

Изучение динамики в процессе $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$
на детекторе СНД

Татьяна Димова

Институт Ядерной Физики им.Будкера

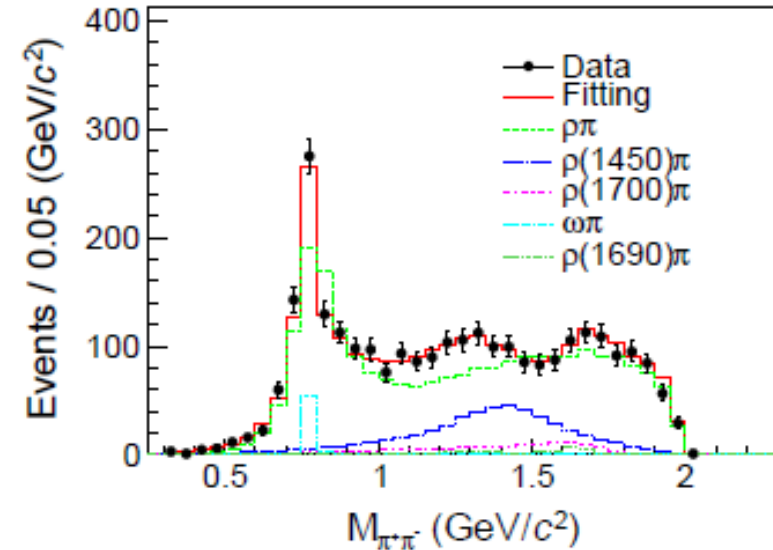
3 июня 2026

Предварительно

Мотивация

1. Предыдущие результаты с детектора SND, который продемонстрировал, что в области состояния $\omega(1420)$ процесс $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ идет в основном через промежуточное состояние $\rho\pi$, в то время как в области состояния $\omega(1650)$ этот процесс идет через промежуточное состояние $\rho'\pi$.
2. На детекторе KLOE был измерен вклад от «прямого» распада ϕ мезона ($I_{\text{dir}} = 8.5 \cdot 10^{-3}$; $I_{\rho\pi} = 0.937$; $I_{\omega\pi} = 2.0 \cdot 10^{-4}$), который можно интерпретировать как вклад от промежуточного состояния $\rho'\pi$.
3. Измерение BESIII в диапазоне 2.00 – 3.08 ГэВ продемонстрировало присутствие промежуточных состояний $\rho\pi$, $\rho'\pi$ и др. в сечении $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$

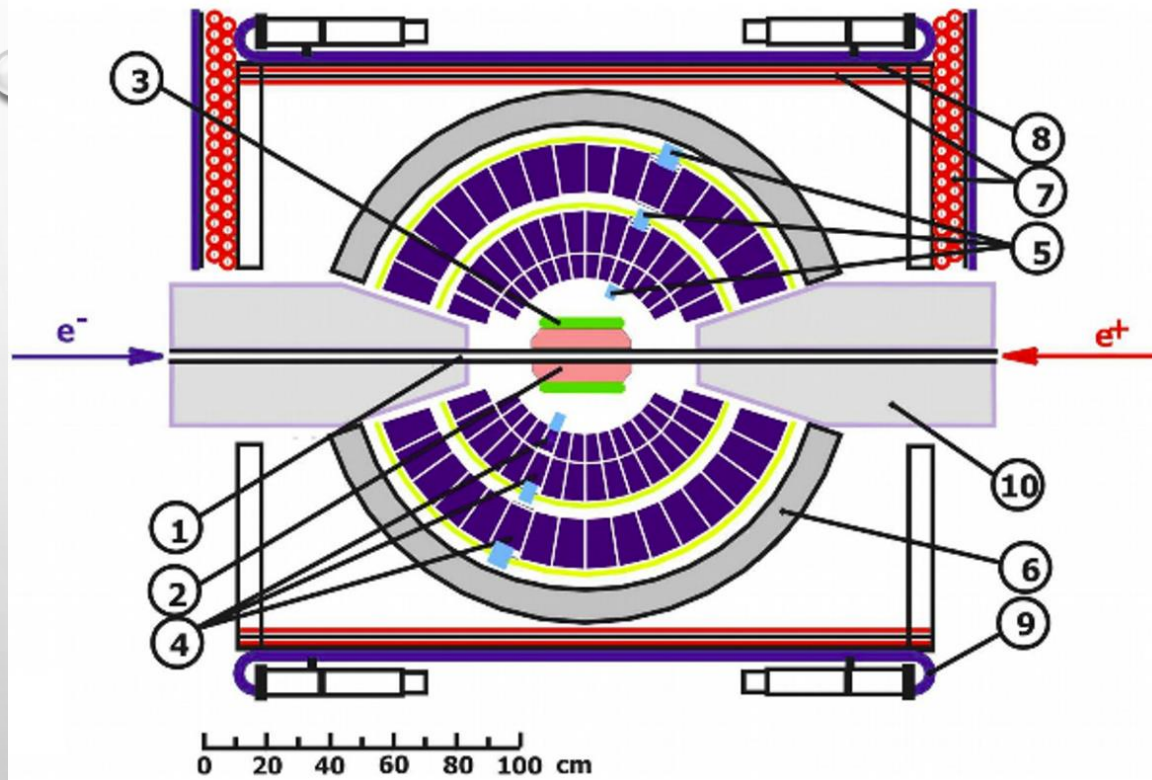
BESIII



Фит распределения по инвариантной массе $\pi^+\pi^-$

Детектор СНД

NIM A449 (2000) 125-139



1 – вак.камера, 2 – трековый детектор, 3 – аэрогель, 4 – кристаллы NaI(Tl), 5 – фототриоды, 6 – мюонный фильтр, 7–9 – мюонный детектор, 10 – СП соленоиды.

Calorimeter

Thickness	$13.5 X_0$
Acceptance	$0.95 \times 4\pi$
Energy resolution	$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{0.042}{\sqrt[4]{E[\text{GeV}]}}$
Angular resolution	$\sigma_{\phi, \theta} = \frac{0.82^\circ}{\sqrt[4]{E[\text{GeV}]}} \oplus 0.63^\circ$

Tracking system

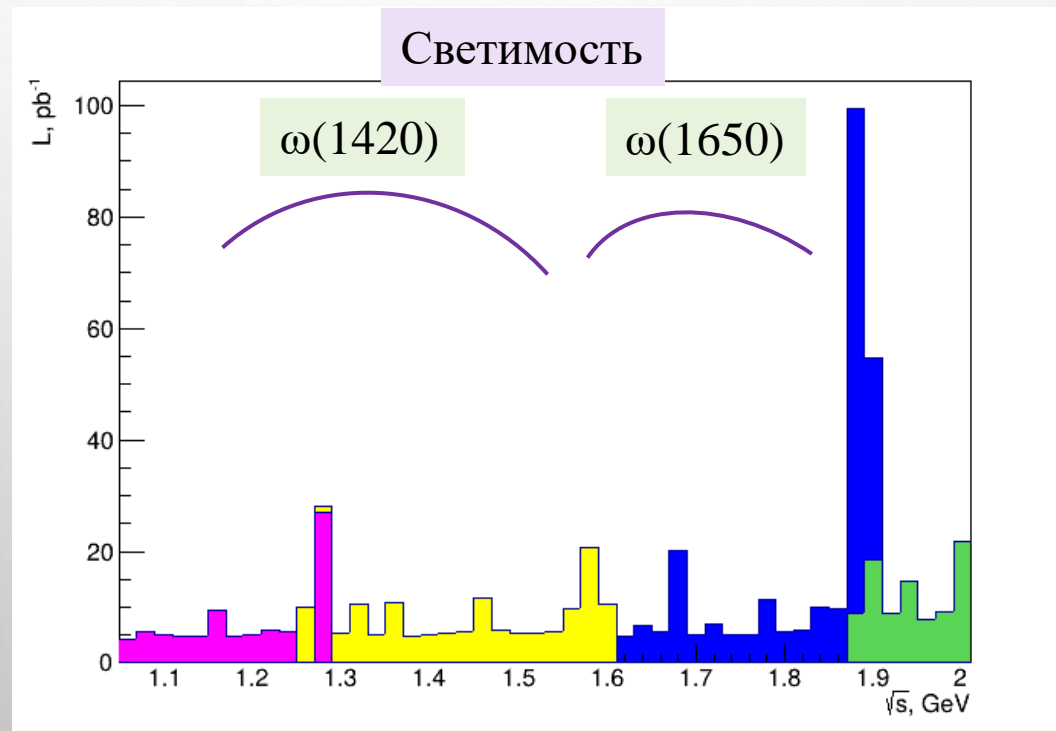
Acceptance (9 layers)	$0.94 \times 4\pi$
Angular resolution	$\sigma_\phi = 0.55^\circ, \sigma_\theta = 1.2^\circ$
Vertex resolution	$\sigma_R = 0.12\text{cm},$ $\sigma_Z = 0.45\text{cm}$

Aerogel counters

K/ π separation	$E < 1 \text{ GeV}$
---------------------	---------------------

Экспериментальные данные

Эксперимент	Число точек	Светимость (пб ⁻¹)
2020 – 2024 года	72 точки от 1.060 до 2.007 ГэВ (объединены в 56 интервалов для анализа распределений Далитца)	604



Условия отбора событий $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$

Предварительный отбор:

- 2 заряженные центральные частицы ($R < 0.5$ см, $|z| < 10$ см, $|z(1) - z(2)| < 1.5$)
- 2 фотона с энергией > 70 MeV
- $0.3 < E_{\text{tot}} / (2E_{\text{beam}}) < 0.8$
- Время срабатывания калориметра относительно момента столкновения пучков $|\Delta t| < 6$ нс

Отбор после кинематической реконструкции:

- $30^\circ < \theta$ частиц $< 150^\circ$
- $\Delta\phi$ заряженных частиц $> 10^\circ$
- ΣE_{dep} заряженных частиц $< 0.6 \cdot \sqrt{s}$
- $\chi^2_{\text{R}} < 100$ (реконструкция общей вершины)
- $\chi^2_{\text{E}} < 20$
- $\chi^2_{\text{K}} - \chi^2_{\text{E}} > 0$ (при $\sqrt{s} > 1.6$ GeV)

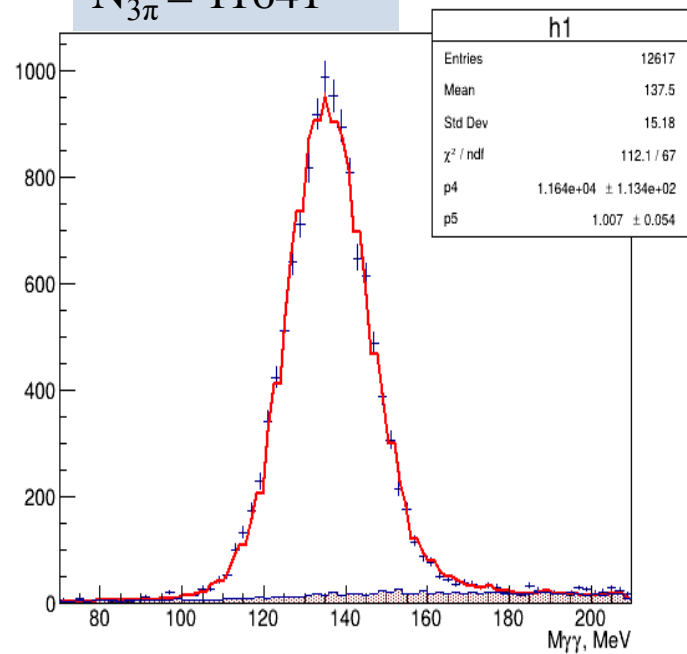
Для определения импульсов заряженных пионов используется кинематический фит. При этом, также уточняются углы и энергии фотонов.

Проводился фит в гипотезе модели $\pi^+\pi^-\gamma\gamma$ (параметр χ^2_{E}), а для энергий $\sqrt{s} > 1.6$ GeV делался так же фит в модели $\text{K}^+\text{K}^-\pi^0$ (χ^2_{K})

Определение количества событий

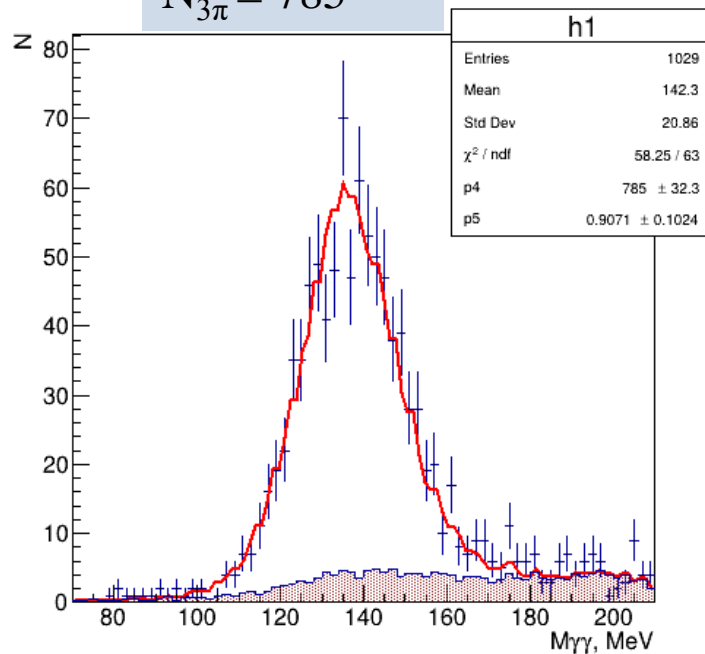
$\sqrt{s}=1.282$ ГэВ

$N_{3\pi} = 11641$



$\sqrt{s}=1.89$ ГэВ

$N_{3\pi} = 785$



Основные фоновые процессы:

$$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$$

$$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma$$

$$e^+e^- \rightarrow K_S K_L (\sqrt{s} < 1.14 \text{ ГэВ})$$

$$e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^0 (\sqrt{s} > 1.7 \text{ ГэВ})$$

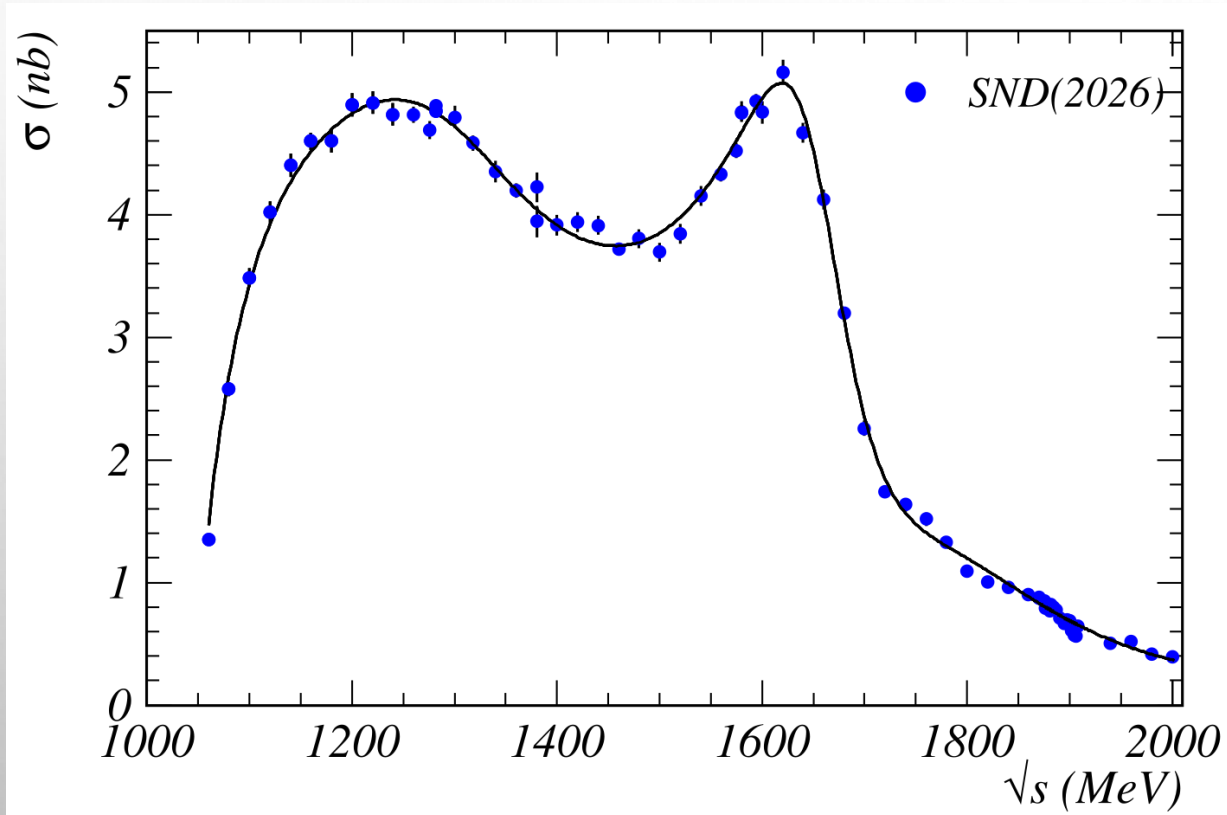
$$e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-\gamma$$

Кроме того, учитывались и другие много-адронные процессы с помощью инклюзивного генератора.

Фит выполняется суммой распределений $m_{\gamma\gamma}$ для сигнала и фона. Параметрами подгонки были число событий $N_{3\pi}$ и множитель к форме распределения для фоновых процессов.

Полное борновское сечение $e^+e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$ и рад.поправка

Борновское сечение:
$$\sigma_{born}(s) = \frac{N_{3\pi}(s)}{\varepsilon(s)L(s)(1+\delta(s))}$$



- Число событий $N_{3\pi}$ определяется из подгонки $M_{\gamma\gamma}$ спектров
- Аппроксимация сечения выполняется для определения радиационной поправки
- Использовалась модель векторной доминантности с промежуточным состоянием $\rho\pi$ и суммированием по $V = \omega, \phi, \omega(1420), \omega(1650)$ и ω_x .

Модель процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$:

Для описания динамики процесса использовалась следующая модель:

$$\frac{d\sigma}{d\Gamma} = |\alpha A_{\rho\pi} + \beta A_{\rho'\pi} + \gamma A_{\omega\pi}|^2$$

$$A_{\rho^{(l)}\pi} \sim \sum_{k=+,-,0} \frac{m_{\rho_k^{(l)}}^2}{q_k^2 - m_{\rho_k^{(l)}}^2 + iq_k \Gamma_{\rho_k^{(l)}}(q_k^2)} \quad \Gamma_{\rho_k^{(l)}}(q_k^2) = \Gamma_{\rho_k} \frac{m_{\rho_k^{(l)}}^2}{q_k^2} \left[\frac{p_\pi(q_k^2)}{p_\pi(m_{\rho_k^{(l)}}^2)} \right]^3$$

$$A_{\omega\pi} \sim \frac{m_\omega^2}{q_0^2 - m_\omega^2 + im_\omega \Gamma_\omega}$$

Изучение BESIII выше 2 ГэВ показало наличие вкладов от $\rho(1450)$, $\rho(1700)$, $\rho_3(1690)$. Однако с нашим разрешением по инвариантной массе и уровнем фона мы не можем различить эти состояния.

Модель процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$: учет разрешения и эффективности

$$D(M_{\pi^+\pi^-}^2, M_{\pi^\pm\pi^0}^2) = |\alpha|^2 H_{\rho\pi} + |\beta|^2 H_{\rho'\pi} + |\gamma|^2 H_{\omega\pi} + 2|\alpha||\beta| \cos(\varphi_1) R_{\rho\pi-\rho'\pi} + 2|\alpha||\beta| \sin(\varphi_1) I_{\rho\pi-\rho'\pi} + \\ + 2|\alpha||\gamma| \cos(\varphi_2) R_{\rho\pi-\omega\pi} + 2|\alpha||\gamma| \sin(\varphi_2) I_{\rho\pi-\omega\pi} + \\ + 2|\beta||\gamma| \cos(\varphi_2 - \varphi_1) R_{\rho'\pi-\omega\pi} + 2|\beta||\gamma| \sin(\varphi_2 - \varphi_1) I_{\rho'\pi-\omega\pi}$$

$H(\mathbf{q}_k, \mathbf{s})$ определяются из моделирования с использованием соответствующей $A_{\rho^{(l)}\pi}$

$R(\mathbf{q}_k, \mathbf{s}), I(\mathbf{q}_k, \mathbf{s})$ определяются из соотношений:

$$2R_{\rho\pi-\rho'\pi}(q_k, s) = H_{\rho\pi+\rho'\pi} - H_{\rho\pi} - H_{\rho'\pi}, \quad 2I_{\rho\pi-\rho'\pi}(q_k, s) = H_{\rho\pi+i\rho'\pi} - H_{\rho\pi} - H_{\rho'\pi}$$

В связи с корреляцией параметров γ и φ_2 , величина параметра $|\gamma|$ определялась из сечения $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0$:

$$N_{\omega\pi} = \epsilon_{\omega\pi} \sigma_{\pi\pi\gamma} (1+\delta) L / V(\omega \rightarrow \pi^0\gamma) \cdot V(\omega \rightarrow \pi^+\pi^-) \longleftrightarrow N_{\omega\pi} = |\gamma|^2 \epsilon_{\omega\pi} \int |A_{\omega\pi}|^2 d\Gamma$$

Параметры подгонки: доля событий от $\rho\pi$ и $\rho'\pi$, и фазы интерференции φ_1, φ_2

Построение распределений Далитца

Построение спектров для аппроксимации

Использовались двумерные распределения по инвариантным массам $M_{\pi^+\pi^-}^2$ vs $M_{\pi^\pm\pi^0}^2$ с разбиением 25x25 каналов. Ширина канала была выбрана таким образом, чтобы пик от ω мезона имел ширину 1.5-2 канала.

Учет вклада от фоновых событий

Для всех фоновых процессов строились распределения по инвариантным массам, нормированные на сечение и светимость.

Учет событий с излучением фотона из начального состояния

Для моделирования используется модель, описанная в ЯФ, 87, 513(2024). Отбирались события с энергией радиационного фотона более 20 MeV, соответствующие условиям отбора. Для них строились распределения Далитца и вычитались при подгонке. После уточнения модели в данном анализе планируется сделать следующие итерации .

Условия отбора для построения распределений Далитца

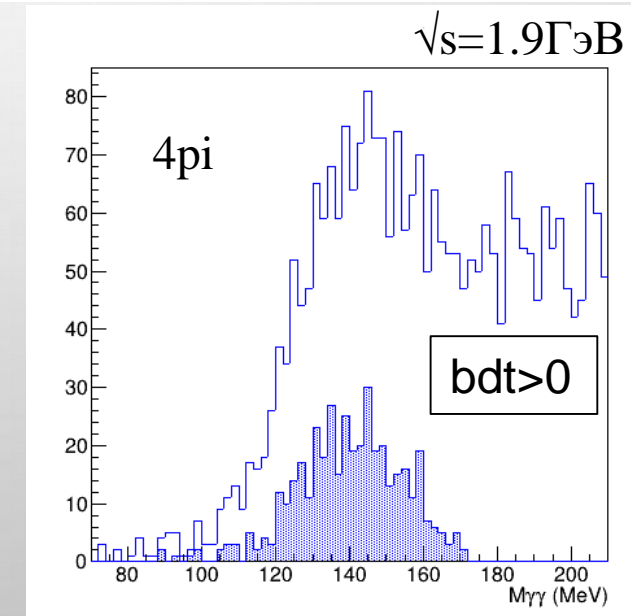
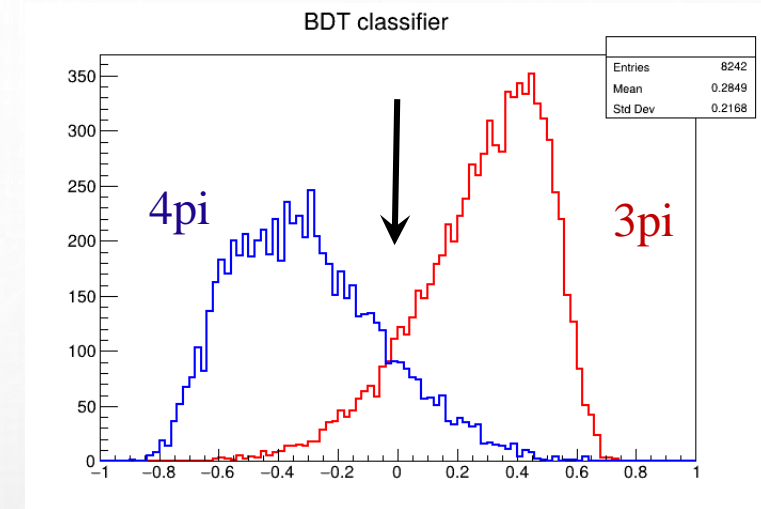
Основной фон от $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ с потерей двух фотонов

Параметры для BDT классификатора (параметры частиц после кинематической реконструкции):

- суммарная энергия фотонов (ΣE_γ)
- параметр кинематической реконструкции χ^2_E
- угол между заряженными пионами
- плоскость процесса определяемая по заряженным пионам
- инвариантная масса фотонов $M_{\gamma\gamma}$
- число кристаллов в кластерах у заряженных пионов
- энерговыделение по слоям калориметра для заряженных пионов

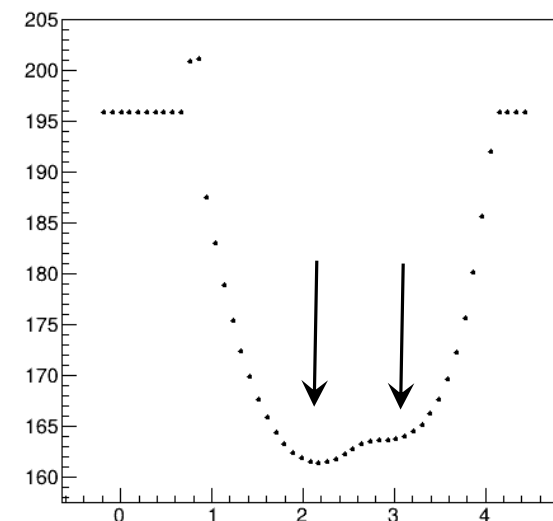
Дополнительные условия отбора:

- ❖ $110 \text{ MeV} < M_{\gamma\gamma} < 170 \text{ MeV}$
- ❖ $\sqrt{s} > 1.6 \text{ GeV} : \text{bdt} > 0$

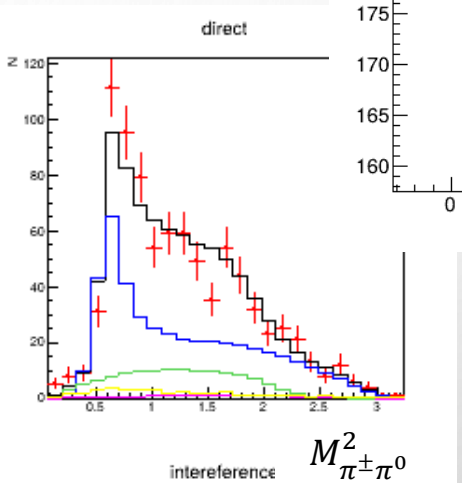
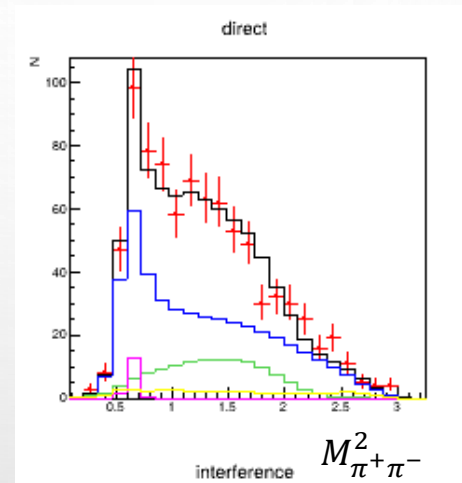
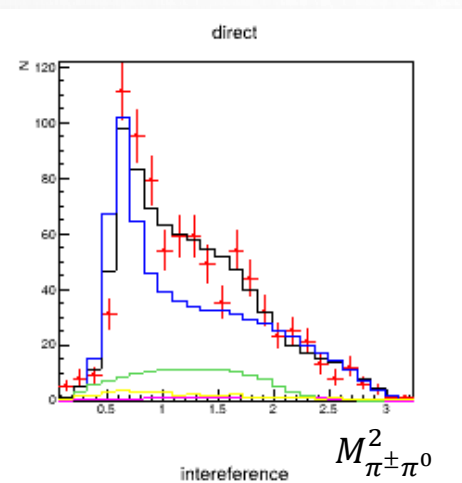
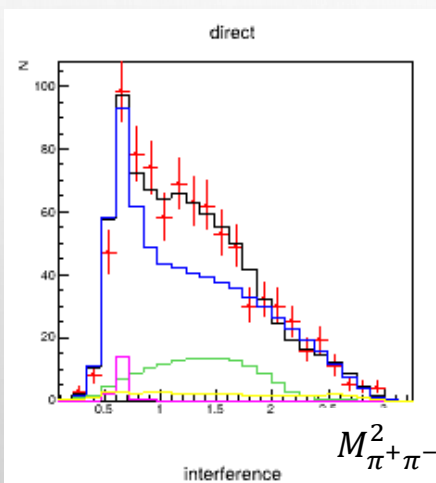


Аппроксимация распределений Далитца: несколько минимумов

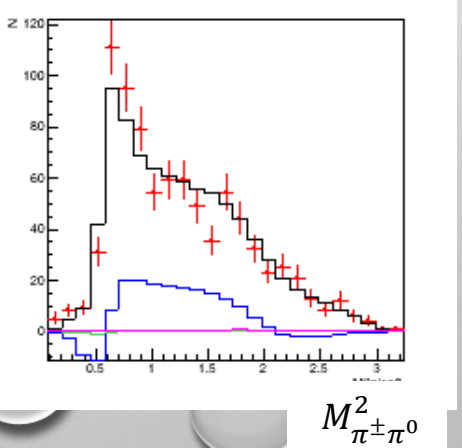
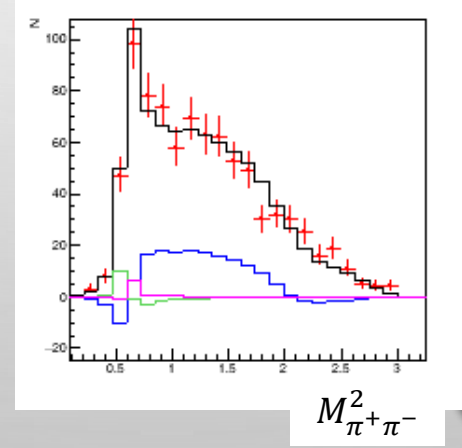
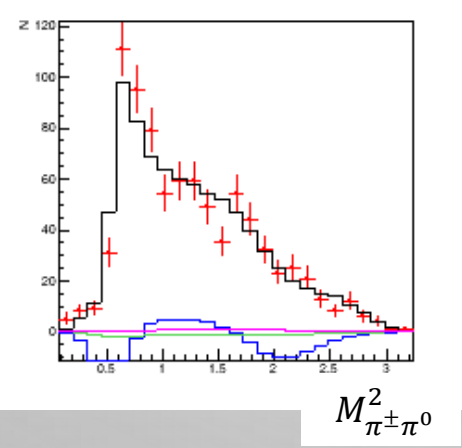
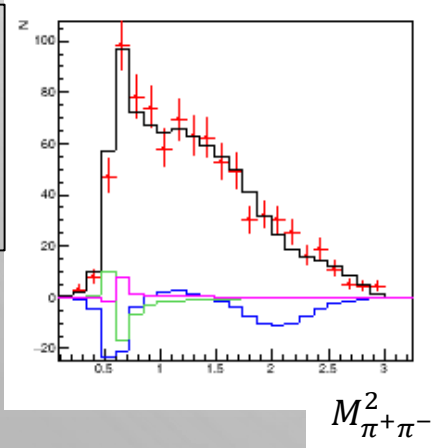
Сканирование LL по
переменной φ_1



Exp
 $\rho\pi$
 $\rho'\pi$
 $\omega\pi$
fit
bkg

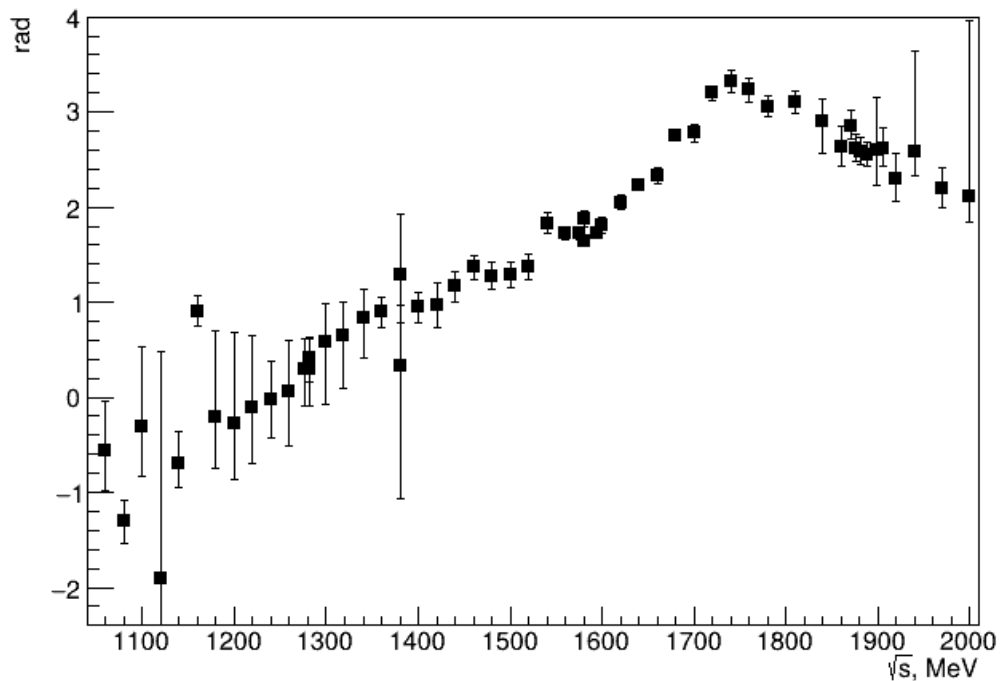


Exp
 $\rho\pi - \rho'\pi$
 $\rho\pi - \omega\pi$
 $\rho'\pi - \omega\pi$
fit

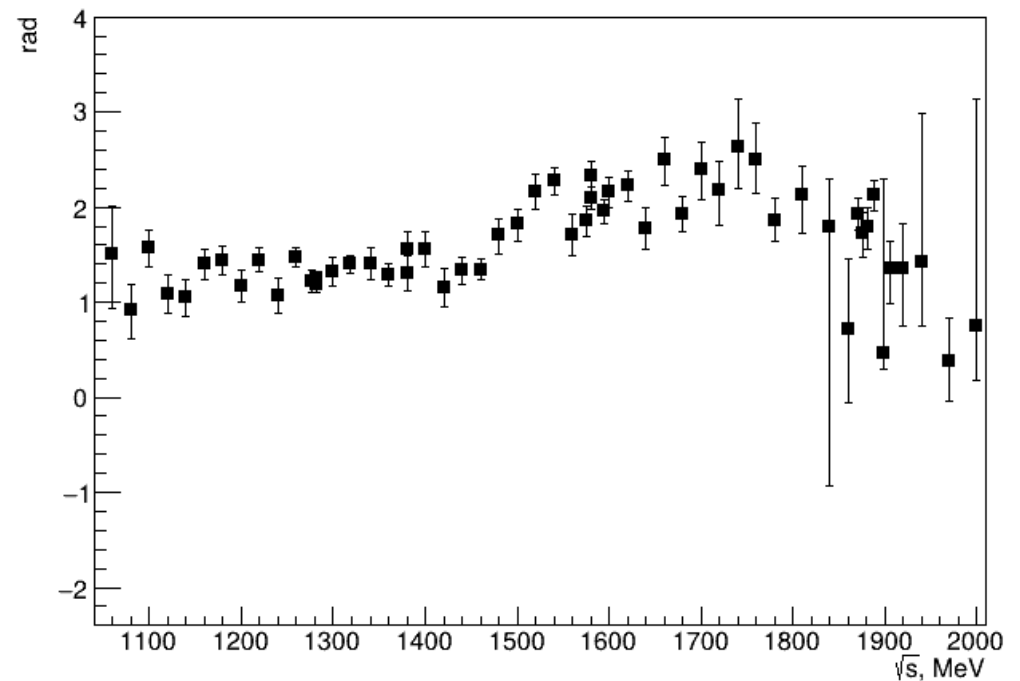


Результат аппроксимации распределений Далитца: фазы интерференции

φ_1 - интерференция между $\rho\pi$ и $\rho'\pi$ состояниями



φ_2 - интерференция между $\rho\pi$ и $\omega\pi$ состояниями



Параметризация сечения $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ (для $\rho\pi$ и $\rho'\pi$ механизмов)

Борновское сечение: $\sigma(s) = \frac{4\pi\alpha}{s^2} |A_{\rho^{(\prime)}\pi}|^2 P_{\rho^{(\prime)}\pi}(s)$ где $P_{\rho^{(\prime)}\pi}(s)$ – фазовый объем $\rho^{(\prime)}\pi$

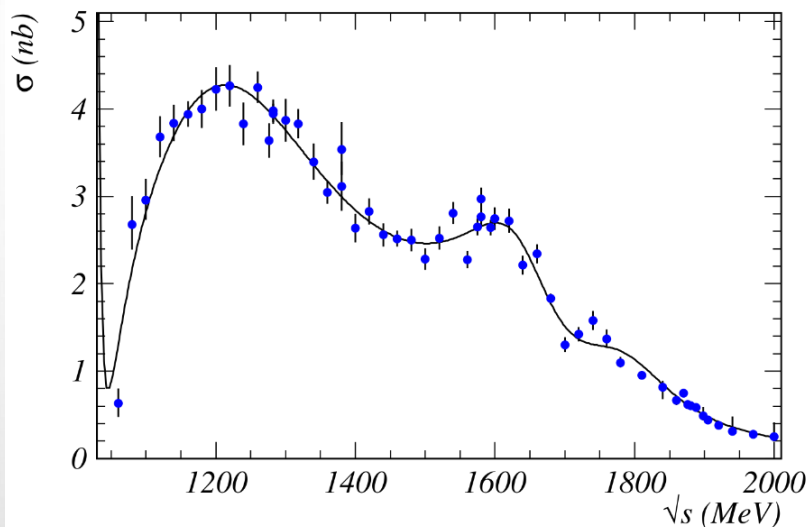
- Параметризация амплитуд $A_{\rho^{(\prime)}\pi}$ производится в рамках модели векторной доминантности.

$$A_{\rho\pi}(s) = \frac{1}{\sqrt{4\pi\alpha}} \sum_{V=\omega, \phi, \omega', \omega'', \omega_x} \frac{\Gamma_V m_V^2 \sqrt{m_V \sigma_V}}{D_V(s) \sqrt{P_{\rho\pi}(m_V^2)}} e^{i\phi_V}; \quad A_{\rho'\pi}(s) = \frac{1}{\sqrt{4\pi\alpha}} \sum_{V=\phi, \omega', \omega'', \omega_x} \frac{\Gamma_V m_V^2 \sqrt{m_V \sigma'_V}}{D_V(s) \sqrt{P_{\rho'\pi}(m_V^2)}} e^{i\phi'_V}$$

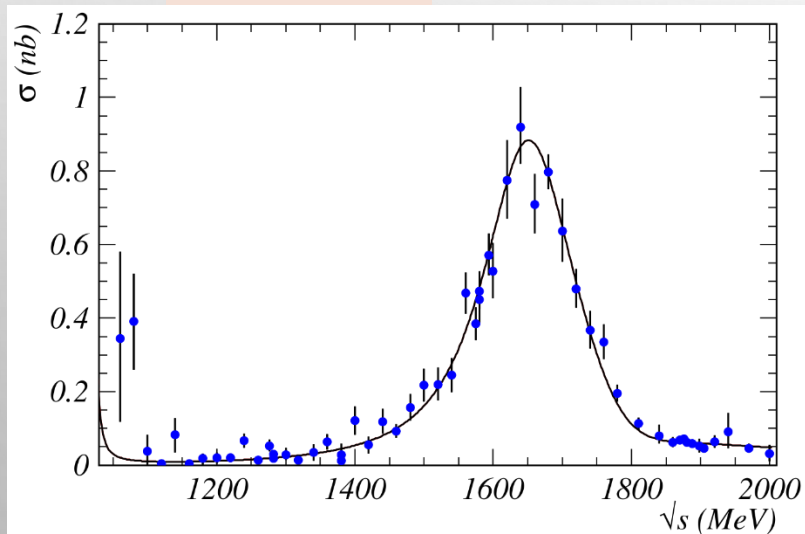
- Учитываются резонансы ω , ϕ , $\omega(1420)$, $\omega(1650)$ и ω_x
- Сечение для конкретного механизма получают умножением доли событий соответствующего состояния, полученных из аппроксимации распределений Далитца, на значение полного борновского сечения
- Фаза между амплитудами $A_{\rho\pi}$ и $A_{\rho'\pi}$ определяется как: $\phi_1(s) = \text{Arg}(A_{\rho\pi}(s)) - \text{Arg}(A_{\rho'\pi}(s))$
- Параметры резонансов ω , ϕ фиксируются на значениях из PDG, а параметры возбужденных резонансов (массы, ширины, фазы, сечения) являются параметрами аппроксимации.
- Параметры распада ϕ мезона для механизма $\rho'\pi$ берутся из работы KLOE (фаза и величина сечения)

Борновское сечение процессов $e^+e^- \rightarrow \rho\pi$ и $\rho'\pi$

$e^+e^- \rightarrow \rho\pi$

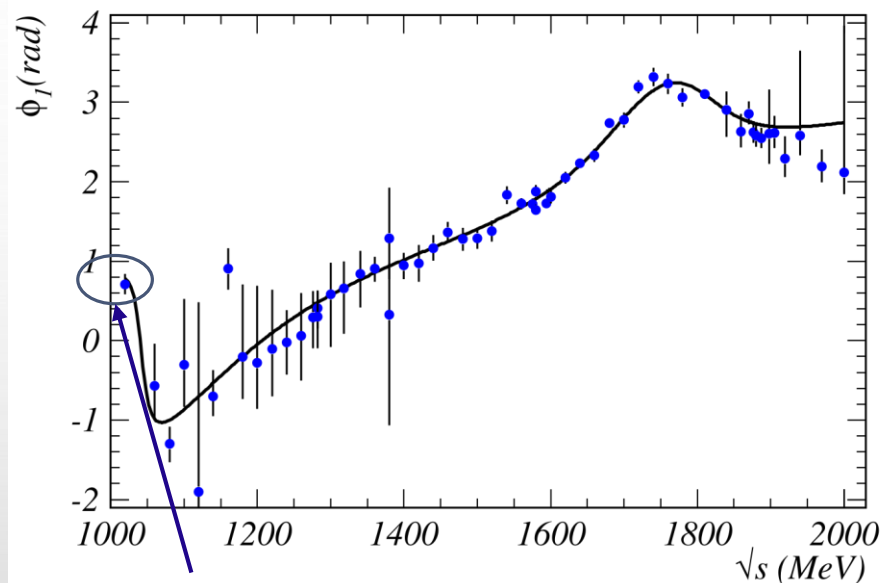


$e^+e^- \rightarrow \rho'\pi$



Одновременно аппроксимируются оба сечения и фаза φ_1

φ_1 - относительная фаза между $\rho\pi$ и $\rho'\pi$ состояниями



KLOE

Предварительно

Параметры резонансов

Параметры	SND [ЯФ, 87, 513(2024)]	Данная работа	PDG
$M(\omega')$ (MeV)	1350 ± 43	1215 ± 26	1410 ± 60
$\Gamma(\omega')$ (MeV)	590 ± 90	480 ± 33	290 ± 190
$\sigma(\omega' \rightarrow \rho\pi)$ (nb)	4.17 ± 0.73	1.35 ± 0.09	
$\sigma(\omega' \rightarrow \rho'\pi)$ (nb)	$0.053^{+0.021}_{-0.015}$	0.72 ± 0.16	
$M(\omega'')$ (MeV)	1643 ± 6	1648 ± 5	1670 ± 30
$\Gamma(\omega'')$ (MeV)	148 ± 13	173 ± 10	315 ± 35
$\sigma(\omega'' \rightarrow \rho\pi)$ (nb)	$0.046^{+0.042}_{-0.028}$	0.023 ± 0.012	
$\sigma(\omega'' \rightarrow \rho'\pi)$ (nb)	1.65 ± 0.16	1.54 ± 0.18	
$M(\omega_x)$ (MeV)		1782 ± 20	
$\Gamma(\omega_x)$ (MeV)		200 ± 10	
$\sigma(\omega'' \rightarrow \rho\pi)$ (nb)		0.36 ± 0.10	
$\sigma(\omega'' \rightarrow \rho'\pi)$ (nb)		0.11 ± 0.06	

Возможные кандидаты для ω_x :
 $\phi(1680)$: $M=1680\text{MeV}$ $\Gamma=150\text{MeV}$
 $X(1750)$: $M=1750\text{MeV}$ $\Gamma=120\text{MeV}$
 Аппроксимация без ω_x ухудшает χ^2

Предварительно

Заключение и планы

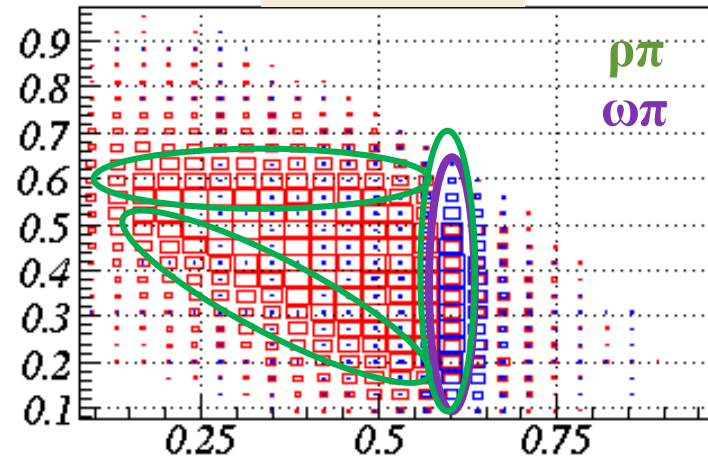
Предварительно

1. На основе данных с $\mathcal{L} \sim 600 \text{ пб}^{-1}$ получен предварительный результат по измерению полного сечения $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$. Также получены сечения для промежуточных механизмов $e^+e^- \rightarrow \rho\pi$ и $e^+e^- \rightarrow \rho'\pi$. Кроме того, измерены фазы между амплитудами $A_{\rho\pi}$ и $A_{\rho'\pi}$ (φ_1) и $A_{\rho\pi}$ и $A_{\omega\pi}$ (φ_2).
2. Из аппроксимации полученных сечений видно, что распад $\omega(1420)$ идет практически только через механизм $\rho\pi$, а в распаде $\omega(1650)$ преобладает механизм $\rho'\pi$.
3. Для описания поведения сечений обоих механизмов и угла φ_1 требуется использование еще одного резонанса с массой около 1780 MeV.
4. Планируется провести изучение разных моделей аппроксимации, добавляя другие резонансы, а также использовать измерения BESIII около 2 ГэВ

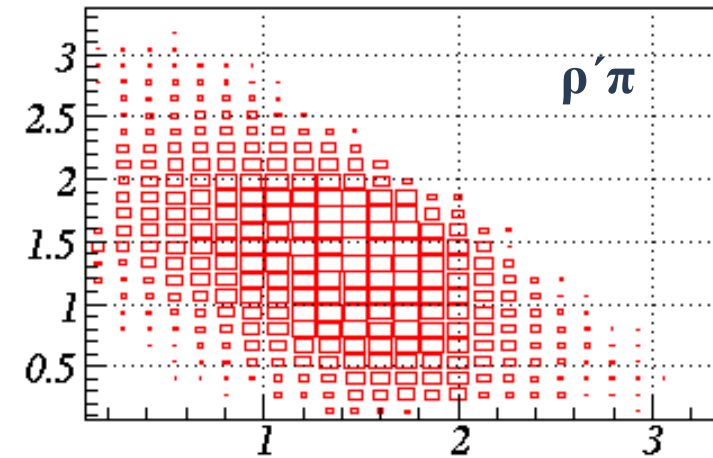
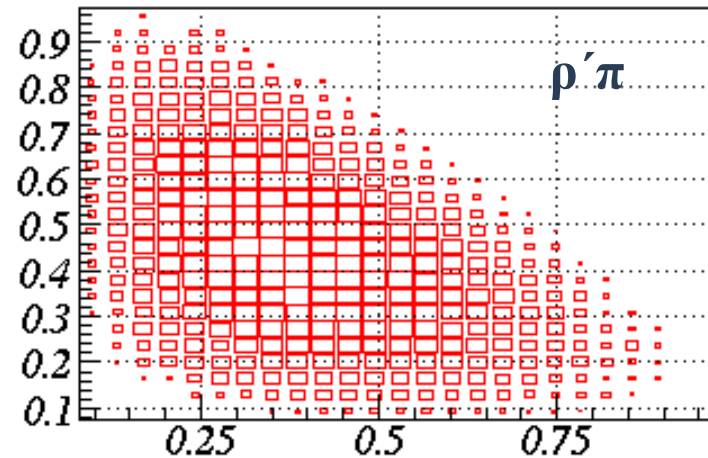
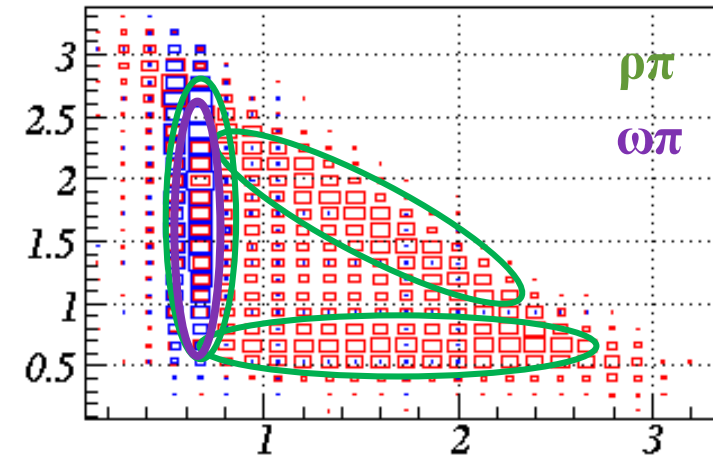
Backup slides

Dalitz plot distributions for individual components (MC)

$\sqrt{s}=1.1\text{GeV}$



$\sqrt{s}=1.95\text{GeV}$



Параметризация сечения $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ (для $\rho\pi$ и $\rho'\pi$ механизмов)

Борновское сечение: $\sigma(s) = \frac{4\pi\alpha}{s^2} |A_{\rho(\prime)\pi}|^2 P_{\rho(\prime)\pi}(s)$ где $P_{\rho(\prime)\pi}(s)$ – фазовый объем $\rho(\prime)\pi$

$$A_{\rho\pi}(s) = \frac{1}{\sqrt{4\pi\alpha}} \sum_{V=\omega,\varphi,\omega',\omega'',\omega_x} \frac{\Gamma_V m_V^2 \sqrt{m_V \sigma_V}}{D_V(s) \sqrt{P_{\rho\pi}(m_V^2)}} e^{i\varphi_V} A_{\rho'\pi}(s) = \frac{1}{\sqrt{4\pi\alpha}} \sum_{V=\omega,\varphi,\omega',\omega'',\omega_x} \frac{\Gamma_V m_V^2 \sqrt{m_V \sigma'_V}}{D_V(s) \sqrt{P_{\rho'\pi}(m_V^2)}} e^{i\varphi'_V}$$

Обратный пропагатор: $D_V(s) = m_V^2 - s - i\sqrt{s}\Gamma_V(s)$, где $\Gamma_V(s) = \sum_f \Gamma(V \rightarrow f, s)$

Фаза между амплитудами $A_{\rho\pi}$ и $A_{\rho'\pi}$ определяется как: $\varphi_1(s) = \text{Arg}(A_{\rho\pi}(s)) - \text{Arg}(A_{\rho'\pi}(s))$

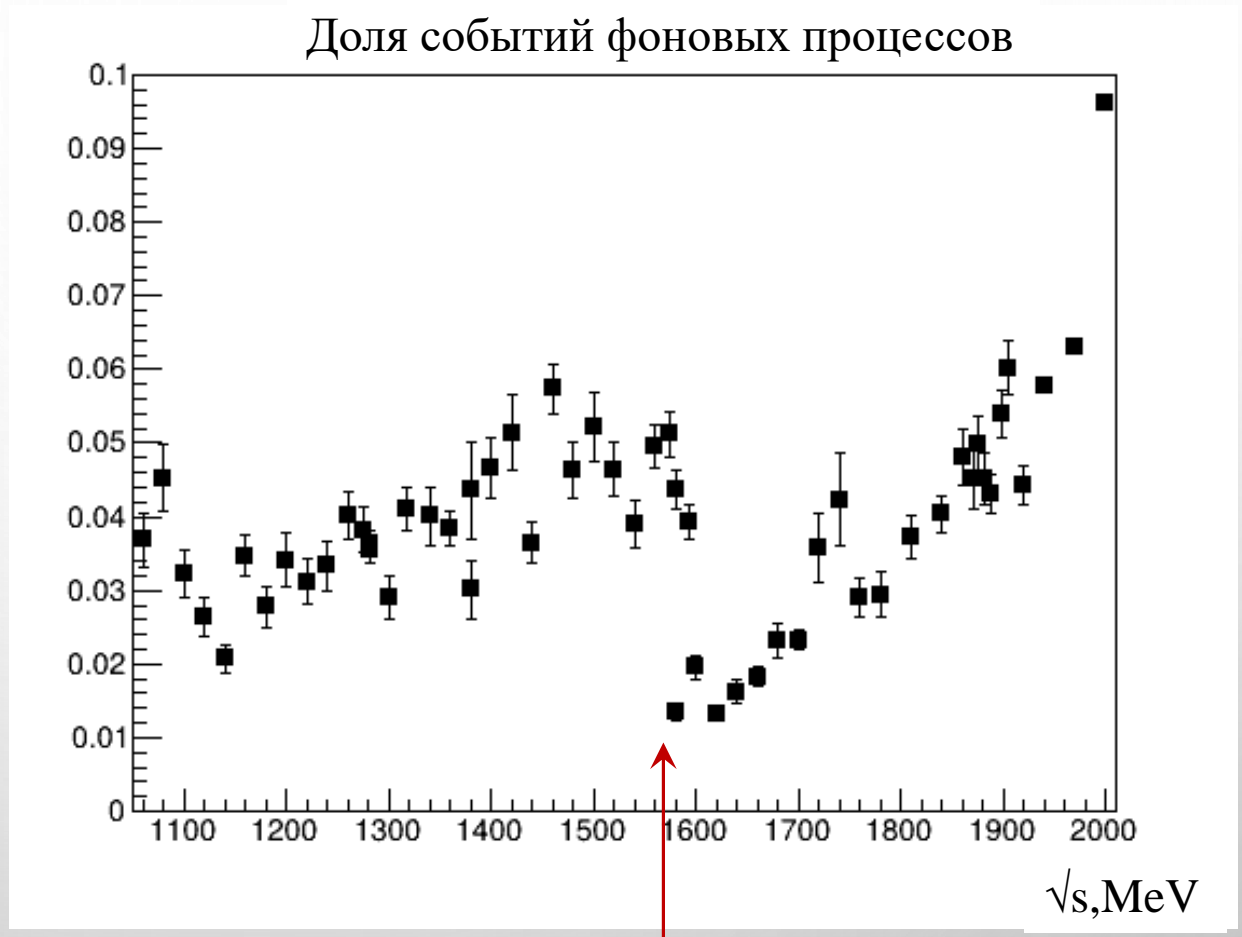
Для $V = \omega, \varphi$ зависимость ширины Γ_V от энергии описывается, как сумма всех основных каналов распада. Для $V = \omega(1420), \omega(1650), \omega_x$ ширина Γ_V является константой.

Масса и ширина ω, φ берутся из *PDG*, фаза $\varphi_\varphi = 163^\circ$. σ'_φ определяется по данным KLOE, при учете ω для перехода $\rho'\pi$ фаза $\varphi'_\rho = 0^\circ$, а σ'_ρ подбиралась в ручную.

В итоге параметрами подгонки являются масса и ширина $\omega(1420), \omega(1650), \omega_x$ сечения $\sigma_{\omega'}, \sigma_{\omega''}, \sigma_{\omega_x}$ и фазы $\varphi_{\omega'}, \varphi_{\omega''}, \varphi_{\omega_x}$ для механизма $\rho\pi$, сечения $\sigma'_{\omega'}, \sigma'_{\omega''}, \sigma'_{\omega_x}$ и фазы $\varphi'_{\omega'}, \varphi'_\varphi, \varphi'_{\omega_x}$ для механизма $\rho'\pi$.

Уровень фона в зависимости от энергии \sqrt{s}

Результат подавления фона от процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ с помощью BDT классификатора



BDT классификатор