

Амплитудный анализ процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$
в диапазоне энергий от 1.2 до 2.0 ГэВ с детектором КМД-3

В. М. Романенко С. С. Грибанов

Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия
Институт ядерной физики им.Г.И.Будкера, Новосибирск, Россия

Сессия-конференция Физика фундаментальных взаимодействий,
ИЯФ СО РАН, 10 - 13 марта 2026

Мотивация:

- Изучение динамики промежуточных состояний
- Уточнение масс и ширин векторных мезонов
- Вклад в $(g - 2)_\mu$

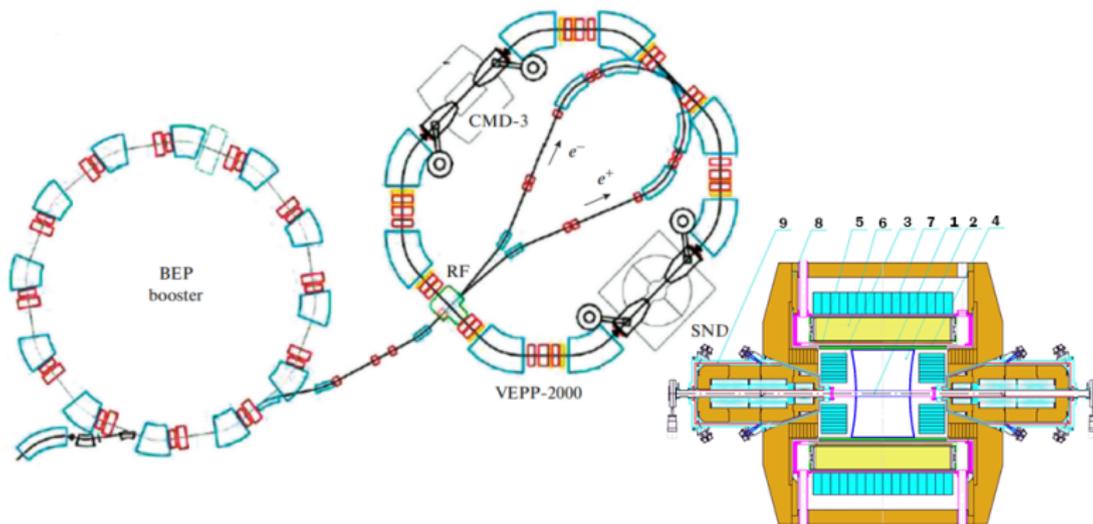
На данный момент проведён амплитудный анализ и получено сечение в механизме $\rho(770)\pi$ по статистике сезонов 2022 и 2023 годов (интегральная светимость 360 пб^{-1}) с детектором КМД-3

Коллайдер ВЭПП-2000 и детектор КМД-3

КМД-3 – криогенный магнитный детектор

Ускорительно-накопительный комплекс ВЭПП-2000 (ИЯФ СО РАН, Новосибирск), работает на встречных электрон-позитронных пучках.

СВЕТИМОСТЬ

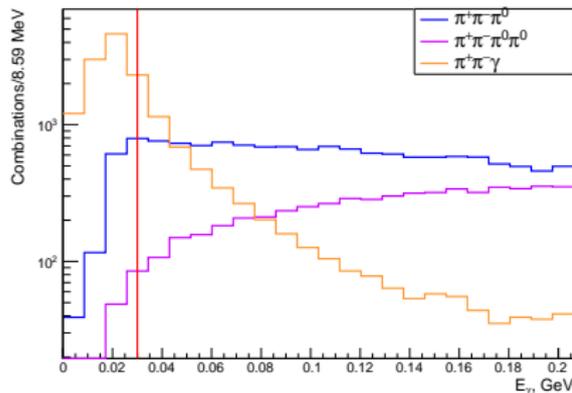


1 – место встречи; 2 – дрейфовая камера (ДК); 3 – торцевой калориметр; 4 – Z-камера; 5 – сверхпроводящий магнит; 6 – LXe калориметр; 7 – CsI калориметр; 8 – железное ядро; 9 – фокусирующие соленоиды

Сечение. Критерии отбора

Кроме процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ моделировали события фоновых процессов: $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ и $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma$. Для подавления событий фоновых процессов были разработаны критерии отбора:

- Число фотонов с энергией больше 30 МэВ ≥ 2

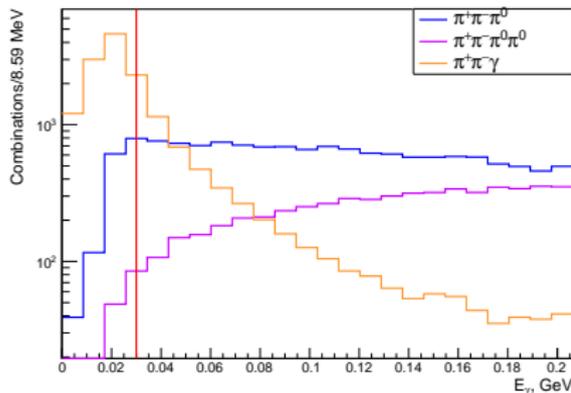


Распределение энергий фотонов в точке с энергией $\sqrt{s} = 1,86$ ГэВ

Сечение. Критерии отбора

Кроме процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ моделировали события фоновых процессов: $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ и $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma$. Для подавления событий фоновых процессов были разработаны критерии отбора:

- Число фотонов с энергией больше 30 МэВ ≥ 2
- Количество центральных треков в ДК, отвечающих заряженным частицам с зарядами противоположного знака = 2

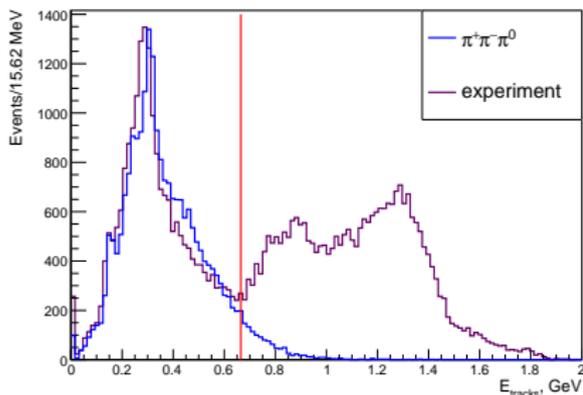


Распределение энергий фотонов в точке с энергией $\sqrt{s} = 1,86$ ГэВ

Сечение. Критерии отбора

Кроме процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ моделировали события фоновых процессов: $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ и $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma$. Для подавления событий фоновых процессов были разработаны критерии отбора:

- Число фотонов с энергией больше 30 МэВ ≥ 2
- Количество центральных треков в ДК, отвечающих заряженным частицам с зарядами противоположного знака = 2
- Суммарное энерговыделение заряженных пионов в калориметре $< 0,5 + 0,25(E_{\text{cm}} - 1,2 \text{ ГэВ})$



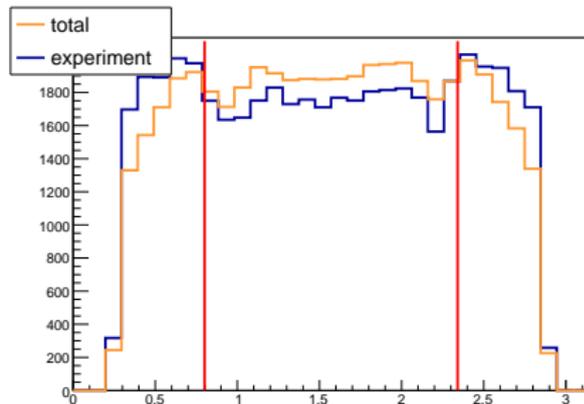
Энерговыделения заряженных пионов в калориметре в точке с энергией $\sqrt{s} = 1,86 \text{ ГэВ}$

Моделирование сигнала и фона

Более того в амплитудном анализе были наложены дополнительные критерии отбора:

- Кинематический фит сошёлся в гипотезе $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-(\gamma\gamma)_{\pi^0}$, где инвариантная масса двух фотонов складывается в массу π^0
- $0.11 \text{ ГэВ} < m_{\gamma\gamma} < 0.15 \text{ ГэВ}$
- Энергии фотонов $> 50 \text{ МэВ}$
- $0.8 < \theta_\gamma < \pi - 0.8$

Каты прошло 5,757,108 событий моделирования сигнала и 155,318 событий фона.

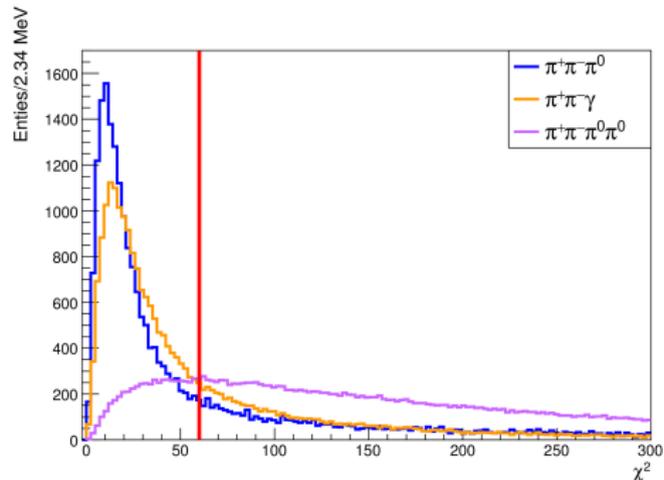


Распределение углов фотонов ($\sqrt{s} = 1,86 \text{ ГэВ}$)

Кинематическая реконструкция

Для каждой пары отобранных фотонов запускается процесс кинематической реконструкции в гипотезе $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma\gamma$ с требованием законов сохранения энергии-импульса и вылета частиц (заряженных пионов) из общей вершины.

Пара фотонов с минимальным значением χ^2 кинематической реконструкции рассматриваются как кандидаты от распада π^0 . Дополнительно накладывается отбор $\chi^2 < 60$.

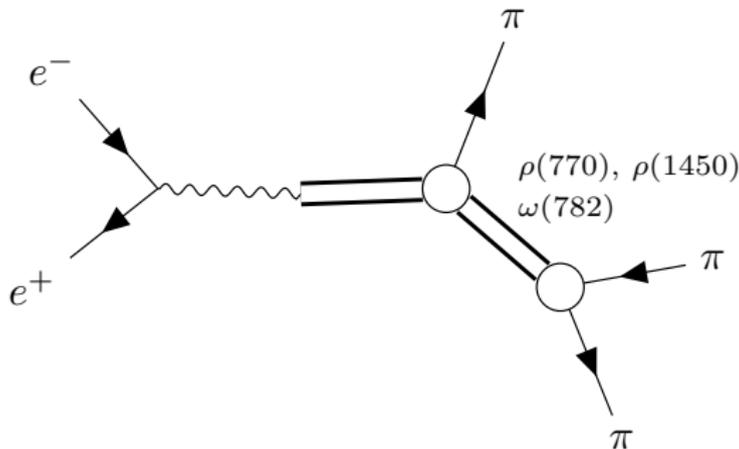


Распределение χ^2 кинематической реконструкции в гипотезе $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma\gamma$ в точке с энергией $\sqrt{s} = 1,86$ ГэВ

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

$$e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow V \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \rho(770)\pi \\ \rho(1450)\pi \\ \omega(782)\pi \end{array} \right\} \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$$

Каждое промежуточное состояние даёт свой вклад в матричный элемент: $\mathcal{M} = \sum C_{\text{sig}_i} \mathcal{M}_i$



Нахождение параметров модели

Плотность вероятности наблюдаемых событий в точке с фиксированной энергией:

$$f(\Phi, \mathbf{C}_{\text{sig}}, \mathbf{C}_{\text{bkg}}) = \frac{\epsilon_{\text{sig}}(\Phi) I_{\text{sig}}(\Phi; \mathbf{C}_{\text{sig}}) + I_{\text{bkg}}(\Phi; \mathbf{C}_{\text{bkg}})}{\int \epsilon_{\text{sig}}(\Phi) I_{\text{sig}}(\Phi; \mathbf{C}_{\text{sig}}) d\Phi + \int I_{\text{bkg}}(\Phi; \mathbf{C}_{\text{bkg}}) d\Phi},$$

где $I_{\text{sig}} \propto \mathcal{M} = \sum C_{\text{sig}_i} \mathcal{M}_i$

$$I_{\text{sig}}(\Phi; \mathbf{C}_{\text{sig}}) = \mathbf{C}_{\text{sig}}^\dagger \hat{\rho}_{\text{sig}}(\Phi) \mathbf{C}_{\text{sig}}$$

$$I_{\text{bkg}}(\Phi; \mathbf{C}_{\text{bkg}}) = \mathbf{C}_{\text{bkg}}^\dagger \hat{\rho}_{\text{bkg}}(\Phi) \mathbf{C}_{\text{bkg}}$$

$\epsilon_{\text{sig}}(\Phi)$ – плотность вероятности сигнала по фазовому объёму

$\hat{\rho}_{\text{bkg}}(\Phi)$ – плотность вероятности фона в модели фона

Нахождение параметров модели

Для аппроксимации плотности вероятности наблюдаемых событий был использован Extended Maximum Likelihood Fit¹.

$$\mathcal{L}_{\text{ext}} = \frac{N_{\text{tot}}^{N_{\text{exp}}}}{N_{\text{exp}}!} e^{-N_{\text{tot}}} \prod_{l \in \text{exp}} f(\Phi_l; \mathbf{C}_{\text{sig}}, \mathbf{C}_{\text{bkg}})$$
$$\ln \mathcal{L}_{\text{ext}} = \sum_{l \in \text{exp}} \ln(\mathbf{C}_{\text{sig}}^\dagger \hat{\rho}_{\text{sig}}(\Phi_l) \mathbf{C}_{\text{sig}} + \mathbf{C}_{\text{bkg}}^\top \frac{\hat{\rho}_{\text{sig}}(\Phi_l)}{\varepsilon_{\text{bkg}}(\Phi_l)} \mathbf{C}_{\text{bkg}}) -$$
$$- \mathbf{C}_{\text{bkg}}^\top \hat{I}_{\text{bkg}} \mathbf{C}_{\text{bkg}} - \mathbf{C}_{\text{sig}}^\dagger \hat{I}_{\text{sig}} \mathbf{C}_{\text{sig}},$$

$$\text{где } \hat{I}_{\text{sig}} = \frac{1}{N_{\text{phsp sig}}^{\text{MC}}} \sum_{j \in \text{phsp sig}} \hat{\rho}_{\text{sig}}(\Phi_j)$$
$$\hat{I}_{\text{bkg}} = \frac{1}{N_{\text{phsp sig}}^{\text{MC}}} \sum_{j \in \text{phsp sig}} \frac{\hat{\rho}_{\text{bkg}}(\Phi_j)}{\varepsilon_{\text{sig}}(\Phi_j)}$$

Позволяет найти параметры модели \mathbf{C}_{sig} , полное число событий

¹Roger Barlow. "Extended maximum likelihood". Nuclear Instruments and Methods in Physics Research 297.3 (1990), с. 496–506.

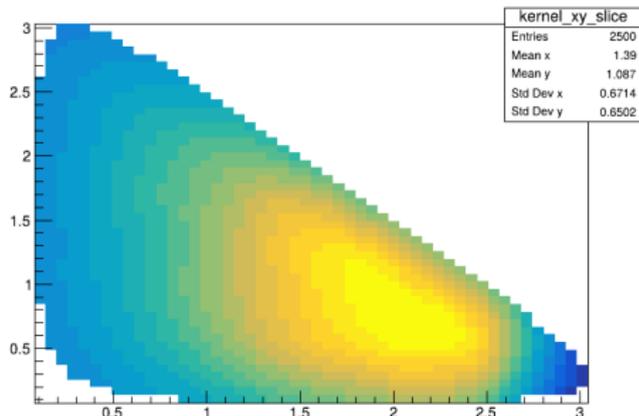
Моделирование сигнала и фона

$\varepsilon_{\text{sig}}(\Phi_l)$ и $\hat{\rho}_{\text{bkg}}(\Phi_l)$ находились с помощью Kernel Density Estimation (KDE)^a

- моделирование сигнала по фазовому объёму.
- моделирование фона $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ на основе предварительных результатов амплитудного анализа

^aA. Poluektov, Kernel density estimation of a multidimensional efficiency profile. JINST 10 (2015) no.02, P02011

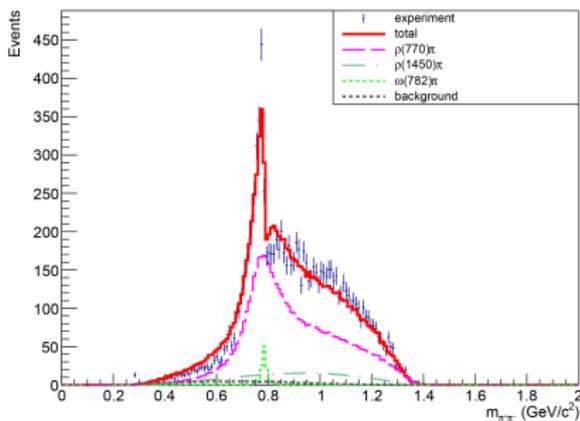
KDE производился в следующих переменных: $m_{\pi^+\pi^-}^2, m_{\pi^0\pi^-}^2, \cos\theta_{\pi^0}$, угол плоскости распада (угол между плоскостями (p_{π^+}, p_{π^-}) и (p_{π^0}, \vec{e}_z)), а также ϕ_{π^0} от которого ничего не зависит, так как пучки неполяризованные.



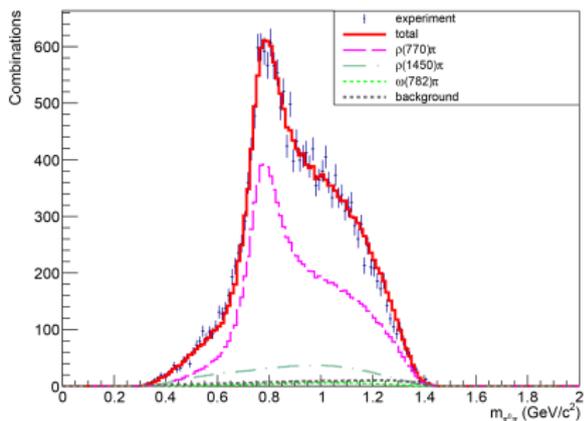
срез PDF сигнала ($\sqrt{s} = 1,86$ ГэВ) в переменных: $(m_{\pi^+\pi^-}^2, m_{\pi^-\pi^0}^2)$

Результаты спектров

Получены спектры для всех энергий в сезонах 2022-2023 годов.
Показаны спектры для точки с энергией $\sqrt{s} = 1,58$ ГэВ.

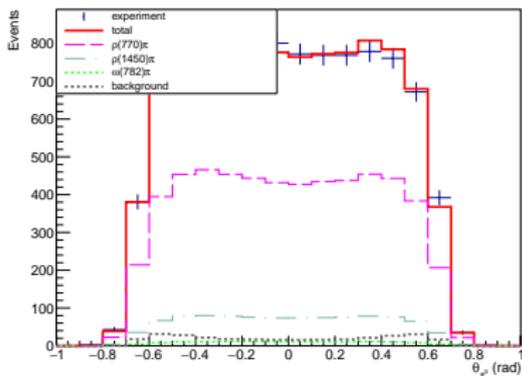


Спектр $m_{\pi^+\pi^-}$

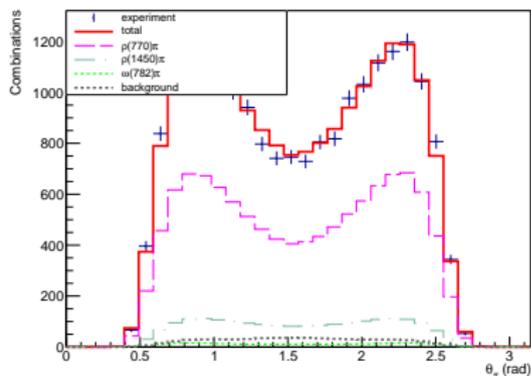


Спектр $m_{\pi^0\pi}$

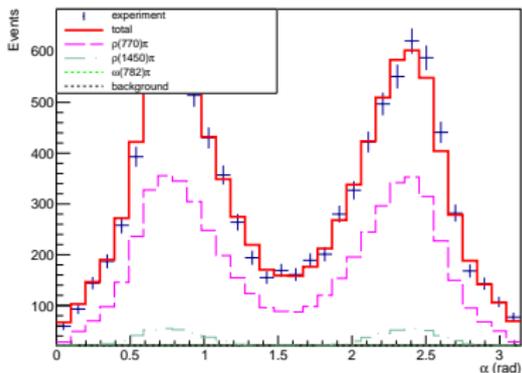
Результаты спектров



Спектр $\cos \theta_{\pi^0}$



Спектр θ_{π}

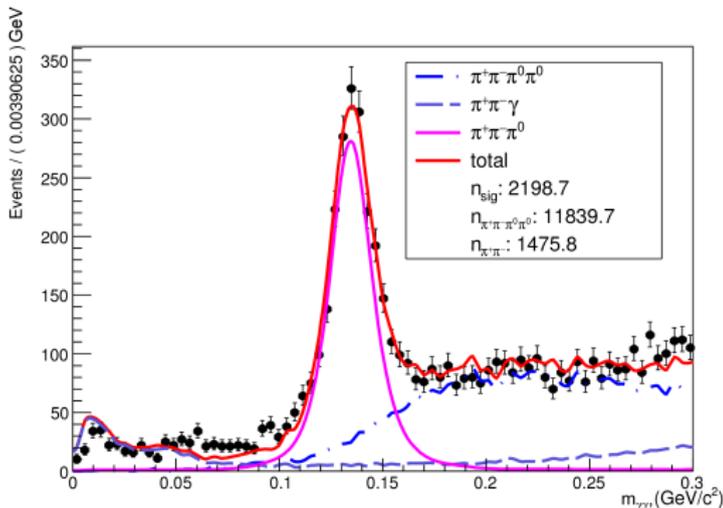


Спектр угла плоскости распада

Борновское сечение

Борновское сечение:
$$\sigma_{\text{born}}(s) = \frac{N_{\text{exp}}^{\text{sel}}(s)}{L(s)\epsilon(s)(1+\delta(s))}$$

- $N_{\text{exp}}^{\text{sel}}(s)$ – число сигнальных событий из эксперимента. Находиться двумя вариантами:
 - ◇ из амплитудного анализа (likelihood fit)
 - ◇ из распределения по инвариантной массе двух фотонов

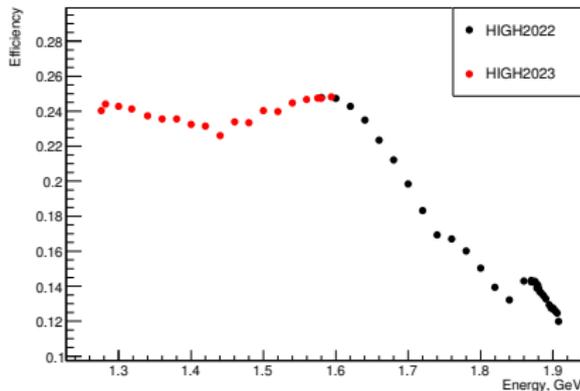


Распределение $m_{\gamma\gamma}$ в точке с энергией $\sqrt{s} = 1,86$ ГэВ

Борновское сечение

Борновское сечение: $\sigma_{\text{born}}(s) = \frac{N_{\text{exp}}^{\text{sel}}(s)}{L(s)\epsilon(s)(1+\delta(s))}$

- $N_{\text{exp}}^{\text{sel}}(s)$ – число сигнальных событий из эксперимента. Находиться двумя вариантами:
 - ◇ из амплитудного анализа (likelihood fit)
 - ◇ из распределения по инвариантной массе двух фотонов
- $\epsilon(s)$ – эффективность регистрации. Определялась по моделированию сигнальных событий: $\frac{N_{3\pi}^{\text{sel}}(s)}{N_{3\pi}^{\text{tot}}(s)}$ (число прошедших каты/общее число)



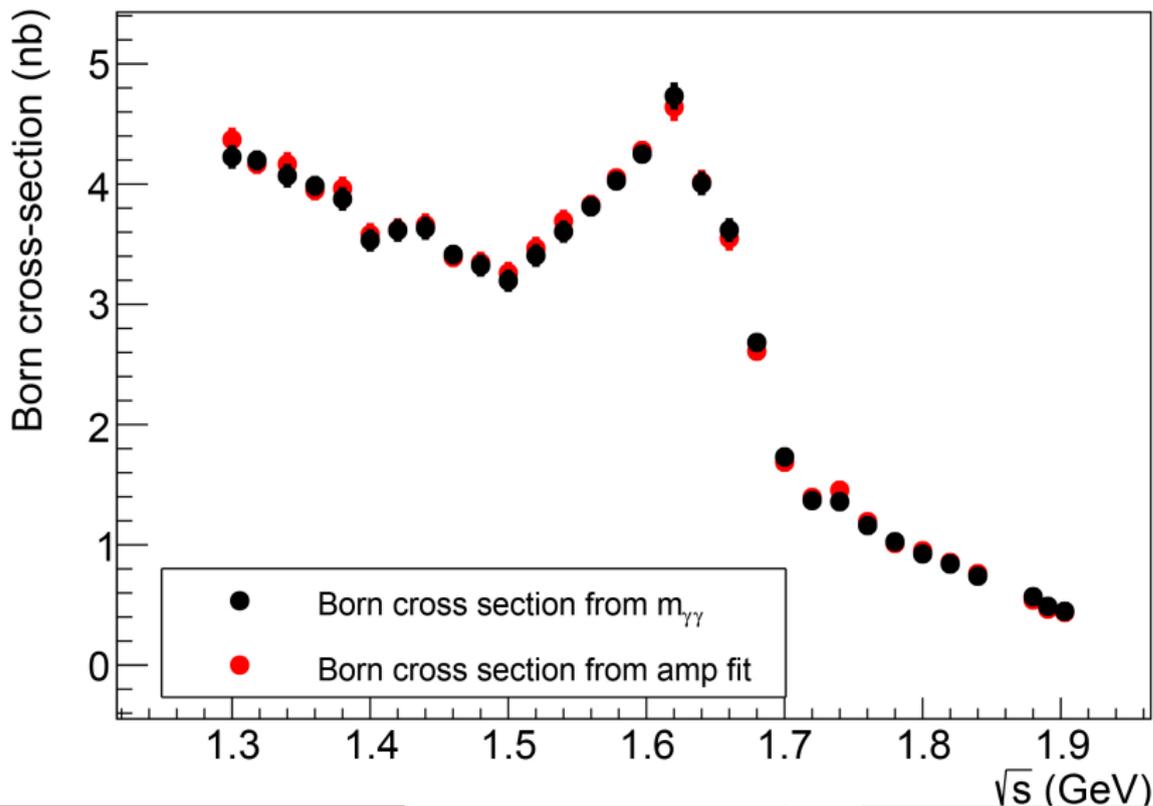
Борновское сечение

Борновское сечение:
$$\sigma_{\text{born}}(s) = \frac{N_{\text{exp}}^{\text{sel}}(s)}{L(s)\epsilon(s)(1+\delta(s))}$$

- $N_{\text{exp}}^{\text{sel}}(s)$ – число сигнальных событий из эксперимента. Находиться двумя вариантами:
 - ◇ из амплитудного анализа (likelihood fit)
 - ◇ из распределения по инвариантной массе двух фотонов
- $\epsilon(s)$ – эффективность регистрации. Определялась по моделированию сигнальных событий: $\frac{N_{3\pi}^{\text{sel}}(s)}{N_{3\pi}^{\text{tot}}(s)}$ (число прошедших каты/общее число)
- $L(s)$ – светимость
- $\delta(s)$ – радиационная поправка (Initial State Radiation). Найдена предварительно по данным BABAR²

²Study of the process $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ using initial state radiation with BABAR. Phys.Rev.D 104 (2021) 11, 112003

Борновское сечение



Заклучение

Сделано:

- Проведено моделирование сигнала и фона
- Разработаны критерии отбора
- Разработана модель с вкладами $\rho(770)\pi, \rho(1450)\pi, \omega(782)\pi$
- Борновское сечение, полученное двумя способами, согласуется

Планы:

- Фит коэффициентов в модели векторной доминантности*
- Совместный амплитудный фит по всем энергетическим точкам в модели векторной доминантности
- Получение параметров резонансов

