

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ, ПУЧКОВ ЧАСТИЦ И ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

УДК 539.126.4

ПОИСК СКАЛЯРНОГО РЕЗОНАНСА В СИСТЕМЕ $\omega\phi$ В ПИОН-ЯДЕРНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ПРИ ИМПУЛЬСЕ 29 ГэВ/с

© 2020 г. М. С. Холоденко* от группы ВЕС

Институт физики высоких энергий Национального исследовательского центра "Курчатовский институт",
Протвино, Московская обл., 142281 Россия

*E-mail: marina.kholodenko@ihep.ru

Поступила в редакцию 07.08.2020 г.

После доработки 11.08.2020 г.

Принята к публикации 11.08.2020 г.

Изучена реакция перезарядки $\pi^- p \rightarrow \pi\omega(783)\phi(1020)$, $\omega \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$, $\phi \rightarrow K^+K^-$ на модернизированной установке ВЕС (У-70, Протвино) при взаимодействии пучка π -мезонов с импульсом 29 ГэВ/с с бериллиевой мишенью. Отобрано 905 событий $\omega\phi$ -системы. В распределении по инвариантной массе $\omega\phi$ -системы $M_{\omega\phi}$ наблюдается околороговый сигнал с массой $M \sim 1.9$ ГэВ/ c^2 . В результате пятичастичного парциально-волнового анализа (ПВА) обнаружено доминирование в этой области масс скалярного состояния ($J^{PC} = 0^{++}$). В предположении резонансной природы сигнала его масса и ширина определены как $M = 1814 \pm 31$ МэВ/ c^2 , $\Gamma = 182 \pm 19$ МэВ/ c^2 .

Ключевые слова: векторный мезон, эксперимент ВЕС, ИФВЭ-Протвино, фиксированная мишень, парное рождение, спектр масс: ($\phi(1020)\omega(783)$), околороговое образование: (1810), парциально-волновой анализ, масса-ширина, спин-четность, экспериментальный результат, $\phi(1020) \rightarrow K^+K^-$, $\omega(783) \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$

DOI: 10.1134/S2079562920040065

1. ВВЕДЕНИЕ

Сектор легких скалярных мезонов занимает особое место в мезонной спектроскопии. Существует неопределенность и избыточность состава одного $SU(3)$ нонета в области скалярных мезонов до 2 ГэВ: $f_0(1370)$, $f_0(1500)$, $f_0(1710)$, $f_0(1790)$, $f_0(1800)$. Возможно некоторые из этих состояний имеют отличную от $q\bar{q}$ структуру: 4-х кварковая структура, мезонная молекула и др. ([1, 2]).

Околороговый сигнал в спектре инвариантной массы $\omega\phi$ системы впервые наблюден в реакции $e^+e^- \rightarrow J/\psi \rightarrow \gamma\omega\phi$ в экспериментах BESII [3], BESIII [4], сигнал интерпретирован как скаляр $X(1800)$, но не исключен эффект взаимодействия в конечном состоянии, околороговый эффект (threshold cusp), хвост от $f_0(1710)$. В связи с этим актуально изучение данного процесса в другой реакции.

Подобный сигнал также был наблюден при взаимодействии пучка пионов с импульсами 27 и 36 ГэВ/с с бериллиевой мишенью в реакции $\pi^- p \rightarrow \phi\omega\pi$ в эксперименте ВЕС [5].

2. ЭКСПЕРИМЕНТ ВЕС

Эксперимент ВЕС расположен на ускорителе У-70 (Протвино) и работает со вторичным пучком π^- мезонов с импульсом 29 ГэВ/с. ВЕС — комбинированная установка с фиксированной мишенью для регистрации многочастичных конечных состояний заряженных частиц и фотонов, состоит из широко — апертурного магнитного спектрометра, электромагнитного калориметра, черенковских счетчиков для идентификации заряженных продуктов реакции и пучковой частицы, бериллиевой мишени толщиной 4 см ($\sim 10\%$ ядерной длины взаимодействия) и охранной системы. Проведена модернизация установки ВЕС ([6, 7]). Полный поток пучковых частиц через мишень за время используемых в анализе экспозиций составил $1.73 \cdot 10^{11}$.

3. ОТБОР СОБЫТИЙ

Рассмотрены события реакции $\pi^- p \rightarrow \omega\phi\pi$ с $\omega \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ и $\phi \rightarrow K^+K^-$, полученные на модернизированной установке ВЕС. Отобраны события с четырьмя реконструированными заряжен-

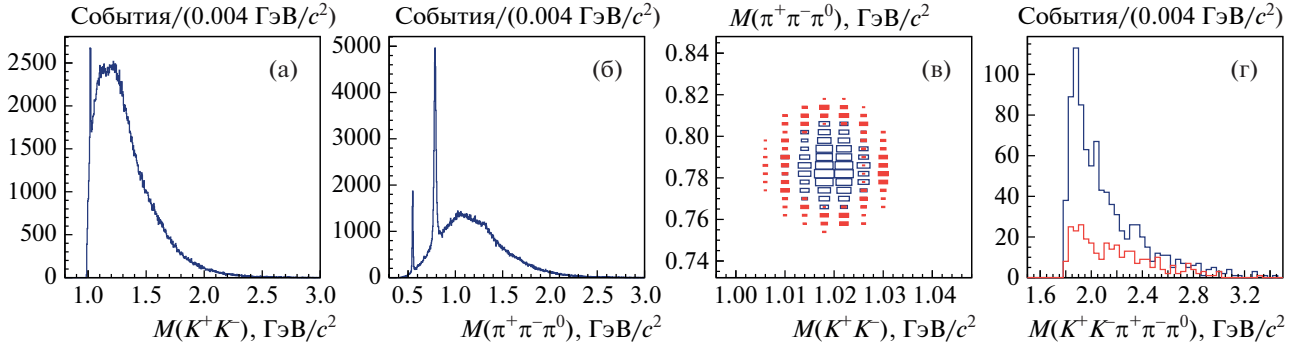


Рис. 1. Спектры инвариантных масс $M(K^+K^-)$ (а), $M(\pi^+\pi^-\pi^0)$ (б), $M(K^+K^-\pi^+\pi^-\pi^0)$ в сигнальной области (синим) (в) и вне (красным) (г).

ными треками (два положительно заряженных, два отрицательно заряженных) и двумя либо тремя γ -квантами. π^0 -мезоны зарегистрированы в $\gamma\gamma$ -мод. Для отобранных пар γ -квантов выполнен кинематический 1С фит к массе π^0 -мезона. Используя многоканальный черенковский счетчик отобранные события, содержащие $K^+K^-\pi^+\pi^-$ в конечном состоянии. Передача импульса в t -канале мала (квадрат переданного импульса $|t| < 1 \text{ ГэВ}^2/c^2$), поэтому в (квази)эксклюзивной реакции без учета частицы отдачи сумма импульсов всех частиц должна быть близка к импульсу пучка. В данном анализе наложено требование на суммарный импульс всех частиц системы $K^+K^-\pi^+\pi^-\pi^0$: $27.5 < P_{\text{tot}} < 31.0 \text{ ГэВ}/c$.

На рис. 1 представлены распределения по инвариантным массам K^+K^- (а) и $\pi^+\pi^-\pi^0$ (б), видны сигналы $\phi(1019)$ и $\omega(783)$ мезонов соответственно. Событие принимается, если массы ω , ϕ мезонов удовлетворяют эллиптическому отбору $\frac{(M_{\pi^+\pi^-\pi^0} - M_\omega)^2}{\delta_1^2} + \frac{(M_{K^+K^-} - M_\phi)^2}{\delta_2^2} < 1$, где $M_{K^+K^-}$ и $M_{\pi^+\pi^-\pi^0}$ — инвариантные массы частиц K^+K^- и $\pi^+\pi^-\pi^0$ соответственно, а $\delta_1 = 22 \text{ МэВ}/c^2$ и $\delta_2 = 8.8 \text{ МэВ}/c^2$ — выбраны в соответствии с аппаратной шириной сигналов ω и ϕ мезонов. Также для событий, удовлетворяющих всем условиям отбора, представлено распределение по массе $M(\omega\phi)$ (рис. 1г — синим), в котором наблюдается околороговый сигнал с $M \sim 1.9 \text{ ГэВ}/c^2$.

Чтобы убедиться, что наблюдаемый околороговый сигнал не является фоновым процессом, проведена оценка фона. Для этого отбирались события, удовлетворяющие всем критериям отбора, за исключением эллиптического обрезания на массы ω и ϕ -мезонов (выбирается область вне эл-

липса, фон от не ω , не ϕ -мезонов). Форма распределения по инвариантной массе $M(\omega\phi)$ в данной области (рис. 1г — красным) сильно отличается от сигнальной области, околороговый сигнал не наблюдается.

Для отобранных событий с $M(\omega\phi) < 1.975 \text{ ГэВ}/c^2$ на рис. 2а показано распределение величины

$$\lambda = \frac{[p_\pi^-, p_\pi^+]}{\lambda_{\text{max}}} \quad (\text{в спиральной системе центра масс}$$

$$\omega\text{-мезона}), \quad \lambda_{\text{max}} = Q^2 \left(\frac{Q^2}{108} + \frac{m_\pi Q}{9} + \frac{m_\pi^2}{3} \right),$$

$Q = T_{\pi^+} + T_{\pi^-} + T_{\pi^0}$ (T -кинетическая энергия пионов), которое характеризует количество фоновых событий под ω -мезоном. Для сигнальных событий распределение λ характеризуется линейным ростом с пересечением 0 при $\lambda = 0$. Распределение по полярному углу каона в системе покоя ϕ -мезона (рис. 2б) соответствует ожидаемому распределению при распаде векторных мезонов. Распределение по углу θ между нормалью к распаду ω -мезона и каоном в системе покоя ϕ -мезона, представленное на рис. 2в, имеет форму $\cos^2 \theta$, что ожидается при распаде скаляра в 2 вектора с орбитальным моментом $L = 0$ (S -волна).

Проведена процедура "побинного фитирования" сигнала по переменным X : инвариантная масса системы $M(K^+K^-\pi^+\pi^-\pi^0)$, $|t|$ и P_{tot} . Построены распределения по всем переменным X , путем определения числа ω -мезонов из фита распределения по массе $M(\pi^+\pi^-\pi^0)$ для событий в полосе масс $M(K^+K^-)$ вблизи массы ϕ -мезона для каждого бина по переменной X (рис. 3а). Аналогичные распределения построены путем определения числа ϕ -мезонов. Эти два способа побинной фильтрации дают полностью совместимые результаты, что подтверждает малый уровень фона не $\omega\phi$ системы. В распределении по P_{tot} , получен-

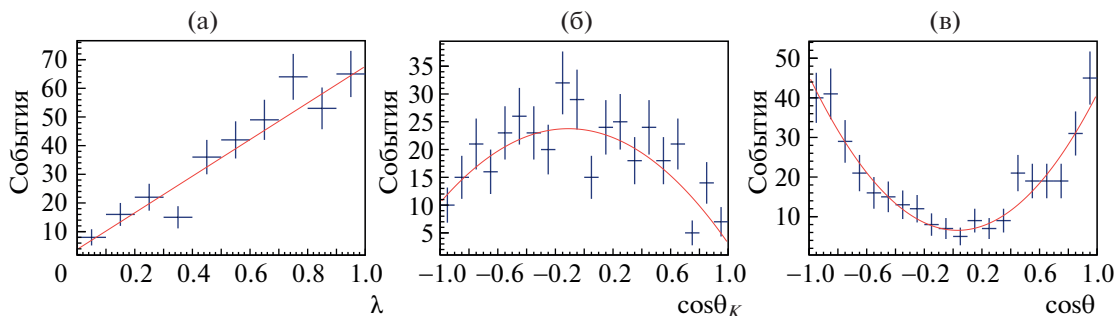


Рис. 2. Распределения для системы $\omega\phi$: (а) по нормированной длине нормали к плоскости распада ω λ ; (б) по полярному углу K^+ в системе покоя ϕ ; (в) по углу между нормалью к плоскости распада ω и каоном в системе покоя ϕ . Сплошными красными линиями показаны фиты распределений.

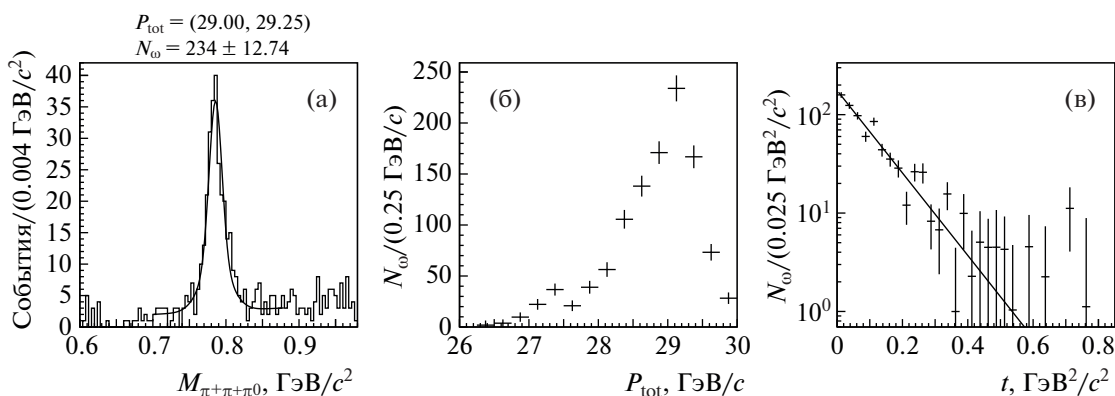


Рис. 3. (а) Фит сигнала ω -мезона для одного бина по переменной P_{tot} ; (б) и $|t|$ (в), полученные в результате побинной фильтрации.

ному побинной фильтрацией (рис. 3б), наблюдается пик, соответствующий эксклюзивному выделению изучаемой системы. Неэксклюзивный фон, проявляющийся как подложка слева от пика, составляет около 10%. Полученное распределение по $|t|$ (рис. 3в) имеет экспоненциальный вид с наклоном $-9.6 \pm 0.5 \text{ ГэВ}^{-2}/c^2$, характерным для пионного обмена.

4. ПАРЦИАЛЬНО-ВОЛНОВОЙ АНАЛИЗ

Пятичастичный ПВА системы $\omega\phi$ выполнен в диапазоне масс (1.78–3.4) $\text{ГэВ}/c^2$ с бином по массе 60 $\text{МэВ}/c^2$ в едином диапазоне по $|t|$ (0–1) $\text{ГэВ}^2/c^2$. Амплитуды построены методом нерелятивистского формализма тензоров Земаха [8]. Параметрами фита является блочно-диагональная по натуральности обмена (reflectivity — симметрия относительно плоскости рождения) матрица плотности состояний. Используется расширенный метод максимального правдоподобия для нахождения пара-

метров с учетом аксептанса установки. Амплитуды включают спектральные линии ω, ϕ -мезонов, которые определены как функции Гаусса с дисперсией, определяемой разрешением установки и превышающей собственные ширины мезонов. ПВА выполнен со следующим набором волн с квантовыми числами $J^{PC} M^\eta$, где J^{PC} — спин и P — четность, C — четность, M^η — проекционное число M и натуральность η .

- FLAT — псевдоволна с равномерным распределением по фазовому объему 5-ти частичной системы для эффективного учета фона и несовершенства модели;

- $J^{PC} M^\eta = 0^{++} 0^-, 2^{++} 0^-, 0^{-+} 0^+.$

Результаты ПВА с учетом аксептанса установки, составившего в области масс изучаемой системы около 8%, представлены на рис. 4. Интенсивности волн, полученные в результате двух анализов на установке ВЕС, полностью совместимы, доминирует волна $J^{PC} = 0^{++}$. Данные по инте-

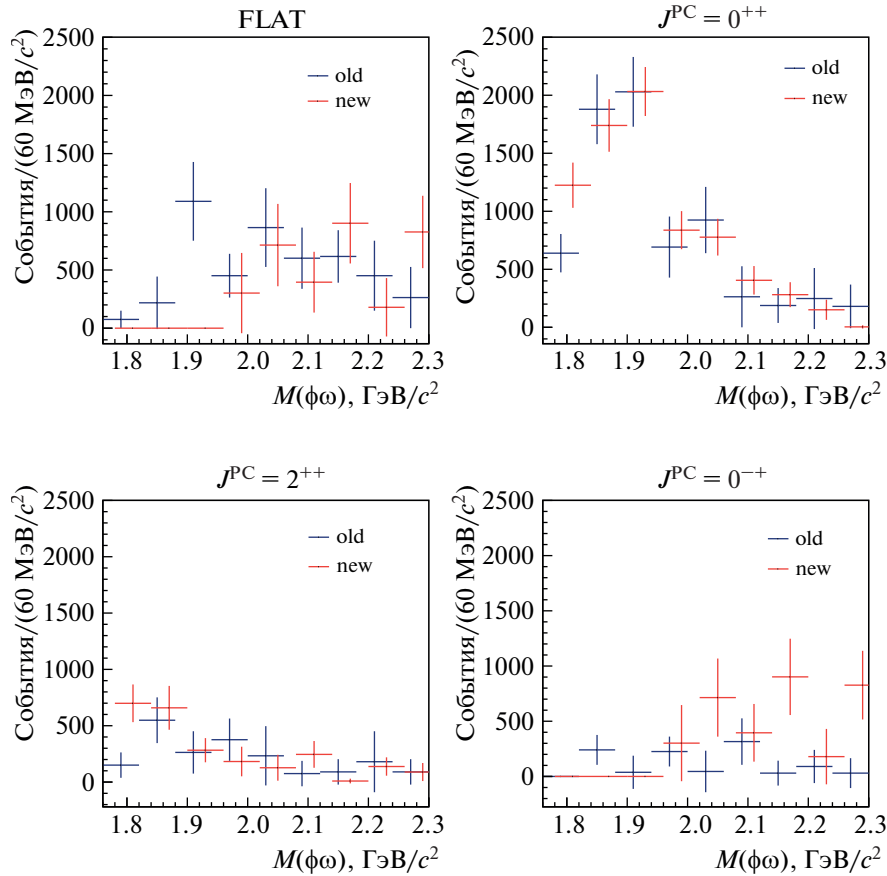


Рис. 4. Интенсивности волн $\phi\omega$ системы: красным — данные модернизированной установки ВЕС, синим — данные установки ВЕС до модернизации.

гравитационному потоку пучковых частиц через мишень для предыдущего анализа данных отсутствуют, грубая оценка составляет $4 \cdot 10^{11}$.

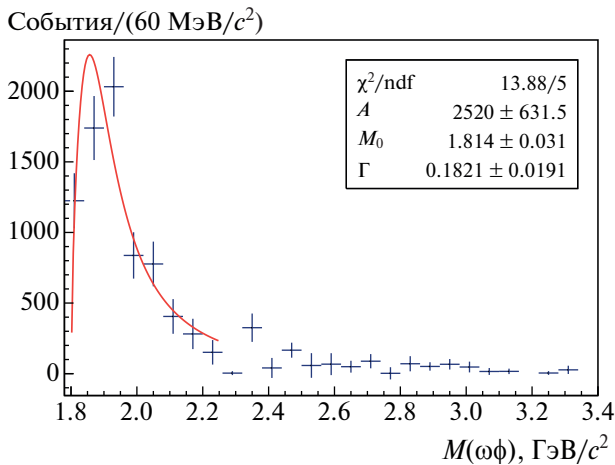


Рис. 5. Фит волны 0^{++} функцией $f(M)$ (1).

В предположении резонансной природы наблюдаемого образования определена его масса и ширина: $M = 1814 \pm 31$ МэВ/ c^2 , $\Gamma = 182 \pm 19$ МэВ/ c^2 . Фит выполнен следующей функцией (рис. 5):

$$f(M) = \begin{cases} 0, & M < (M_\omega + M_\phi) \\ PhS(M) \cdot A \cdot BW(M), & M > (M_\omega + M_\phi) \end{cases}, \quad (1)$$

где $BW(M) = \frac{1}{(M^2 - M_0^2)^2 + M_0^2 \Gamma^2}$ — функция Брейта–Вигнера; $PhS(M) = |p_\omega|/M$ — функция двухчастичного фазового пространства.

Полученные параметры сигнала коррелируют. При фиксации параметров M_0 , Γ получаем $A = 2520 \pm 160$, что соответствует числу событий в пике $N = 7230 \pm 459$.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На данных модернизированной установки ВЕС отобраны события реакции $\pi^- p \rightarrow \phi\pi l$. В спектре масс $M(\phi\omega)$ наблюдается пороговая осо-

бенность, в которой доминирует состояние $J^{PC} = 0^{++}$. Спектр масс $M(\omega\phi)$ и результаты ПВА совместимы с полученными в более раннем анализе на установке ВЕС. В предположении резонансной природы сигнала $f_0(1800)$ его масса и ширина определены как $M = 1814 \pm 31$ МэВ/ c^2 , $\Gamma = 182 \pm 19$ МэВ/ c^2 . Близость сигнала к порогу искажает брейт-вигнеровскую форму. Кроме того, возможны другие механизмы образования околопорогового пика, например от подпорогового резонанса $f_0(1710)$ [9]. Возможно одна из этих причин объясняет сравнительно плохую подгонку сигнала ($\chi^2/\text{ndf} \sim 3$).

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-02-00246 А.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *van Beveren E., Rijken T.A., Metzger K., Dullemond C., Rupp G., Ribeiro J.E.* // *Z. Phys.* 1986. V. 30. P. 615; arXiv:0710.4067 [hep-ph].
2. *Pelaez J.R.* // *Mod. Phys. Lett. A.* 2004. V. 19. P. 2879; arXiv:hep-ph/0411107.
3. *Ablikim M. et al. (BES Collab.)* // *Phys. Rev. Lett.* 2006. V. 96. P. 162002; arXiv:hep-ex/0602031.
4. *Ablikim M. et al. (BESIII Collab.)* // *Phys. Rev. D.* 2013. V. 87. P. 032008; arXiv:1211.5668 [hep-ex].
5. *Nikolaenko V. et al.* // *Int. J. Mod. Phys. A.* 2009. V. 24. P. 295.
6. *Dorofeev V.A. et al.* // *Instrum. Exp. Tech.* 2016. V. 59. P. 658.
7. *Ivashin A., Matveev V., Khokhlov Yu.* IHEP Preprint 2010-10. 2010. Protvino: IHEP.
8. *Zemach Ch.* // *Phys. Rev.* 1965. V. 140. P. B97.
9. *Martinez Torres A., Khemchandani K., Navarra F., Nielsen M., Oset E.* // *Phys. Lett. B.* 2013. V. 719, P. 388; [arXiv:1210.6392 [hep-ph]].

Search for a Scalar Resonance in the $\omega\phi$ System in the Collision of a 29 GeV/c Pion Beam with a Nuclear Target

M. S. Kholodenko* (on behalf of the VES Collaboration)

Institute for High Energy Physics, National Research Center Kurchatov Institute, Protvino, Moscow region, 142281 Russia

**e-mail: marina.kholodenko@ihep.ru*

Received August 7, 2020; revised August 11, 2020; accepted August 11, 2020

Abstract—The charge-exchange reaction $\pi^- p \rightarrow n\omega(783)\phi(1020)$, $\omega \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$, $\phi \rightarrow K^+K^-$ is studied on the upgraded VES facility (U-70, Protvino). There are 905 events of $\omega\phi$ -system selected. The signal near threshold ($M \sim 1.9$ GeV/ c^2) is observed in $\omega\phi$ invariant mass. The five-particles partial wave analyses shows that $J^{PC} = 0^{++}$ state dominates. Under the assumption of the resonant nature of the signal, its mass and width are obtained: $M = 1814 \pm 31$ MeV/ c^2 and $\Gamma = 182 \pm 31$ MeV/ c^2 .

Keywords: vector meson, VES Experiment, IHEP-Protvino, fixed-target, pair production, mass spectrum: ($\Phi(1020)$ $\omega(783)$), mass enhancement: (1810), partial wave analysis, mass: width, spin: parity, experimental results, $\Phi(1020) \rightarrow K^+ K^-$, $\omega(783) \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$