3.2) с результатами K -матричного анализа ряда экспериментов по поиску маломассовых $\pi^+\pi^-$ -особенностей. Заметим, кстати, что в эту же таблицу составителями внесены (с отметкой «по PWA») и наши данные из [12], касающиеся резонанса с массой $M_{\pi^+\pi^-} = 762 \text{ МэВ}/c^2$ и полученные в прямом исследовании массового спектра. Отметим, что данные K -матричного анализа хорошо совпадают с нашими наблюдениями, за исключением ширин резонансов.

5. ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ СКАЛЯРНЫХ РЕЗОНАНСОВ

Мы предприняли попытку феноменологического описания последовательности скалярных ($f_0(\sigma_0)$) резонансов с учетом как полученных нами резонансов, так и данных, приведенных в PDG.

Из анализа всех данных видно, что расстояния между резонансами изменяются довольно сложным образом. Это наводит на мысль о существовании нескольких траекторий, описывающих увеличивающиеся массы резонансов.

Для аппроксимации выбрана форма

$$M_n = M_0 + x \frac{n(n+1)}{2}, \quad (1)$$

где M_0 — начальное возбуждение траектории; x — параметр возбуждения; n — номер резонанса на траектории. Член вида $\frac{n(n+1)}{2}$ возникает при суммировании членов натурального ряда чисел от 1 до n . Таким образом, масса резонанса номера n может быть представлена схематически (рис. 10) в виде суммы последовательности возбуждений силой x . Просуммировав все цепочки, получим форму (1).

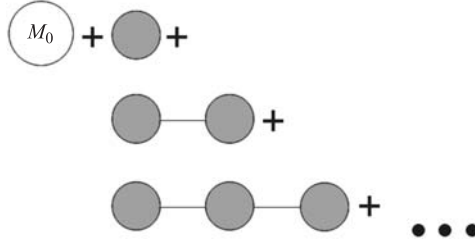


Рис. 10. Схематическое представление, согласно форме (1), массы резонанса номера n в виде суммы последовательности возбуждений силой x

Таблица 4. Вычисленные значения масс резонансов в зависимости от номера n для каждой из построенных четырех последовательностей резонансов. Первая колонка содержит номер резонанса n в последовательности i , вторая — показывает сумму членов натурального ряда чисел от 1 до n , третья — вычисленные значения масс, четвертая — экспериментальные значения масс скалярных резонансов как из нашего эксперимента, так и из PDG, с ошибками

Траектория 1: $M_n = 305 + 120 \frac{n(n+1)}{2}$				Траектория 2: $M_n = 350 + 136 \frac{n(n+1)}{2}$			
n	$n(n+1)/2$	$M_{n \text{ calc}}$	$M \pm \Delta M_{\text{exp}}$	n	$n(n+1)/2$	$M_{n \text{ calc}}$	$M_{\text{exp}} \pm \Delta M_{\text{exp}}$
0	0	305		0	0	350	353 ± 6
1	1	425	408 ± 5	1	1	486	489 ± 4
2	3	665	678 ± 3	2	3	758	764 ± 18
3	6	1025	1036 ± 10	3	6	1166	1168 ± 11
4	10	1505	1505 ± 6	4	10	1710	1724 ± 7
5	15	2105	2103 ± 8	5	15	1290	2330 ± 20

Траектория 3: $M_n = 420 + 158 \frac{n(n+1)}{2}$				Траектория 4: $M_n = 485 + 170 \frac{n(n+1)}{2}$			
n	$n(n+1)/2$	$M_{n \text{ calc}}$	$M_{\text{exp}} \pm \Delta M_{\text{exp}}$	n	$n(n+1)/2$	$M_{n \text{ calc}}$	$M_{\text{exp}} \pm \Delta M_{\text{exp}}$
0	0	420	408 ± 5	0	0	485	489 ± 4
1	1	578	585 ± 6	1	1	655	678 ± 3
2	3	894	876 ± 4	2	3	995	980 ± 10
3	6	1368	1370	3	6	1505	1505 ± 6
4	10	2000	1992 ± 16	4	10	2185	2189 ± 13

Нами были построены четыре последовательности резонансов, для которых подобраны значения M_0^i и x^i (здесь i — номер последовательности).

В табл. 4 приведены вычисленные значения масс резонансов в зависимости от номера n для каждой из последовательностей, указаны начальные возбуждения M_0^i и возбуждения кластеров x^i и приведены экспериментальные значения масс скалярных резонансов как из нашего эксперимента, так и из PDG.

Сформированные четыре траектории содержат все без исключения наши резонансы и скалярные резонансы, отмеченные в PDG. Мы ограничились массами до 2400 МэВ/c², так как далее данные очень неопределенные.

Подобранные траектории отображены на рис. 11, где по оси абсцисс отложено значение $K = \frac{n(n+1)}{2}$, по оси ординат — массы $f_0(\sigma_0)$ -мезонов из наших (отмечены +) данных и из PDG (отмечены x). Экспериментальные значения приведены на рисунке справа. Величины экспериментальных ошибок покрываются размерами отметок на графике.

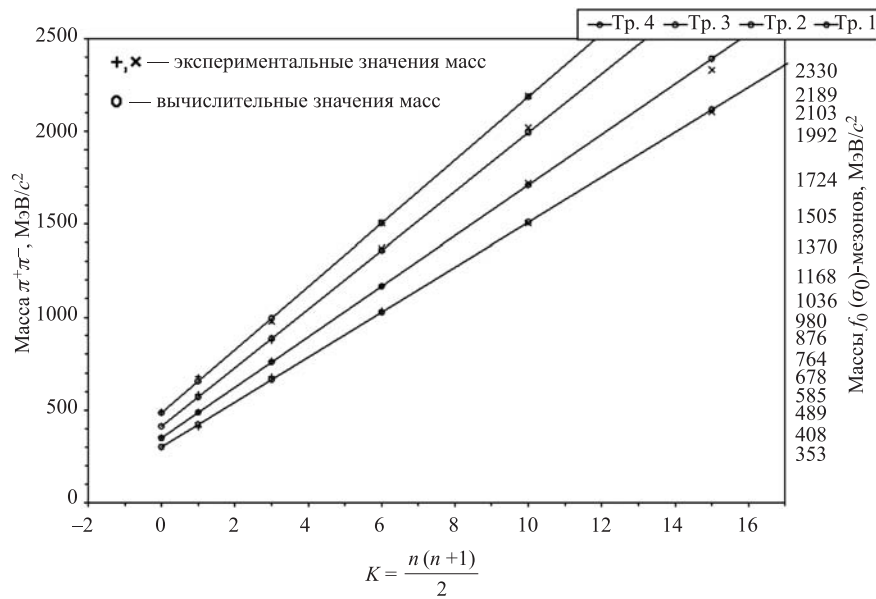


Рис. 11. Графическое представление подобранных траекторий согласно табл. 4. По оси абсцисс отложено значение $K = \frac{n(n+1)}{2}$, по оси ординат — массы $f_0(\sigma_0)$ -мезонов из наших (отмечены +) данных и из PDG (отмечены x). Номера траекторий (справа налево) показаны над графиком. Экспериментальные значения приведены справа от графика. Величины экспериментальных ошибок покрываются размерами отметок на графике

Как из табл. 4, так и из графика на рис. 11 видно очень хорошее совпадение вычислений с помощью формулы (1) с экспериментом во всем диапазоне масс $\pi^+\pi^-$ от суммы масс (280 МэВ/c²) до массы 2400 МэВ/c².

Таким образом, можно думать, что резонанс с номером n содержит целую последовательность возбуждений кластеров, эффект от которых складывается и дает суммарное возбуждение скалярного поля.

6. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

- Нами наблюдается серия резонансов в системе $\pi^+\pi^-$ -мезонов в реакции $np \rightarrow np\pi^+\pi^-$ при $P_n = (5,20 \pm 0,12)$ ГэВ/с с квантовыми числами σ_0 -мезона $0^+(0^{++})$ и с массами, лежащими в области $M \leq 1200$ МэВ/с². Данные о таких резонансах практически отсутствуют.

- Ширины найденных особенностей достаточно малы. Это резко противоречит данным экспериментов, обработанных с помощью фазового анализа, в котором получены ширины в несколько сотен МэВ/с². Такие широкие резонансы в нашем эксперименте мы наблюдать не могли бы.

- Статистические значимости наблюдаемых нами особенностей после применения критерия $\cos \Theta_p^* > 0$ и отбора событий в соответствующих (для каждого эффекта) диапазонах $X_{\pi^+\pi^-}^*$ значительны ($\geq 5S.D.$).

- Резонансы возникают, по-видимому, в рассеянии π^+ на π^- . При этом происходит упорядоченное возбуждение скалярных полей.

- Исследование свойств σ_0 -мезонов в горячей и плотной среде даст много информации о свойствах такой среды. Таким образом, исследование σ_0 -мезонов крайне важно как для проекта NICA/MPD, так и для экспериментов с ядерными пучками на всех ускорителях мира.

- Мы не видим распада резонанса f_0 с массой $M = 980$ МэВ/с², а видим, скорее, провал в распределении масс $\pi^+\pi^-$ в этом месте. Это наводит на мысль о том, что резонанс $f_0(980)$ в нашем эксперименте замаскирован пороговым эффектом рождения пары K^+K^- -мезонов.

Благодарности. Мы благодарим проф. В.Л. Любошица за значительную помощь в нашей работе, проф. А.И. Малахова и проф. С. Вокала за интерес к работе и ее пропаганду, д-ра М.В. Токарева за полезные обсуждения, д-ра П. Палацци за интерес к нашим работам.

Работа выполнена в ЛФВЭ ОИЯИ в рамках темы 03-1-0983-92/2007.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ericson T., Weise W.* Pions and Nuclei. Clarendon Press, Oxford, 1988.
2. *Pennington M.R.* // Proc. of the 11th International Conference on Meson–Nucleon Physics and Structure of the Nucleon, 10–14 September, FZJ, Juelich, 2007; [http://arXiv:0711.1435v1\[hep-ph\]](http://arXiv:0711.1435v1[hep-ph])
3. *Yao W.-M. et al.* // Particle Data Group, J. Phys. G. 2006. V. 33. P. 1; http://pdg.lbl.gov/2007/reviews/scalar_m014.pdf
4. *Arkhipov A.A.* Preprint No. 2002–43, ИИЭП, Protvino, 2002; <http://arXiv:hep-ph/0208215>
5. *Гареев Ф.А., Казача Г.С., Рамис Ю.Л.* // ЭЧАЯ. 1996. Т. 27, вып.1. С. 98; <http://wwwinfo.jinr.ru/publish/Archive/Pepan/1996-v27/v-27-1/3.htm>

6. *Palazzi P.* Preprint p3a-2005-004, 2005;
<http://www.particlez.org/p3a/abstract/2005-004.html>
7. *Lee Hee-Jung, Kochelev N.I.* // *Phys. Lett. B.* 2006. V. 642. P. 358–365;
<http://arXiv:hep-ph/0608188v3>
8. <http://www-hades.gsi.de>
9. http://nica.jinr.ru/files/NICA_CDR.pdf
10. *Volkov M. K., Radzhabov A. E., Russakovich N. L.* // *ЯФ.* 2003. V. 66, No 5. P. 1030.
11. *Троян Ю. А. и др.* // Краткие сообщения ОИЯИ. 1998. № 5[91]. С. 33;
12. *Троян Ю. А. и др.* // Письма в ЭЧАЯ. 2000. № 6[103]. С. 25;
Troyan Yu. A. et al. *Part. Nucl. Lett.* 2002. No 114. P. 53;
<http://arXiv:hep-ex/0405049v4>;
Troyan Yu. A. et al. // Proc. of the XVIII ISHEPP «Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics», JINR, Dubna. September, 2006;
<http://arXiv:hep-ex/0611033v2>
13. *Gasparian A. P. et al.* JINR Preprint 1-9111. Dubna, 1975;
Гаспарян А.П. и др. // ПТЭ. 1977. Т. 2, С. 37.
14. *Moroz V.I. et al.* // *Yad. Fiz.* 1969. V. 9. P. 565.
15. *Besliu C. et al.* // *Yad. Fiz.* 1986. V. 63. P. 888.
16. *Troyan Yu. A. et al.* // *Yad. Fiz.* 2000. V. 63, No. 9. P. 1562.
17. *Ierusalimov A. P. et al.* // JINR Rapid Comm. 1989. No. 2[35]. P. 21.
18. *Troyan Yu. A. et al.* // JINR Rapid Comm. 1996. No. 6[80]. P. 73.
19. *Abashian A., Booth N. E., Growe K. M.* // *Phys. Rev. Lett.* 1960. V. 5. P. 3258;
Booth N.E., Abashian A., Growe K.M. // *Phys. Rev. Lett.* 1961. V. 7. P. 35;
Booth N.E., Abashian A., Growe K.M. // *Phys. Rev.* 1963. V. 132. P. 2309.
20. *Abdivaliev A. et al.* JINR Preprint E1-12903. Dubna, 1979.
21. *Abraamyan A. et al.* <http://arxiv.org/abs/0806.2790> [nucl-ex]
22. *Togoo R. et al.* // Proc. of the Mongolian Academy of Sciences. 2005. No. 4. V. 178, P. 45.
23. *Yndurain F. J., Garcia-Martin R., Pelaez J. R.*
<http://arXiv:hep-ph/0701025v3>
24. *Ablikin M. et al.* // *Phys. Lett. B.* 2004. V. 598. P. 149;
<http://arXiv:hep-ex/0406038v1>

Получено 4 июля 2008 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 09.09.2008.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,25. Уч.-изд. л. 1,47. Тираж 420 экз. Заказ № 56295.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/