



**Изучение процесса  $e^+e^- \rightarrow \eta\pi^0\gamma$   
в области энергии  $\sqrt{s} = 1.05-2.00$  ГэВ  
с детектором СНД**

**Л.В.Кардапольцев**

*ИЯФ СО РАН*

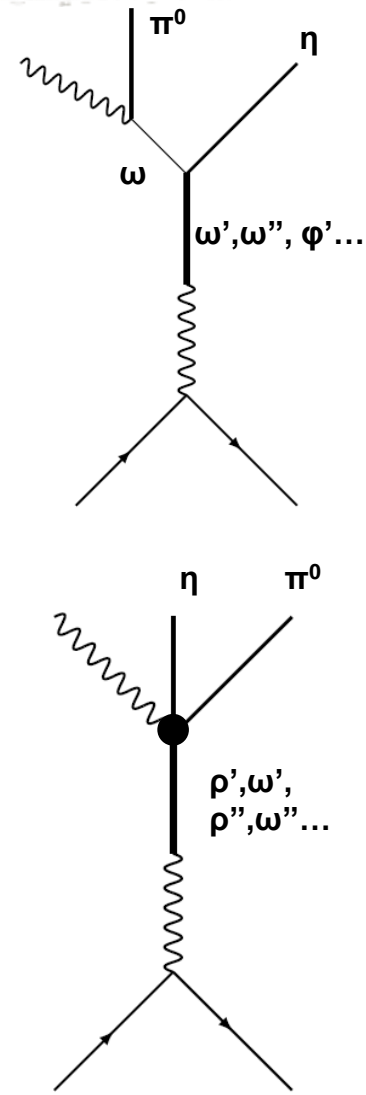
**19 июня 2020**



# Введение

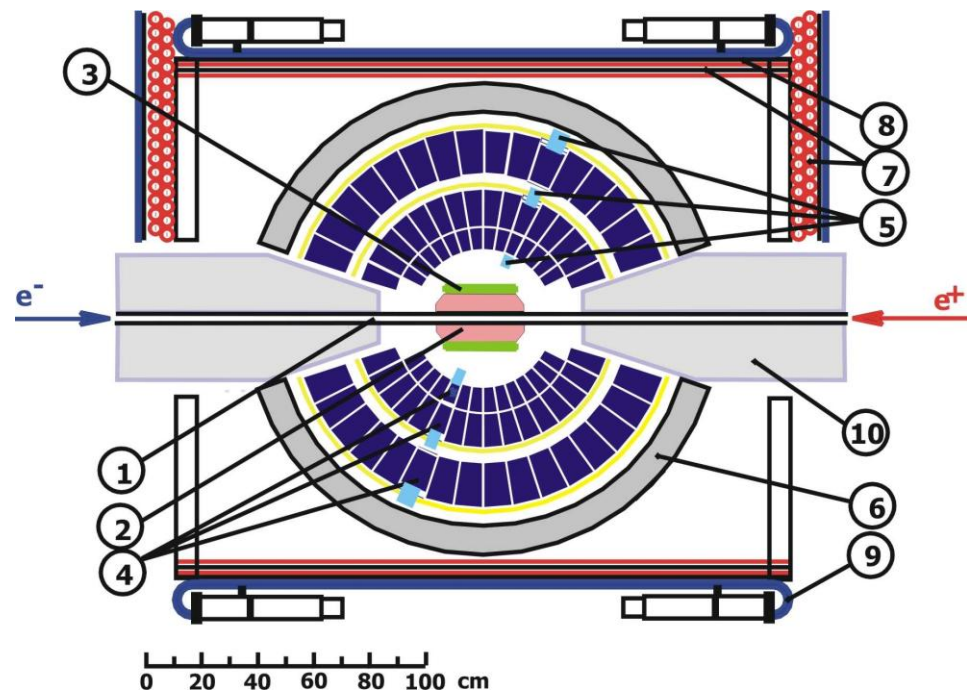


- Процесс  $e^+e^- \rightarrow \eta\pi^0\gamma$  изучается в диапазоне энергии в с.ц.м. от 1.05 до 2.00 ГэВ
- В этом диапазоне энергии сечение  $e^+e^- \rightarrow \eta\pi^0\gamma$  **измерено впервые**
- Процесс изучался в **пятифотонном конечном состоянии**
- **Доминирующий вклад** в сечение дает процесс  $e^+e^- \rightarrow \omega\eta$  с распадом  $\omega \rightarrow \pi^0\gamma$
- Сечение  $e^+e^- \rightarrow \omega\eta$  **измерялось в канале  $\omega \rightarrow 3\pi$**  на СВД, КМД-3, ВаВаг
- 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.

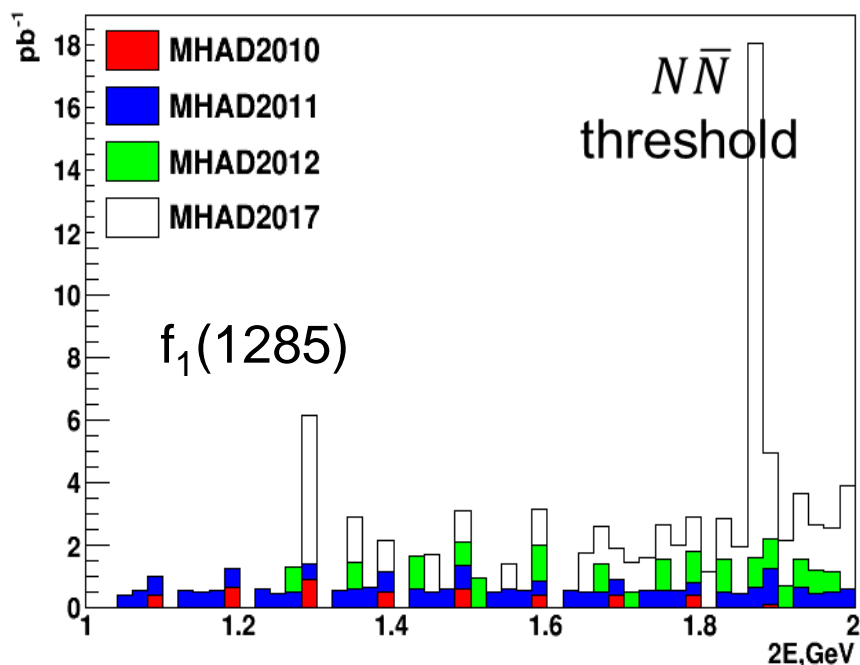
- ✓ Полное адронное сечение, которое вычисляется как сумма эксклюзивных сечений
- ✓ Изучение динамики эксклюзивных процессов
- ✓ Изучение свойств возбужденных векторных мезонов семейства  $\rho, \omega, \phi$



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

Integrated luminosity

$\Delta L(\text{пб})/(20 \text{ МэВ})$



- 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%**

- Данные объединены в **13 интервалов по энергии**



# Основные фоновые процессы

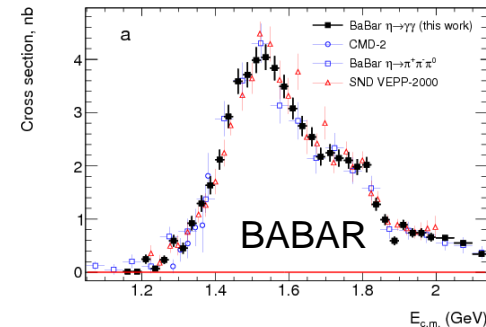
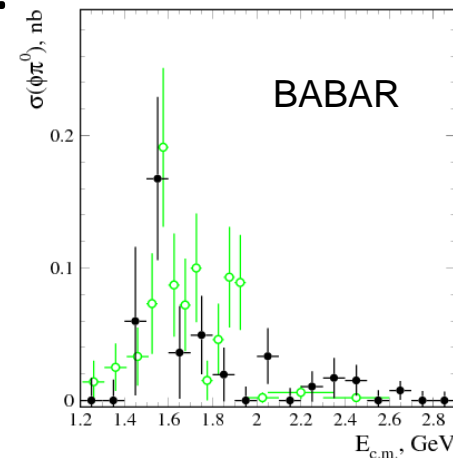
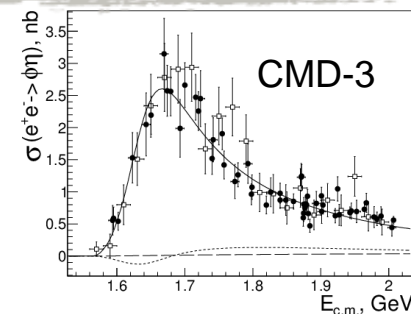


## Фон

- 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  $N_{\text{res}} = 19.6 \pm 1.3$
- Вклад от  $\rho\pi^0$ ,  $\omega\pi^0$  незначителен.





# Условия отбора



▪ **Ровно 5 фотонов**, нет треков

▪ **Кинематическая реконструкция**

**в гипотезах:**

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

$$e^+e^- \rightarrow 5\gamma, \quad e^+e^- \rightarrow 3\gamma$$

▪  $\chi^2_{5\gamma} < 30$

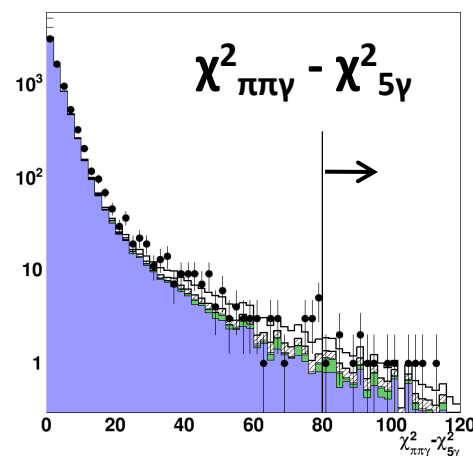
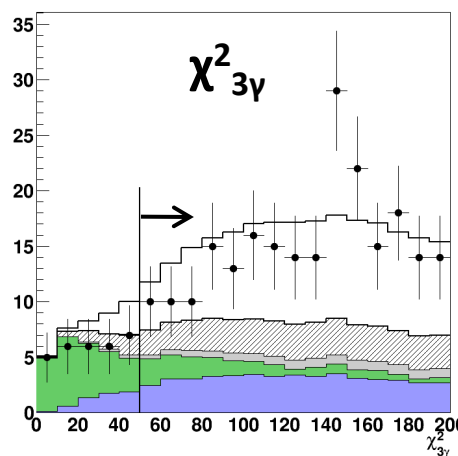
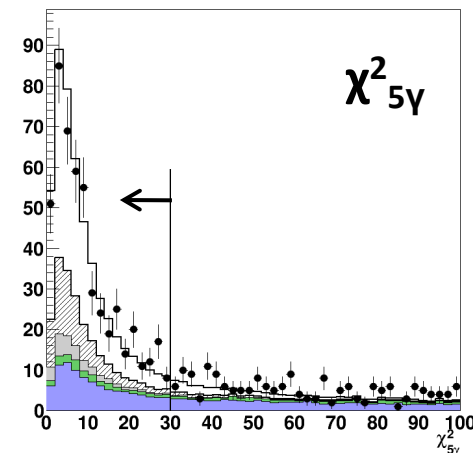
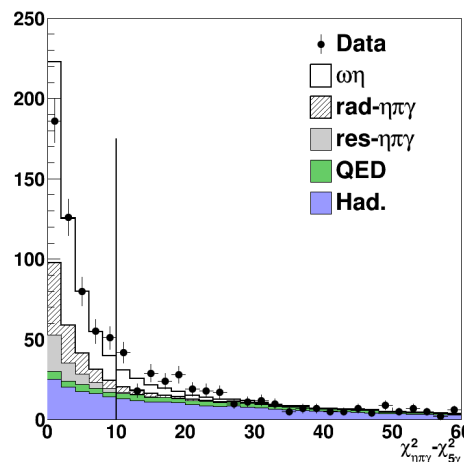
▪  $\chi^2_{\pi\pi\gamma} - \chi^2_{5\gamma} > 80, \quad \chi^2_{3\gamma} > 50$

▪ **Сигнальная 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**

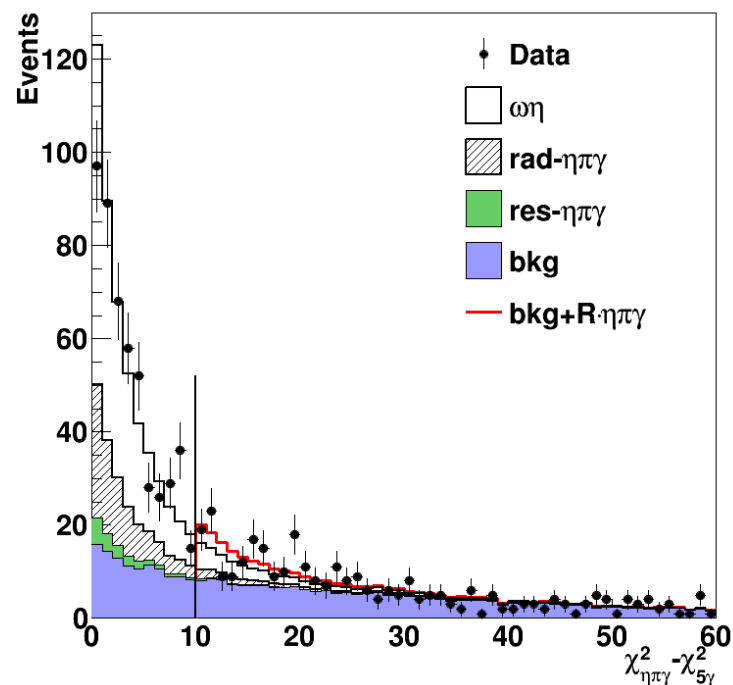
- Соотношения между числами событий в сигнальной и контрольной областях:

$$N_{\eta\pi\gamma}^C = k_{\text{sig}} \cdot N_{\eta\pi\gamma}; \quad N_{\text{bkg}} = k_{\text{bkg}} \cdot N_{\text{bkg}}^C$$

- К  $k_{\text{sig}}$  применялась поправка  $R = 1.5 \pm 0.3$  которая определялась по событиям  $\omega\eta$

- Ошибка  $k_{\text{bkg}}$  определялась **варьированием сечений** фоновых процессов

- $k_{\text{sig}} = 0.22 \pm 0.04$ ,  $k_{\text{bkg}} = 0.53 \pm 0.01$  (1.05-2.00 ГэВ)



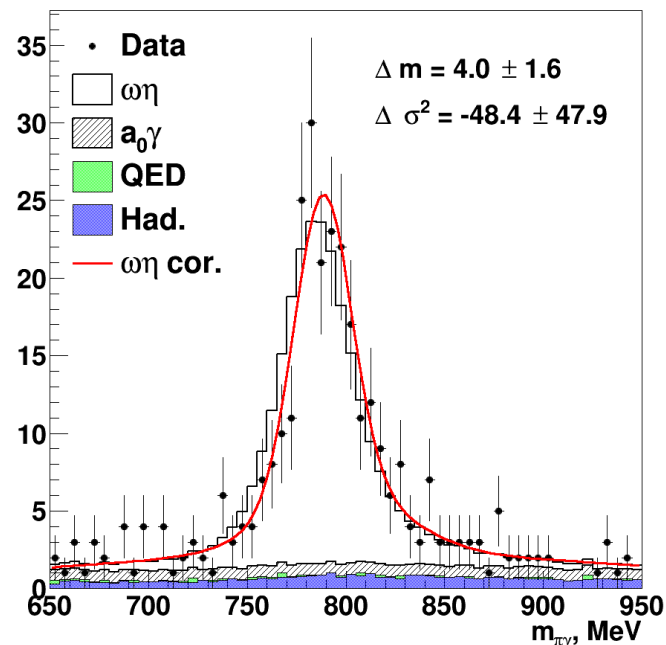




# Определение числа событий



- Для уточнения формы линии  $\omega$  мезона вводились дополнительный сдвиг ( $\Delta m$ ) и уширение ( $\Delta\sigma^2$ )
- Величины  $\Delta m$  и  $\Delta\sigma^2$  определялись из сравнения эксперимента и моделирования
- Величина  $\Delta\sigma^2$  сравнима с нулем, так что дополнительное размытие в моделирование не вводилось

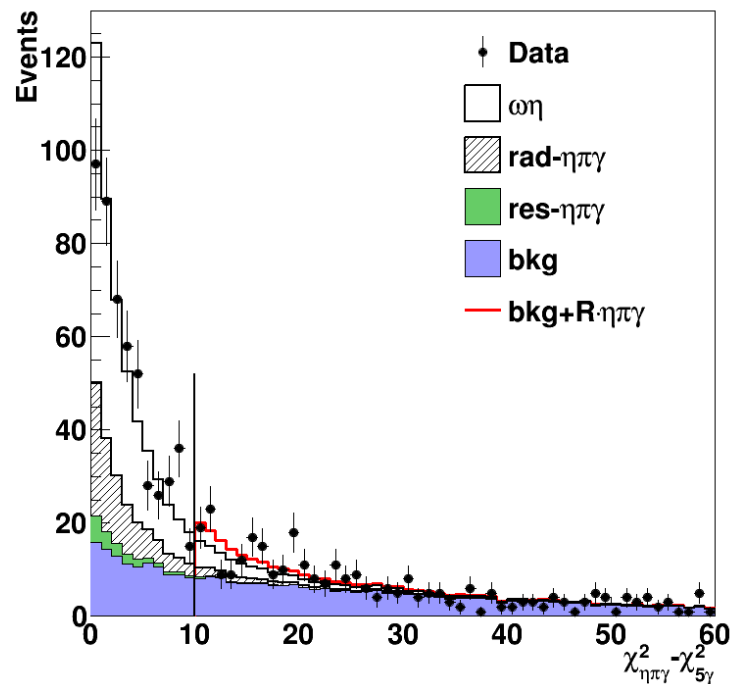
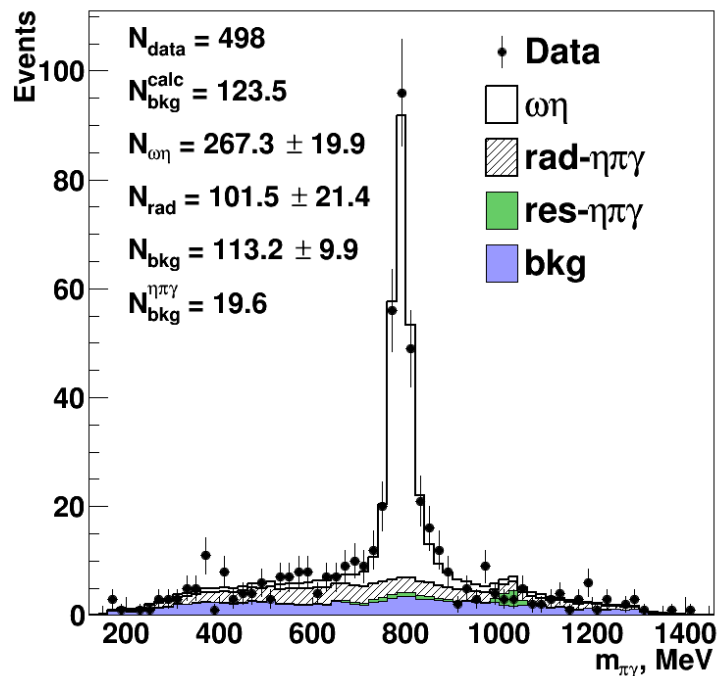


- Для определения систематических погрешностей в функцию правдоподобия вводились параметры соответствующие  $\Delta m$ ,  $\Delta\sigma^2$ ,  $N_{res}$ ,  $k_{sig}$ ,  $k_{bkg}$
- На эти параметры накладывались гауссовы ограничения
- Погрешность за счет процедуры определения числа событий
  - $\omega\eta$ : 2 - 27%
  - rad- $\eta\pi^0\gamma$ : 4 - 15%





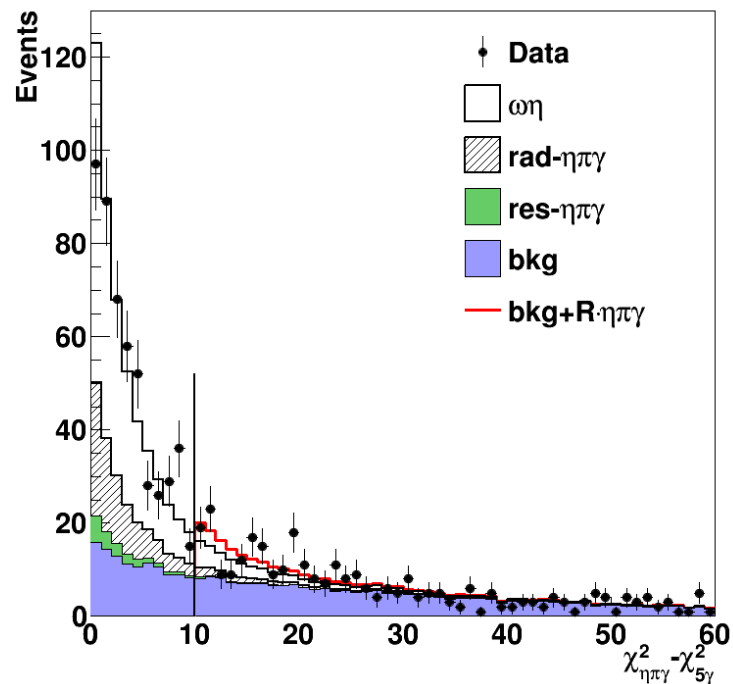
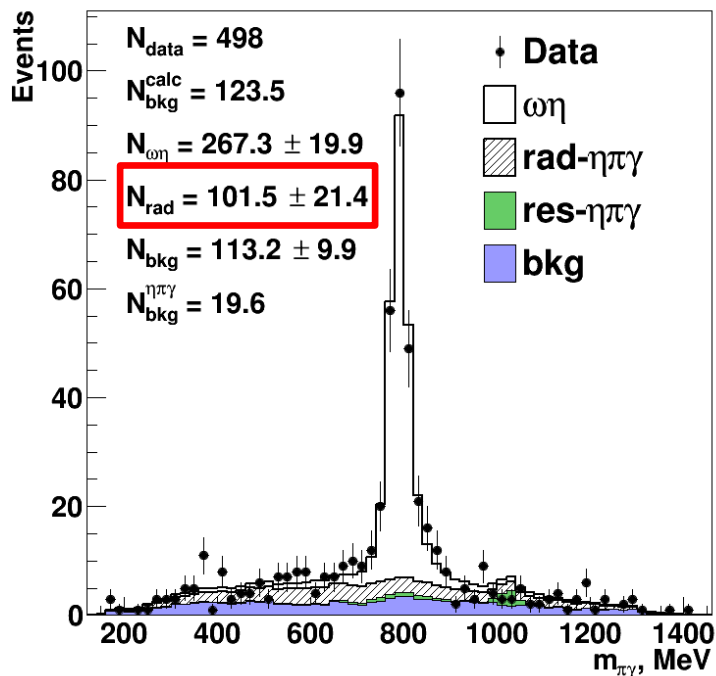
# Результат подгонки $m(\pi^0\gamma)$ и $\chi^2_{\eta\pi\gamma} - \chi^2_{5\gamma}$



- Результат подгонки для всех событий в интервале  $2E=1.05-2.00$  ГэВ



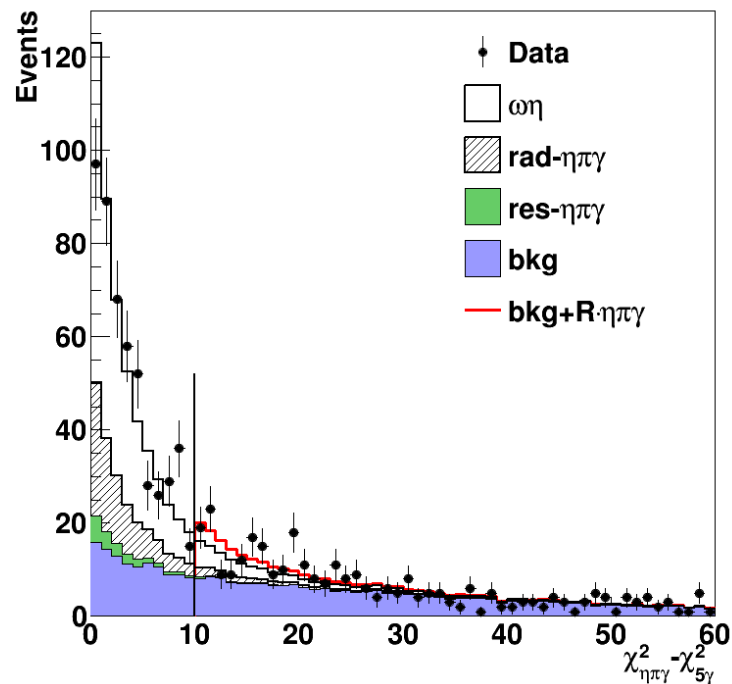
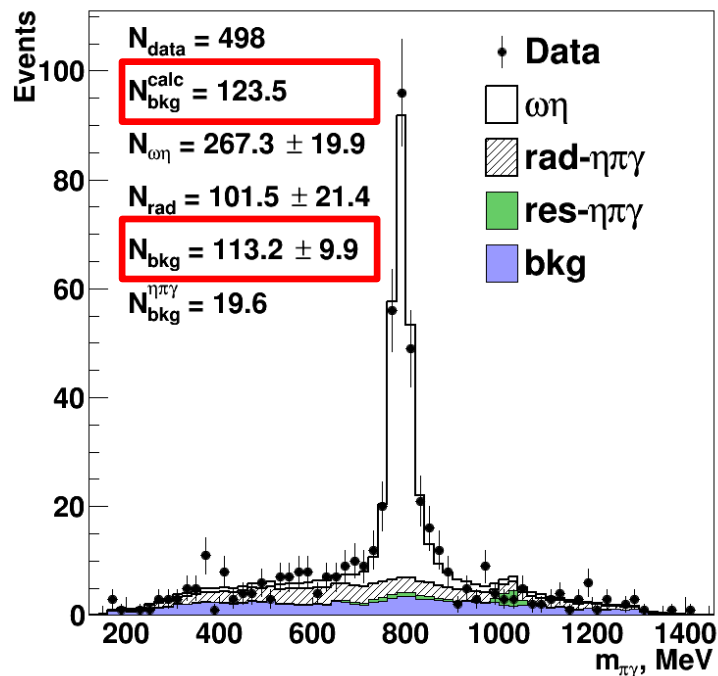
# Результат подгонки $m(\pi^0\gamma)$ и $\chi^2_{\eta\pi\gamma} - \chi^2_{5\gamma}$



- Результат подгонки для всех событий в интервале  $2E=1.05-2.00$  ГэВ
- Обнаружено около **100 событий** процесса  $e^+e^- \rightarrow \text{rad-}\eta\pi^0\gamma$



# Результат подгонки $m(\pi^0\gamma)$ и $\chi^2_{\eta\pi\gamma} - \chi^2_{5\gamma}$



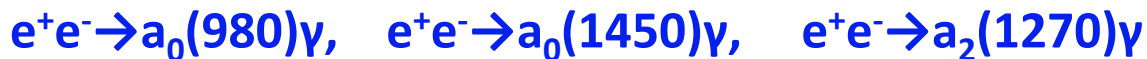
- Результат подгонки для всех событий в интервале  $2E=1.05-2.00$  ГэВ
- Обнаружено около **100 событий** процесса  $e^+e^- \rightarrow \text{rad-}\eta\pi^0\gamma$
- Ожидаемое и полученное из подгонки числа событий фона **хорошо согласуются**



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



- Были рассмотрены 3 модели:



- Для определения их комбинации, лучше всего описывающей данные, **двумерное распределение  $m(\eta\pi):m(\pi\gamma)$**  было подогнано

$$\alpha P_{a_2(1270)\gamma} + \beta P_{a_0(980)\gamma} + (1 - \alpha - \beta) P_{a_0(1450)\gamma}$$

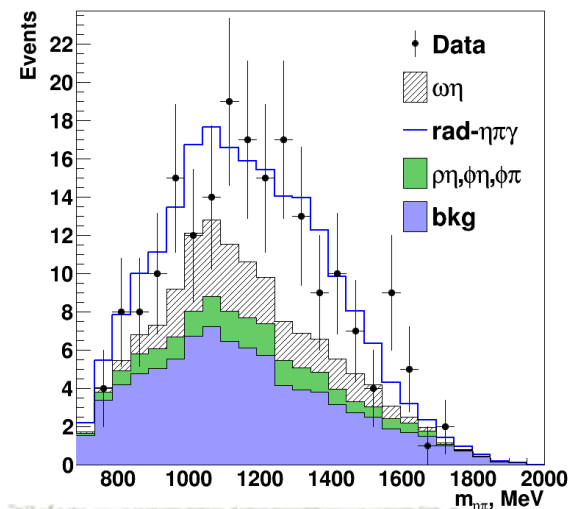
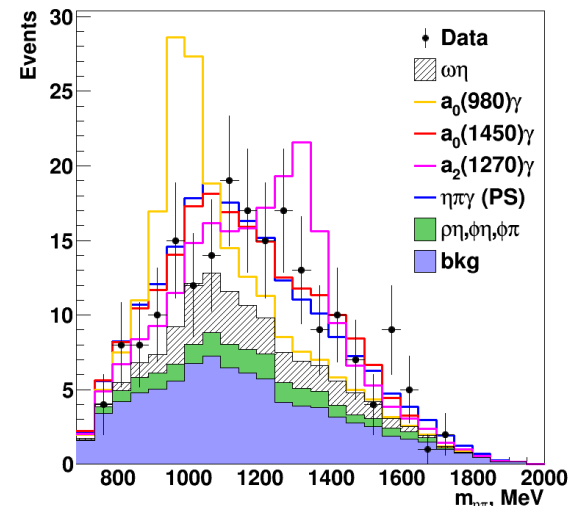
- В результате получились  $\alpha = 0.22 \pm 0.21$  и  $\beta = 0.0^{+0.09}$

- Полученные значения для  $\alpha$  и  $\beta$  использовались для вычисления **эффективности регистрации**, а их ошибки для оценки **модельной зависимости эффективности**

- Значимость вклада от радиационных процессов:

$$2D[m(\eta\pi):m(\pi\gamma)]: -2\ln(L_0/L_3) = 42.3 \rightarrow 5.8\sigma \text{ (сист.)}$$

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



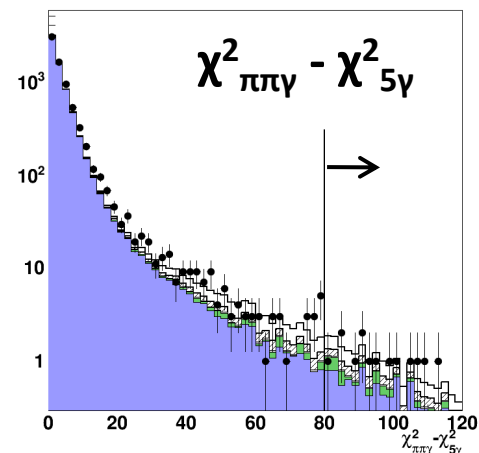
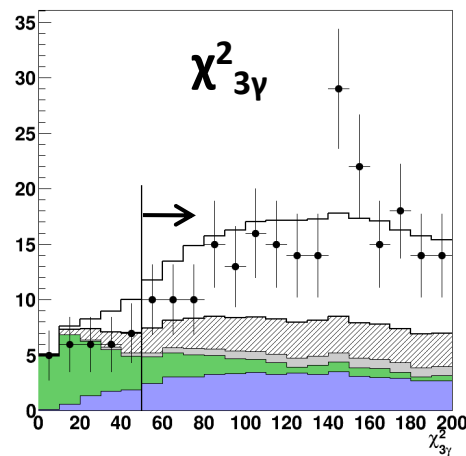
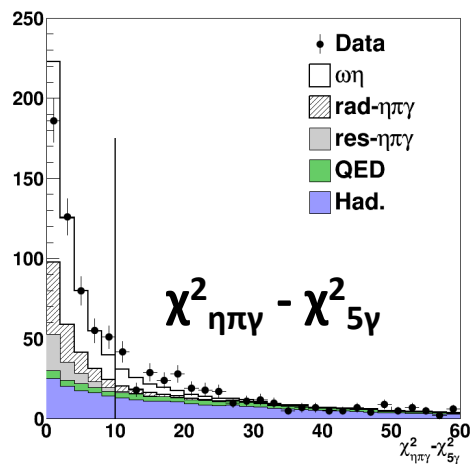
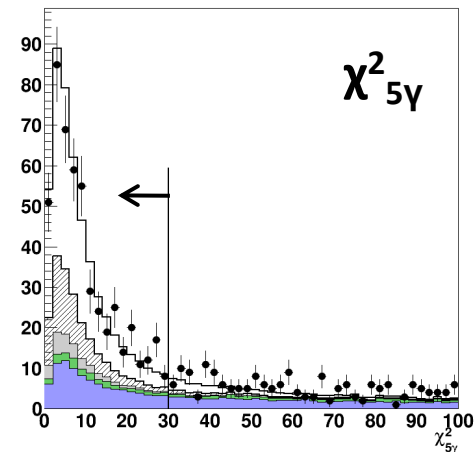


# Эффективность регистрации



■ Поправка к эффективности регистрации определялась по событиям  $e^+e^- \rightarrow \omega\eta$

$\chi^2_{\eta\pi\gamma} - \chi^2_{5\gamma} (10 \rightarrow 60)$	$(-5.6 \pm 4.5)\%$
$\chi^2_{5\gamma} (30 \rightarrow 60)$	$(-0.5 \pm 3.3)\%$
$\chi^2_{\pi\pi\gamma} - \chi^2_{5\gamma} (80 \rightarrow 10)$	$(1.2 \pm 2.1)\%$
$\chi^2_{3\gamma} (50 \rightarrow 0)$	$(-0.8 \pm 1.1)\%$
Конверсия фотона ( $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$ )	$(-0.79 \pm 0.02)\%$
$N_{\gamma}=5 (e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0)$	$(-0.4 \pm 0.2)\%$
Итого	$(-6.9 \pm 6.1)\%$





# Радиационные поправки



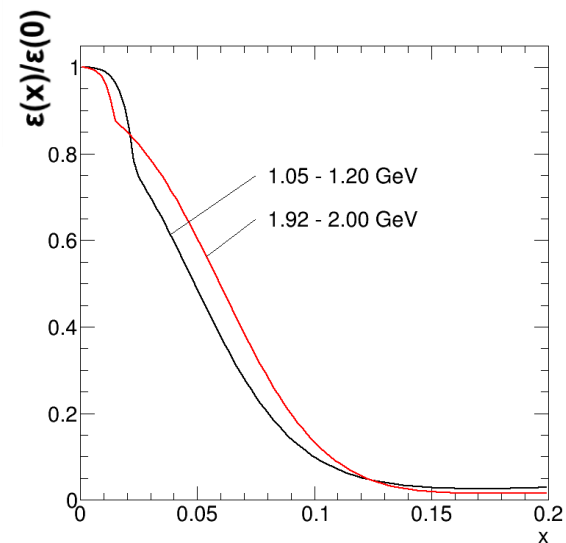
■ Для вычисления радиационных поправок определялась зависимость эффективности регистрации от энергии рад. фотона  $\varepsilon(x)$ ,  $x=E_r/2E$

■  $\varepsilon(x)/\varepsilon(0)$  слабо зависит от энергии пучков и практически не зависит от промежуточного механизма  $e^+e^- \rightarrow \eta\pi^0\gamma$

■ Для вычисления рад. поправок использовались выражения:

$$\sigma_{\text{vis}}(s) = \int_0^{x_{\text{max}}} \varepsilon(s, x) F(x, s) \sigma(s(1 - 2x)) dx$$
$$\sigma_{\text{vis}} = N/L, \quad \sigma_{\text{vis}}(s) = \varepsilon(s) \sigma(s) (1 + \delta(s))$$

■ Для определения модельной зависимости рад. поправок параметры подгонки для  $\sigma(s)$  варьировались внутри ошибок





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



	Fit 1	Fit2	SND(3π)	CMD-3(3π)
$m_{V'}$ , МэВ	$\equiv 1420$	$\equiv 1420$	$\equiv 1420$	$\equiv 1420$
$\Gamma_{V'}$ , МэВ	$440 \pm 124$	$\equiv 220$	$\equiv 220$	$\equiv 220$
$B_{V'} \cdot 10^8$	$2.5 \pm 0.6$	$3.0 \pm 0.6$	$2.1 \pm 0.9$	$3.2 \pm 0.6$
$m_{V''}$ , МэВ	$1698 \pm 10$	$1694 \pm 9$	$1679 \pm 5$	$1679 \pm 5$
$\Gamma_{V''}$ , МэВ	$110 \pm 16$	$94 \pm 13$	$95 \pm 11$	$121 \pm 9$
$B_{V''} \cdot 10^7$	$6.4 \pm 0.9$	<b><math>5.4 \pm 0.6</math></b>	<b><math>5.6 \pm 0.4</math></b>	<b><math>4.7 \pm 0.3</math></b>
$\chi^2/n.d.f.$	8.6/6	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  $B_V = B(V \rightarrow e^+e^-)B(V \rightarrow \omega\eta)$

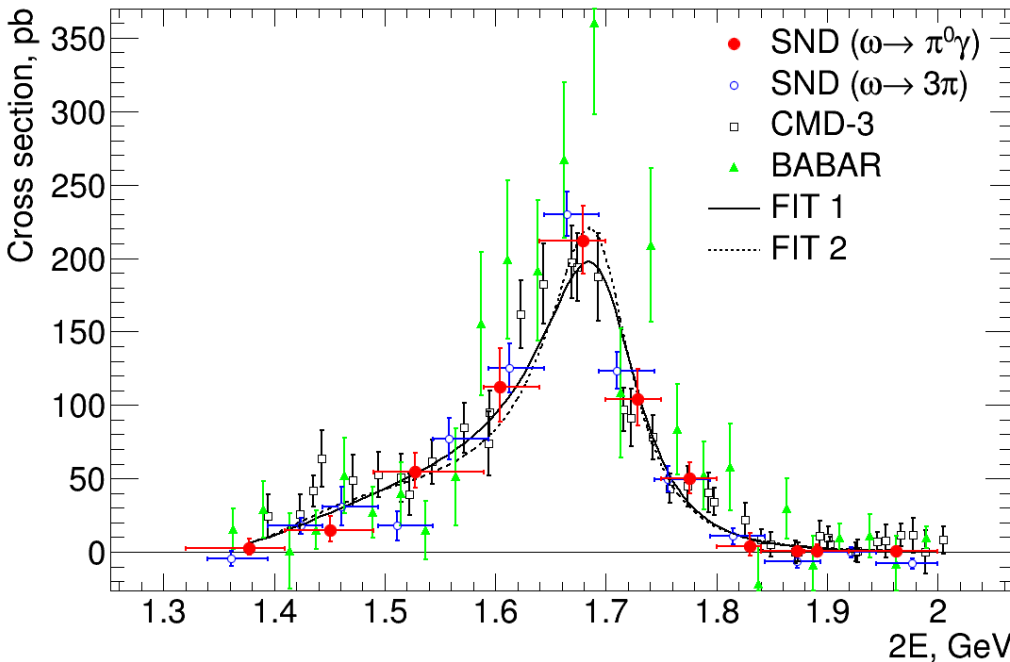
- Полученное сечение хорошо согласуется с предыдущими измерениями СНД и КМД-3 и противоречит BABAR

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

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

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

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





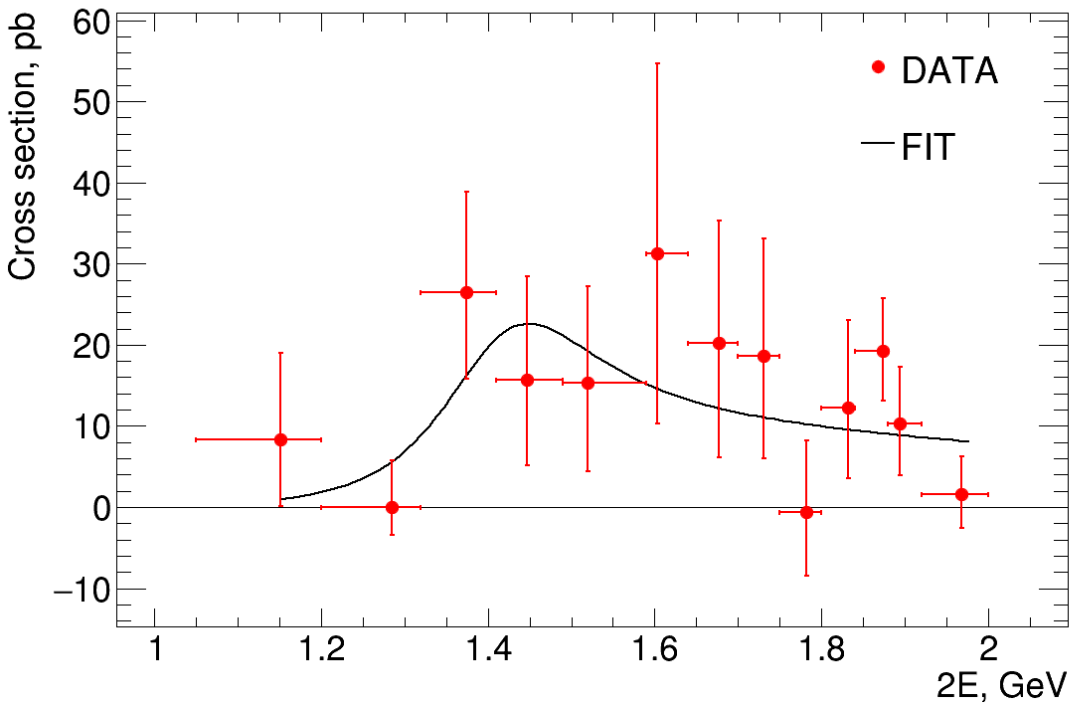


# Сечения $e^+e^- \rightarrow rad\text{-}\eta\pi\gamma$



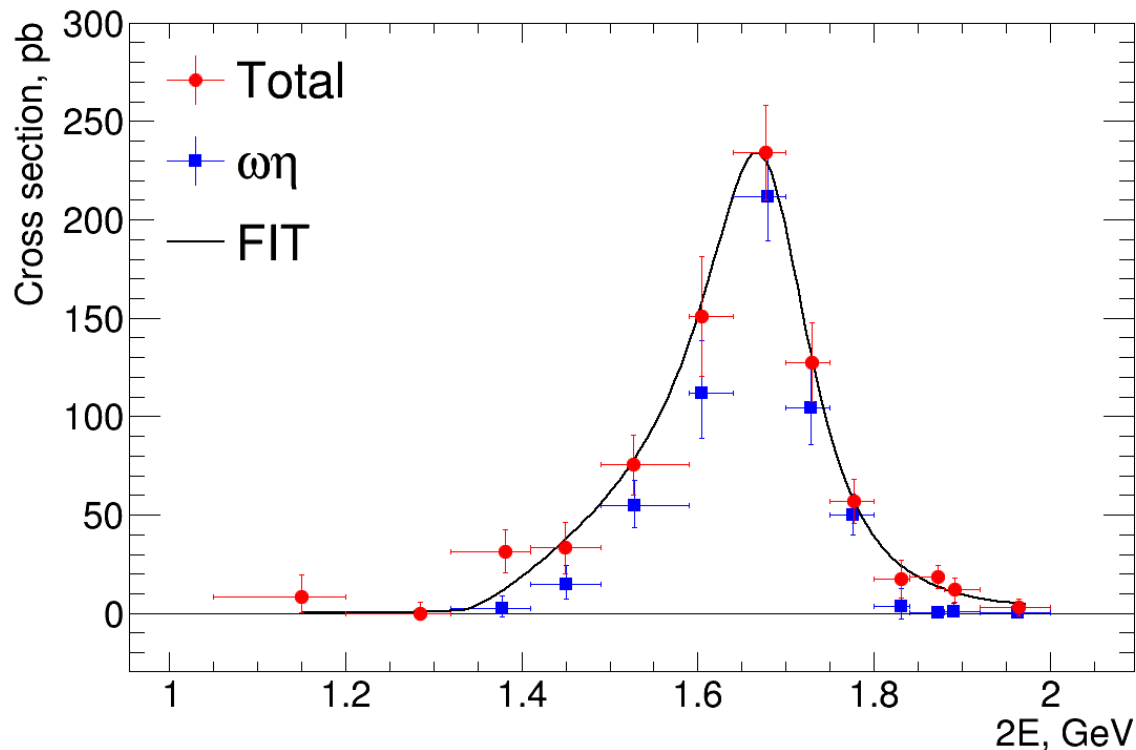
Fit	
$m_{V'}$ , МэВ	$1415 \pm 52$
$\Gamma_{V'}$ , МэВ	$247 \pm 81$
$B(V' \rightarrow e^+e^-) B(V' \rightarrow rad\text{-}\eta\pi\gamma)$	$(4 \pm 2) \times 10^{-10}$
$\chi^2/n.d.f.$	10.8/10

- При аппроксимации сечения предполагалось, что оно определяется распадом  $V' \rightarrow a_0(1450)\gamma$
- Сечение составляет **10-15 пб** в широком диапазоне энергии **1.3-1.9 ГэВ**





# Полное сечения $e^+e^- \rightarrow \eta\pi\gamma$



▪ Полное сечение процесса  $e^+e^- \rightarrow \eta\pi^0\gamma$  было получено как **сумма сечений для всех промежуточных состояний**

▪ Для определения **рад. поправок** подгонка сечения производилась **суммой моделей** для  $e^+e^- \rightarrow \omega\eta$  и  $e^+e^- \rightarrow \text{rad-}\eta\pi\gamma$

$$\sigma_{\text{vis}} = \frac{1}{L} \left( N_{\omega\eta} + \frac{\epsilon_{\omega\eta}}{\epsilon_{\text{rad}}} N_{\text{rad}} + \frac{\epsilon_{\omega\eta}}{\epsilon_{\text{res}}} N_{\text{res}} \right)$$



Источник	$\omega\eta$ (1.64-1.70 ГэВ)	$\omega\eta$ (1.84-2.00 ГэВ)	rad- $\eta\pi\gamma$	$\eta\pi\gamma$
Светимость	2%	2%	2%	2%
Условия отбора	6%	6%	6%	6%
Определение числа событий	2%	20-27%	4-35%	1-15%
Модельная зависимость эффективности	—	—	2-3%	0.5-3%
Интерференция с $\rho\eta$	5%	24-37%	—	—
Рад. поправки	1%	13-27%	1-3%	1-6%
Итого	8%	40-50%	8-35%	6-18%

- Для оценки вклада интерференции с  $\rho\eta$  вычислялись сечений

$$A_{\pm} = A_{\omega\eta} \pm A_{\rho\eta}, \quad \sigma_{\text{int}} = (\sigma_{+} - \sigma_{-})/2$$

- Во всем диапазоне энергии точность **определяется статистической ошибкой**



# Заключение



- В области энергии от порога рождения до 2 ГэВ измерено сечение  $e^+e^- \rightarrow \omega\eta$
- Измерение **согласуется** с предыдущими измерениями СНД и КМД-3 и имеет **сравнимую точность**
- С достоверностью на уровне  **$5.8\sigma$**  установлено, что сечение процесса  $e^+e^- \rightarrow \eta\pi^0\gamma$  не полностью объясняется адронными промежуточными состояниям типа вектор-псевдоскаляр.
- Статья в arXiv <https://arxiv.org/abs/2006.05465>