

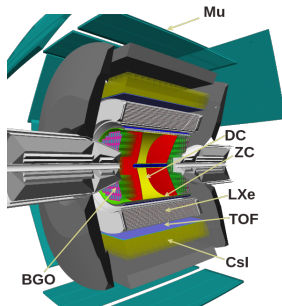
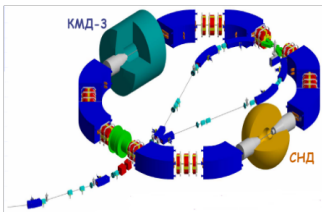
# Изучение процесса $e^+e^- \rightarrow \eta\pi^+\pi^-$ с детектором КМД-3

Грибанов Сергей Сергеевич

ИЯФ СО РАН

Сессия-конференция секции ядерной физики ОФН РАН,  
посвященная 70-летию В.А. Рубакова

# Коллайдер ВЭПП-2000. Детектор КМД-3.



- Область сканирования  $0.3 \text{ ГэВ} < \sqrt{s} < 2.0 \text{ ГэВ}$ .
- Энергия измеряется методом обратного комптоновского рассеяния с точностью 50 КэВ.
- Впервые использована методика круглых пучков.
- Достигнута светимость  $6 \times 10^{31} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$  (проектная  $\sim 10^{32} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ ).
- Два детектора КМД-3 и СНД.

## Мотивация

- Изучение динамики.
- Вычисление  $\mathcal{B}(\tau^- \rightarrow \eta\pi^-\pi^0\nu_\tau)$ , тест CVC-гипотезы.
- Получение форм-фактора  $\eta \rightarrow \gamma^*\gamma^*$ .
- Вклад в  $(g - 2)_\mu$ .

## Данные

В анализе использовались данные с детектора КМД-3, соответствующие диапазону энергий  $1.2 \text{ ГэВ}/c^2 \lesssim \sqrt{s} \lesssim 2.0 \text{ ГэВ}/c^2$ . Интегральная светимость использованных в анализе данных  $\approx 684.5 \text{ пб}^{-1}$ . В предыдущей работе<sup>1</sup> по изучению процесса  $e^+e^- \rightarrow \eta\pi^+\pi^-$  с КМД-3 использовалась почти в 10 раз меньшая статистика ( $78.3 \text{ пб}^{-1}$ ).

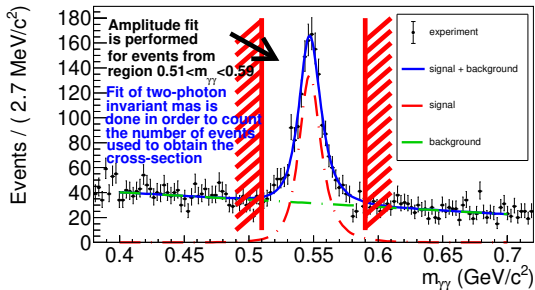
<sup>1</sup>S.S. Gribov и другие (коллаборация КМД-3). "Measurement of the  $e^+e^- \rightarrow \eta\pi^+\pi^-$  cross section with the CMD-3 detector at the VEPP-2000 collider". В: *JHEP* 01 (2020), с. 112. DOI: 10.1007/JHEP01(2020)112. arXiv: 1907.08002 [hep-ex].

# Критерии отбора событий

- Наличие двух центральных треков
- Наличие двух или более фотонов с энергиями больше 50 МэВ.
- Суммарное энерговыделение кандидатов на  $\pi^+$  и  $\pi^-$  в калориметре меньше  $0.4 + 0.25 \times (\sqrt{s} - 1.2)$  ГэВ для подавления событий  $e^+e^-$  рассеяния.
- Кинематическая реконструкция<sup>2</sup> в гипотезе  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma\gamma$ : фит должен сойтись и  $\chi^2 < 40$ .
- Кинематическая реконструкция в гипотезе  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma\gamma\gamma_{\text{lost}}$ . Одна пара фотонов складывается в  $\pi^0$  (для которой  $\chi^2$  меньше). Требуется, чтобы либо фит не сошелся, либо фит сошелся и  $\chi^2 > 20$ . Данный критерий отбора накладывается, чтобы дополнительно подавить события процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ .
- Кинематическая реконструкция в гипотезе  $e^+e^- \rightarrow \eta\pi^+\pi^-$ ,  $\eta \rightarrow \gamma\gamma$ . Требуется, чтобы фит сошелся, но никаких ограничений на  $\chi^2$  не накладывается. Нужна для того, чтобы в амплитудном фите четырех-импульс двух фотонов соответствовал четырех-импульсу  $\eta$ -мезона.

<sup>2</sup>S.S. Griбанov и A.S. Popov. "Kinematic and vertex fitting package for the CMD-3 experiment". В: *Journal of Instrumentation* 18.05 (май 2023), P05030.

# Спектр масс двух фотонов



- На рисунке приведен спектр масс двух фотонов, кандидатов на фотоны из распада  $\eta \rightarrow \gamma\gamma$ .
- Число событий определяемое из фита  $m_{\gamma\gamma}$  используется для получения сечения.
- При амплитудном анализе накладывается дополнительное условие  $0.51 \text{ МэВ}/c^2 < m_{\gamma\gamma} < 0.59 \text{ МэВ}/c^2$ .
- При амплитудном анализе точки с близкими энергиями в системе центра масс объединяются с целью увеличения статистики (шаг  $\Delta E_{\text{ц.м.}} \sim 10\text{-}20 \text{ МэВ}$ ).

# Амплитудный анализ процесса $e^+e^- \rightarrow \eta\pi^+\pi^-$

## Промежуточные состояния

Достоверно наблюдаются:

- $\rho(770)\eta$  — P-волна.
- $a_2(1320)\pi$  — D-волна.

Изучались, но дают малый вклад:

- $\omega\pi$  ( $\rho$ - $\omega$  смешивание) — P-волна.
- $\rho(1450)\pi$  — P-волна.
- $\rho(1700)\pi$  — P-волна.
- $a_2(1700)\pi$  — D-волна.

## Плотность вероятности

$$f(\Phi; \mathbf{C}_{\text{sig}}, \mathbf{C}_{\text{bkg}}) = \frac{1}{N_{\text{tot}}(\mathbf{C}_{\text{sig}}, \mathbf{C}_{\text{bkg}})} \times [\varepsilon_{\text{phsp sig}}(\Phi) I_{\text{sig}}(\Phi; \mathbf{C}_{\text{sig}}) + I_{\text{bkg}}(\Phi; \mathbf{C}_{\text{bkg}})],$$

где  $\mathbf{C}_{\text{sig}}$  — параметры модели сигнального процесса,  $\mathbf{C}_{\text{bkg}}$  — параметры модели фонового процесса;  $\varepsilon_{\text{phsp sig}}$  — эффективность событий сигнала, разыгранных по фазовому объему;  $I_{\text{bkg}}$  — функция, описывающая распре-

ление (зарегистрированных) событий фонового процесса в переменных сигнального процесса;  $I_{\text{sig}}$  — усредненный по поляризациям начальных частиц квадрат модуля суммарной амплитуды сигнального процесса;  $N_{\text{tot}}$  — нормировка:  $N_{\text{tot}} = N_{\text{sig}} + N_{\text{bkg}}$ ,  $N_{\text{sig}} = \int \varepsilon_{\text{sig}}(\Phi) I_{\text{sig}}(\Phi; \mathbf{C}_{\text{sig}}) d\Phi$ ,  $N_{\text{bkg}} = \int I_{\text{bkg}}(\Phi; \mathbf{C}_{\text{bkg}}) d\Phi$ .

Функцию  $I_{\text{sig}}$  можно записать в виде<sup>a</sup>:  $I_{\text{sig}} = \mathbf{C}_{\text{sig}}^\dagger \hat{\rho}_{\text{sig}}(\Phi) \mathbf{C}_{\text{sig}}$ , где  $\hat{\rho}_{\text{sig}}^\dagger = \hat{\rho}_{\text{sig}}$ ,  $\mathbf{C}_{\text{sig}} \in \mathbb{C}^{n_{\text{sig}}}$ . Тогда  $N_{\text{sig}} = \mathbf{C}_{\text{sig}}^\dagger \hat{I}_{\text{sig}} \mathbf{C}_{\text{sig}}$ , где  $\hat{I}_{\text{sig}} = \frac{1}{N_{\text{MC}}^{\text{phsp sig}}} \sum_{j \in \text{phsp sig}} \hat{\rho}_{\text{sig}}(\Phi_j)$ .

Функцию  $I_{\text{bkg}}$  можно записать в виде:  $I_{\text{bkg}} = \mathbf{C}_{\text{bkg}}^\dagger \hat{\rho}_{\text{bkg}} \mathbf{C}_{\text{bkg}}$ , где  $\hat{\rho}_{\text{bkg}}^\dagger = \hat{\rho}_{\text{bkg}}$ ,  $\hat{\rho}_{\text{bkg}}$  — диагональная матрица,  $\mathbf{C}_{\text{bkg}} \in \mathbb{R}^{n_{\text{bkg}}}$ . Тогда  $N_{\text{bkg}} = \mathbf{C}_{\text{bkg}}^\dagger \hat{I}_{\text{bkg}} \mathbf{C}_{\text{bkg}}$ , где  $\hat{I}_{\text{bkg}} = \frac{1}{N_{\text{MC}}^{\text{phsp sig}}} \sum_{j \in \text{phsp sig}} \frac{\hat{\rho}_{\text{bkg}}(\Phi_j)}{\varepsilon_{\text{phsp sig}}(\Phi_j)}$ .

<sup>a</sup>Массы и ширины резонансов полагаются фиксированными.

# Extended Maximum Likelihood (EML)<sup>3</sup>

$$\mathcal{L}_{\text{ext}} = \frac{N_{\text{tot}}^{N_{\text{exp}}}}{N_{\text{exp}}!} e^{-N_{\text{tot}}} \prod_{\ell \in \text{exp}} f(\Phi_{\ell}; \mathbf{C}_{\text{sig}}, \mathbf{C}_{\text{bkg}}) = \frac{1}{N_{\text{exp}}!} e^{-N_{\text{tot}}} \prod_{\ell \in \text{exp}} N_{\text{tot}} f(\Phi_{\ell}; \mathbf{C}_{\text{sig}}, \mathbf{C}_{\text{bkg}})$$

$$\ln \mathcal{L}_{\text{ext}} = \sum_{\ell \in \text{exp}} \ln \left( \mathbf{C}_{\text{sig}}^{\dagger} \hat{\rho}_{\text{sig}}(\Phi_{\ell}) \mathbf{C}_{\text{sig}} + \mathbf{C}_{\text{bkg}}^{\dagger} \frac{\hat{\rho}_{\text{bkg}}(\Phi_{\ell})}{\varepsilon_{\text{phsp sig}}(\Phi_{\ell})} \mathbf{C}_{\text{bkg}} \right) - \mathbf{C}_{\text{sig}}^{\dagger} \hat{\mathbf{I}}_{\text{sig}} \mathbf{C}_{\text{sig}} - \mathbf{C}_{\text{bkg}}^{\dagger} \hat{\mathbf{I}}_{\text{bkg}} \mathbf{C}_{\text{bkg}}$$

- Позволяет найти полное число событий ( $N_{\text{tot}} = N_{\text{sig}} + N_{\text{bkg}}$ ) при фите, число событий сигнала ( $N_{\text{sig}} = \mathbf{C}_{\text{sig}}^{\dagger} \hat{\mathbf{I}}_{\text{sig}} \mathbf{C}_{\text{sig}}$ ) и фона ( $N_{\text{bkg}} = \mathbf{C}_{\text{bkg}}^{\dagger} \hat{\mathbf{I}}_{\text{bkg}} \mathbf{C}_{\text{bkg}}$ ). Эти числа событий согласуются с аналогичными числами, полученными при фите спектра масс двух фотонов.
- Матрицы  $\hat{\rho}_{\text{sig}}(\Phi_{\ell})$ ,  $\frac{\hat{\rho}_{\text{bkg}}(\Phi_{\ell})}{\varepsilon_{\text{sig}}(\Phi_{\ell})}$ ,  $\hat{\mathbf{I}}_{\text{sig}}$  и  $\hat{\mathbf{I}}_{\text{bkg}}$  рассчитываются перед фитом.
- В данном анализе  $\hat{\rho}_{\text{bkg}}(\Phi_{\ell})$  — матрица  $1 \times 1$ , т.к. рассматривается фон только от  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$  (доминирующий фоновый процесс). События фона пока что моделируются по фазовому объему. Про работу над уточнением модели фона см. последние слайды.

<sup>3</sup>Roger Barlow. “Extended maximum likelihood”. В: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 297.3 (1990), с. 496—506.


# Метод нахождения $\varepsilon_{\text{phsp sig}}(\Phi)$ и $\hat{\rho}_{\text{bkg}}(\Phi)$

Эффективность сигнала  $\varepsilon_{\text{phsp sig}}(\Phi)$  и плотность вероятности фона  $\hat{\rho}_{\text{bkg}}(\Phi)$  в переменных трех-частичного процесса находились с помощью Kernel Density Estimation (KDE) с некоторыми модификациями<sup>4</sup>. Для трех-частичных процессов можно указать 5 независимых кинематических переменных. Были выбраны следующие переменные:

- $m_{\pi^+\pi^-}^2$ ,
- $m_{\eta\pi^-}^2$ ,
- $\cos \theta_\eta$ ,
- $\phi_\eta$ ,
- угол между плоскостями  $(\vec{p}_{\pi^+}, \vec{p}_{\pi^-})$  и  $(\vec{p}_\eta, \vec{e}_z)$ .

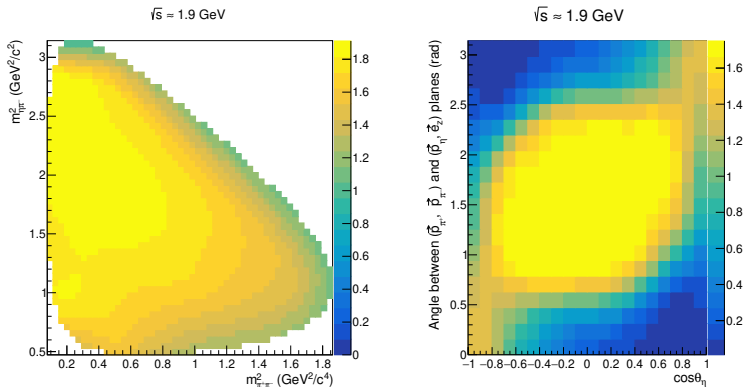
Так как пучки неполяризованные, то от угла  $\phi_\eta$  ничего не зависит (в пренебрежении неработающими каналами и т.п.).

---

<sup>4</sup>A. Poluektov. "Kernel density estimation of a multidimensional efficiency profile". В: *Journal of Instrumentation* 10.02 (февр. 2015), P02011. 

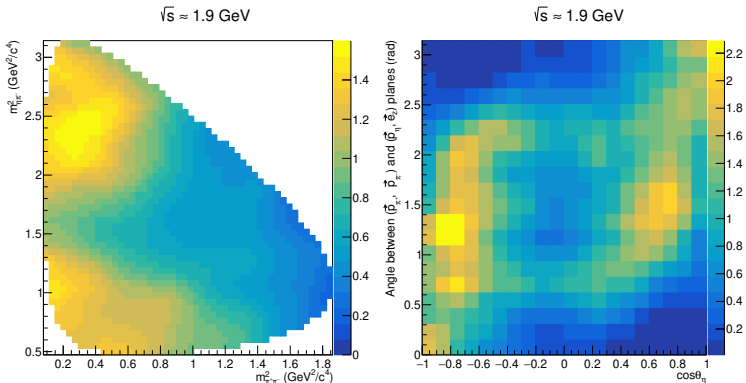


# Эффективность сигнала, $\varepsilon_{\text{phsp sig}}$



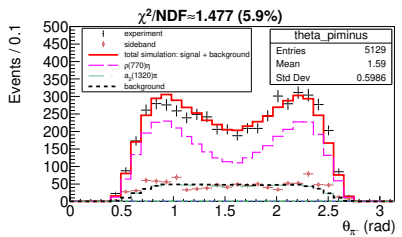
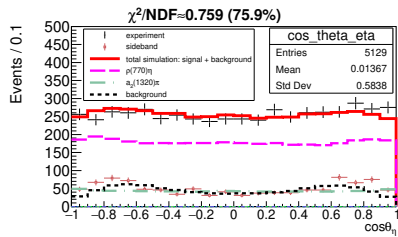
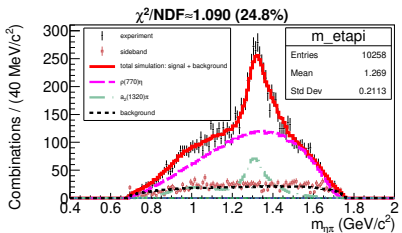
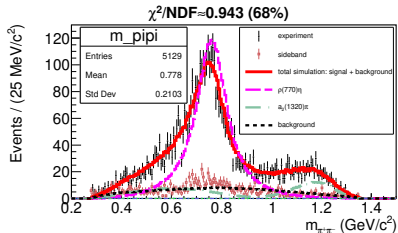
Эффективность моделирования сигнала по фазовому объему в срезе по некоторым переменным (не интеграл, а значения PDF). В данной группе точек (вблизи  $\sqrt{s} \approx 1.9 \text{ GeV}$ ) оценка  $\varepsilon_{\text{sig}}$  проведена с использованием  $\approx 7.9 \times 10^6$  событий моделирования сигнала по фазовому объему (после наложения всех критериев отбора).

# Распределение фона, $\hat{\rho}_{\text{bkg}}$



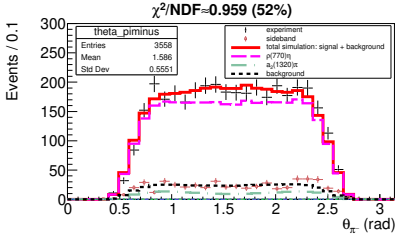
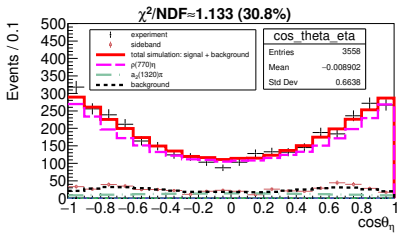
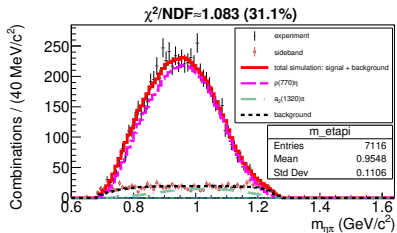
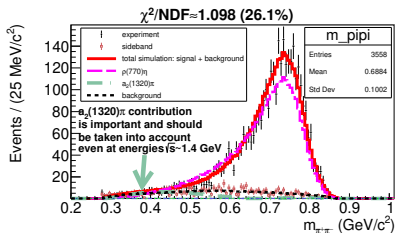
Плотность вероятности фона ( $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$  по фазовому объему) в срезе по некоторым переменным. В данной группе точек (вблизи  $\sqrt{s} \approx 1.9 \text{ GeV}$ ) оценка плотности фона была проведена по 15017 событиям (после наложения всех критериев отбора).

# Сравнение спектров, $\sqrt{s} \approx 1.9$ ГэВ

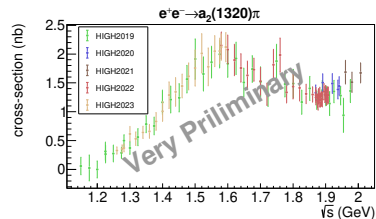
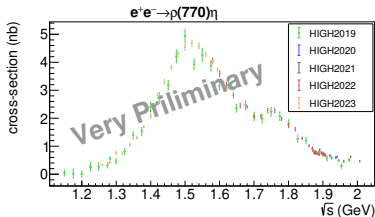
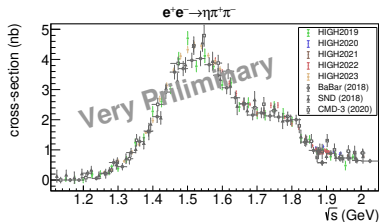


Всего 5129 событий эксперимента (4169 событий сигнала, 960 событий фона).

# Сравнение спектров, $\sqrt{s} \approx 1.4$ ГэВ



Всего 3558 событий эксперимента (3099 событий сигнала, 459 событий фона).



Борновское сечение:

$$\sigma_B(s) = \frac{N_{\text{sig}}(s)}{\varepsilon_{\text{sig}}(s)L_{\text{int}}(s)(1+\delta_{\text{rad}}(s))},$$

Эффективность регистрации событий сигнала  $\varepsilon_{\text{sig}}$  определялась по моделированию  $(\rho(770)\eta + a_2(1320)\pi)$ .

Парциальные сечения:

$$\sigma_k(s; \mathbf{C}_{\text{bkg}}) = \sigma_B(s) \times \text{ratio}_k(s; \mathbf{C}_{\text{bkg}}),$$

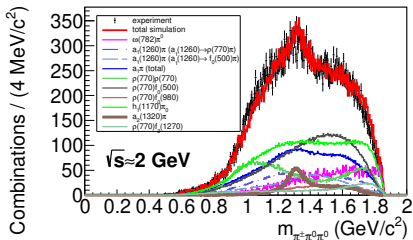
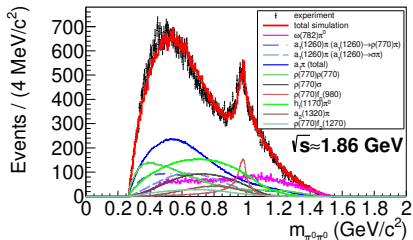
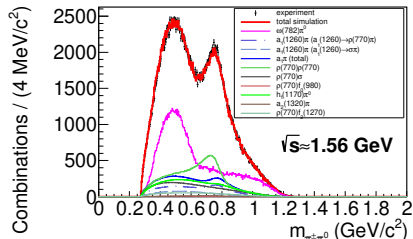
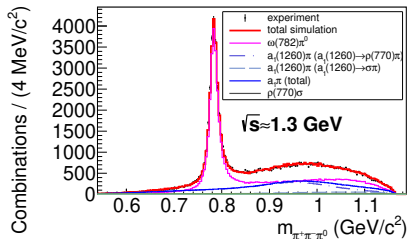
$$\text{ratio}_k(s; \mathbf{C}_{\text{bkg}}) = \frac{\int I_{\text{sig}}^{(k)}(\Phi; \mathbf{C}_{\text{sig}}) d\Phi}{\int I_{\text{sig}}(\Phi; \mathbf{C}_{\text{sig}}) d\Phi}$$

Результаты очень предварительные. Ошибки парциальных сечений завышены.

# Уточнение модели фона ( $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ )

- Для уточнения модели фона был проведен амплитудный анализ процесса  $e^+e^- \rightarrow 4\pi$ .
- Получен предварительный результат, достаточный для уточнения модели фонового процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ .
- Проводились амплитудные фит для различных конечных состояний:
  - $\pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ ,
  - совместный фит для  $\pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$  и  $\pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$ .
- Промежуточные состояния (список приблизительный, использовались менее и более богатые модели):
  - $e^+e^- \rightarrow \omega(782)\pi^0$  (P-волна),  $\omega \rightarrow \rho(770)\pi$  (P-волна);
  - $e^+e^- \rightarrow a_1\pi$  (S- и D-волны),  $a_1 \rightarrow \rho(770)\pi$  (S- и D-волны);
  - $e^+e^- \rightarrow a_1\pi$  (S- и D-волны),  $a_1 \rightarrow \sigma\pi$  (P-волна);
  - $e^+e^- \rightarrow \rho(770)\rho(770)$  (P- и F-волны); только в  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ ;
  - $e^+e^- \rightarrow \rho(770)\sigma$  (S- и D-волны);
  - $e^+e^- \rightarrow \rho(770)f_0(980)$  (S- и D-волны);
  - $e^+e^- \rightarrow h_1(1170)\pi^0$  (S- и D-волны),  $h_1 \rightarrow \rho\pi$  (S- и D-волны);
  - $e^+e^- \rightarrow a_2(1320)\pi$  (D-волна),  $a_2(1320) \rightarrow \rho(770)\pi$  (D-волна);
  - $e^+e^- \rightarrow \rho(770)f_2(1270)$  (S-, D-, G-волны).

# Характерные примеры спектров ( $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ )



- Разработан фреймворк для амплитудного анализа.
- Получены предварительные результаты по изучению динамики процесса  $e^+e^- \rightarrow \eta\pi^+\pi^-$ .
- Получен предварительный результат измерения сечения  $e^+e^- \rightarrow \eta\pi^+\pi^-$  по новой статистике.
- Проведена работа по уточнению фонового вклада от процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ . С этой целью был выполнен совместный амплитудный фит конечных состояний  $\pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$  и  $\pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$ .



Спасибо за внимание!

# Запасной слайд: характерные примеры спектров ( $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$ )

