



Изучение процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$   
в области энергии  $\sqrt{s} = 1.05-2.0$  ГэВ с  
детектором СНД

Л.В.Кардапольцев

ИЯФ СО РАН

*Сессия-конференция секции ядерной физики ОФН РАН*

17-21 февраля 2025



# Мотивация

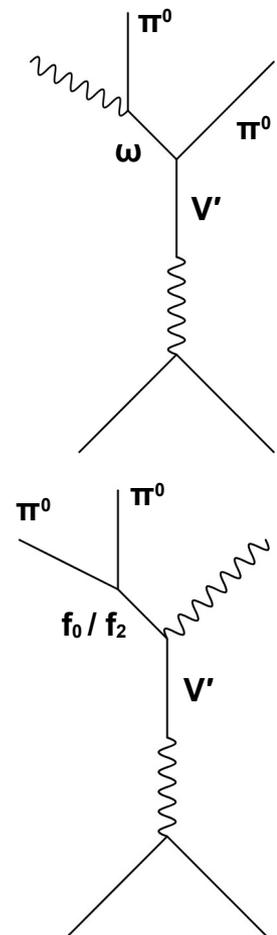


- **Разделение промежуточных механизмов** процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$  посредством **анализа распределений Далица**
- **Доминирующий** промежуточный **механизм**  $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0$ 
  - **Спектроскопия** возбужденных состояний  $\rho$  мезона
  - Измерение **вероятностей распада** в  $\omega\pi^0$   
 $V(\rho(1700) \rightarrow \omega\pi^0) = 0.73$        $\Gamma(\rho(1700)) = 72$  МэВ (КХД на решетке [1])  
 $V(\rho(1700) \rightarrow \omega\pi^0) = 0.08$        $\Gamma(\rho(1700)) = 435$  МэВ ( ${}^3P_0$  модель [2])
- **Поиск радиационных распадов** возбужденных векторных мезонов
  - Предсказание **кварковой модели** [3]  
 $\Gamma(\rho(1450) \rightarrow f_2(1270)\gamma) = 712$  кэВ       $\Gamma(\rho(1700) \rightarrow f_0(1370)\gamma) = 899$  кэВ

[1] Phys.Rev. D 110 (2024) 3, 034512

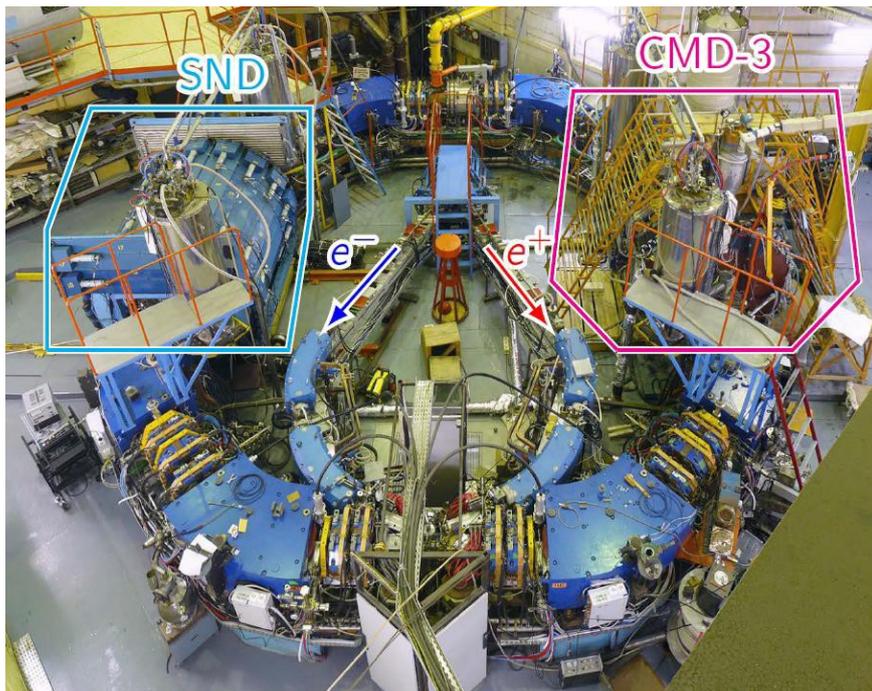
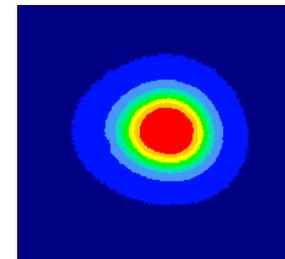
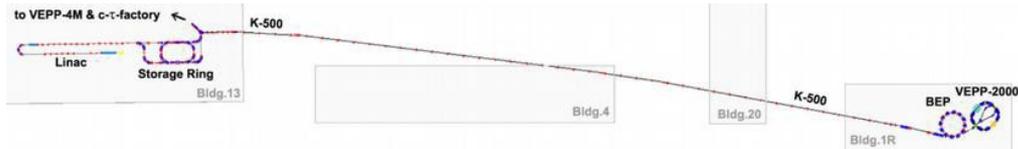
[2] Phys.Rev. D 55 (1997) 4157

[3] Phys.Rev.D 65 (2002) 092003





# $e^+e^-$ коллайдер ВЭПП-2000

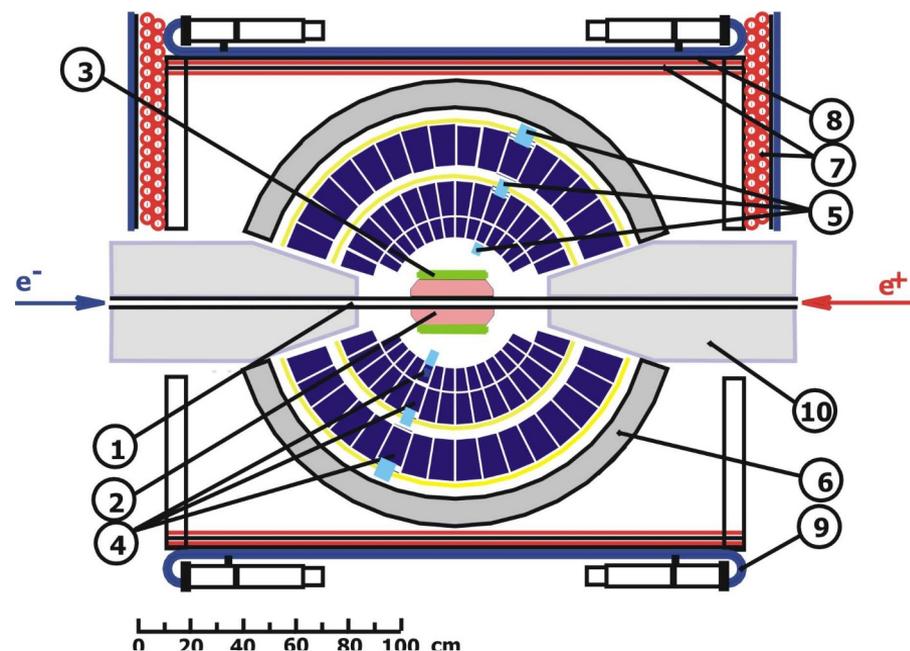


## Параметры ВЭПП-2000:

- энергия в с.ц.м. 0.3-2.0 ГэВ
- периметр – 24.4 м
- **Круглые пучки**
- Светимость вблизи 2 ГэВ
  - $1 \times 10^{32} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$  (проект)
  - $0.8 \times 10^{32} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$  (достигнутая)
- Два детектора: **СНД и КМД-3**



# Сферический нейтральный детектор



1 – вакуумная камера, 2 – трековая система, 3 – аэрогелевые черенковские счетчики, 4 – кристаллы NaI(Tl), 5 – фототриоды, 6 – железный поглотитель, 7–9 – мюонный детектор, 10 – фокусирующие соленоиды ВЭПП-2000.

Пленарный доклад 19 февраля в 11:00  
В.П. Дружинин «Изучение  $e^+e^-$  аннигиляции в адроны на коллайдера в ИЯФ»

Главная физическая задача СНД - это изучение всех возможных процессов  $e^+e^-$  аннигиляции в адроны ниже 2 ГэВ.

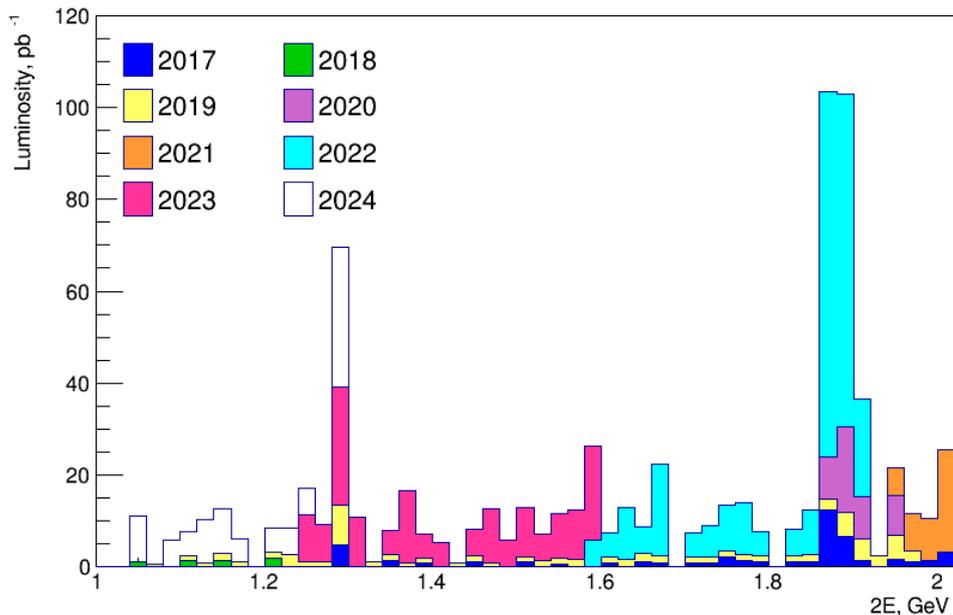
- ✓ Полное адронное сечение, которое вычисляется как сумма эксклюзивных сечений
- ✓ Изучение динамики эксклюзивных процессов
- ✓ Изучение свойств возбужденных векторных мезонов семейства  $\rho, \omega, \phi$



# Использованная статистика



- Для анализа были использованы данные, набранные в 2017 - 2024 гг.
- Интегральная светимость составила **752 пбн<sup>-1</sup>**
- Данные были набраны в **163 точках по энергии** в области **E=1.05-2.0 ГэВ**
- Для анализа данные были сгруппированы в **40 и 19 интервалов по энергии**



## Статистика, набранная ВЭПП-2000

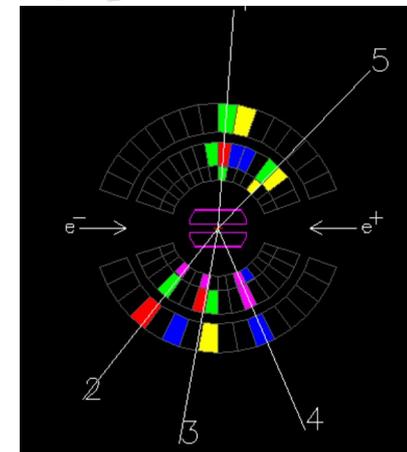
	Ниже $\phi$	Вблизи $\phi$	Выше $\phi$
$\mathcal{L}$ , пбн <sup>-1</sup>	127	83	793
$E_{cm}$ , ГэВ	0.30-0.97	0.98-1.05	1.05-2.00



# Стратегия анализа



- Отбираются события **без треков** и с **5 фотонами**
- **Кинематическая реконструкция** в гипотезах  $\pi^0\pi^0\gamma$  и  $5\gamma$
- Анализируется **распределение Далица**  $m^2_{\pi\gamma}$  vs  $m^2_{\pi\gamma}$
- Критически важно **учесть разрешение детектора**  $\Rightarrow$  подгонка гистограммами, полученными из моделирования
- **Учет интерференции** между промежуточными механизмами

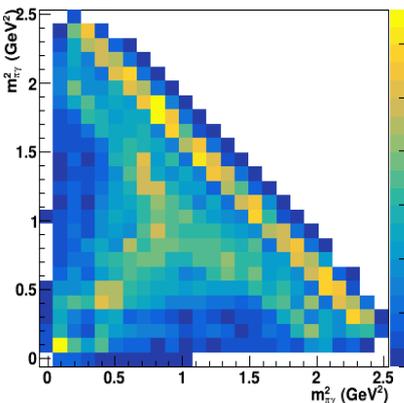
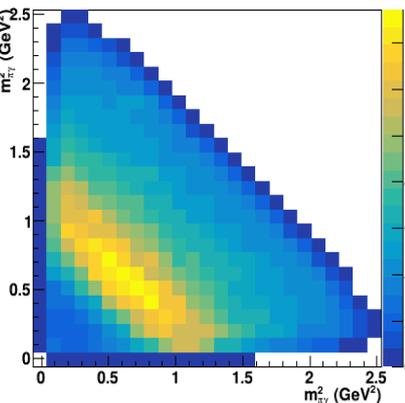
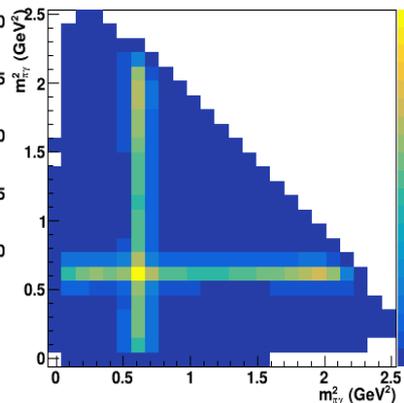
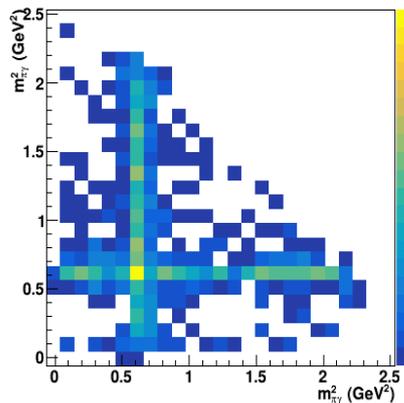


Данные

МС,  $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0$

МС,  $e^+e^- \rightarrow f_0(1370)\gamma$

МС, фон





# Модель для описания сигнала



- Сигнал описывается **когерентной суммой** промежуточных механизмов **двух типов**:
  - Вида вектор-скаляр:  $\omega\pi^0$  и  $\rho\pi^0$
  - Радиационные процессы:  $f_0(500)\gamma$ ,  $f_0(980)\gamma$ ,  $f_0(1370)\gamma$ ,  $f_2(1270)\gamma$
- **Вклад  $\rho\pi^0$**  и его фаза относительно  $\omega\pi^0$  **извлекаются** из измерения  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$  [1] и **фиксируются** во время подгонки
- **Радиационные поправки** учитываются **перевзвешиванием** моделирования и **нормировкой** гистограмм

$f_0(500)$ :  $M = 0.513$  ГэВ  $\Gamma = 0.335$  ГэВ [2]

$f_0(980)$ : Каонные петли [3] + параметризация Флатте [4]

$f_0(1370)$ :  $M = 1.315$  ГэВ  $\Gamma = 0.255$  ГэВ [5]

$f_2(1270)$ :  $M = 1.2754$  ГэВ  $\Gamma = 0.1866$  ГэВ (PDG)

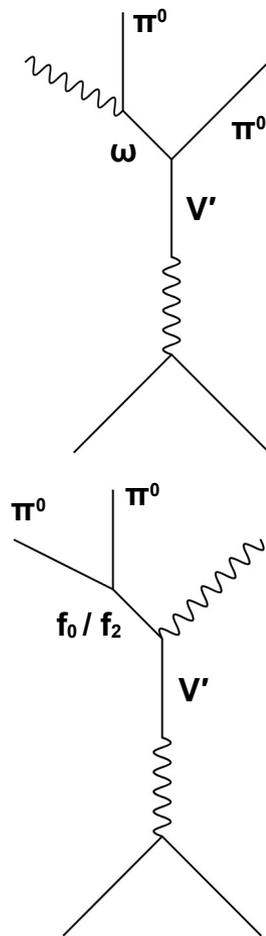
[1] Phys.Atom.Nucl. 87 (2024) 6, 747-762

[2] Phys.Rev.Lett. 89 (2002) 251802 (CLEO)

[3] Nucl.Phys.B 315(1989) 465

[4] Phys.Rev.Lett. 96(2006) 251803 (Belle)

[5] Phys.Lett.B 467(1999) 296 (GAMS-4000)



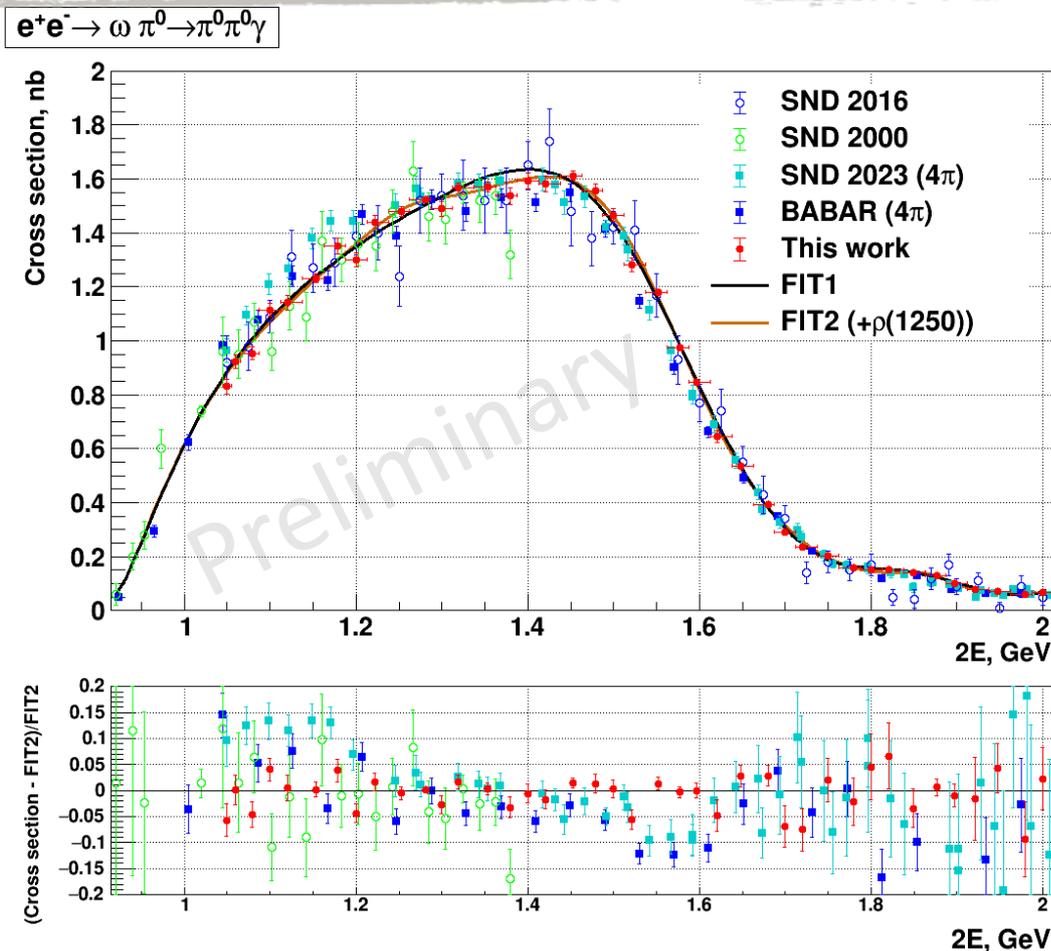


# Сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0 \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$



- Хорошо согласуется с предыдущими измерениями в канале  $\omega \rightarrow \pi^0\gamma$
- Существенное расхождение с измерениями в канале  $\omega \rightarrow \pi^+\pi^0$
- Подгонка суммой функций Брейта-Вигнера  $\rho(770)+\rho(1450)+\rho(1700)+\rho(2150)$  (FIT1) дает  $\chi^2/\text{ndf} = 103/35$
- Добавление гипотетического  $\rho(1250)$  (FIT2) ( $M=1.266, \Gamma=0.166$ ) [1] существенно улучшает качество подгонки  $\chi^2/\text{ndf} = 66/33$ 
  - Требуется анализ систематических погрешностей
  - Более сложная модель с учетом связанных каналов

[1] Nucl.Phys.Proc.Suppl 21, 105 (1991) (LASS,  $K\text{-p} \rightarrow \pi^+\pi^-\Lambda$ )

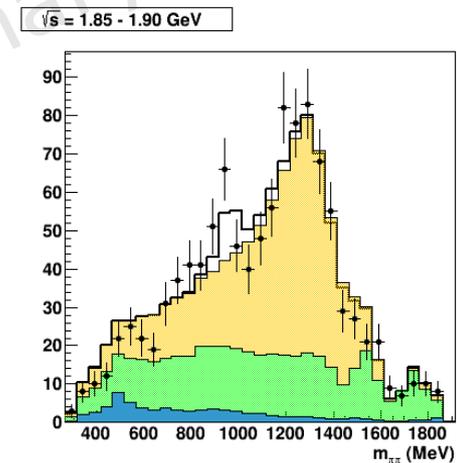
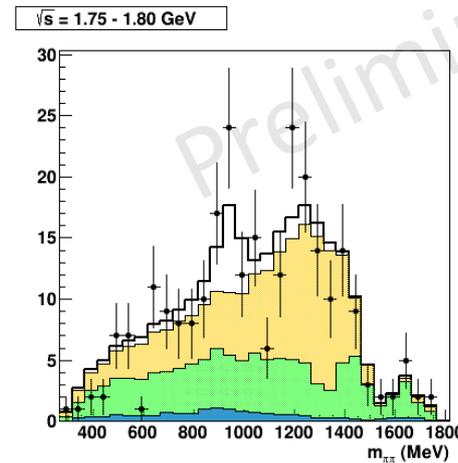
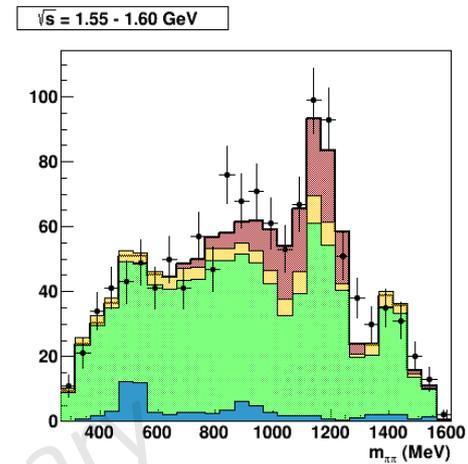
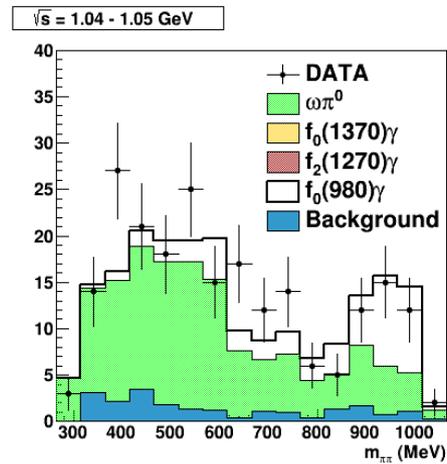




# Сечение радиационных процессов



- Вклад радиационных промежуточных состояний **виден почти во всем диапазоне энергии со значимостью  $>5\sigma$**
- Из подгонки распределений Далица определяем **суммарное сечение радиационных процессов**
- Основная модель:
  - $E = 1.05-1.10$  ГэВ:  $f_0(980)\gamma$
  - $E = 1.10-1.60$  ГэВ:  $f_2(1270)\gamma + f_0(1370)\gamma$
  - $E = 1.60-2.0$  ГэВ:  $f_0(1370)\gamma + f_0(980)\gamma$
- Для визуализации результатов подгонки Далиц распределений **показано распределение по  $m_{\pi\pi}$**
- Вклад  $\omega\pi^0$  подавлен в 10-15 раз

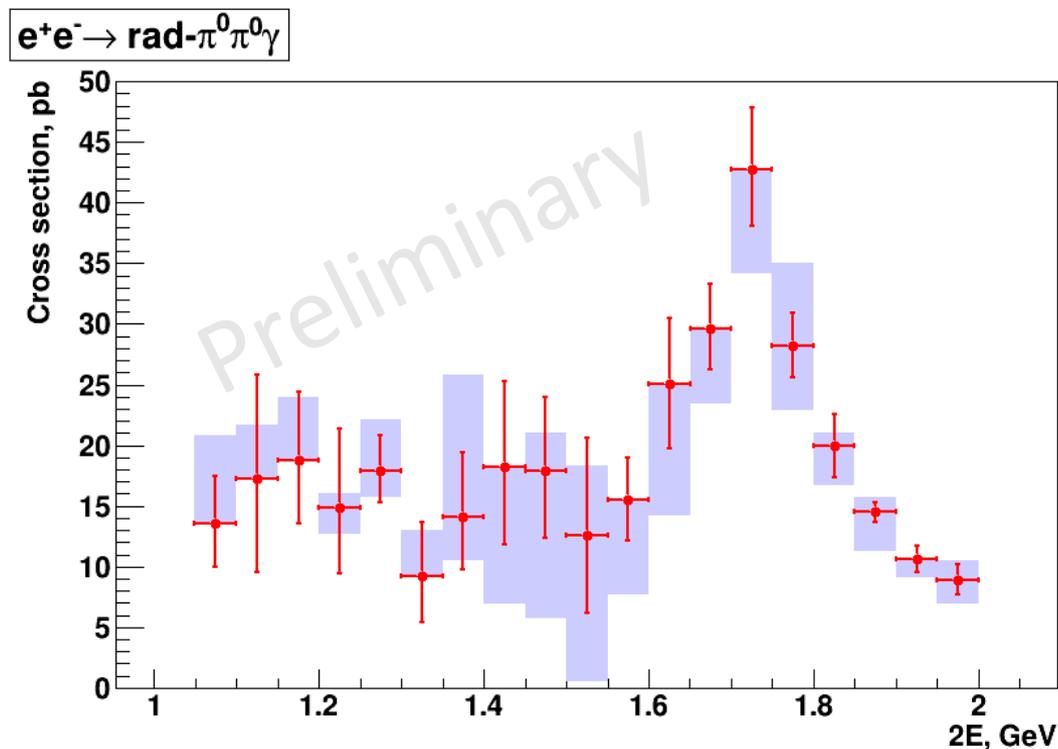




# Сечение радиационных процессов



- Для оценки модельной зависимости проводилась подгонка различными комбинациями  $f_0(500)\gamma$ ,  $f_0(980)\gamma$ ,  $f_0(1370)\gamma$ ,  $f_2(1270)\gamma$
- Красные точки - подгонка основной моделью
- Заштрихованная область — оценка модельной ошибки
- Явная резонансная структура видна
- вблизи 1.7 ГэВ





# Заключение



- Проведен **Далиц анализ** процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$  в области энергии 1.05-2.0 ГэВ
- Измерено сечение процесса  $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0$
- Данное измерение имеет **самую высокую статистическую точность**
- Впервые обнаружен **вклад радиационных процессов** в процесс  $e^+e^- \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$
- Наилучшее описание этого вклада дает модель, включающая  **$f_0(980)\gamma$ ,  $f_0(1370)\gamma$ ,  $f_2(1270)\gamma$**
- Явная **резонансная структура** видна вблизи 1.7 ГэВ



***Спасибо за внимание!***



# Модель для описания фона



## Основные фоновые процессы

- $e^+e^- \rightarrow 3\gamma, 4\gamma, 5\gamma$
- $e^+e^- \rightarrow \eta\pi^0\gamma$
- $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0\pi^0, \quad e^+e^- \rightarrow \omega\eta\pi^0$
- $e^+e^- \rightarrow K_S K_L$
- $e^+e^- \rightarrow K_S K_L \pi^0$

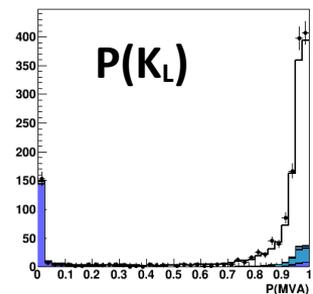
## Анализ профиля энерговыделения в калориметре для подавления $K_S K_L$ (BDT)

## Примерно в (4-12) % событий в результате кинематической реконструкции находится **неправильная комбинация фотонов**

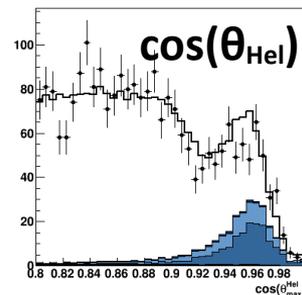
## Для определения числа таких событий подгонялся спектр $\Delta\chi^2_{\text{плт}\gamma} = \chi^2_{\text{плт}\gamma, s} - \chi^2_{\text{плт}\gamma} [1]$ , где $\chi^2_{\text{плт}\gamma, s}$ это $\chi^2$ кинематической реконструкции для комбинации **дающей $\chi^2$ следующий за минимальным**

[1] Eur.Phys.J.C 49 (2007) 473 (KLOE)

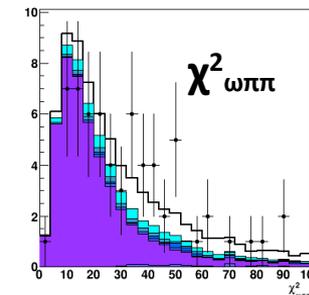
2E = 1.55 - 1.60 GeV



2E = 1.85 - 1.90 GeV



2E = 1.85 - 1.90 GeV



2E = 1.25 - 1.30 GeV

