



**Изучение процесса  $e^+e^- \rightarrow \eta\eta\gamma$   
в области энергии  $\sqrt{s} = 1.17-2.00$  ГэВ  
с детектором СНД**

**Л.В.Кардапольцев**

*ИЯФ СО РАН*

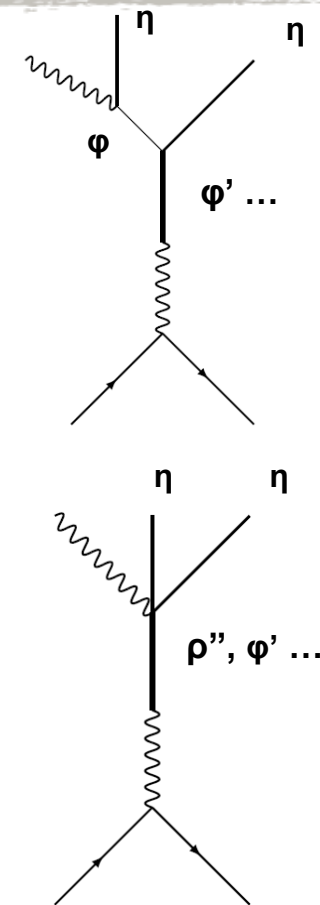
**15 октября 2021**



# Введение

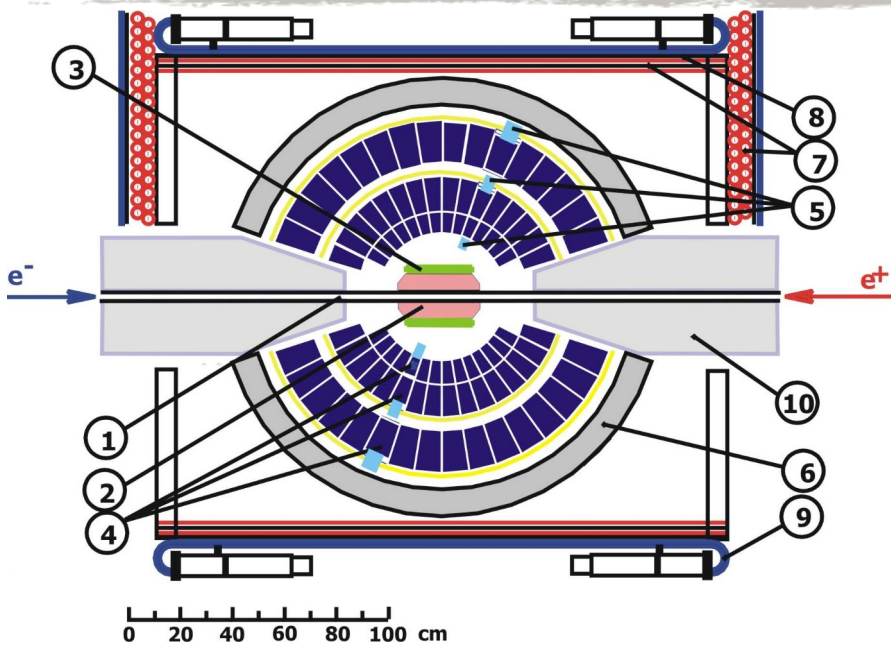


- Процесс  $e^+e^- \rightarrow \eta\eta\gamma$  изучается в диапазоне энергии в с.ц.м. от 1.17 до 2.00 ГэВ
- В этом диапазоне энергии сечение  $e^+e^- \rightarrow \eta\eta\gamma$  **измерено впервые**
- Процесс изучался в **пятифотонном конечном состоянии**
  
- **Доминирующий вклад** в сечение дает процесс  $e^+e^- \rightarrow \phi\eta$  с распадом  $\phi \rightarrow \eta\gamma$
- Сечение  $e^+e^- \rightarrow \phi\eta$  **измерялось в канале  $\phi \rightarrow K^+K^-$**  на SND, КМД-3, BaBar
- Наибольший интерес представляет **поиск радиационных процессов**, в которых фотон излучается возбужденным векторным мезоном, например,  $e^+e^- \rightarrow f_0(1500)\gamma, f'_2(1525)\gamma$





# 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  $\rho, \omega, \phi$

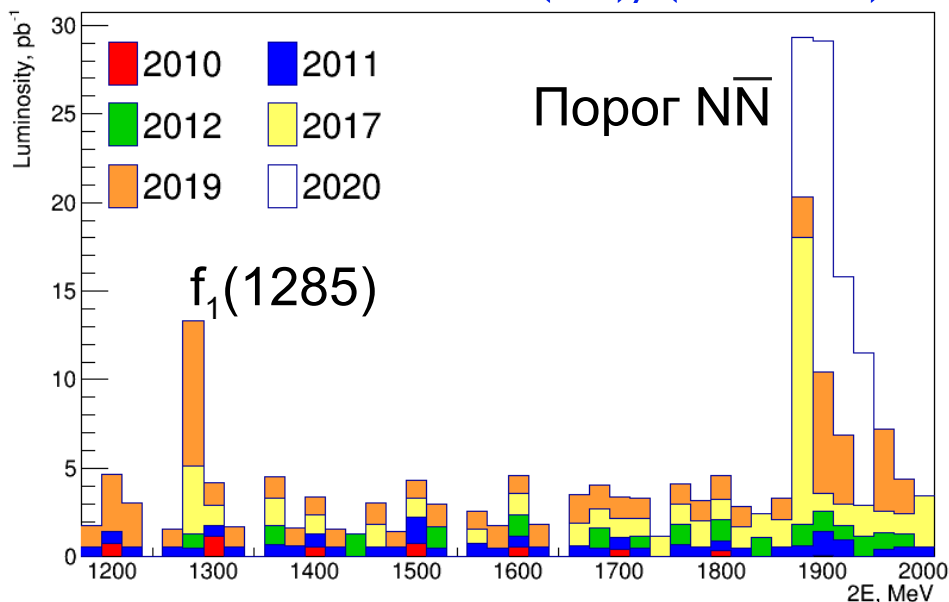


# Использованная статистика



- Для анализа были использованы данные набранные в **2010 - 2020 гг.**
- Интегральная светимость составила **201 пб<sup>-1</sup>**

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



- 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 6 интервалов по энергии



# Фон и условия отбора

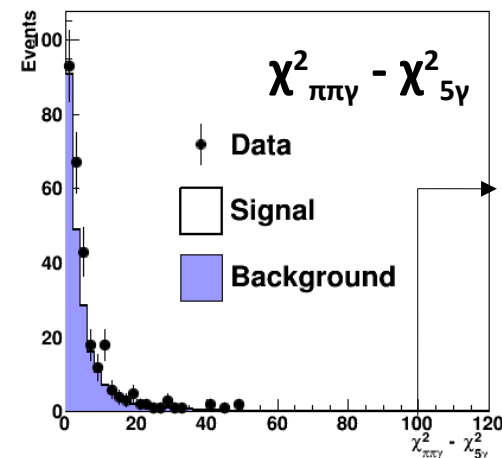
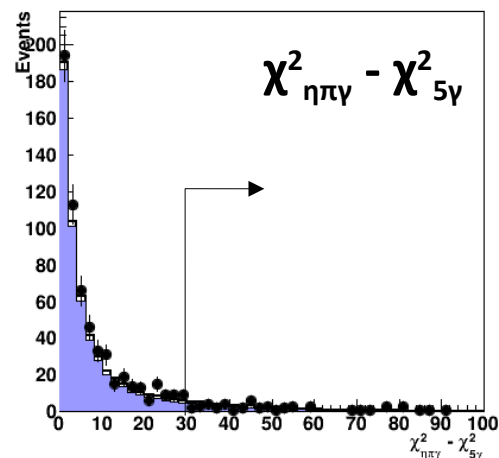
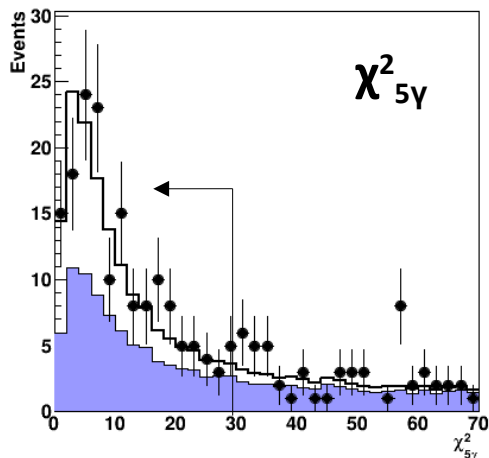
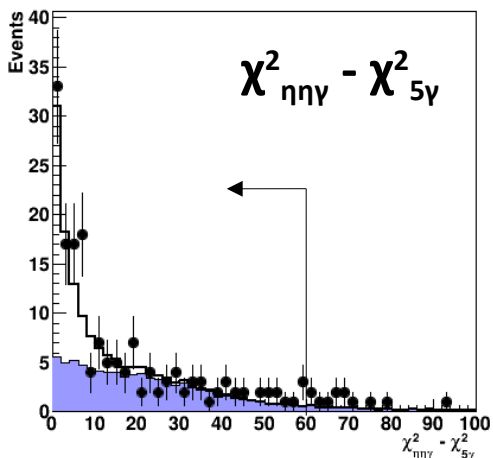


## Фон

- Основные фоновые процессы:  
 $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0 \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$ ,  
 $e^+e^- \rightarrow \omega\eta \rightarrow \eta\pi^0\gamma$
- Также заметный вклад дают процессы  
 $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0\pi^0$ ,  $e^+e^- \rightarrow \omega\eta\pi^0$   
и процессы КЭД  $e^+e^- \rightarrow 4\gamma, 5\gamma$

## Условия отбора

- Ровно **5 фотонов**, нет треков
- Кинематическая реконструкция  
 $e^+e^- \rightarrow \eta\eta\gamma$ ,  $e^+e^- \rightarrow \eta\pi^0\gamma$ ,  
 $e^+e^- \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$ ,  $e^+e^- \rightarrow 5\gamma$
- $\chi^2_{\eta\eta\gamma} - \chi^2_{5\gamma} < 60$ ,  $\chi^2_{5\gamma} < 30$ ,  $\chi^2_{\pi\pi\gamma} - \chi^2_{5\gamma} > 100$
- $\chi^2_{\eta\pi\gamma} - \chi^2_{5\gamma} > 30$  при  $\sqrt{s} > 1.32$  ГэВ

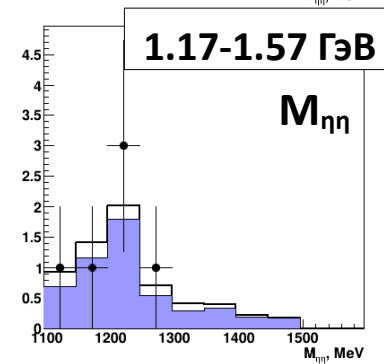
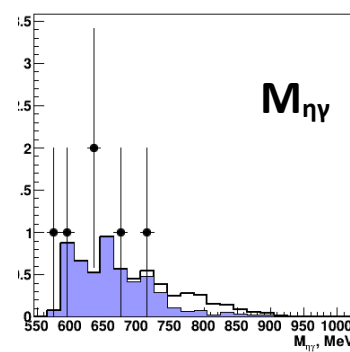
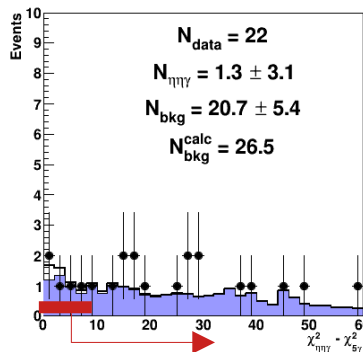
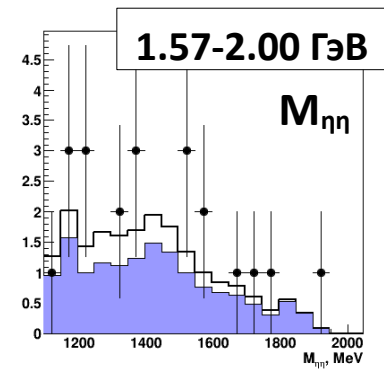
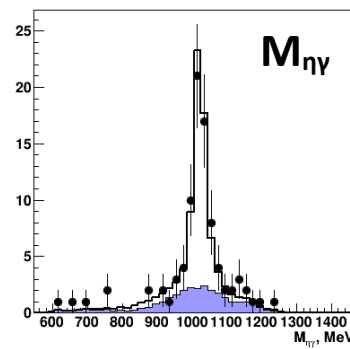
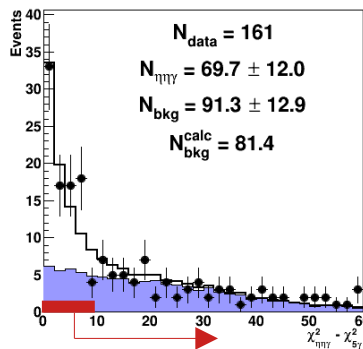




# Определение числа событий



- Для определения числа событий процесса  $e^+e^- \rightarrow \eta\eta\gamma$  проводилась подгонка распределения по  $\chi^2_{\eta\eta\gamma} - \chi^2_{5\gamma}$  суммой распределений **для сигнала и фона**
- Распределение для сигнала получено как сумма распределений для  $e^+e^- \rightarrow \phi\eta, \rho\eta, \omega\eta$
- Выше порога  $\phi\eta$  виден сигнал от событий  $e^+e^- \rightarrow \phi\eta$
- Ниже порога  $\phi\eta$  значимого сигнала не обнаружено
- Ожидаемый вклад от  $e^+e^- \rightarrow \rho\eta, \omega\eta$  для
- $\sqrt{s} = 1.17-1.57$  ГэВ  $\approx 0.7$  события
- Ожидаемое количество событий фона хорошо согласуется с найдемym из подгонки

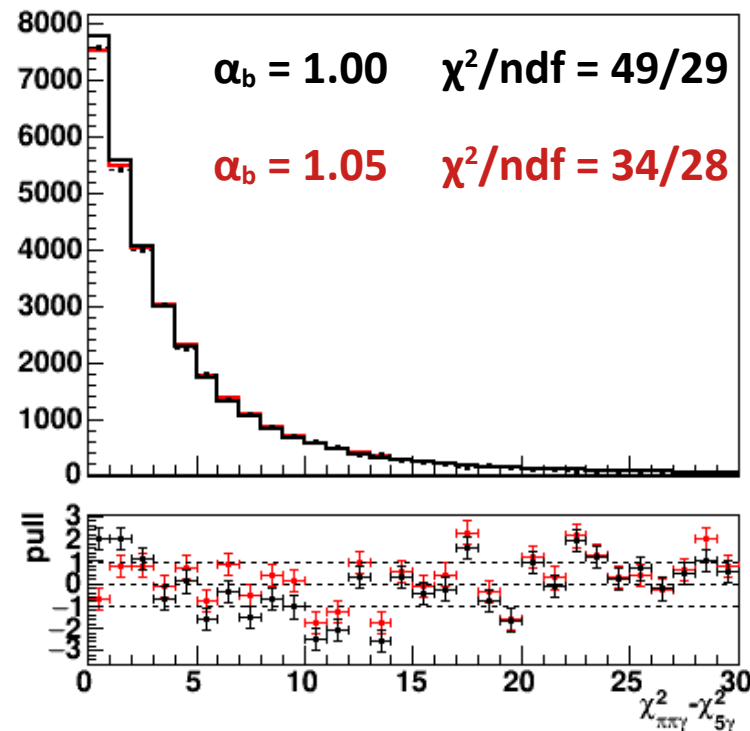




# Распределение по $\chi^2_{\eta\eta\gamma} - \chi^2_{5\gamma}$ для сигнала

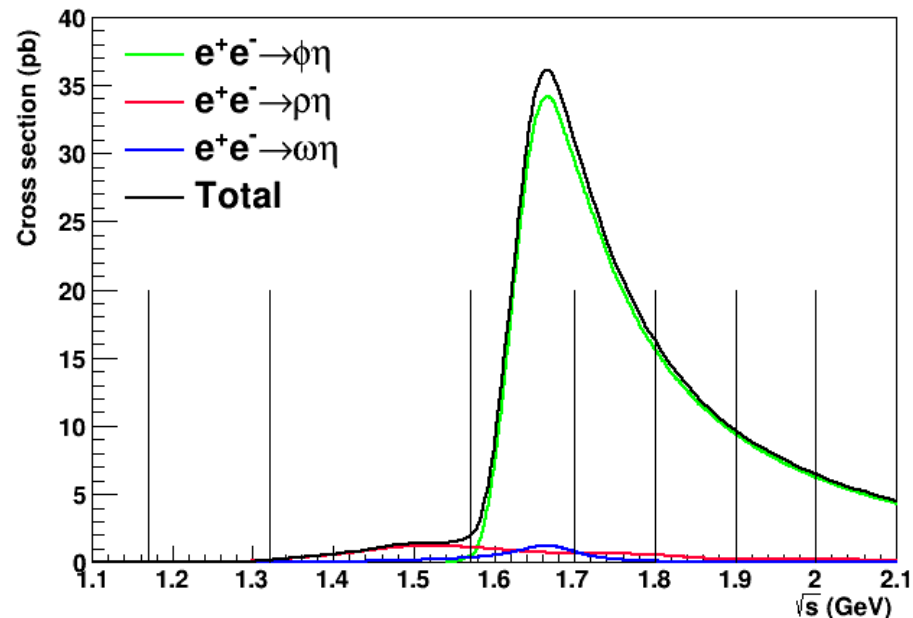


- Для изучения неточности, с которой моделируется распределение по  $\chi^2_{\eta\eta\gamma} - \chi^2_{5\gamma}$ , были использованы события  $e^+e^- \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$  с энергией  $\sqrt{s} = 1.05-1.70$  ГэВ
- Неточность можно описать растяжением  $\alpha_b(\chi^2_{\pi\pi\gamma} - \chi^2_{5\gamma})$ ,  $\alpha_b = 1.05 \pm 0.01$
- Эта поправка была применена к сигнальному распределению. Для оценки ошибки параметр  $\alpha_b$  добавлялся в подгонку с Гауссовым ограничением 0.05.
- Систематическая ошибка составила 3%
- Систематическая ошибка за счет точности описания распределения для фона — 1%





- При определении **эффективности** и **рад. поправок** предполагалось, что в сечении **доминируют вклады  $e^+e^- \rightarrow \phi\eta, \rho\eta, \omega\eta$**
- Интерференция **не учитывалась**
- **Ниже 1.57 ГэВ** основной вклад дает  **$\rho\eta$** , а **выше 1.57 ГэВ  $\phi\eta$**
- Внутри каждого из 6 интервалов **эффективность** и **рад. поправка** **усреднялись**



$$\sigma = \frac{N_{\eta\eta\gamma}}{L \epsilon (1 + \delta)},$$
$$(1 + \delta) = \sum_{i,j} L_i \sigma_{vis,j}(s_i) / \sum_{i,j} L_i \sigma_j(s_i), \quad \epsilon = \sum_{i,j} \epsilon_{i,j} L_i \sigma_{vis,j}(s_i) / \sum_{i,j} L_i \sigma_{vis,j}(s_i).$$
$$\sigma_{vis,j}(s_i) = \int_0^{x_{max}} F(x, s_i) \sigma_j(s_i(1-x)),$$

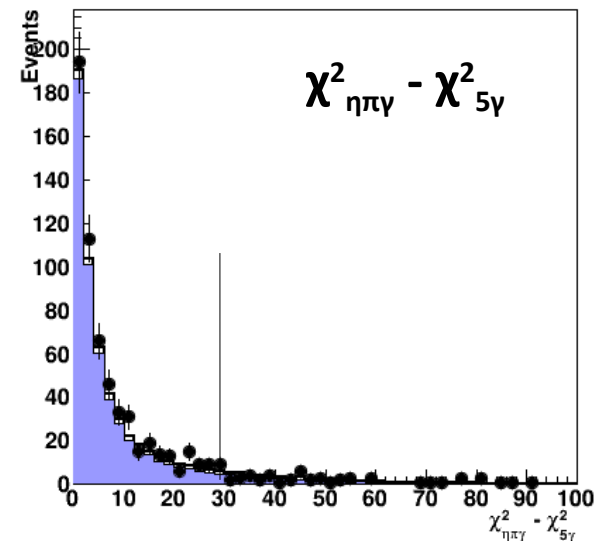




# Систематические ошибки



- Модельная зависимость сечения составила **2%** для  $\sqrt{s} > 1.57$  ГэВ и **20%** для  $\sqrt{s} < 1.57$  ГэВ
  - Варьировались отдельные вклады
  - Добавлялся **интерференционный член** между  $\rho\eta, \omega\eta$
  - Добавлялись **вклады**  $e^+e^- \rightarrow f_0(1500)\gamma, f'_2(1525)\gamma$
- Систематическая неопределенность за счет условий отбора
  - За счет  $\chi^2_{\eta\pi\gamma} - \chi^2_{5\gamma} - 10\%$
  - За счет других условий – **5%**



## Усредненная эффективность регистрации (%)

ГэВ	1.17-1.32	1.32-1.57	1.57-1.80	1.80-2.0
---	33.4	36.8	40.0	36.0
$\chi^2_{\eta\pi\gamma} - \chi^2_{5\gamma} > 30$	17.8	20.7	27.8	25.8
$\chi^2_{\eta\pi\gamma} - \chi^2_{5\gamma} > 100$	9.3	12.4	20.8	20.2



# Сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \eta\eta\gamma$



Источник	
Светимость	2%
Условия отбора	5-11%
Вычитание фона	1%
Форма $\chi^2_{\eta\eta\gamma} - \chi^2_{5\gamma}$	3%
Модельная зависимость	2-10%
Итого	12-23%

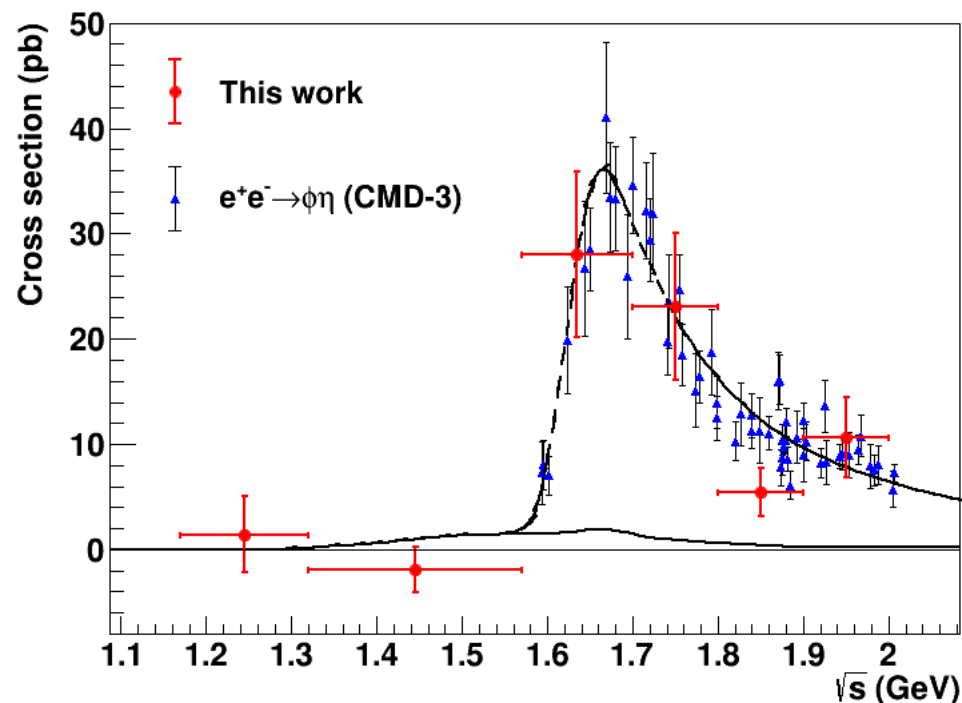
- Поправка к эффективности за счет неточности описания конверсии фотонов  $(-0.79 \pm 0.02)\%$

- Точность определяется стат. ошибкой

- Измеренное сечение хорошо

- согласуется с измерением КМД-3 для  $e^+e^- \rightarrow \phi\eta$ ,  $\phi \rightarrow K^+K^-$

- Также оно хорошо согласуется с теоретической моделью

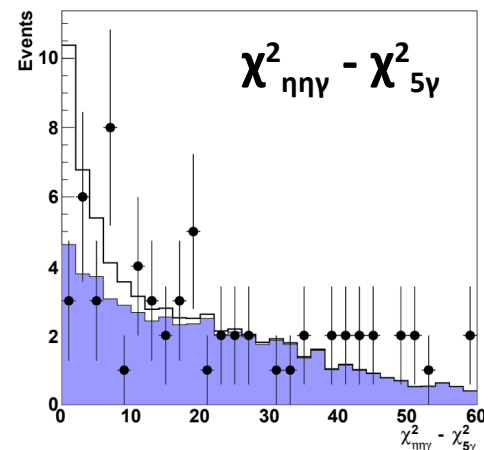
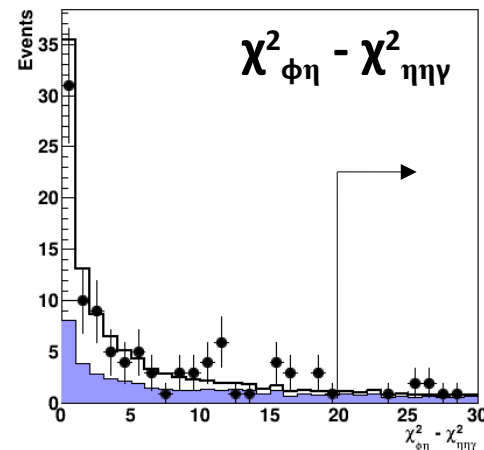




# Поиск вкладов радиационных процессов



- Наиболее вероятные дополнительные вклады  $e^+e^- \rightarrow f_0(1500)\gamma, f'_2(1525)\gamma$
- Для увеличения чувствительности было добавлено условие  $\chi^2_{\phi\eta} - \chi^2_{\eta\eta\gamma} > 20$
- Сигнала от радиационных процессов не обнаружено
- Для вычисления верхних пределов использовалась техника  $CL_s$
- Распределение  $\chi^2_{\eta\eta\gamma} - \chi^2_{5\gamma}$  для данных сравнивалось с ожидаемым распределением для фона и сигнала
- В качестве эффективности использовалась среднее эффективностей для  $e^+e^- \rightarrow f_0(1500)\gamma$  и  $f'_2(1525)\gamma$
- Их полуразность использовалась в качестве оценки модельной зависимости, она составила 6%
- Ошибка ожидаемого числа фоновых событий не превышает 10%





# Поиск вкладов радиационных процессов



Предсказания кварковой модели:

$$\Gamma(\phi(1680) \rightarrow f'_2(1525)\gamma) = 199 \text{ кэВ}$$

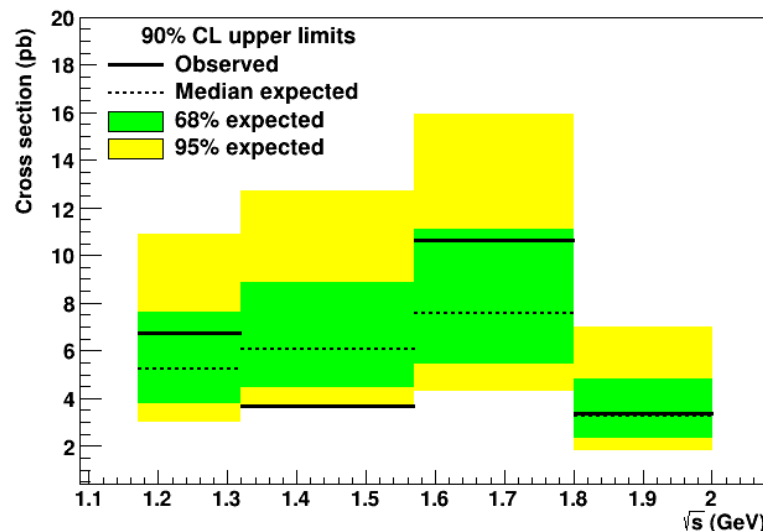
$$\Gamma(\rho(1700) \rightarrow f_0(1500)\gamma) = 98 - 520 \text{ кэВ}$$

F.E.Close, A.Donnachie, Y.S.Kalashnikova Phys.Rev.D 65, 092003 (2002)

Этим ширинам соответствуют сечения

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow f'_2(1525)\gamma \rightarrow \eta\eta\gamma) = 1.7 \text{ пб}$$

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow f'_2(1525)\gamma \rightarrow \eta\eta\gamma) = 0.4-1.9 \text{ пб}$$



$\sqrt{s}$ , ГэВ	$\sigma_{\text{stat.}}$ (пб)	$\sigma$ (пб)
1.17-1.32	6.7	6.8
1.32-1.57	3.6	3.7
1.57-1.80	10.5	10.7
1.80-2.00	3.2	3.4



# Заключение



- В области энергии  $\sqrt{s} = 1.17-2.00$  ГэВ впервые измерено сечение процесса  $e^+e^- \rightarrow \eta\eta\gamma$
- Основной промежуточный механизм в этой области энергии  $e^+e^- \rightarrow \phi\eta$
- Измеренное сечение в хорошем согласии с измерением КМД-3 для процесса  $e^+e^- \rightarrow \phi\eta$ ,  $\phi \rightarrow K^+K^-$
- Сигнал от радиационных процессов не обнаружен
- Статья выложена в arXiv: <https://arxiv.org/abs/2110.05845>