

LXXV Международная конференция
«ЯДРО-2025. Физика атомного ядра и элементарных частиц.
Ядерно-физические технологии»

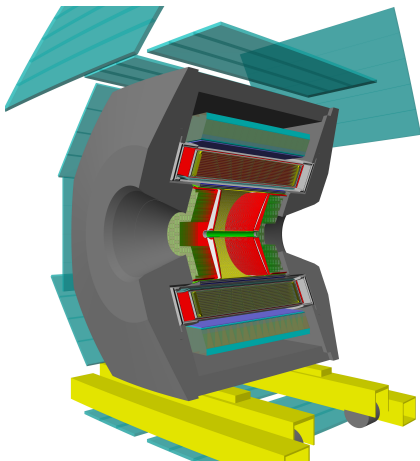
Измерение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ в области
энергий ω -мезона с детектором КМД-3 на
ВЭПП-2000

Толмачев С.С.
Коллаборация КМД-3

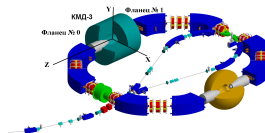
ИЯФ СО РАН



02.07.2025



- ВЭПП-2000
- КМД-3



- $\sqrt{s} = 0.3 - 2$ ГэВ
- Дрейфовая камера
($\sigma_{R\phi} \sim 100\mu m, \sigma_Z \sim 2.5mm$)
- Калориметры
 - барельный: LXe + CsI
 - торцевой: BGO
- TOF
- Мюонная система
- Магнитное поле 1.3 Тл

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

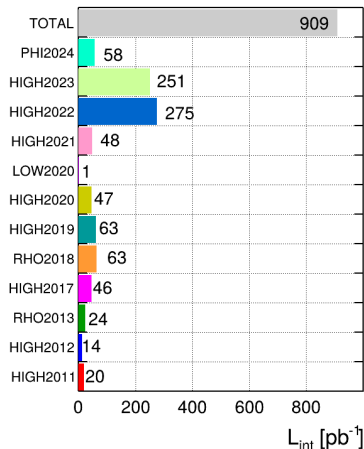
Мотивация

- Второй по значимости вклад в адронную часть $(g-2)_\mu$
- Различие КМД-2 и СНД (~ 130 нб)
- Измерение параметров ω -мезона
- Изучение динамики (ρ - ω интерференция в канале $\pi^+\pi^-\pi^0$)
- КМД-2
- СНД

Ключевые задачи анализа

- Измерение сечения $\sigma(e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0)$
- Определение параметров ω -мезона из аппроксимации сечения
- Исследование ρ - ω интерференции
- Расчет вклада в $(g-2)_\mu$

Данные. Светимость. Измерение энергии

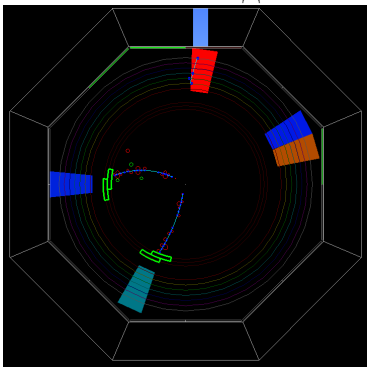


- Светимость
- Измерение энергии

- 4 сканирования области энергий $\sqrt{s} = 0.65 - 0.98$
- RHO2013 (47 точек) $L_{int} \sim 13 pb^{-1}$
- RHO2018 (69 точек) $L_{int} \sim 34 pb^{-1}$
- Светимость измерена по процессу $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ ($\Delta_{sys} \sim 1.5\%$)
- Энергия пучка измерялась методом обратного комптоновского рассеяния ($\Delta_{sys} \sim 60$ кэВ)
- Разброс энергии в пучке $\sigma_E \sim 250$ кэВ

Критерии отбора событий

Характерная сигнатура события
 $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ в КМД-3



“Хороший” трэк:

- $N_{\text{hits}} > 10$
- $1 < \theta < \pi - 1$ рад
- $\rho < 0.2$ см
- $|z| < 10$ см
- $dE/dx < 5000$
- $0.2 < P/E_{\text{beam}} < 0.8$

Общие критерии:

- $N_{\text{good tr}} = 2$
- $Q_1 + Q_2 = 0$
- $N_{\text{good } \gamma} \geq 2$
- $0.25 < |\Delta\phi| < \pi - 0.25$
- $0.4 < (P_1 + P_2)/2E_{\text{beam}} < 0.75$

“Хороший” фотон:

- $E_\gamma > 50$ МэВ
- $0.84 < \theta_\gamma < \pi - 0.84$ рад

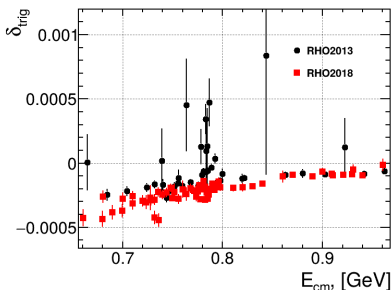
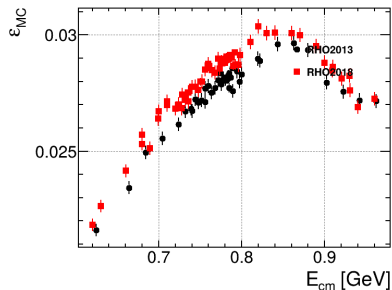
Кинематический фит:

- $\chi^2_{\pi\pi\gamma} > 40$
- $\chi^2_{ee\gamma} > 200$
- $\chi^2_{\mu\mu\gamma} > 100$

Основные фоновые процессы:

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

Эффективность. Поправка к эффективности триггера



Моделирование

- $\rho\pi$ - механизм рождения 3π
- учет ISR

Определение величин:

- $\varepsilon_{MC} = \frac{N_{sel}^{MC}}{N_{tot}^{MC}}, \sim 3\% \text{ т.к. } \pi^0$

- $\delta_{\text{trig}} = 1 - \frac{\varepsilon_{\text{trig}}^{\text{exp}}}{\varepsilon_{\text{trig}}^{\text{MC}}}$

$$\varepsilon_{\text{trig}} = 1 - (1 - \varepsilon_{\text{ch}})(1 - \varepsilon_{\text{neut}})$$

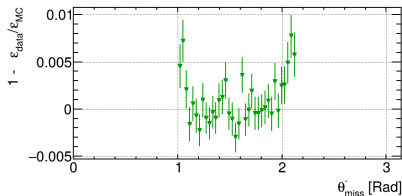
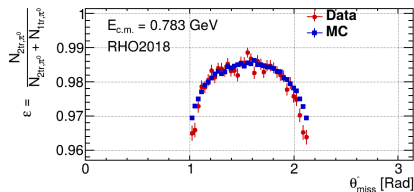
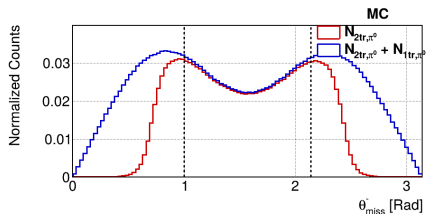
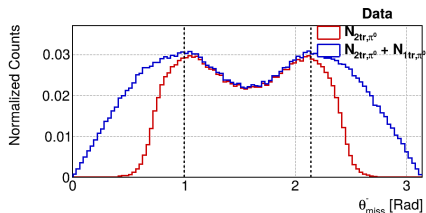
$$\varepsilon_{\text{neut}} = \frac{N_{\text{both}}}{N_{\text{ch}} + N_{\text{both}}}$$

$$\varepsilon_{\text{ch}} = \frac{N_{\text{both}}}{N_{\text{neut}} + N_{\text{both}}}$$

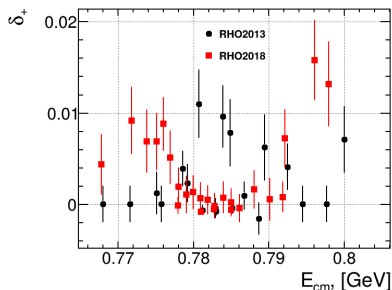
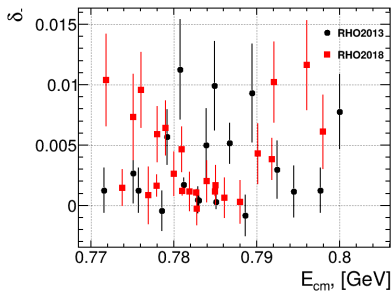
Поправки к реконструкции треков (Расчет)

Два класса событий (N_{2tr,π^0} и $N_{2tr+1tr,\pi^0}$) отбираются в более "жестких" отборах на π^0

- $120 < M_{\gamma\gamma} < 150$ MeV



Поправки к реконструкции треков

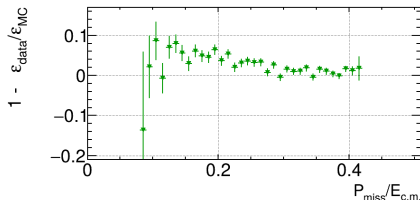
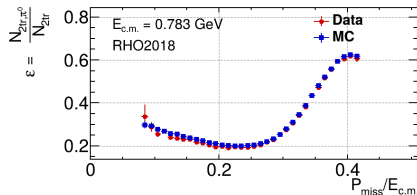
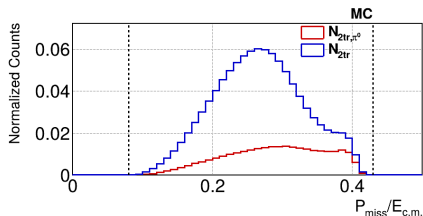
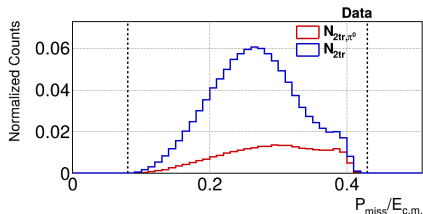


- Для определения интегральной поправки на точку, распределение по $\delta_{\pm} = 1 - \frac{\epsilon_{\pm}^{exp}}{\epsilon_{\pm}^{MC}}$ сворачивалось с угловым распределением событий.
- В точках где нет достаточно статистики для определения поправки бралось взвешенное среднее за сезон.
- на пике $< 0.5\%$ на трек (RHO2018)

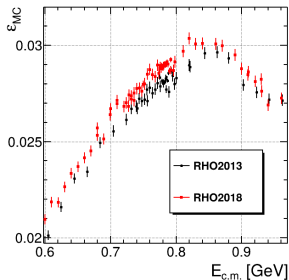
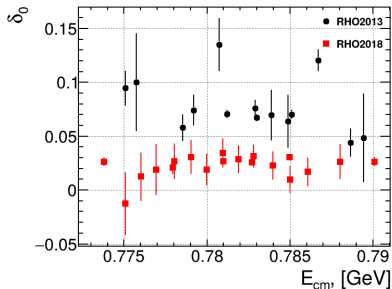
Поправки к реконструкции π^0 (расчет)

Два класса событий (N_{2tr,π^0} и N_{2tr}) отбираются в более "жестких" отборах на M_{miss}

- $40 < M_{miss} < 180 \text{ MeV}$

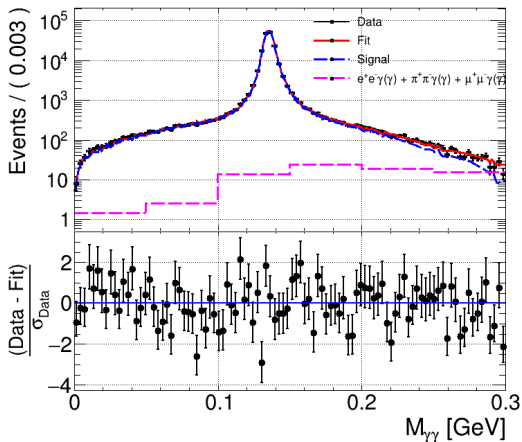


Поправки к реконструкции π^0



- Для определения интегральной поправки на точку, распределение по $\delta_0 = 1 - \frac{\epsilon_0^{exp}}{\epsilon_0^{MC}}$ сворачивалось с импульсным распределением потерянного π^0 .
- В точках где нет достаточно статистики для определения поправки бралось взвешенное среднее за сезон.
- RHO2018 $\sim 2.5\%$
- RHO2013 $\sim 7.5\%$

Определение числа событий. Расчет видимого сечения.



- Аппроксимация распределения по инвариантной массе пары фотон с наименьшим $\chi^2_{\pi^+\pi^-}$ в сигнальной гипотезе.
- $Sig(MC + res) + Bkg(MC + uniform)$
- RHO2018
- $E_{beam} = 391.5 \text{ MeV}$
- $L_{int} \sim 5 \text{ пб}^{-1}$
- $N_{sig} \sim 200k$ $N_{bkg} \sim 1k$

$$\sigma_{vis} = \frac{N_{sig}}{\varepsilon_{MC} L (1 - \delta_+) (1 - \delta_-) (1 - \delta_0) (1 - \delta_{trig})}$$

Аппроксимация видимого сечения

$$\sigma_{\text{vis}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_E^2}} \int \exp\left(\frac{(\sqrt{s'} - \sqrt{s})^2}{2\sigma_E^2}\right) \times \int_0^{1-s_{th}/s'} F(x, s') \sigma_{\text{born}}(s'(1-x)) dx d(\sqrt{s'})$$

$$\sigma(s)_{\text{born}} = \frac{F_{3\pi}^{\rho\pi}(s)}{s^{3/2}} \left| \sum_{V=\rho, \omega, \phi, \omega^1, \omega^2} e^{i\phi_{\omega V}} \sqrt{\frac{\sigma_0(V \rightarrow 3\pi) M_V}{F_{3\pi}^{\rho\pi}(M_V^2)}} \frac{\Gamma_V M_V^2}{D_V(s)} \right|^2$$

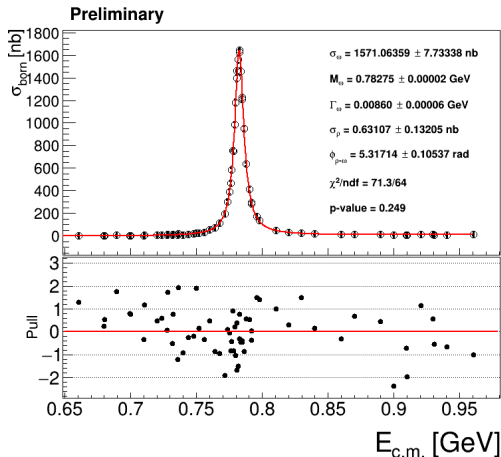
$$F_{3\pi}^{\rho\pi}(s) = \frac{(4\pi\alpha)^2 \sqrt{s}}{12\pi} \int [\vec{P}_+ \times \vec{P}_-]_{\perp}^2 \left| \sum_{i=0,+,-} \frac{g_{\rho^i \pi \pi}}{D_{\rho^i}(P_{\rho^i}^2)} \right|^2 d\Phi_{3\pi}$$

- V - векторный мезон
- $\phi_{\omega V}$ - относительная фаза смешивания векторных мезонов
- $F_{3\pi}^{\rho\pi}(s)$ - фазовый объем в механизме $\rho\pi$
- $M_{\omega}, \Gamma_{\omega}, \sigma_0(\omega \rightarrow 3\pi), \sigma_0(\rho \rightarrow 3\pi), \phi_{\omega\rho}$ - свободные параметры
- $\phi_{\omega\phi} = 162^\circ$ (СНД)

• Isrsolver

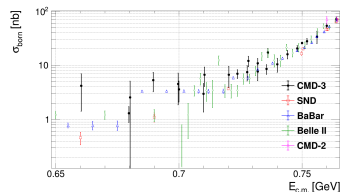
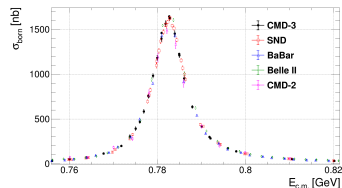
• СНД

Аппроксимация сечения. Сравнение с другими экспериментами.



● BaBar

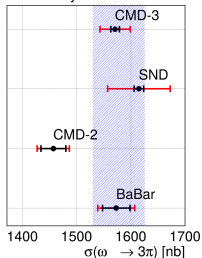
● Belle II



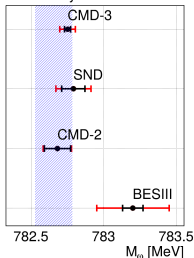
На графиках только
статистические
погрешности

Параметры аппроксимации. Сравнение с другими экспериментами

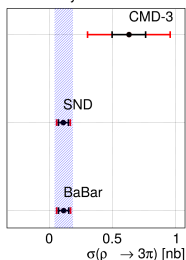
Preliminary



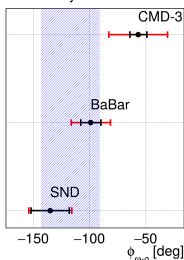
Preliminary



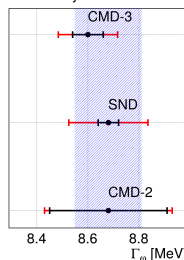
Preliminary



Preliminary



Preliminary



- черная линия - статистическая погрешность
- красная линия - полная погрешность
- согласие параметров ω -мезона

Систематические погрешности

Источник	Вклад (%)	Способ оценки
Светимость	1.5	Отличие светимости по $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ и $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$
Поправка реконструкции треков	0.2	Расчет поправок в разных критериях отбора
Поправка реконструкции π^0	0.5	Сравнение с сечением без реконструкции π^0
Поправка на эффективность триггера	<0.1	–
Критерии отбора	0.5	Вариация критериев отбора
Вычитание фона	0.3	Разные процедуры определения числа событий

Полная систематическая погрешность сечения: 1.8%

Систематические погрешности для Γ_ω , $\sigma(\rho \rightarrow 3\pi)$ и $\phi_{\omega-\rho}$ оценивались по разбросу значений в разных сканированиях.

$$a_\mu^{had, 3\pi} = \frac{1}{4\pi^3} \int_{s_{min}}^{s_{max}} \sigma_{\text{born}}^{3\pi}(s) |1 - \Pi(s)|^2 \cdot K(s) ds$$

- $\sigma_{\text{born}}^{3\pi}(s)$ – функция борновского сечения после аппроксимации экспериментальных данных

$a_\mu^{had, 3\pi}$ в диапазоне $0.62 < \sqrt{s} < 1.1 \text{ GeV}/c^2$

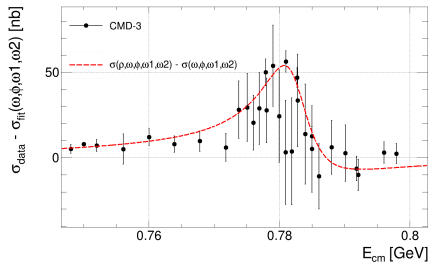
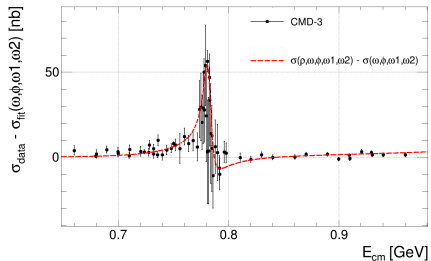
- **CMD-3** $(44.3 \pm 0.2 \pm 0.8) \times 10^{10}$ (**Preliminary**)
- BaBar $(42.91 \pm 0.14 \pm 0.55 \pm 0.09) \times 10^{10}$
- $\Delta = (1.4 \pm 1) \times 10^{10}$ (Preliminary)

$a_\mu^{had, 3\pi}$ в диапазоне $\sqrt{s} < 2 \text{ GeV}/c^2$

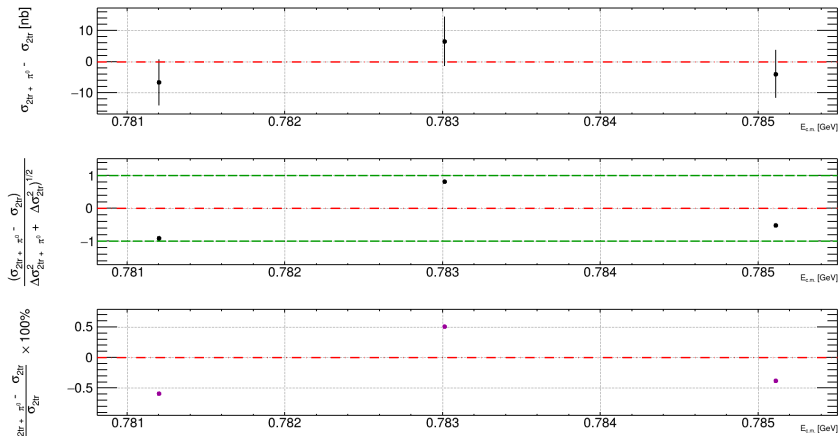
- Belle II $(48.91 \pm 0.23 \pm 1.07) \times 10^{10}$
- SND $(45.8 \pm 0.2 \pm 1.7) \times 10^{10}$

- Оператор поляризации вакуума

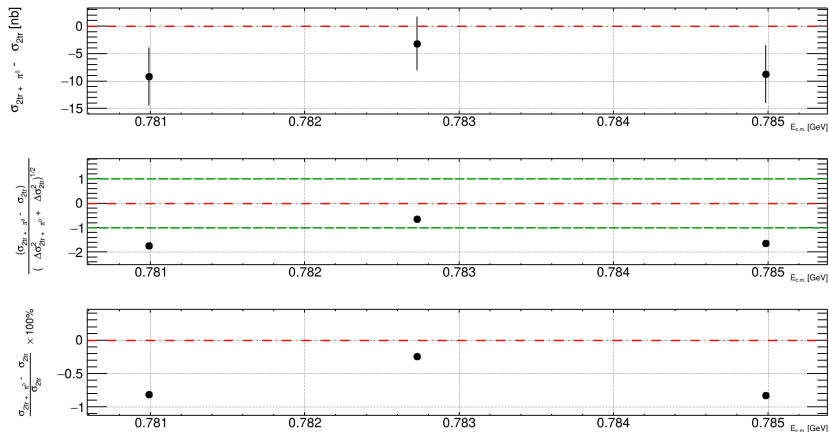
Backslides. Вычитание вклада ρ



Backslides. Систематика. Сравнение сечений (RHO2013)

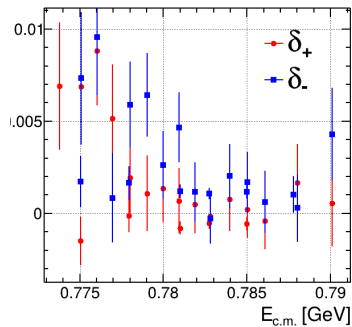


Backslides. Систематика. Сравнение сечений (RHO2018)



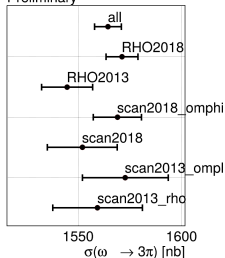
Backslides. Поправка к реконструкции треков.

Сравнение π^+ и π^- (RHO2018)

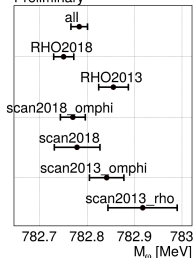


Backslides. Сравнение параметров аппроксимации в разных сканированиях КМД-3

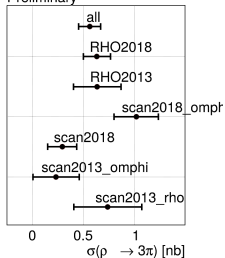
Preliminary



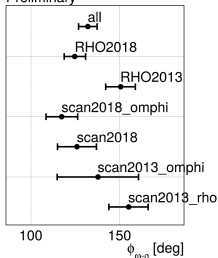
Preliminary



Preliminary



Preliminary



Preliminary

