

ИЗУЧЕНИЕ СИСТЕМЫ $\eta'\pi^+\pi^-$ В РЕАКЦИИ ПЕРЕЗАРЯДКИ ПИОНОВ НА Ве ПРИ ИМПУЛЬСЕ 29 ГэВ

Ю. А. Хохлов^{1,*} от имени группы ВЕС**

¹ Институт физики высоких энергий им. А. А. Логанова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»,
Протвино, Россия

На установке ВЕС ускорительного комплекса У-70 впервые наблюдалось образование системы $\eta'(958)\pi^+\pi^-$ в реакции перезарядки пионов. Представлены предварительные результаты исследования. Спектр инвариантной массы системы имеет характер широкого пика с максимумом около 2,2 ГэВ. Доминирует промежуточное состояние $\eta'\rho^0$. Измерено сечение реакции $\pi^-\text{Be} \rightarrow A\eta'\pi^+\pi^-$, $\Delta(1232)$, где A состоит из девяти нуклонов (трех протонов и шести нейтронов) или из восьми нуклонов и изобары $\Delta(1232)$.

The first observation of the $\eta'(958)\pi^+\pi^-$ system in the charge-exchange reaction of pions with the VES setup of the U-70 accelerator is reported. The preliminary results of the study are presented. The invariant mass spectrum has a wide maximum at about 2.2 GeV. The $\eta'\rho^0$ intermediate state dominates. The cross section is measured for the reaction $\pi^-\text{Be} \rightarrow A\eta'\pi^+\pi^-$, $\Delta(1232)$, where A presents nine nucleons (three protons and six neutrons) or eight nucleons and $\Delta(1232)$ isobar.

PACS: 13.85.-t; 14.40.Be; 13.25.-k

ВВЕДЕНИЕ

Система $\eta'\pi^+\pi^-$ вызывает интерес по ряду причин. Мезон $\eta'(958)$ занимает особое место в нонете псевдоскаляров: его большая масса обусловлена аномалией [1–3], определяющей основные характеристики мезона. В связи с этим интересны свойства его радиальных возбуждений, потенциально ожидаемых в канале $\eta'\pi^+\pi^-$. Этот же канал рассматривается в теоретических работах в качестве одного из основных для распада псевдоскалярного глюбола [4]. Сравнение резонансных структур в системах $\eta'\pi^+\pi^-$ и $\eta\pi^+\pi^-$ может помочь в поисках гибридов, в первую очередь в связи с возможным проявлением $q\bar{q}$ экзотического состояния $J^{PC} = 1^{-+}$ в подсистемах $\eta'\pi$ и $\eta\pi$.

* E-mail: Yury.Khokhlov@ihep.ru

** А. П. Власенко, В. Г. Готман, В. А. Дорофеев, Р. Р. Загитов, А. М. Зайцев, А. Н. Карюхин, И. А. Качаев, В. И. Лисин, В. Д. Матвеев, А. П. Плеханов, Д. И. Рябчиков, А. А. Солодков, Е. А. Старченко, В. П. Сугоняев, А. А. Шумаков.

Экспериментальные данные по $\eta'\pi^+\pi^-$ немногочисленны [5] и по большей части получены в e^+e^- , а также в $p\bar{p}$ -столкновениях. В данной работе представлено первое наблюдение этой системы в перезарядке пионов на ядерной мишени. Измерения проведены на установке ВЕС. Установка, отбор событий и основные характеристики реакции описаны в разд. 1. Разд. 2 посвящен измерению сечения двух каналов реакции. Предварительные результаты обсуждаются в разд. 3.

1. ОТБОР СОБЫТИЙ И ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕАКЦИИ

В анализе использованы данные с модернизированной установки ВЕС [6], представляющей собой широкоапертурный магнитный спектрометр с детектором γ -квантов, расположенный на вторичном пучке ускорительного комплекса У-70 НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ. Данные накоплены в семи экспозициях в 2012–2015 и в 2022–2024 гг. при импульсе пучка 29 ГэВ. Интегральный поток за «живое» время эксперимента составил около $2,8 \cdot 10^{11}$ пучковых частиц, преимущественно пионов.

Набор событий проводился по триггерному решению из трех компонент: BEAM — наличие пучковой частицы до мишени; MWG (от Main Without Guard, см. ниже) — выбывание пучковой частицы в результате взаимодействия с веществом на пути к счетчикам, расположенным на отклоненном пучке после магнитного спектрометра; MAIN = MWG $\times$ $\times$ VETO — взаимодействие пучка без фрагментации в кинематической области мишени. Вспомогательные решения BEAM и MWG разрежены с соответствующими коэффициентами. Если не указано явно, то используются события основного решения MAIN.

Изучается реакция

$$\pi^- {}^9\text{Be} \rightarrow A\eta'(958)\pi^+\pi^- \quad (1)$$

с $\eta' \rightarrow \pi^+\pi^-\eta$, $\eta \rightarrow 2\gamma$. Здесь A состоит из девяти нуклонов и, возможно, мягких пионов.

Отбираются события с пучковой частицей, четырьмя вторичными частицами с соответствующими зарядами, с общей вершиной пяти треков в объеме мишени и двумя γ -квантами с энергией каждого $E_\gamma > 200$ МэВ. В спектре инвариантной массы $M_{\gamma\gamma}$ наблюдается гауссовский пик с параметрами $M_\eta = 549,3$ МэВ и $\sigma_\eta = 17,0$ МэВ. События из области $M_\eta \pm 2\sigma_\eta$ считаются содержащими η . Комбинаторный спектр масс $\pi^+\pi^-\eta$ демонстрирует пик с $M_{\eta'} = 961$ МэВ, $\sigma_{\eta'} = 4,4$ МэВ на небольшом фоне. Комбинация из области $M_{\eta'} \pm 2\sigma_{\eta'}$, ближайшая по массе к $M_{\eta'}$, принимается за η' , соответствующие события являются сигнальными. События из полос шириной по $2\sigma_{\eta'}$ с обеих сторон от сигнальной области рассматриваются как фон не- η' . На рис. 1 показан спектр масс $\eta' 2\pi$ для событий с вычтенным фоном. В спектре $M_{\pi^+\pi^-}$ (рис. 2) доминирует сигнал мезона ρ . В спектрах $M_{\eta'\pi^\pm}$ значимых структур не видно. Таким

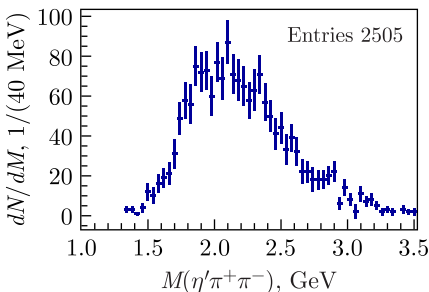


Рис. 1. Спектр масс $\eta'\pi^+\pi^-$ сигнальных событий с вычтенным фоном не- η'

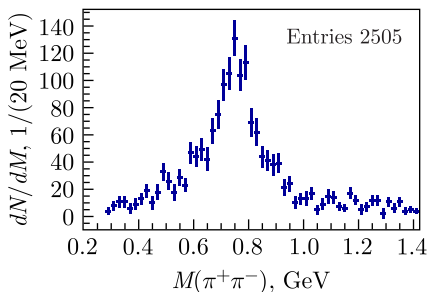


Рис. 2. Спектр масс $\pi^+\pi^-$ для отобранных событий $\eta'\pi^+\pi^-$

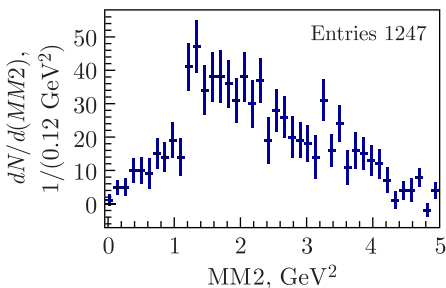


Рис. 3. Спектр квадрата недостающей массы для событий с $\eta'\pi^+\pi^-$ в триггере MWG

образом, изучаемая система образуется в основном в изовекторном состоянии $\rho\eta'$.

Частицы отдачи в области фрагментации мишени не изменяются. Их параметры характеризуются квадратом недостающей массы события $MM^2 = (\vec{P}_{\text{beam}} + \vec{P}_{\text{target}} - \vec{P}_{\eta'2\pi})^2$, где шляпка обозначает 4-вектор. На рис. 3 приведен спектр MM^2 , вычисленный в модели с покоящимся нуклоном в качестве мишени для событий, прошедших

перечисленные выше отборы, с триггером MWG. Спектр складывается из компонент с разным составом отдачи, размытых разрешением (см. разд. 2). Нуклонная компонента в области M_N^2 составляет малую часть, доминируют процессы с барионными возбуждениями.

В триггере MAIN события с большой недостающей массой (рис. 4) кратно подавлены вето, но тем не менее составляют значительную часть спектра. В данной работе анализируются события с $0 < MM^2 < 2 \text{ ГэВ}^2$, соответствующие областям нуклона и $\Delta(1232)$. Данные рис. 1 и 2 представлены с применением этого отбора.

На рис. 5 показано распределение сигнальных событий по углу Треймана-Янга для 2π в с.ц.м. $\eta'2\pi$, а на рис. 6 — по $t' = |t| - |t|_{\min}$, где t — квадрат переданного импульса от пучка к мишени, $|t|_{\min}$ — его минимальное значение. В кинематике изучаемой реакции $|t|_{\min}$ мало, так что в дальнейшем мы пренебрегаем различием t' и $|t|$. Система $\eta'2\pi$ с положительной G -четностью может рождаться в однопионном обмене (ОПО). Близкое к равномерному распределение по углу Треймана-Янга и узкий характер t -распределения не противоречат доминированию ОПО.

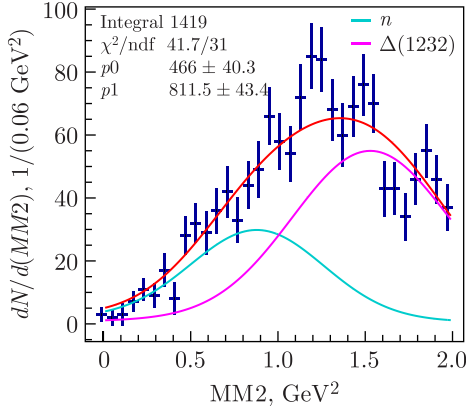


Рис. 4. Гистограмма — спектр квадрата недостающей массы для событий с $\eta'\pi^+\pi^-$ в триггере MAIN. Кривые — результат подгонки (см. разд. 2), показаны две компоненты и их сумма

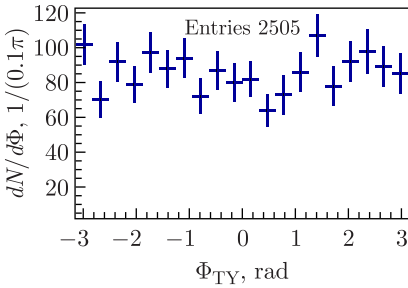


Рис. 5. Распределение событий по углу Треймана-Янга для пары $\pi^+\pi^-$

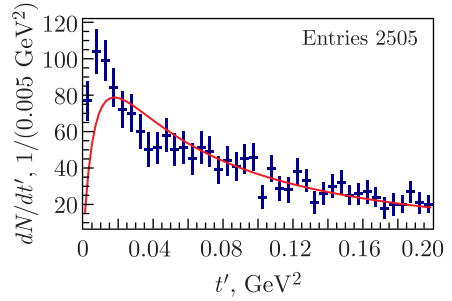


Рис. 6. Распределение событий по квадрату переданного импульса. Кривая — подгонка формулой ОПО с нуклоном в конечном состоянии

Подгонка t -распределения формулой ОПО для нуклона в конечном состоянии $\frac{dN}{dt} \propto \frac{t e^{\beta t}}{(t - m_\pi^2)^2}$ оставляет место для компоненты $\frac{dN}{dt} \propto \frac{e^{\beta t}}{(t - m_\pi^2)^2}$, соответствующей ОПО с образованием $\Delta_3^3(1232)$.

2. ИЗМЕРЕНИЕ СЕЧЕНИЯ

В измерении сечения [7] данной реакции основная неопределенность связана с моделью процесса, включающей две вершины t -канального взаимодействия. Модель отдачи в нижней (барионной) вершине включает вклад в реакцию (1) двух изучаемых подпроцессов:

$$\pi^- p \rightarrow n \eta' (958) \pi^+ \pi^- \quad (2)$$

и

$$\pi^- N \rightarrow \Delta(1232)\eta'(958)\pi^+\pi^-, \quad (3)$$

где $N = (p, n)$ с относительными вкладами $p : n = 4 : 5$ соответственно, $\Delta = (\Delta^0, \Delta^-)$ с параметрами $M = 1232$ МэВ, $\Gamma = 117$ МэВ. Для вершин $N\Delta\pi$ учтены изотопические коэффициенты Клебша. Азимутальный угол вылета нуклона (изобары) относительно направления пучка равномерен, а полярный угол определяется из t согласно указанным выше формулам ОПО. Распад $\Delta \rightarrow N\pi$ разыгрывается изотропно.

Углы для системы X с заданной инвариантной массой в верхней вершине следуют из углов отдачи, распада $X \rightarrow \eta' 2\pi$, $\eta' \rightarrow 2\pi\eta$ разыгрываются по трехчастичному фазовому объему.

Для эффективного описания вклада в спектр ММ2 более тяжелых барионных возбуждений, рассматриваемых далее как фон, введен условный резонанс $\Delta(1600)$ с параметрами $M = 1570$ МэВ, $\Gamma = 250$ МэВ и распадом $\Delta(1600) \rightarrow \Delta(1232)\pi \rightarrow N 2\pi$.

Интегральные вклады процессов (2), (3) и фона $\Delta(1600)$ определяются из подгонки к наблюдаемому спектру ММ2 трехкомпонентной суммы $dN/d(\text{ММ2}) = \sum_{i=1}^3 A_i f_i(\text{ММ2})$ со свободными параметрами A_i .

Для примера на рис. 7 приведена модельная функция для нуклона отдачи вида $f_1(\text{ММ2} = x) = a + bx + c \exp(-(x - M_N^2)^2/(2\sigma_1^2))$ с $\sigma_1 = 0,5$ ГэВ². В триггере MAIN вклад фона оказался совместим с нулем. Кривая двухкомпонентной подгонки показана на рис. 4. Результирующее отношение вкладов (2) к (3) с учетом отношения их эффективностей составляет $R_{n:\Delta} = 0,153 \pm 0,015$. Таким образом, сечение рождения $\eta'\pi^+\pi^-$ на ядре ${}^9\text{Be}$ с возбуждением $\Delta(1232)$ кратно превышает сечение процесса с нейтроном в конечном состоянии.

Эффективность для такой смеси $R_{n:\Delta}$ составляет менее 1%. Спектр $M_{\eta' 2\pi}$, поправленный на эффективность, приведен на рис. 8. Сечение на ядре Be для реакции (2) в указанном диапазоне t с учетом вероятности

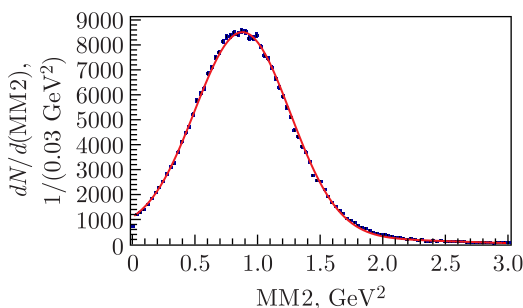


Рис. 7. Спектр квадрата недостающей массы для нуклона отдачи: модель (точки с ошибками) и аппроксимирующая функция (кривая)

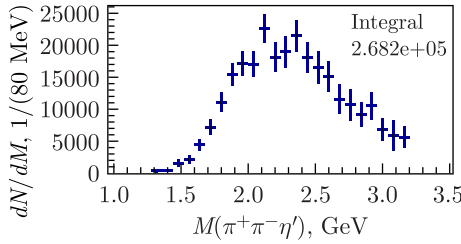


Рис. 8. Поправленный на эффективность спектр масс системы $\eta'\pi^+\pi^-$

распада $\text{Br}(\eta' \rightarrow \pi^+\pi^-2\gamma) = 0,168$ составляет

$$\sigma(\pi^-p \rightarrow n\eta'\pi^+\pi^-, |t| < 0,2 \text{ ГэВ}^2, {}^9\text{Be}) = (1,92 \pm 0,21 \text{ (стат.)}) \text{ мкб.} \quad (4)$$

Предварительная оценка систематической неопределенности, связанной в основном с неопределенностью и упрощенностью модели, — фактор 1,5.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Приведем величину (4) к сечению на протонной мишени через параметризацию $\sigma_{Zp} \approx Z^{2/3}\sigma_p$, которой хорошо следуют данные по перезарядочным реакциям на легких ядрах [8]:

$$\sigma(\pi^-p \rightarrow n\eta'\pi^+\pi^-, |t| < 0,2 \text{ ГэВ}^2) = (0,77 \pm 0,08 \text{ (стат.)}) \text{ мкб.} \quad (5)$$

Для системы с $I = 1$, $C = -1$, образующейся в $\pi\pi$ -рассеянии, естественно предположить доминирование состояний ряда $J^{PC} = 1^{--}, 3^{--}, \dots$. В похожей системе $\eta\pi^+\pi^-$ при близком импульсе пучка 27 ГэВ наибольшие интенсивности имеют $1^{--}, 3^{--}\eta\rho$ [9]. Можно оценить их сечение. Для нормировки с учетом приведенной эффективности служит пик $\eta' \rightarrow \eta\pi^+\pi^-$, сечение которого получается интерполяцией данных [10] к нужному импульсу. Оценка по диапазону масс $M_{\eta 2\pi} = 1,9\text{--}2,3$ ГэВ составляет

$$\sigma(\pi^-p \rightarrow n\rho\eta(1^{--}), |t| < 0,2 \text{ ГэВ}^2) \approx 0,6 \text{ мкб,} \quad (6)$$

$$\sigma(\pi^-p \rightarrow n\rho\eta(1^{--} + 3^{--}), |t| < 0,2 \text{ ГэВ}^2) \approx 1,8 \text{ мкб.} \quad (7)$$

Значение (5) находится в сравнимом с (6) и (7) диапазоне.

В этой области масс можно ожидать рождение мезона $\rho'(2150)$, который в различных реакциях наблюдается в [5] и, возможно, в [11]. В частности, имеются данные из e^+e^- по ρ' в каналах $\eta'\pi^+\pi^-$ [12] и $\omega\pi^0$ [13]. Из них можно получить отношение ширины

$$\begin{aligned} R^{ee} &= \Gamma(\rho' \rightarrow \eta'\rho)/\Gamma(\rho' \rightarrow \omega\pi^0), \\ R_1^{ee} &= 0,69 \pm 0,4, \quad R_2^{ee} = 0,019 \pm 0,020, \end{aligned} \quad (8)$$

где два значения соответствуют двум моделям подгонки из [12].

Используя (5), можно оценить аналогичное отношение вероятностей в реакции перезарядки. Сечение в канале $\omega\pi^0$ при 29 ГэВ получается из данных [14] при 38 ГэВ с учетом зависимости $\sigma \propto s^{-2}$: $\sigma(\pi^- p \rightarrow n\rho') \text{Br}(\rho' \rightarrow \omega\pi^0) = (0,24 \pm 0,05) \text{ мкб}$. Таким образом, в предположении определяющего вклада $\rho'(2150)$ в сечение перезарядки в $\eta'2\pi$ находим

$$R_1^{\text{ChEx}} = \frac{\text{Br}(\rho' \rightarrow \eta'\rho)}{\text{Br}(\rho' \rightarrow \omega\pi^0)} \approx 3,2, \quad (9)$$

что с учетом указанных выше неопределенностей недалеко от величины R_1^{ee} . Если по примеру $\eta'2\pi$ принять, что только $1/3$ сечения $\eta'2\pi$ относится к состоянию 1^{--} , то получим $R_2^{\text{ChEx}} \approx 1,1$, совместимое с R_1^{ee} . Ни в том, ни в другом случае наш результат не совместим со второй моделью [12].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При импульсе 29 ГэВ впервые наблюдалась зарядово-обменная реакция $\pi^- \text{Be} \rightarrow A\eta'\pi^+\pi^-$. Спектр масс $\eta'\pi^+\pi^-$ представляет собой широкий пик ($\Gamma \approx 0,7 \text{ ГэВ}$) с максимумом около 2,2 ГэВ. Доминирует вклад $\eta'\rho$. Предварительно измерено сечение на ядре ${}^9\text{Be}$:

$$\sigma(\pi^- p \rightarrow n\eta'\pi^+\pi^-, |t| < 0,2 \text{ ГэВ}^2, {}^9\text{Be}) = (1,92 \pm 0,21 \text{ (стат.)}) \text{ мкб}.$$

Характеристики процесса совместимы с гипотезой ОПО. В предположении о доминировании образования $\rho'(2150)$ оценено отношение $\text{Br}(\rho' \rightarrow \eta'\rho)/\text{Br}(\rho' \rightarrow \omega\pi^0) \approx 1-3$, не противоречащее аналогичному отношению из e^+e^- -аннигиляции.

Работа выполнена с использованием вычислительного кластера коллективного пользования ИФВЭ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 't Hooft G. // Phys. Rev. Lett. 1976. V. 8. P. 37.
2. Witten E. // Nucl. Phys. B. 1979. V. 156. P. 269.
3. Veneziano G. // Ibid. V. 159. P. 213.
4. Kochelev N., Min D. P. η_c : Glueball Mixing and Resonance $X(1835)$ // Phys. Rev. D. 2005. V. 72. P. 097502.
5. Navas S. et al. (Particle Data Group). Review of Particle Physics // Phys. Rev. D. 2024. V. 110, No. 3. P. 030001.
6. Борисов А. А. и др. Установка ВЕС. Препринт ИФВЭ 2025-04. Протвино, 2025.
7. Shumakov A. A. The Methods of Measuring the Cross Sections of the Reactions in the VES Experiment // Phys. Part. Nucl. 2025. V. 56, No. 3. P. 662–667.
8. Apokin V. D. et al. Determination of the Cross Section of the Process $\pi^+\pi^- \rightarrow \pi^0\pi^0$ in the Dipion Mass Range $0.5 < M < 2 \text{ GeV}$ from the Reaction $\pi^- p \rightarrow \pi^0\pi^0 n$ at 39.1 GeV/c // Sov. J. Nucl. Phys. 1989. V. 49. P. 278.

9. *Amelin D. V. et al. (VES Group)*. Natural Parity Resonances in $\eta\pi^+\pi^-$ // Nucl. Phys. A. 2000. V. 668. P. 83–96.
10. *Apel W. D. et al. (Serpukhov–CERN Collab.)*. Reaction $\pi^-p \rightarrow \eta'n$ in the 15–40 GeV/c Momentum Range // Phys. Lett. B. 1979. V. 83. P. 131.
11. *Dorofeev V. A. et al. (VES Group)*. Study of the $\phi\pi^0$ -System Production in the Charge Exchange Reaction of the 29 GeV Pion Beam with the Beryllium Target of the VES Setup // Phys. Part. Nucl. Lett. 2025. V. 22, No. 1. P. 131–136.
12. *Ablikim M. et al. (BESIII Collab.)*. Measurement of the Born Cross Sections for $e^+e^- \rightarrow \eta'\pi^+\pi^-$ at Center-of-Mass Energies between 2.00 and 3.08 GeV // Phys. Rev. D. 2021. V. 103, No. 7. P. 072007.
13. *Ablikim M. et al. (BESIII Collab.)*. Observation of a Resonant Structure in $e^+e^- \rightarrow \omega\eta$ and Another in $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0$ at Center-of-Mass Energies between 2.00 and 3.08 GeV // Phys. Lett. B. 2021. V. 813. P. 136059.
14. *Alde D. et al. (GAMS Collab.)*. Partial Wave Analysis of the $\omega\pi^0$ System at High Masses // Nuovo Cim. A. 1994. V. 107. P. 1867–1874.