

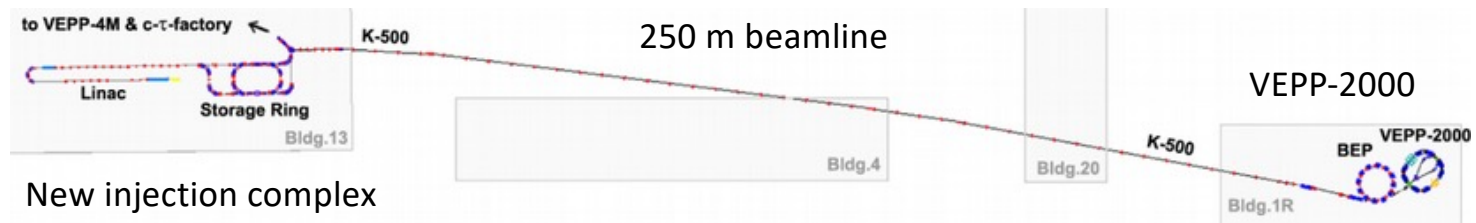


Изучение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0\eta$ с КМД-3

Солодов Е.П. (КМД-3 Коллаборация)
ИЯФ СО РАН, Новосибирск

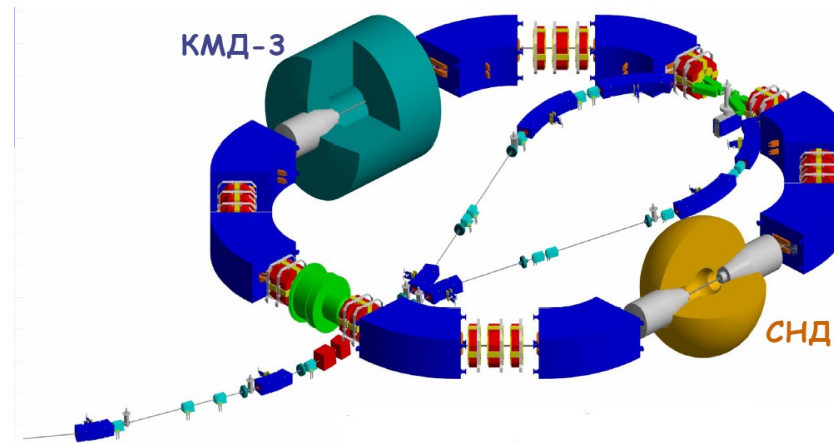
Сессия РАН Февраль 2025г.

VEPP-2000 (after upgrade 2013-2016)



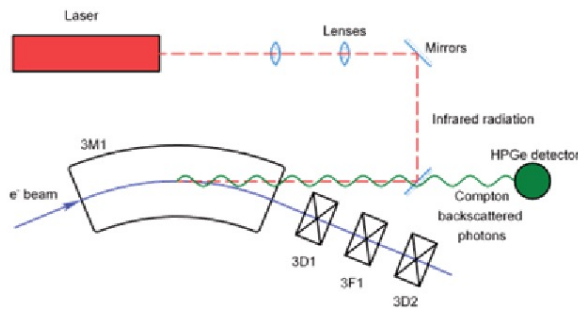
VEPP-2000 parameters:

- c.m. energy 0.3-2.0 GeV
- circumference – 24.4 m
- round beam optics
- Luminosity at 2 GeV:
 - $1.0 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ (project)
 - $0.8 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ (achieved)

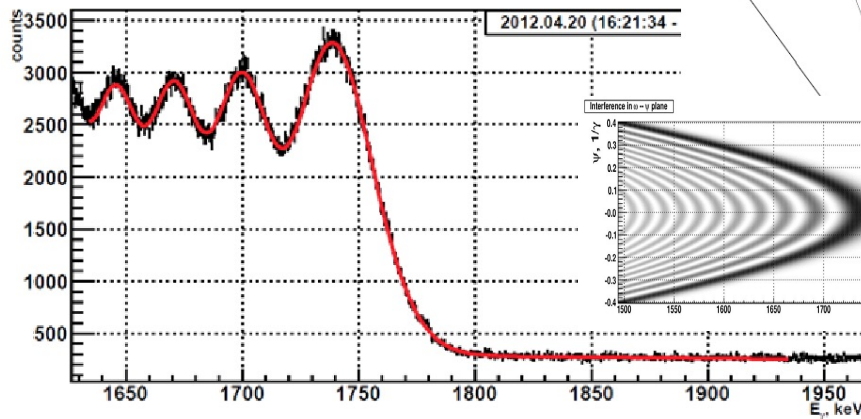
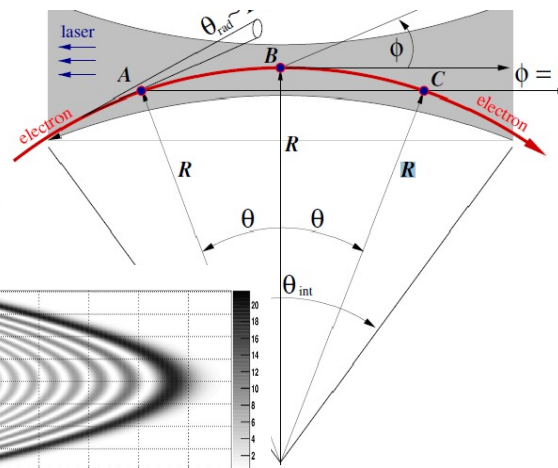


Energy measurement

Starting from 2012, beam energy and energy spread are monitored continuously using Compton backscattering system with about 30 keV uncertainty



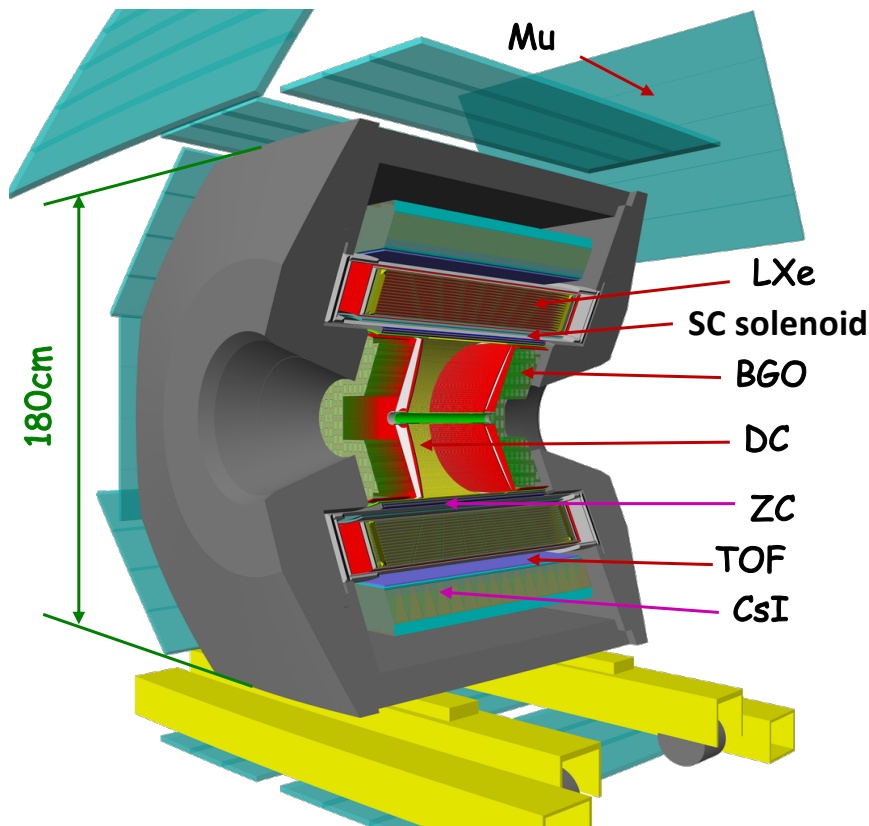
Two sources of photons are used: **ytterbium** and **CO lasers**.
CO (5 nm) at the energy above **500 MeV**,
Nd:YAG (1 nm) at the energy below **500 MeV**.



$$E = 993.662 \pm 0.016 \text{ MeV}$$

M.N. Achasov et al. arXiv:1211.0103v1 [physics.acc-ph] 1 Nov 2012

CMD-3 detector



Tracking:

× Drift Chamber in 1.3 T magnetic field

$$\sigma_{R\phi} \sim 100 \mu\text{m}, \sigma_Z \sim 2.5\text{mm}$$

$$\sigma_p/P \sim \sqrt{0.6^2 + (4.4 \cdot p[\text{GeV}])^2}, \%$$

Magnet:

0.25 X_0 1.3 T SC solenoid in common cryostat with LXe calorimeter

Calorimetry:

× Combined EM calorimeter (LXe, CsI, BGO)

13.4 X_0 in barrel part

$$\sigma_E/E \sim 0.034/\sqrt{E} [\text{GeV}] \oplus 0.020 - \text{barrel}$$

$$\sigma_E/E \sim 0.024/\sqrt{E} [\text{GeV}] \oplus 0.023 - \text{endcap}$$

× LXe calorimeter with 7 ionization layers with strip readout

~2mm measurement of conversion point,
tracking capability,
shower profile (from 7 layers + CsI)

PID:

× TOF system ($\sigma_T < 1\text{nsec}$)

particle ID mainly for p, n

× Muon range system

CMD-3 Collaboration at VEPP2000 collider



09.02.2025

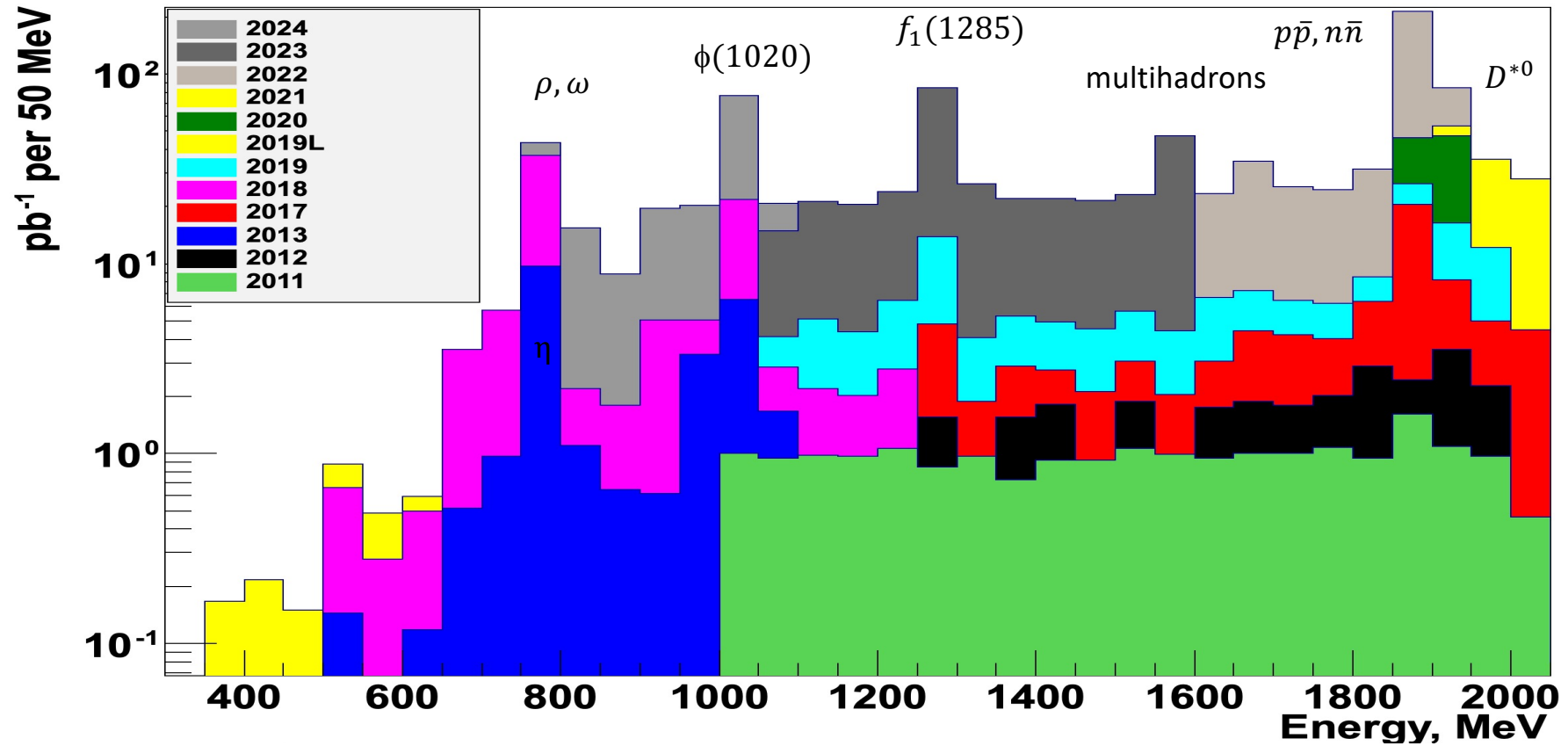
solodov_2pi2pi0eta

5

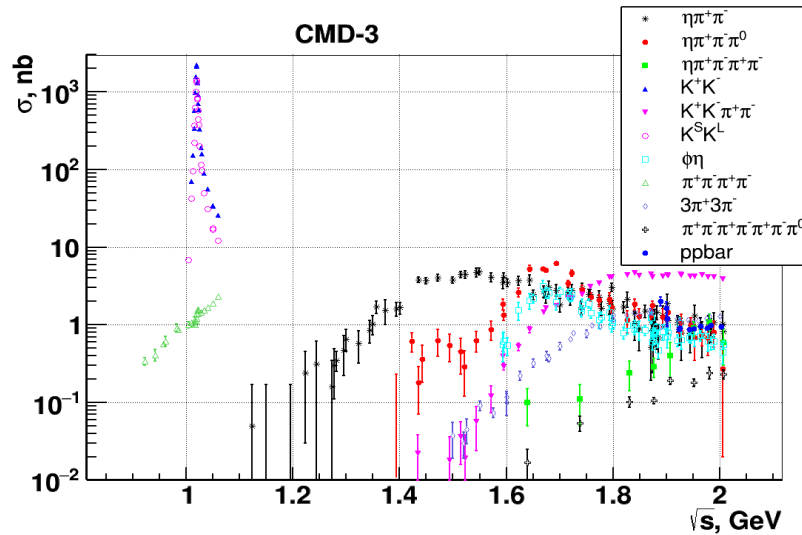
Luminosity integral distribution



~1000 1/pb !



Data analysis



Our strategy is: the exclusive measurement of each final state with detailed study of the production dynamics – each channel has few intermediate states!

Publication speed depends on limited manpower and complicated structures and interferences of intermediate states – not solid theory for this energy region.

09.02.2025

| Signature | Final states (preliminary, published) |
|-------------------------|---|
| 2 charged | $\pi^+\pi^-$, K^+K^- , $K_S K_L$, $p\bar{p}$ |
| 2 charged + γ 's | $\pi^+\pi^-\gamma$, $\pi^+\pi^-\pi^0$, $\pi^+\pi^-2\pi^0$, $\pi^+\pi^-3\pi^0$, $\pi^+\pi^-4\pi^0$, $\pi^+\pi^-\eta$, $\pi^+\pi^-\pi^0\eta$, $\pi^+\pi^-2\pi^0\eta$, $K^+K^-\pi^0$, $K^+K^-2\pi^0$, $K^+K^-\eta$, $K_S K_L \pi^0$, $K_S K_L \eta$ |
| 4 charged | $2(\pi^+\pi^-)$, $K^+K^-\pi^+\pi^-$, $K_S K_S \pi^+\pi^-$ |
| 4 charged + γ 's | $2(\pi^+\pi^-)\pi^0$, $2\pi^+2\pi^-2\pi^0$, $\pi^+\pi^-\eta$, $\pi^+\pi^-\omega$, $2\pi^+2\pi^-\eta$, $K^+K^-\omega$, $K_S K_S \pi^+\pi^-$ |
| 6 charged | $3(\pi^+\pi^-)$, $K_S K_S \pi^+\pi^-$ |
| 6 charged + γ 's | $3(\pi^+\pi^-)\pi^0$ |
| Neutral | $\pi^0\gamma$, $2\pi^0\gamma$, $3\pi^0\gamma$, $\eta\gamma$, $\pi^0\eta\gamma$, $2\pi^0\eta\gamma$ |
| Other | $n\bar{n}$, $\pi^0 e^+ e^-$, $\eta e^+ e^-$ |
| Rare decays | η' , $D^*(2007)^0$ |

$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ has been published!

solodov_2pi2pi0eta

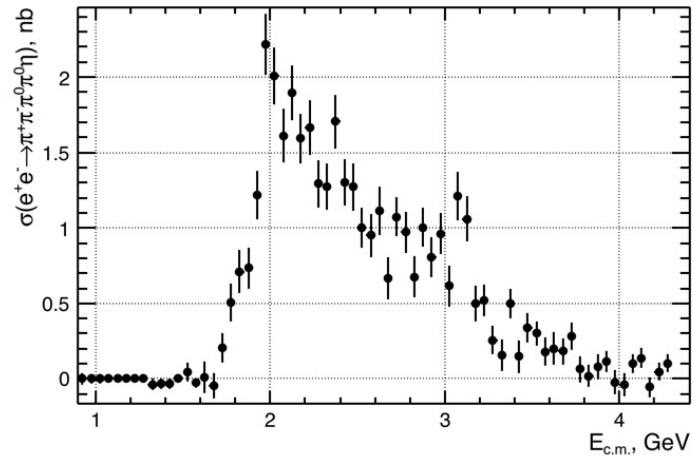
7

Мотивация изучения много-адронных состояний

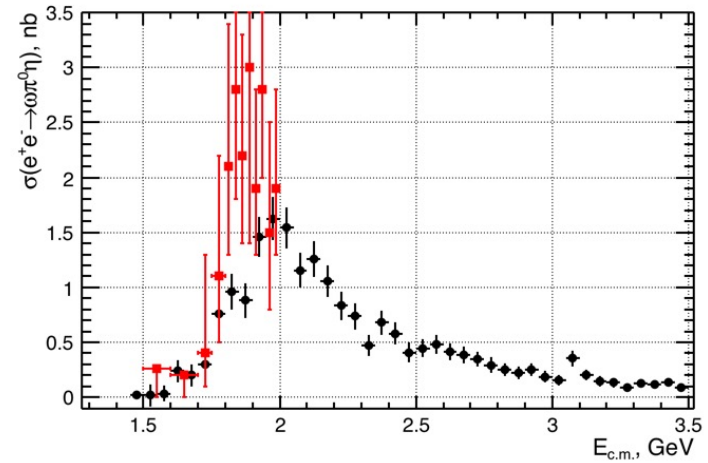
- Каналы $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0\pi^0$ и $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0\eta$ новые для КМД и очень богатые на промежуточные состояния см. анализ БаБара.
- Для $\pi^+\pi^-\pi^0\pi^0\pi^0$ это $\omega\pi^0\pi^0$, $\omega f_0(980)$, $\phi f_0(980)$, $\rho\eta$, $\rho^+\rho^-\pi^0$
- Для $\pi^+\pi^-\pi^0\pi^0\eta$ это $\omega a_0(980)$, $\phi a_0(980)$, $\rho^+\rho^-\eta$
- Ну и конечно $f_1(1285) \rightarrow a_0\pi^0 \rightarrow \eta\pi^0\pi^0$ - поиск С-четного резонанса при $E=641$ МэВ – На этой точке по энергии набрано 50 pb^{-1} !
- Вклад в НРВ от этих реакций мал, но если их много неучтенных, то сдвиг на заметную долю ошибки в $g-2$ мюона может быть. Анализ промежуточных состояний очень важен.

Измерения БаБара

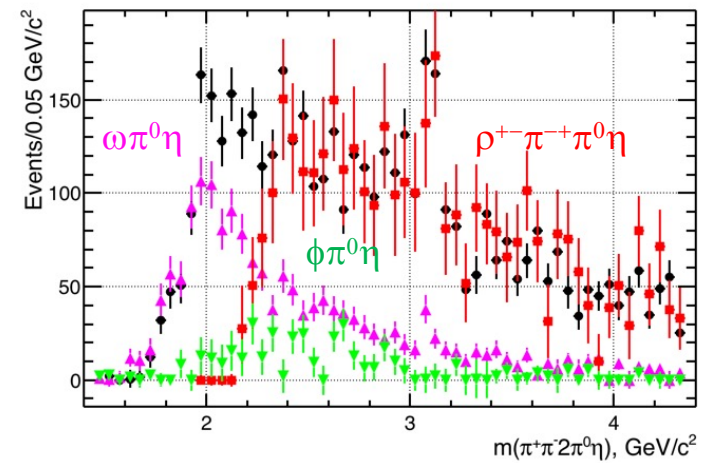
Полное сечение



Сечение $\omega\pi^0\eta$ и сравнение с СНД

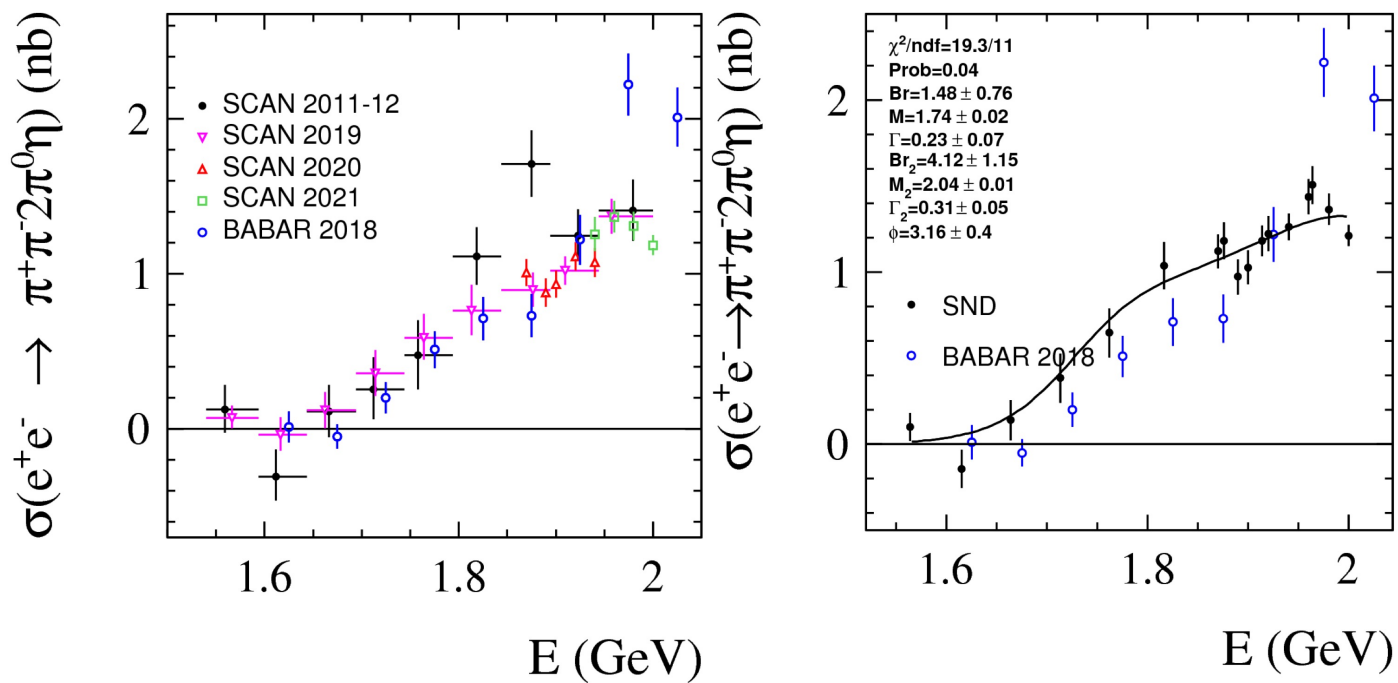


Вклад выделенных каналов



СНД - предварительно

Доклад А.Ботова на сессии РАН в Дубне 2024 г.



Наш анализ

Использованы данные:

- Scan 2020 – from 1.870 to 1.935 GeV – 5 points with 10 pb⁻¹/point 46.870 pb⁻¹
- Scan 2021 – from 1.935 to 2007 GeV – 4 points with 10pb⁻¹/point (24 pb⁻¹ at 2007) 48.400 pb⁻¹
- Scan 2021-2022 at NN threshold and below to 1.600 Gev: 282.844 pb⁻¹
 - 18 point at the threshold with ~1 MeV step – 10 pb⁻¹/point (x5 to 2017 scan)
 - 13 points below threshold with 10 MeV step – 5-10 pb⁻¹/point
- Scan 2023 – from 1.600 down to 1.400 GeV – with ~10pb⁻¹/point 176.860 pb⁻¹
(ниже порога – взят для проверки)

Моделирование:

Сделано моделирование $e+e- \rightarrow \omega\pi^0\pi^0, \omega\pi^0\eta, \pi^+\pi^-\eta$ ($\eta \rightarrow 3\pi^0$ – канал для проверки)

Отбор событий – стандартный набор отборов:

- Два «хороших» пучковых трека пролетевших пол радиуса ДК с dE/dX соответствующим $\pi^+\pi^-$
- Четыре и более фотонов с порогом 25 МэВ (до 60 МэВ для малых углов в БГО) – фон от $\pi^+\pi^-\pi^0\pi^0(\eta)$
- Шесть и более фотонов для поиска сигнала

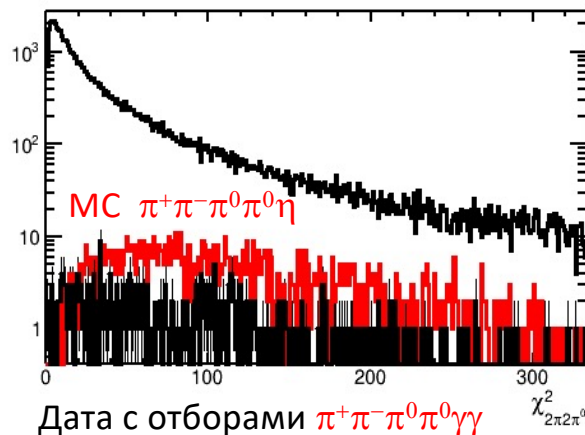
Кинематический фит

Делается фит в двух гипотезах –

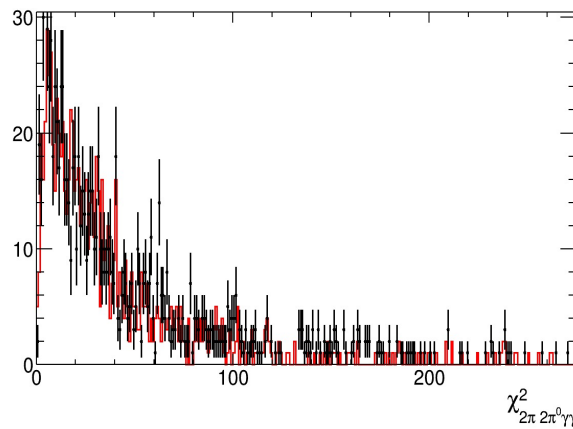
Первый: два пи заряженных + одна пара фотонов с массой π^0 и одна пара фотонов без констрэйна - 5С фит - это фон (огромный!) от $\pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ - полученный χ^2 используется для его подавления.

Второй фит - 6 и более фотонов. Перебираются все возможные комбинации для поиска минимального χ^2 . На две самые лучшие пары (в окне ± 60 МэВ от массы π^0) налагается констрэйн с массой π^0 , а оставшаяся пара без констрэйна - это 6С фит.

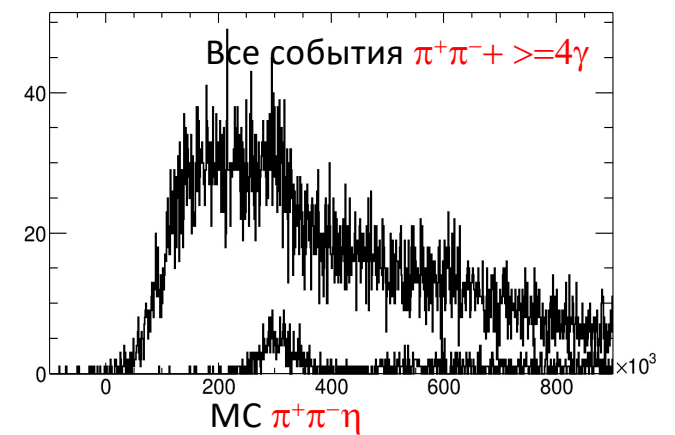
Дата в гипотезе $\pi^+\pi^-\pi^0\gamma\gamma$



Дата и МС в гипотезе $\pi^+\pi^-\pi^0\pi^0\gamma\gamma$



Missing mass for $\pi^+\pi^-$



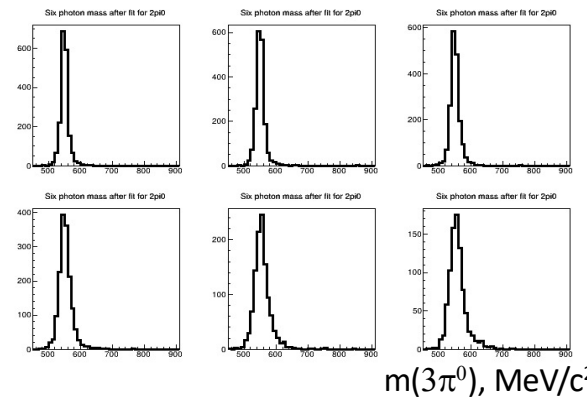
Используются отборы на полную энергию и полный импульс и углы фотонов в системе π^0

Использовался KinFitter разработанный Сергеем Грибановым, адаптированный для анализа КМД-3

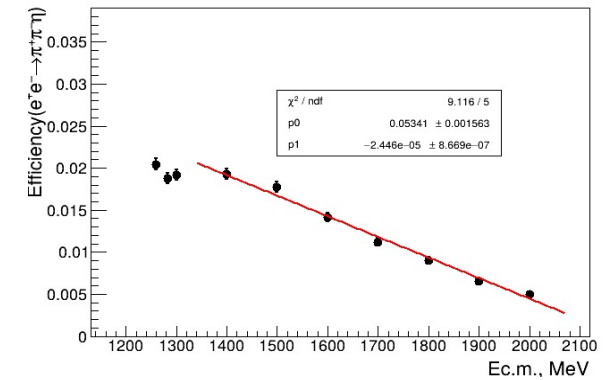
Эффективности из моделирования

Для определения числа событий используется распределение по массе двух фотонов или комбинации масс заряженных и(или) нейтральных пионов.

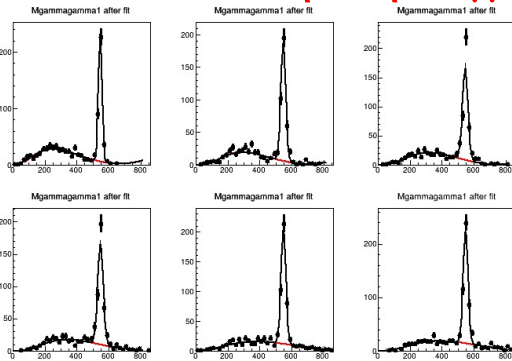
MC $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\eta$, селект $\eta \rightarrow 3\pi^0$



Эффективности реконструкции (включен Br распада $\eta \rightarrow 3\pi^0, \gamma\gamma$)

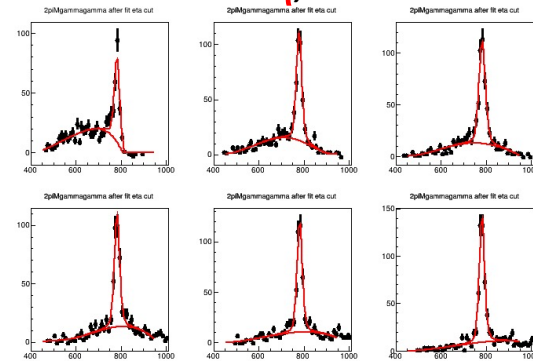


MC $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0\eta$, fit $\eta \rightarrow \gamma\gamma$

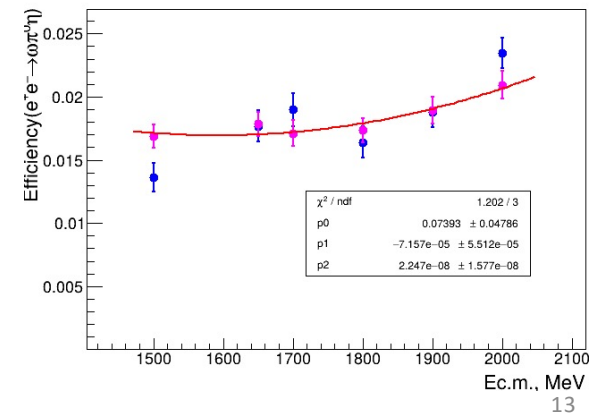


09.02.2025

MC $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0\eta$, fit $\omega \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$



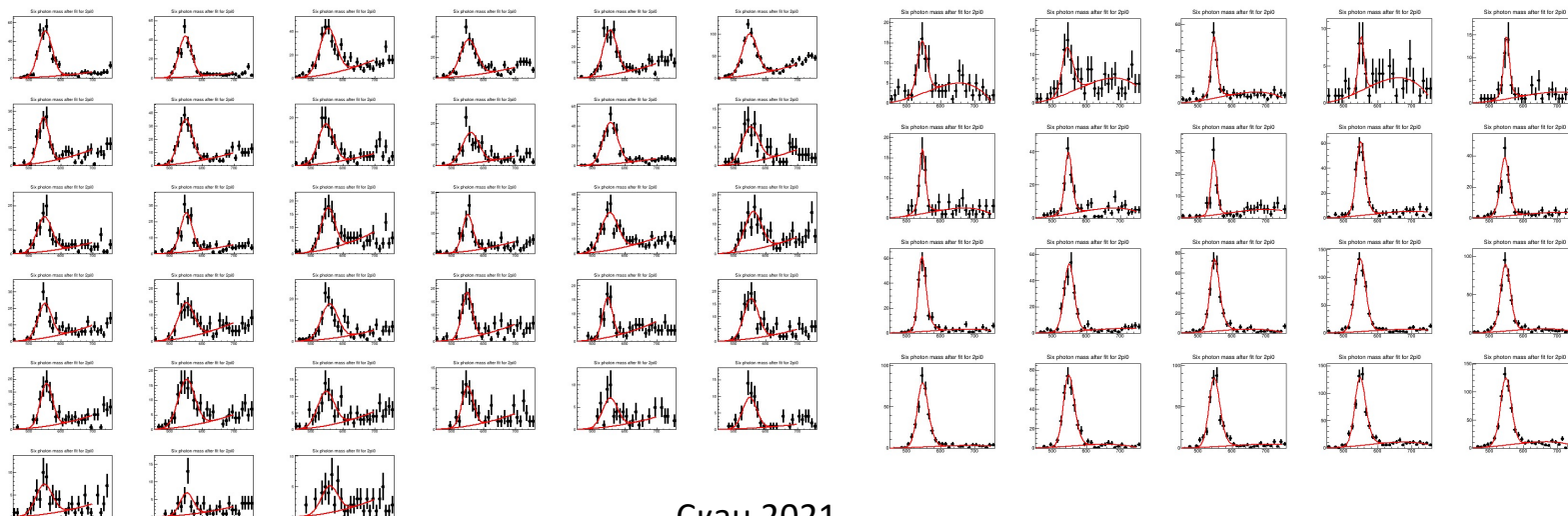
solodov_2pi2pi0eta



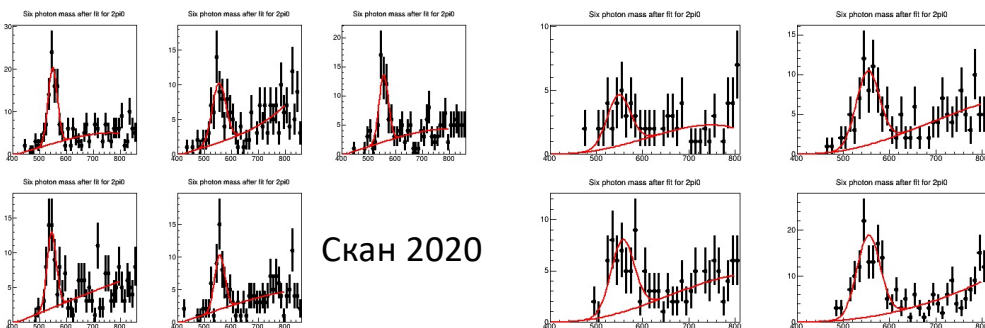
Тестовый процесс $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\eta$, $\eta \rightarrow 3\pi^0$

Скан 2023

Скан 2022

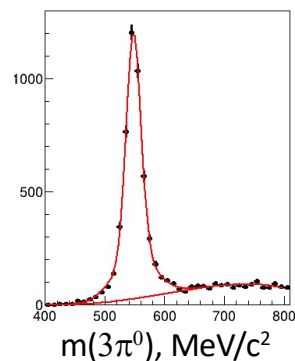


Скан 2021



Скан 2020

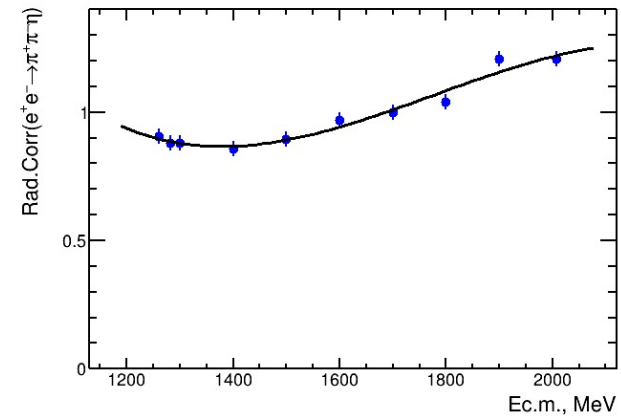
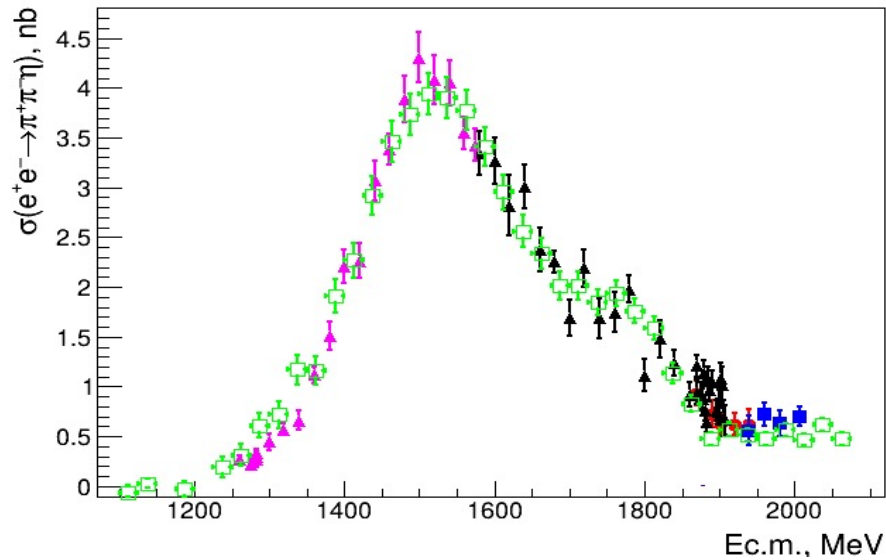
Six photon mass after fit for 2pi0



Фит суммы всех точек
Скана 2022 - распределение
фона как-то на глаз, без
детального изучения.

Сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\eta$

Сравнение сечений разных сезонов и данных БаБара

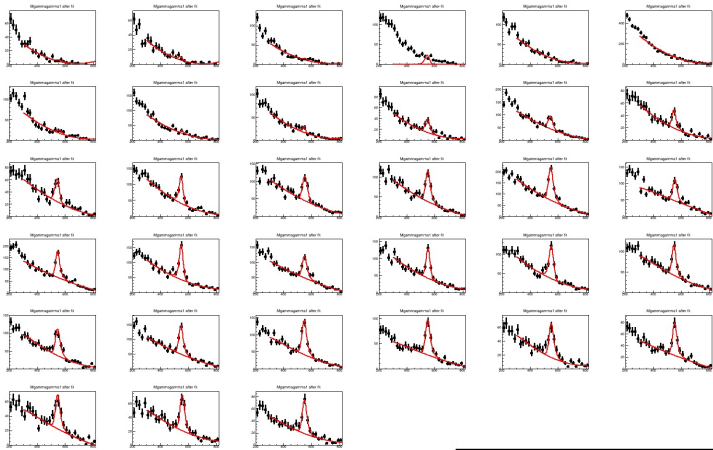


Радпоправка учтена.

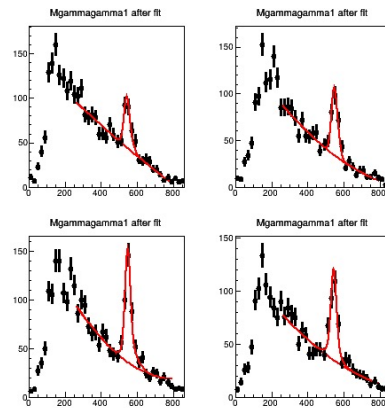
Нет поправок (пока) на эффективности реконструкции π^0 в данных и MC
Сечение получено для иллюстрации, что процедура
не имеет больших систематических неопределенностей

События $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0\eta$, фит 2гаусса массы η в $\gamma\gamma$

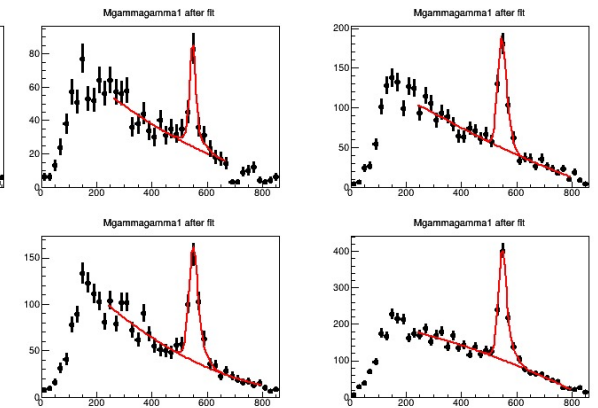
Скан 2022



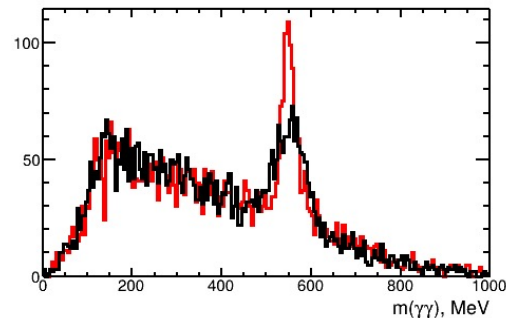
Скан 2020



Скан 2021

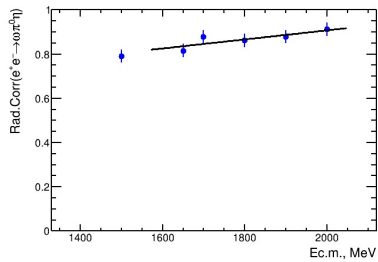
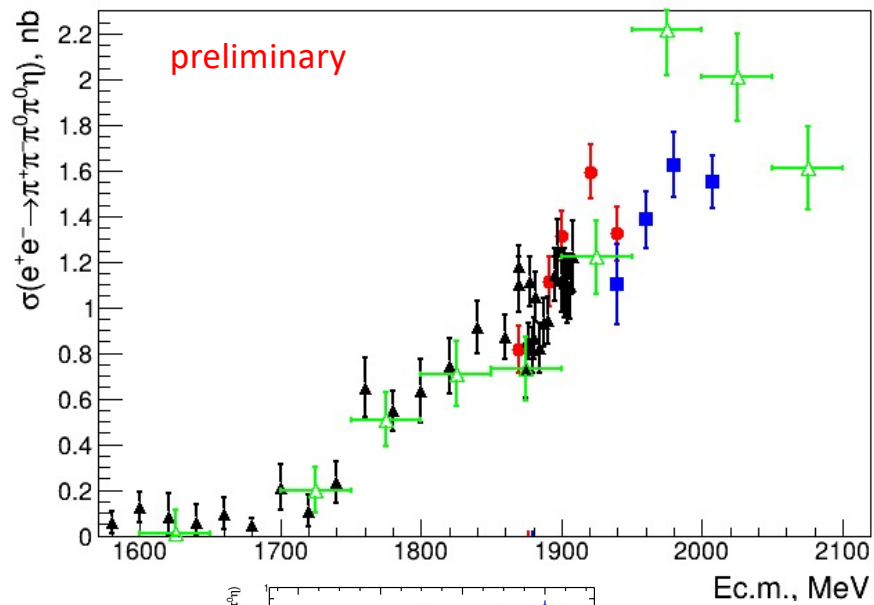


Сравнение массы
2-х фотонов до и
после фита

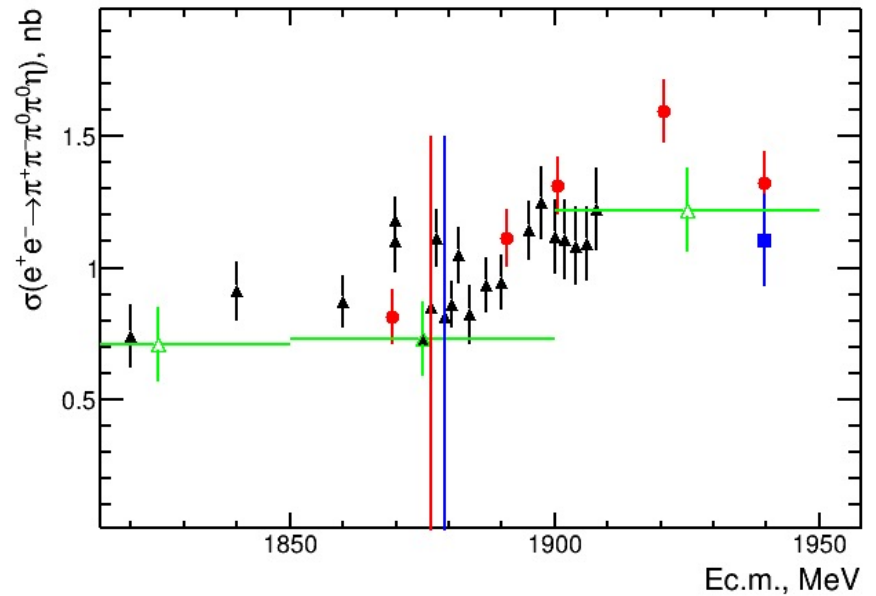


По моделированию и оцененный из фита $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\eta$ в данных фон в пик η не обнаружен

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



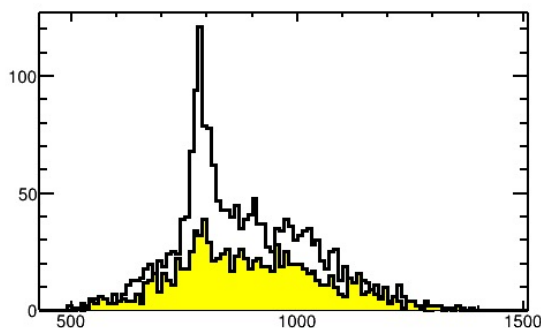
Радпоправка



Похоже видна волна на пороге $\text{NN}\bar{\text{a}}$ наблюдаемая в некоторых адронных каналах (6π , $\text{KK}\pi\pi$)

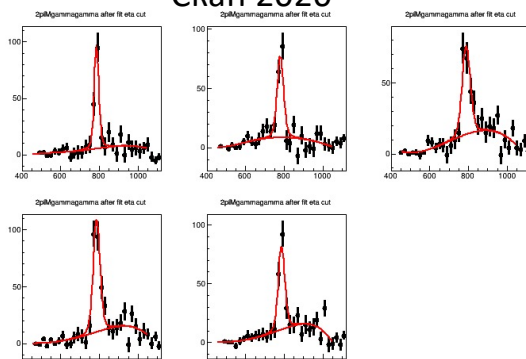
Выделение вклада $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0\eta$

Выделяются события в распределении $\gamma\gamma$ в ± 70 МэВ от массы η , а 70 МэВ сайд бэнды используются для вычитания фона. Строится масса $\pi^+\pi^-\pi^0$ – две комбинации и пик ω фитируется BW (ширина 9 МэВ) свернутым с разрешением ~ 15 -20 МэВ

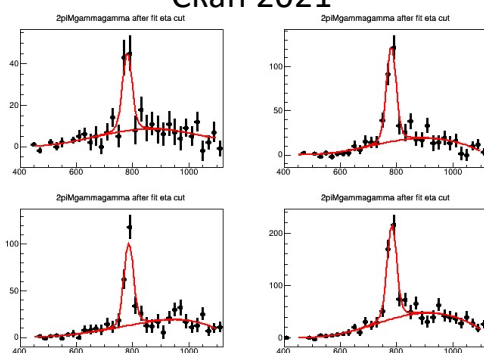


Виден фон от процессов $\omega\pi^0, \omega\eta$
– огромное сечение

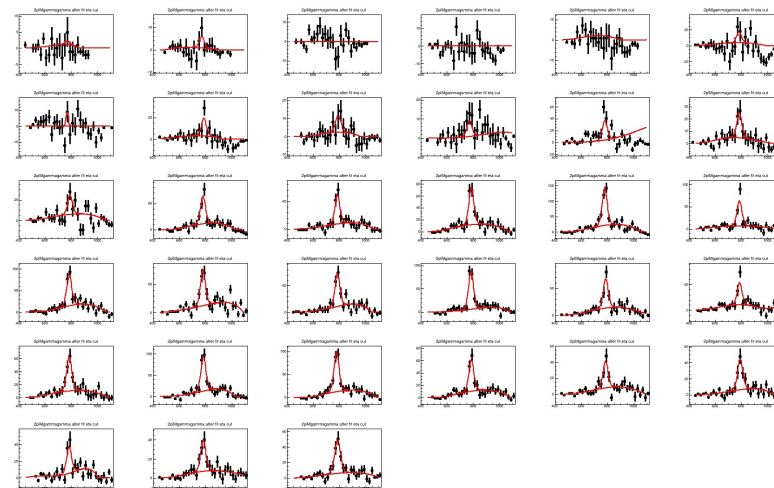
Скан 2020



Скан 2021

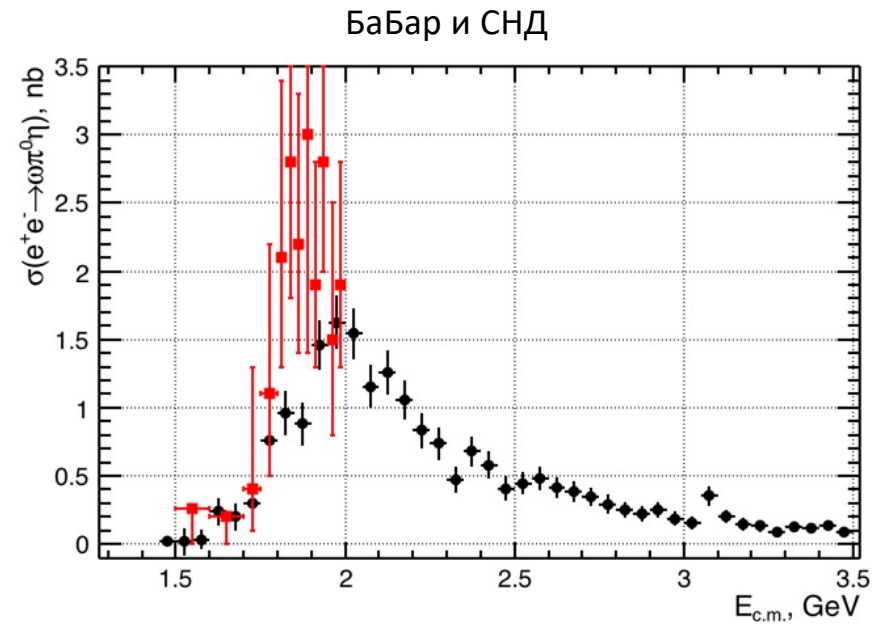
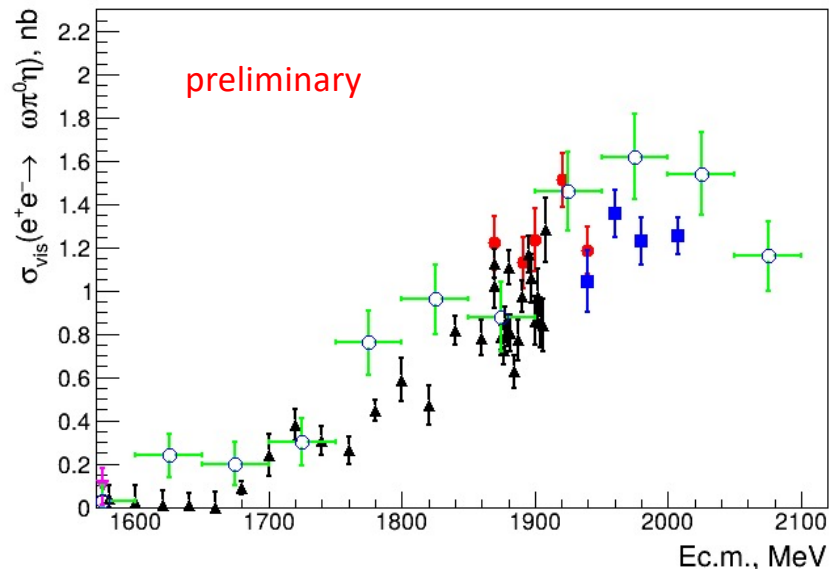


Скан 2022



Для некоторых точек с малой статистикой
требуется индивидуальный подход

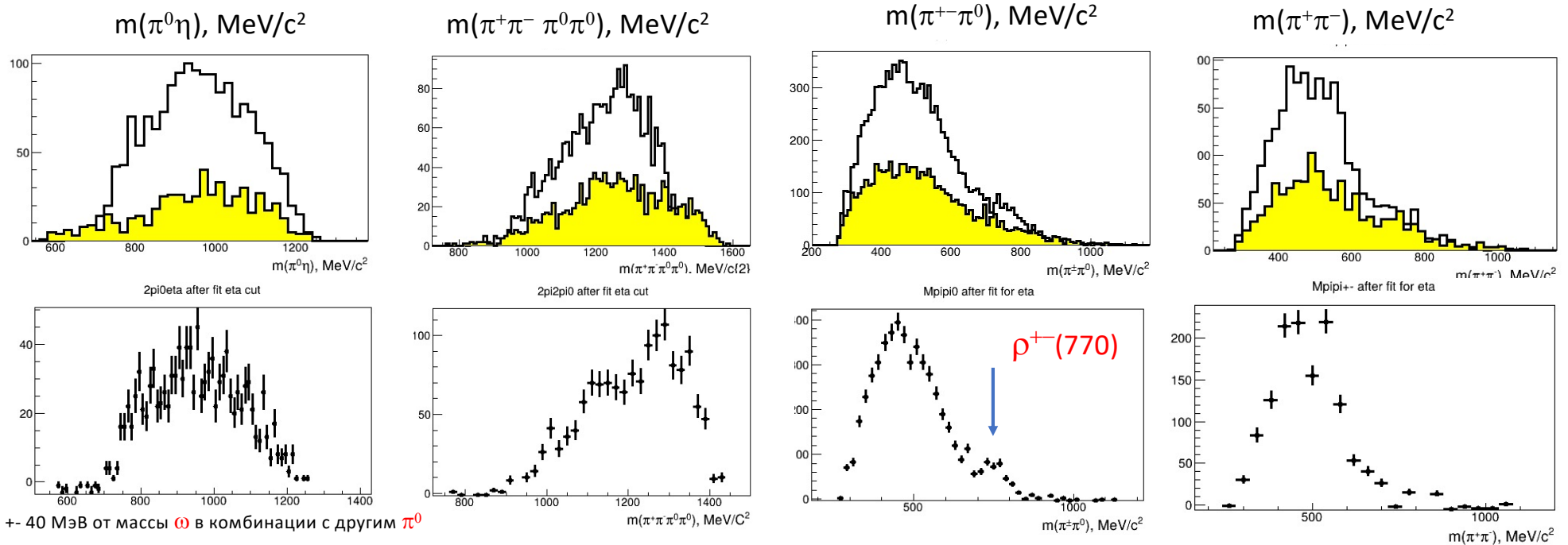
Сечение $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0\eta$



Чуть ниже Бабара. Но у Бабара есть сигнал ниже 1700 МэВ, чего нет в полном сечении! Фон полностью не вычтен. У нас, если не вычитать фон от сайдбэндов, получается такое же сечение с сигналом ниже 1700 МэВ – явное наблюдение пикованного фона от $\omega\pi^0$.

Сечение $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0\eta$ ниже $\pi^+\pi^-\pi^0\pi^0\eta$: что еще?

Объединены точки 970-1003 скана 2021. Строим массы. Вычитаем фон от сайдбэнда

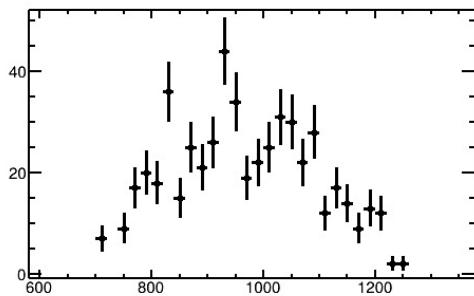
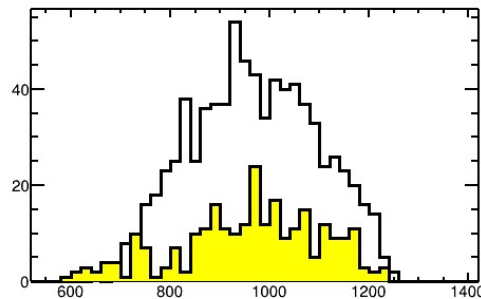


В нашей области не видно явного сигнала от $\omega a_0(980)$ (хотя БаБар видит при больших энергиях?).
 Зато есть сигнал от $\rho^+(770)$, но нет сигнала от ρ^0 . Это сигнал от процесса $\rho(1420)\eta \rightarrow \rho^+\pi^+\pi^0\eta$?
 Процесс $\rho^+\rho^-\eta$ может и есть, но у нас не хватает фазового объема при нашей энергии.

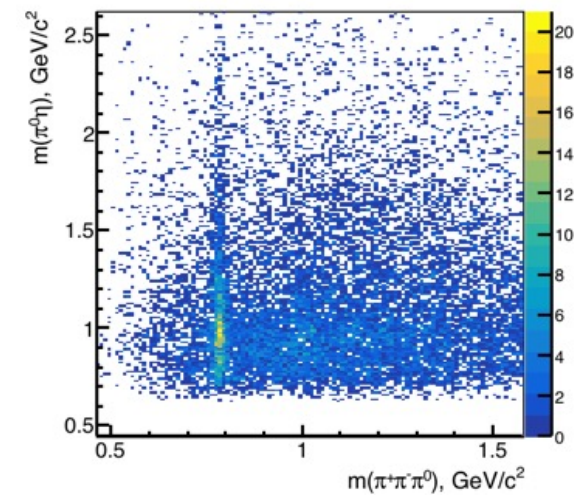
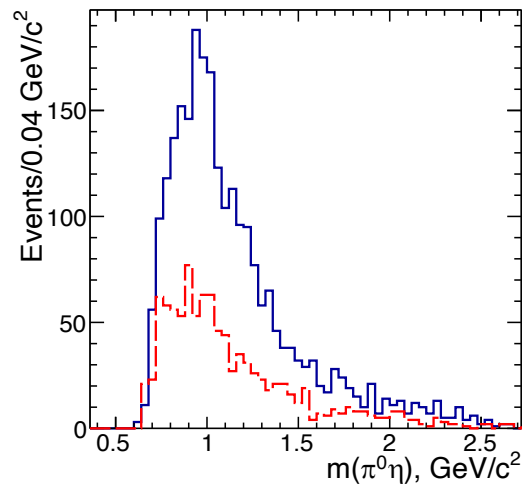
Сечение $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0\eta$ ниже $\pi^+\pi^-\pi^0\pi^0\eta$: что еще?

Точка 1003 скана 2021 $\sim 25 \text{ pb}^{-1}$. Строим массы. Вычитаем фон от сайдбэнда

$m(\pi^0\eta)$, MeV/c^2



Картинки из статьи БаБара



Скорее какая-то интерференция...

± 40 МэВ от массы ω в комбинации с другим π^0

При энергии 1003.5 МэВ виден небольшой сигнал от $\omega a_0(980)$ (БаБар видит сигнал при больших энергиях).

Заключение

- Довольно успешная попытка выделения событий с 6-ю фотонами в каналах $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0\pi^0$ и $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0\eta$ – эффективность $\sim 2\%$ (с учетом $\text{Br } \eta$)
- Эффективность будет в 2 раза выше, после запуска процедуры поиска фотонов по полоскам LXe.
- Получены сечения $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0\eta$ и $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0\eta$ в согласии с БаБар и с лучшей точностью. Есть вклад от процесса $e^+e^- \rightarrow \rho^+\pi^-\pi^0\eta$
- Требуется работа по оценке систематических неопределенностей – ожидается на уровне 10-15%. Полезно моделирование в модели $\omega a_0(980)$
- Детальный амплитудный анализ требует большей статистики

СПАСИБО