



Изучение процесса $e^+e^- \rightarrow \eta\pi^0\gamma$ с детектором СНД на e^+e^- коллайдере ВЭПП-2000

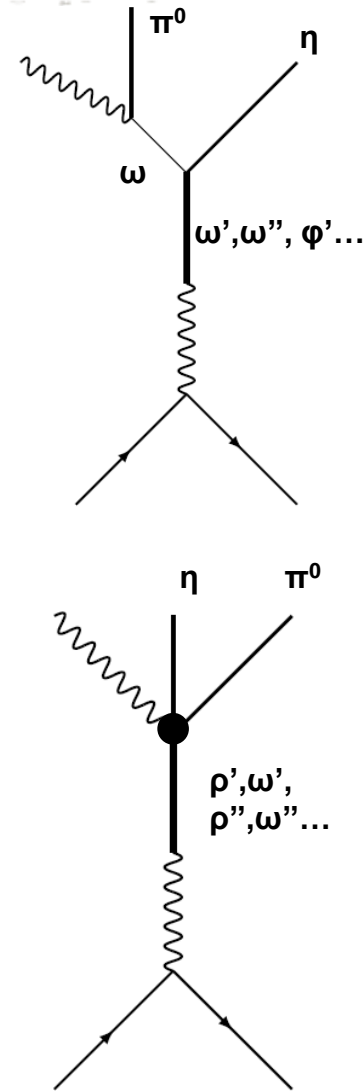
Л.В.Кардапольцев

*ИЯФ СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет*

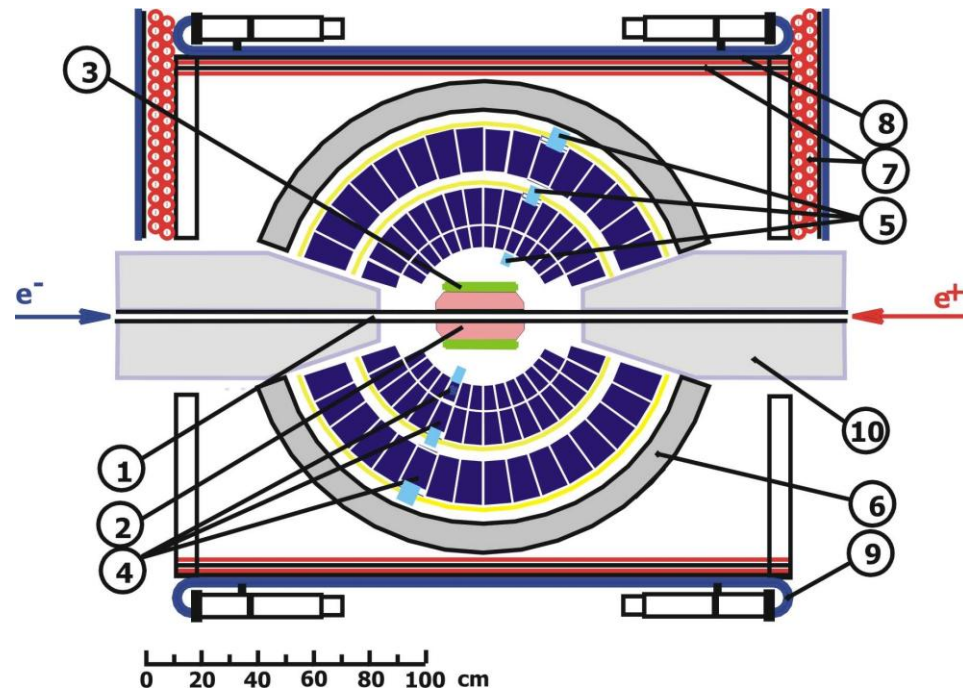
СЯФ ОФН РАН, Новосибирск,
10-12 Марта 2020

Введение

- Процесс $e^+e^- \rightarrow \eta\pi^0\gamma$ изучается в диапазоне энергии в с.ц.м. от 1.05 до 2.00 ГэВ
- В этом диапазоне энергии сечение $e^+e^- \rightarrow \eta\pi^0\gamma$ измерено впервые
- Процесс изучался в пятифотонном конечном состоянии
- Доминирующий вклад в сечение дает процесс $e^+e^- \rightarrow \omega\eta$ с распадом $\omega \rightarrow \pi^0\gamma$
- Сечение $e^+e^- \rightarrow \omega\eta$ измерялось в канале $\omega \rightarrow 3\pi$ на SND, KMD-3, BaBar
- Наибольший интерес представляет поиск радиационных процессов, в которых фотон излучается возбужденным векторным мезоном



Детектор СНД



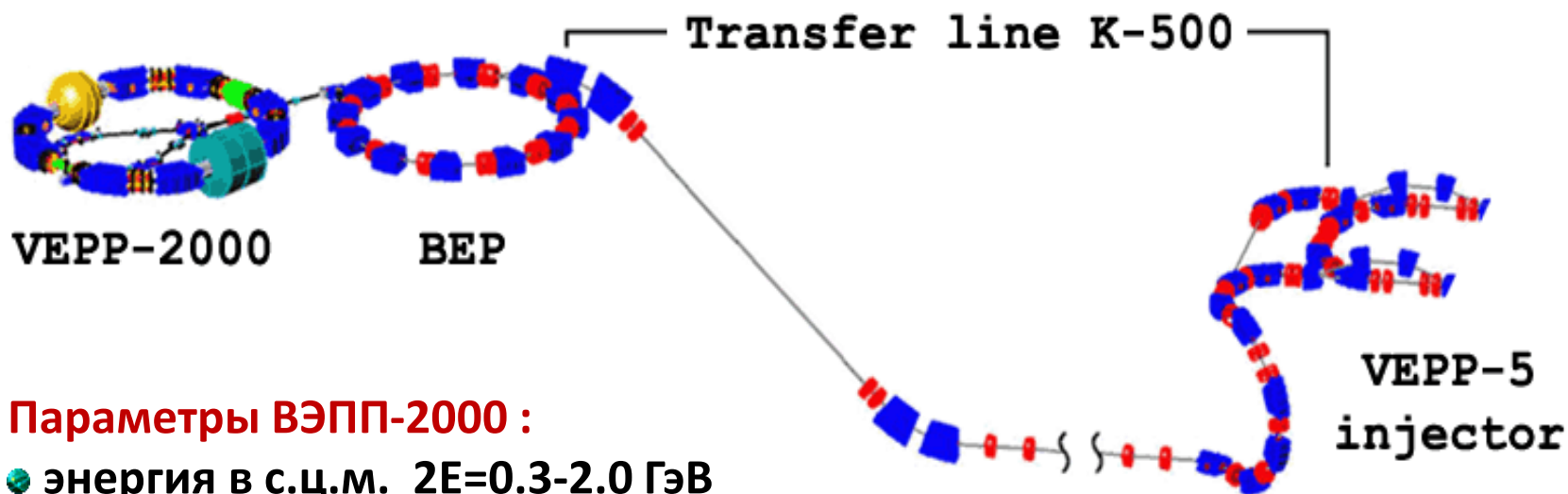
1 – вакуумная камера, 2 – трековая система, 3 – аэрогелевые черенковские счетчики, 4 – кристаллы NaI(Tl), 5 – фототриоды, 6 – железный поглотитель, 7–9 – мюонный детектор, 10 – фокусирующие соленоиды ВЭПП-2000.

Детектор СНД набирал данные на ВЭПП-2000 в 2010-2013 г и с 2016 по настоящее время

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 ρ , ω , ϕ

e^+e^- коллайдер ВЭПП-2000



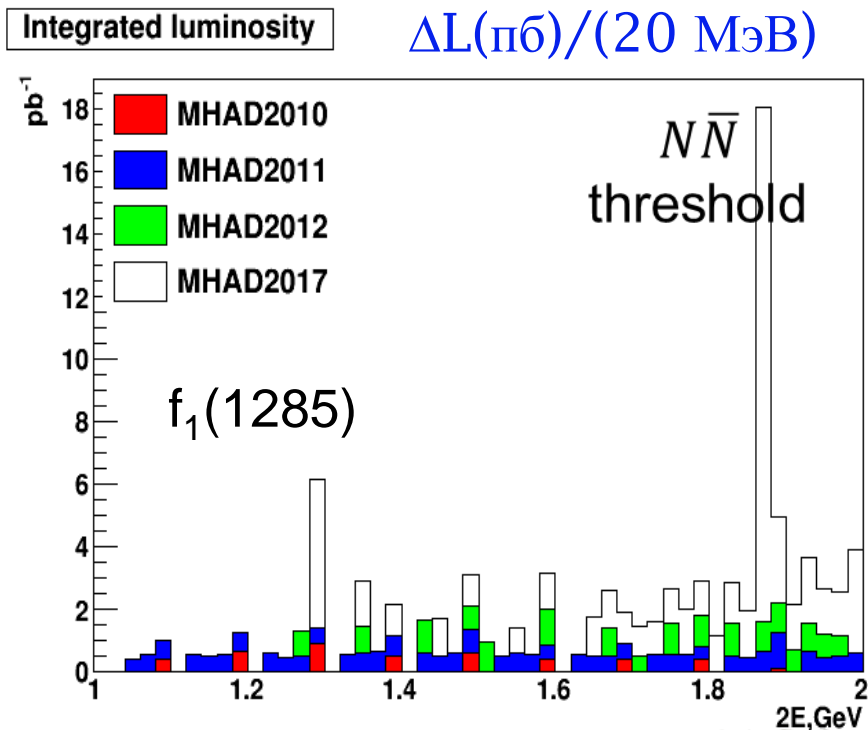
Параметры ВЭПП-2000 :

- энергия в с.ц.м. $2E=0.3-2.0$ ГэВ
- периметр – 24.4 м
- круглые пучки
- Светимость на $2E=1.8$ ГэВ
 $1 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ (проектная)
 $4 \times 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ (достигнутая)
- Два детектора: СНД и КМД-3

2010-2013 – эксперименты, 70 пб^{-1}
2013-2016 – модернизация, новый инжектор
2016- ... – эксперименты, 210 пб^{-1}

Использованная статистика

- Для анализа были использованы данные набранные в 2010, 2011, 2012 и 2017 гг.
- Интегральная светимость составила **94.5 пб⁻¹**

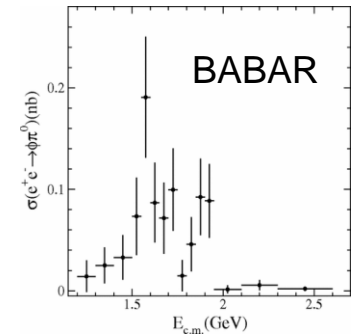
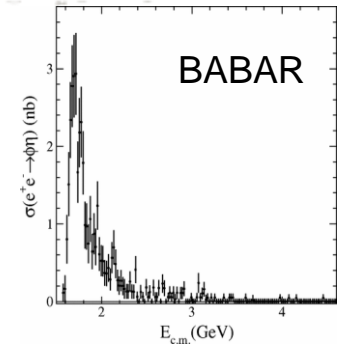


- Для измерения светимости был использован процесс $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$
- Этот процесс имеет **общие систематические ошибки** с изучаемым и они **сокращаются** при нормировке
 - ✓ учет наложений пучкового фона
 - ✓ моделирование триггера
- Систематическая погрешность измерения светимости **2%**

Основные фоновые процессы

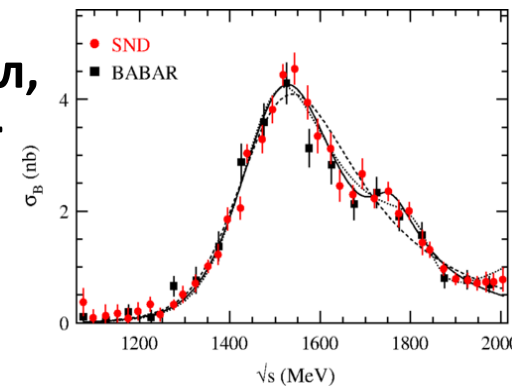
Фон

- Основной фоновый процесс $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0 \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$
- Также заметный вклад дают процессы КЭД $e^+e^- \rightarrow 3\gamma, 4\gamma, 5\gamma$
- Вклад в фон проверялся также для следующих процессов:
 $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0\pi^0$, $e^+e^- \rightarrow \omega\eta\pi^0$, $e^+e^- \rightarrow \eta\gamma$, $e^+e^- \rightarrow \pi^0\gamma$,
 $e^+e^- \rightarrow K_S K_L$, $e^+e^- \rightarrow K_S K_L \pi^0$, $e^+e^- \rightarrow K_S K_L \pi^0\pi^0$



Вклад других промежуточных состояний

- Также важно учесть вклад от процессов $e^+e^- \rightarrow \eta\pi^0\gamma$ с промежуточными состояниями $\rho\eta$, $\phi\eta$ и $\phi\pi^0$. Их вклад мал, но в рамках данного анализа его невозможно отличить от $\text{rad-}\eta\pi^0\gamma$
- Их вклад был вычислен и зафиксирован
- Вклад от $\rho\pi^0$, $\omega\pi^0$ незначителен.



Условия отбора

■ Ровно 5 фотонов, нет треков

■ Кинематическая реконструкция
в гипотезах:

$e^+e^- \rightarrow \eta\pi^0\gamma$, $e^+e^- \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$,
 $e^+e^- \rightarrow 5\gamma$, $e^+e^- \rightarrow 3\gamma$

■ $\chi^2_{5\gamma} < 30$

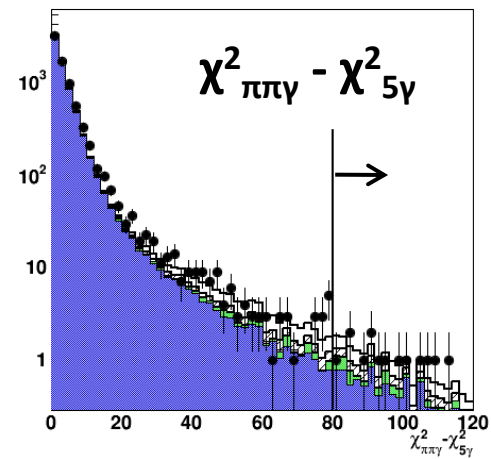
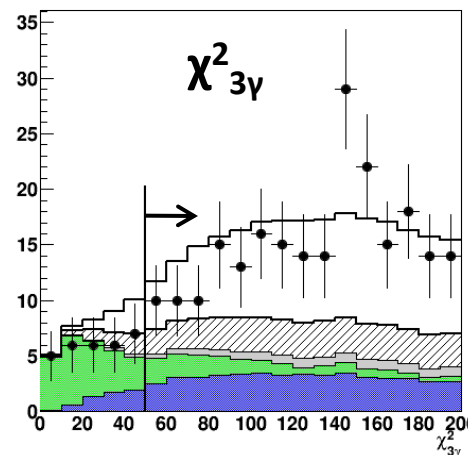
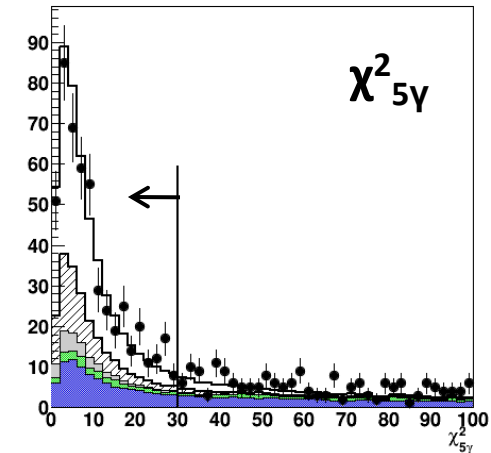
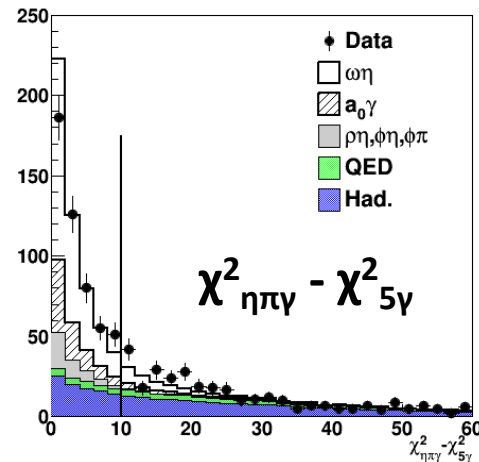
■ $\chi^2_{\pi\pi\gamma} - \chi^2_{5\gamma} > 80$, $\chi^2_{3\gamma} > 50$

■ Сигральная область:

$\chi^2_{\pi\pi\gamma} - \chi^2_{5\gamma} < 10$

■ Контрольная область:

$10 < \chi^2_{\pi\pi\gamma} - \chi^2_{5\gamma} < 60$



Определение числа событий

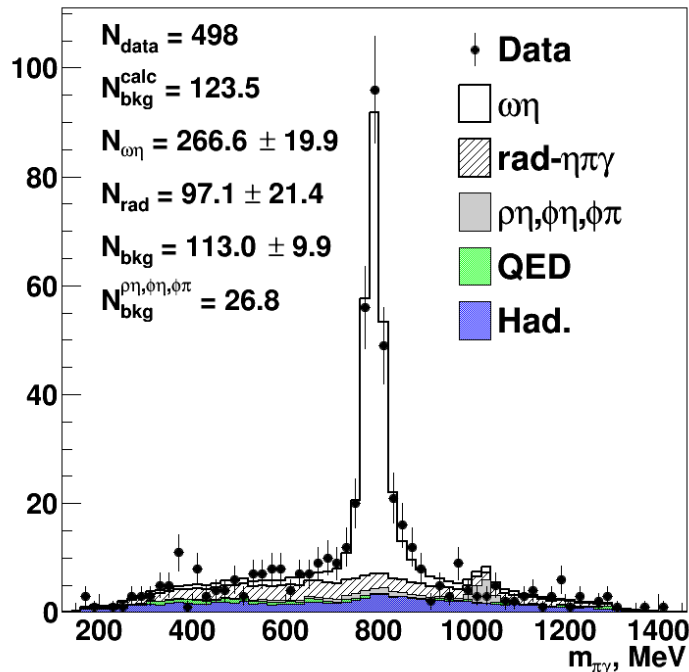
■ Для определения числа сигнальных событий проводилась **совместная** подгонка $m(\pi^0\gamma)$ для **сигнальной области** и $\chi^2_{\eta\pi\gamma} - \chi^2_{5\gamma}$ в **контрольной области**

■ Подгонка проводилась суммой 4 вкладов:

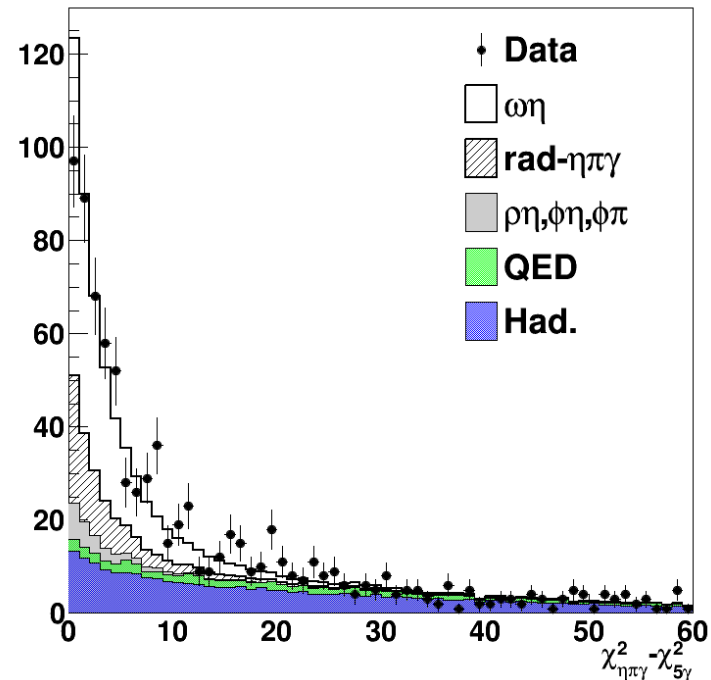
1) $e^+e^- \rightarrow \omega\eta \rightarrow \eta\pi^0\gamma$ 2) $e^+e^- \rightarrow \text{rad-}\eta\pi^0\gamma$ 3) $e^+e^- \rightarrow \rho\eta, \phi\eta, \phi\pi^0 \rightarrow \eta\pi^0\gamma$ 4) Фон

■ Вклады для $\omega\eta$, $\text{rad-}\eta\pi^0\gamma$ и фона были **свободными параметрами**

2E=1.05-2.00 GeV



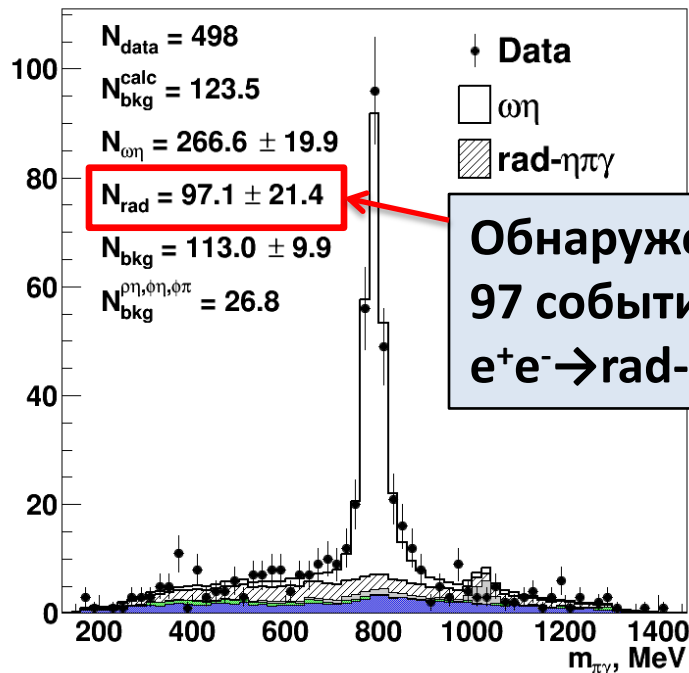
2E=1.05-2.00 GeV



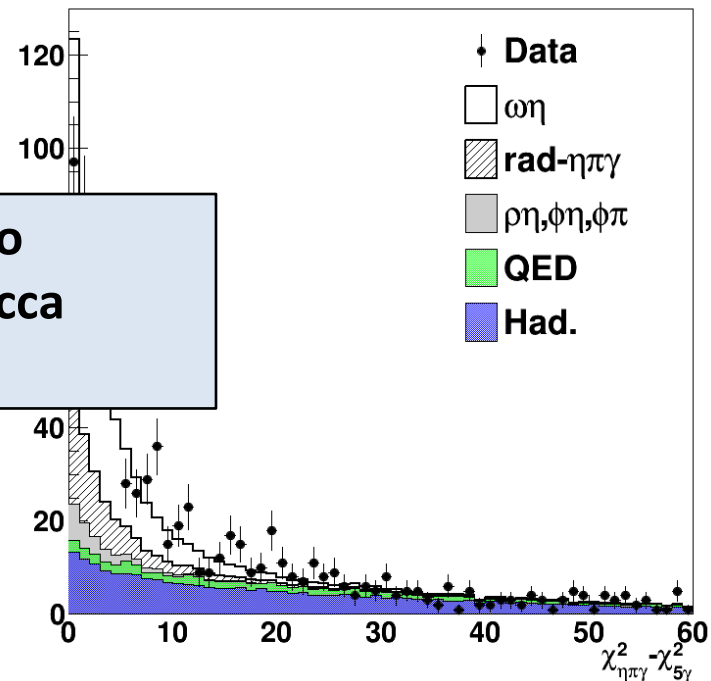
Определение числа событий

- Для определения числа сигнальных событий проводилась **совместная** подгонка $m(\pi^0\gamma)$ для **сигнальной области** и $\chi^2_{\eta\pi\gamma} - \chi^2_{5\gamma}$ в **контрольной области**
- Подгонка проводилась суммой 4 вкладов:
 1) $e^+e^- \rightarrow \omega\eta \rightarrow \eta\pi^0\gamma$ 2) $e^+e^- \rightarrow \text{rad-}\eta\pi^0\gamma$ 3) $e^+e^- \rightarrow \rho\eta, \phi\eta, \phi\pi^0 \rightarrow \eta\pi^0\gamma$ 4) Фон
- Вклады для $\omega\eta$, $\text{rad-}\eta\pi^0\gamma$ и фона были **свободными параметрами**

2E=1.05-2.00 GeV



2E=1.05-2.00 GeV

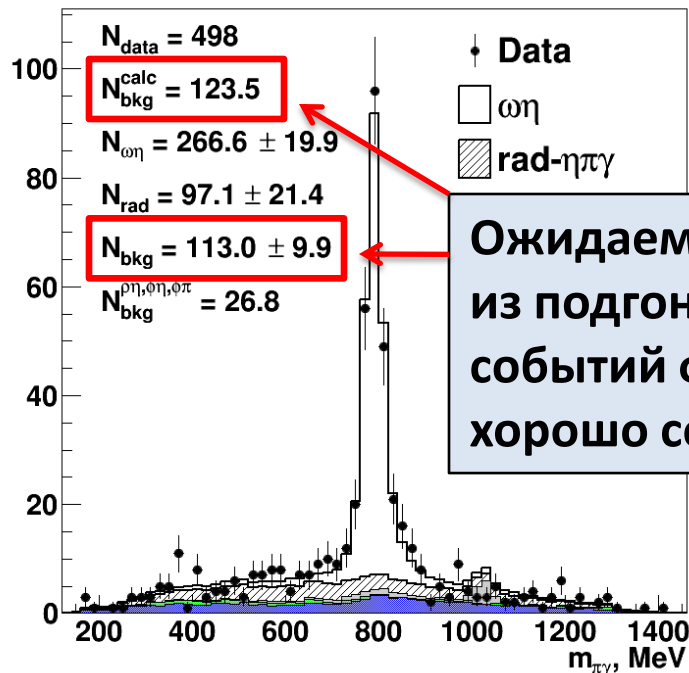


Определение числа событий

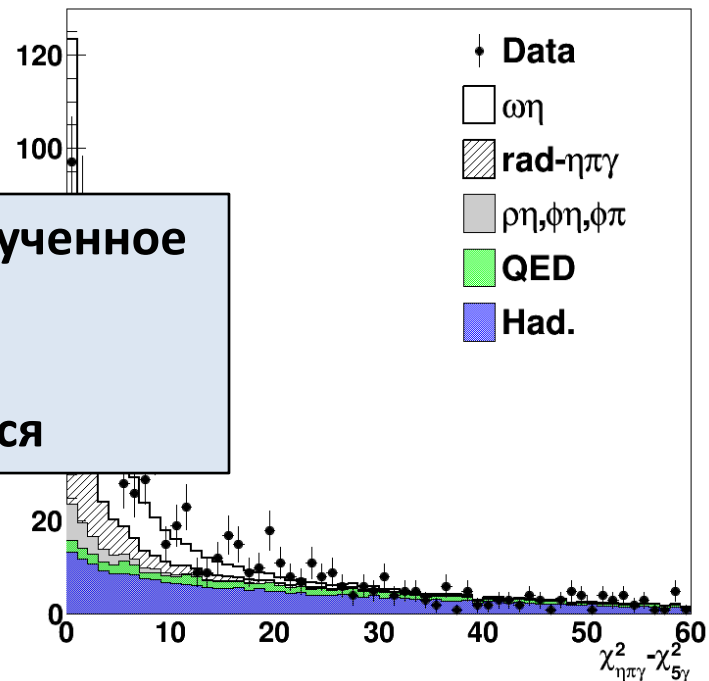
- Для определения числа сигнальных событий проводилась **совместная** подгонка $m(\pi^0\gamma)$ для **сигнальной области** и $\chi^2_{\eta\pi\gamma} - \chi^2_{5\gamma}$ в **контрольной области**
- Подгонка проводилась суммой 4 вкладов:
 1) $e^+e^- \rightarrow \omega\eta \rightarrow \eta\pi^0\gamma$ 2) $e^+e^- \rightarrow \text{rad-}\eta\pi^0\gamma$ 3) $e^+e^- \rightarrow \rho\eta, \phi\eta, \phi\pi^0 \rightarrow \eta\pi^0\gamma$ 4) Фон
- Вклады для $\omega\eta$, $\text{rad-}\eta\pi^0\gamma$ и фона были **свободными параметрами**

2E=1.05-2.00 GeV

2E=1.05-2.00 GeV



Ожидаемое и полученное из подгонки числа событий фона хорошо согласуются



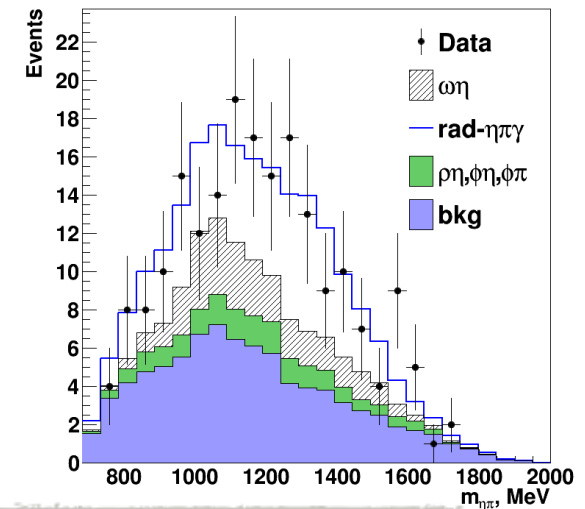
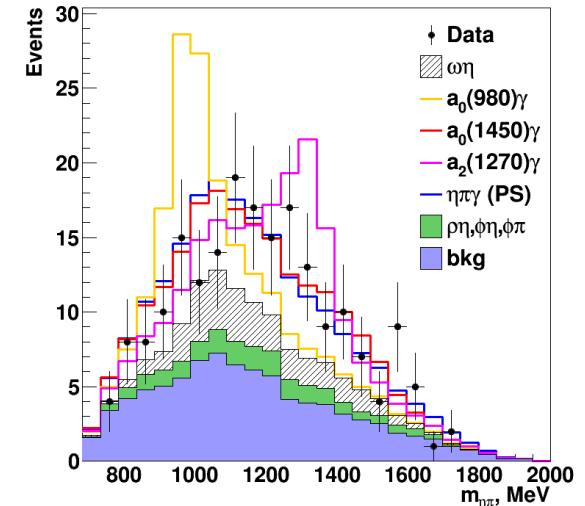
Выбор модели для $rad\text{-}\eta\pi\gamma$

- Были рассмотрены 3 модели:
 $e^+e^- \rightarrow a_0(980)\gamma$, $e^+e^- \rightarrow a_0(1450)\gamma$, $e^+e^- \rightarrow a_2(1270)\gamma$
- Для определения их комбинации, лучше всего описывающей данные, двумерное распределение $m(\eta\pi):m(\pi\gamma)$ было подогнано

$$\alpha P_{a_2(1270)\gamma} + \beta P_{a_0(980)\gamma} + (1 - \alpha - \beta) P_{a_0(1450)\gamma}$$
- В результате получились $\alpha = 0.22 \pm 0.21$ и $\beta = 0.0^{+0.09}$
- Полученные значения для α и β использовались для вычисления эффективности регистрации
- Значимость вклада от радиационных процессов:

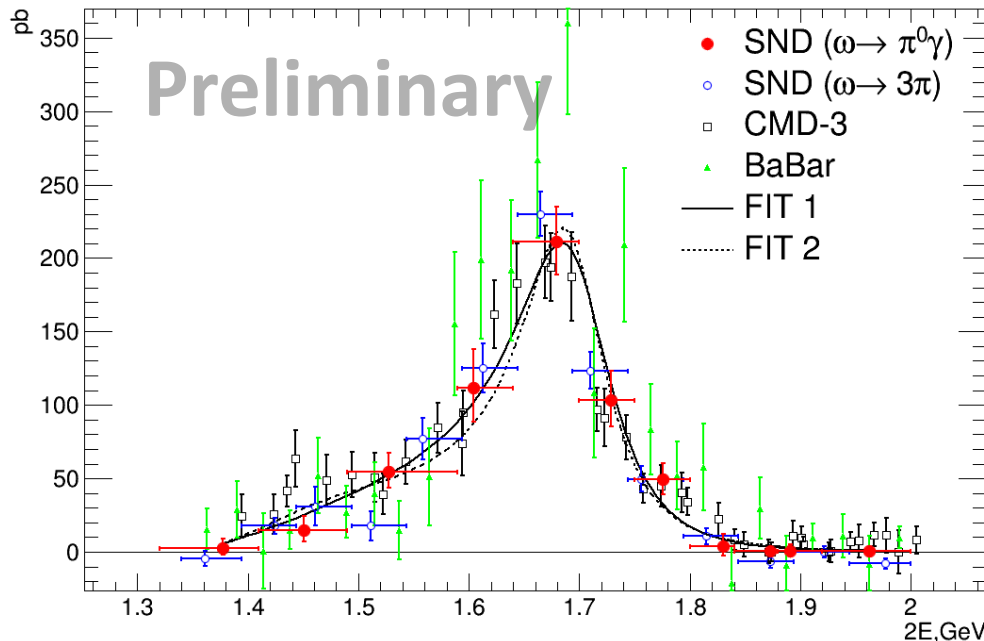
$$2D[m(\eta\pi):m(\pi\gamma)]: -2\ln(L_0/L_3) = 40.3 \rightarrow 5.7\sigma$$

Удалены события с
 $700 \text{ МэВ} < m(\pi\gamma) < 900 \text{ МэВ}$



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

	Fit 1	Fit2	SND(3 π)	CMD-3(3 π)
$m_{V'}$, МэВ	$\equiv 1420$	$\equiv 1420$	$\equiv 1420$	$\equiv 1420$
$\Gamma_{V'}$, МэВ	440 ± 124	$\equiv 220$	$\equiv 220$	$\equiv 220$
$B_{V'} \cdot 10^8$	2.4 ± 0.6	3.0 ± 0.6	2.1 ± 0.9	3.2 ± 0.6
$m_{V''}$, МэВ	1698 ± 10	1694 ± 9	1679 ± 5	1679 ± 5
$\Gamma_{V''}$, МэВ	110 ± 16	94 ± 13	95 ± 11	121 ± 9
$B_{V''} \cdot 10^7$	6.3 ± 0.9	5.4 ± 0.6	5.6 ± 0.4	4.7 ± 0.3
$\chi^2/n.d.f.$	8.7/6	12.4/7	10.5/9	23/35



- Для аппроксимации было использовано выражение

$$\sigma(s) = \frac{12\pi}{s^{3/2}} \left| \sqrt{\frac{B_{V'}}{P_f(m_{V'})}} \frac{m_{V'}^{3/2} \Gamma_{V'}}{D_{V'}} + \sqrt{\frac{B_{V''}}{P_f(m_{V''})}} \frac{m_{V''}^{3/2} \Gamma_{V''}}{D_{V''}} e^{i\phi} \right|^2 P_f(s)$$

где $B_V = B(V \rightarrow e^+e^-)B(V \rightarrow \omega\eta)$

- Полученное сечение хорошо **согласуется** с предыдущими **измерениями СНД и КМД-3** и **противоречит BaBar**

- В области **1.89-2.00 ГэВ** вклады амплитуд V' и V'' **сокращаются**

$$\sigma_{\text{this work}} = 0.6 \pm 1.8 \text{ пб}$$

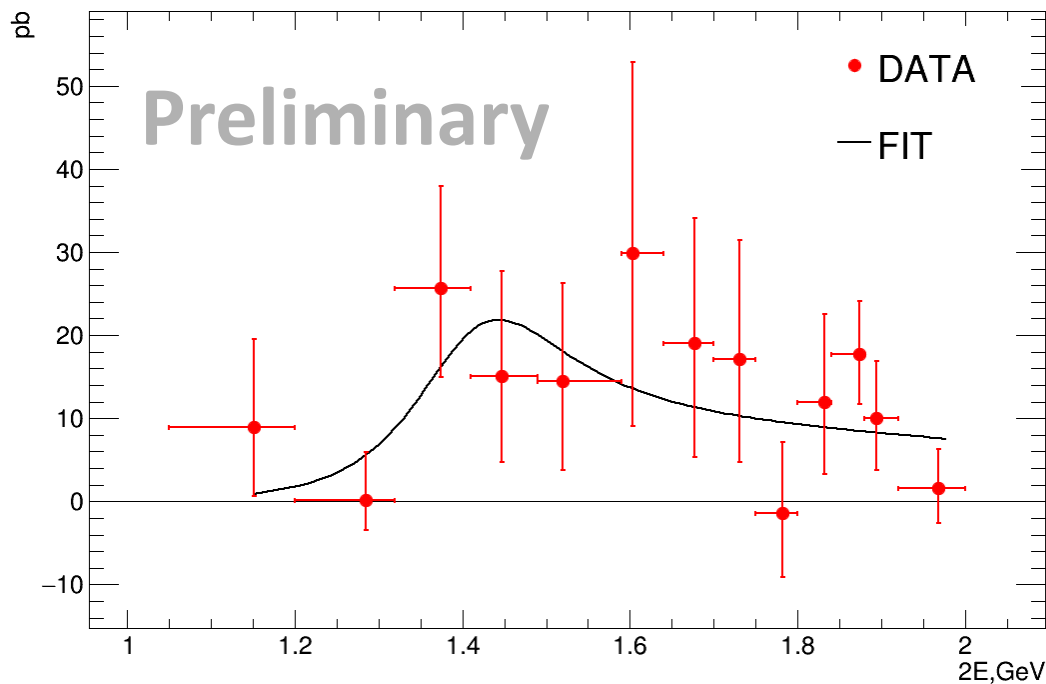
$$\sigma_{\text{SND}(3\pi)} = -4.0 \pm 2.5 \text{ пб}$$

$$\sigma_{\text{CMD-3}(3\pi)} = 6.1 \pm 2.3 \text{ пб}$$

Аппроксимация сечения $e^+e^- \rightarrow \text{rad-}\eta\pi\gamma$

Fit	
$m_{V'}$, МэВ	1411 ± 51
$\Gamma_{V'}$, МэВ	242 ± 84
$B(V' \rightarrow e^+e^-) B(V' \rightarrow \text{rad-}\eta\pi\gamma)$	$(4 \pm 2) \times 10^{-10}$
$\chi^2/\text{n.d.f.}$	10.0/10

- При аппроксимации сечения предполагалось, что оно определяется распадом $V' \rightarrow a_0(1450)\gamma$
- Масса и ширина V' близки к значениям для $\omega(1420)$



Систематические погрешности

Источник	$\omega\eta$	rad- $\eta\pi\gamma$
Светимость	2%	2%
Условия отбора	6%	6%
Вычитание фона	1%	1-10%
Форма ω мезона	1%	1-6%
Модельная зависимость эффективности	—	2-3%
Интерференция с $\rho\eta$	5-20%	—
Радикационные поправки	1% (2E<1.8 ГэВ) 3-8% (2E>1.8 ГэВ)	1%
Итого	8-20%	7-15%

- В эффективность регистрации была внесена поправка - 6.5%
- Во всем диапазоне энергии точность определяется статистической ошибкой

Заключение

- В области энергии $2E = 1.05-2.00$ ГэВ измерено сечение $e^+e^- \rightarrow \omega\eta$
- Измерение согласуется с предыдущими измерениями СНД и КМД-3
- Впервые измерено сечение радиационного процесса $e^+e^- \rightarrow \text{rad-}\eta\pi^0\gamma$.
Уровень достоверности 5.7σ .