

ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ДЕТЕКТОРОМ КМД-3 НА КОЛЛАЙДЕРЕ ВЭПП-2000

Иван Логашенко (ИЯФ СО РАН)

*Научная сессия Объединенного ученого
совета по физическим наукам СО РАН*

27.11.2024

Физическая программа ВЭПП-2000

1. Прецизионное измерение $R(s)$

$$R(s) = \sigma(e^+e^- \rightarrow \text{hadrons}) / \sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)$$

<1% для основных каналов
2. Изучение адронных каналов:
 $e^+e^- \rightarrow 2h, 3h, 4h \dots, h = \pi, K, \eta$
3. Изучение возбуждений векторных мезонов: $\rho', \rho'', \omega', \phi', \dots$
4. Изучение парного рождения нуклон-antinуклона – электромагнитные формфакторы нуклона, ...
5. Двухфотонная физика

Тесная связь с задачей измерения вклада сильных взаимодействий в аномальный магнитный момент мюона

Изучение рождения адронов в аннигиляции e^+e^- :

- Что рождается?
- Сколько рождается?
- Как рождается?

Рождение пар $p\bar{p}, n\bar{n}$
 Поведение адронных сечений на пороге

Отдельные задачи:

$$e^+e^- \rightarrow \eta, \eta', f_1$$

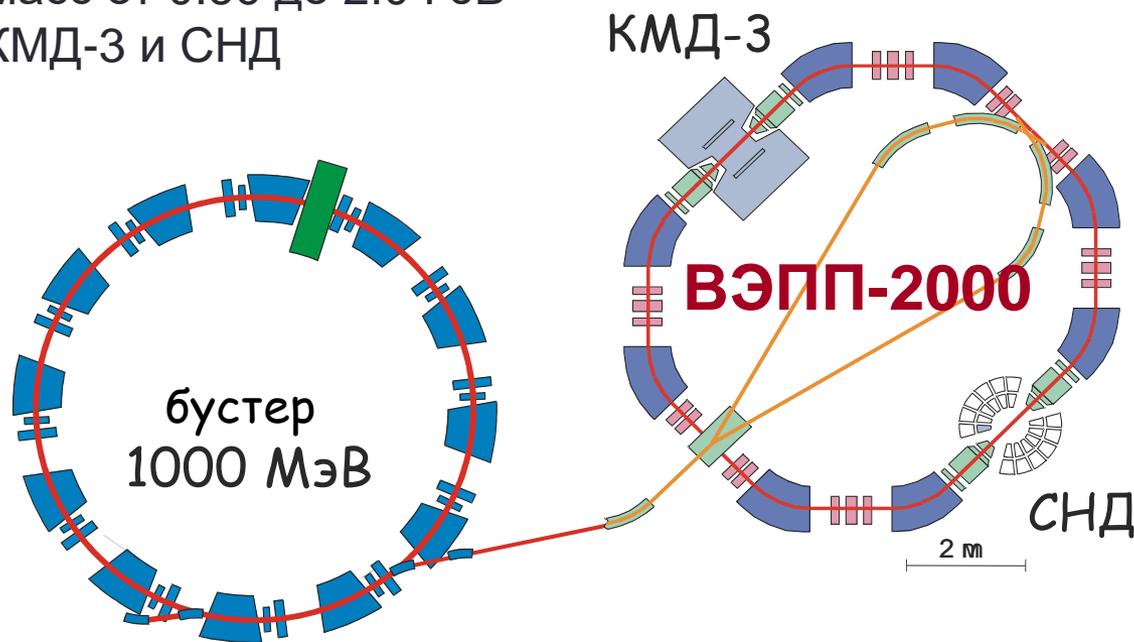
$$e^+e^- \rightarrow \pi^0 e^+e^-$$

$$e^+e^- \rightarrow D^{0*}$$

Коллайдер ВЭПП-2000

Электрон-позитронный коллайдер
Энергия в системе центра масс от 0.36 до 2.0 ГэВ
Два детектора – КМД-3 и СНД

Design parameters @ 1 GeV	
Circumference	24.388 m
Beam energy	150 ÷ 1000 MeV
N of bunches	1×1
N of particles	1×10 ¹¹
Betatron tunes	4.14 / 2.14
Beta*	8.5 cm
BB parameter	0.1
Luminosity	1×10 ³² cm ⁻² s ⁻¹



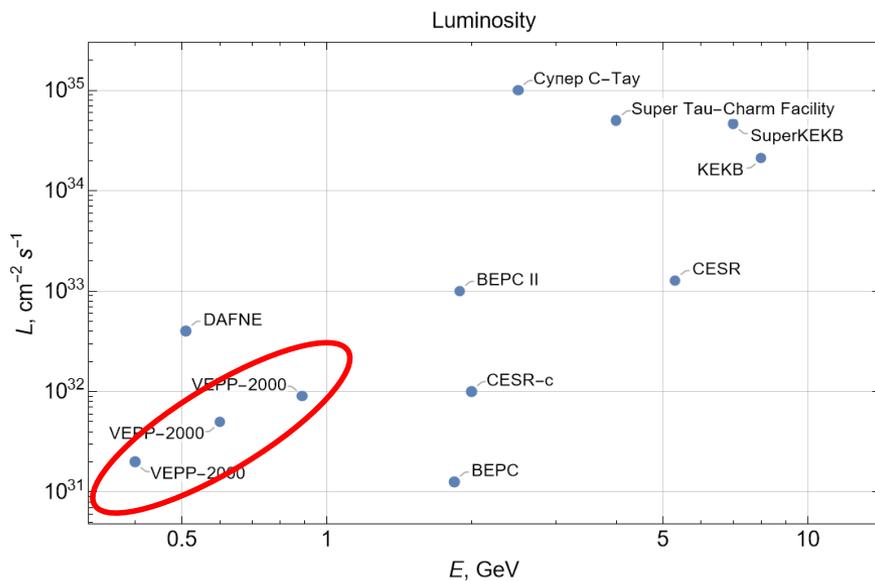
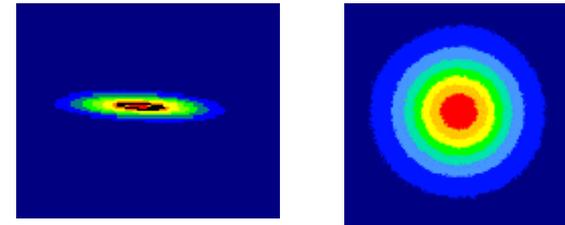
Непрерывный мониторинг энергии пучков с помощью комптоновского рассеяния ($\sigma_{\sqrt{s}} \approx 0.1$ MeV)

Светимость ВЭПП-2000

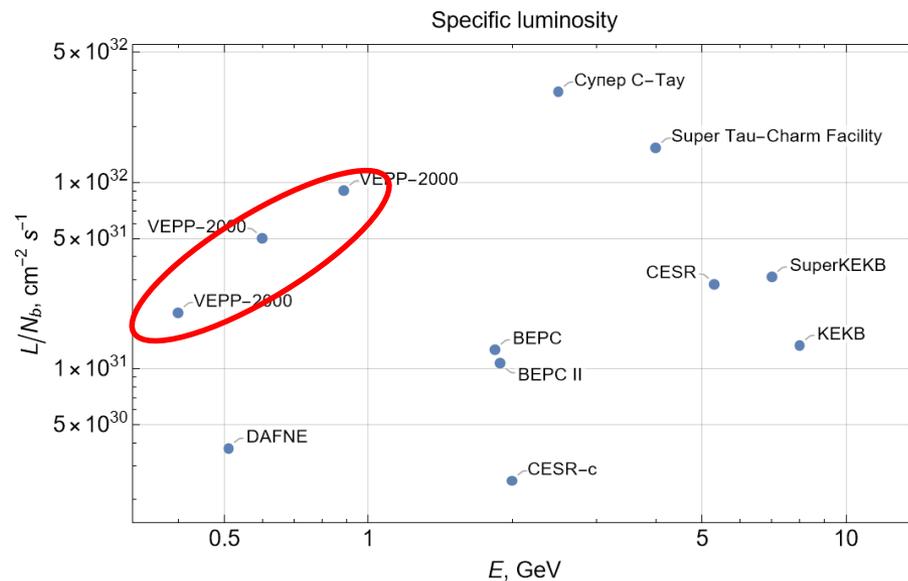
Уникальная оптика ВЭПП-2000 – «круглые пучки» - разработка ИЯФ

Позволяет преодолеть ограничения по эффектам встречи

Мировой рекорд по светимости в одноканальном режиме!



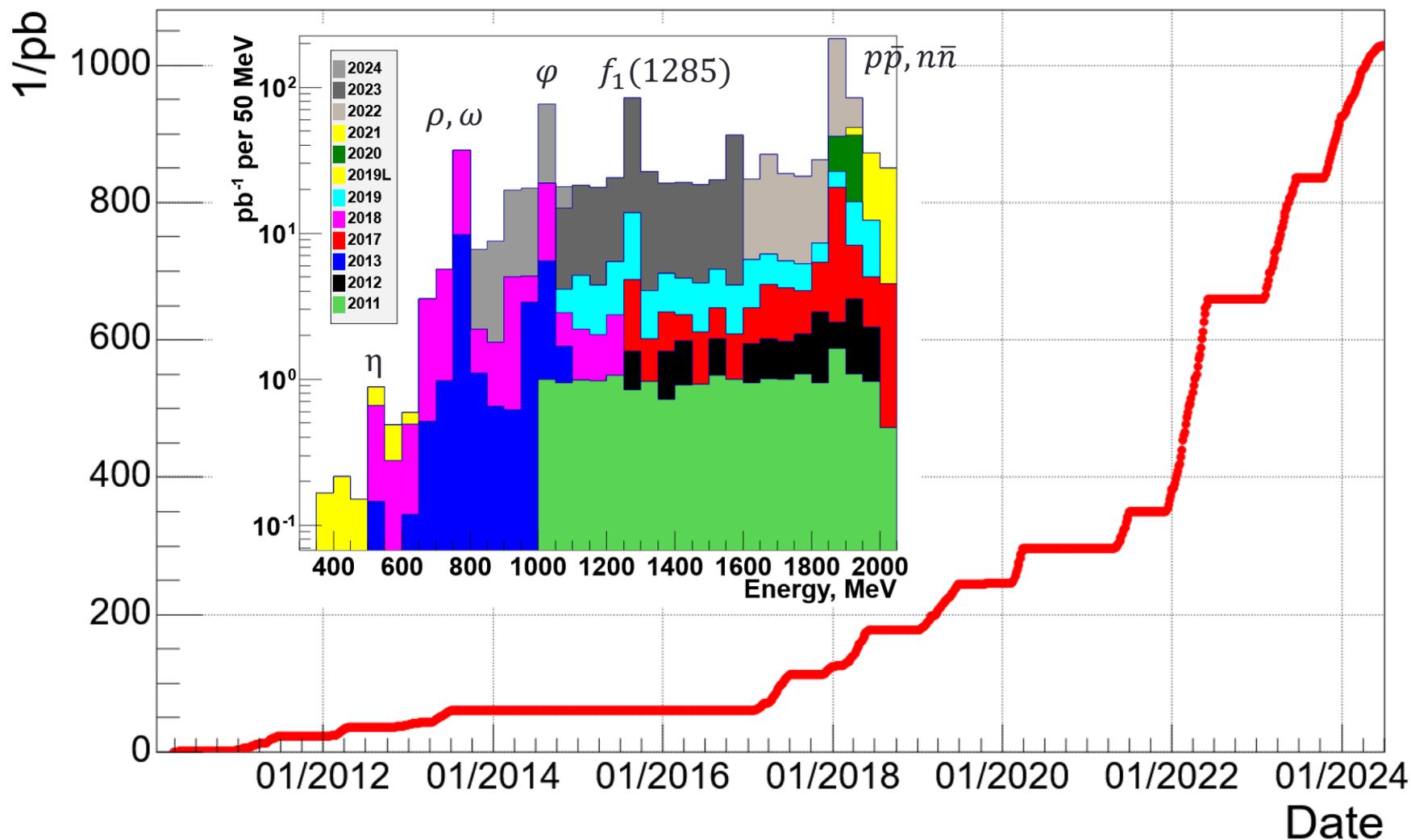
Светимость коллайдеров



Одноканальная светимость коллайдеров

Набранная статистика

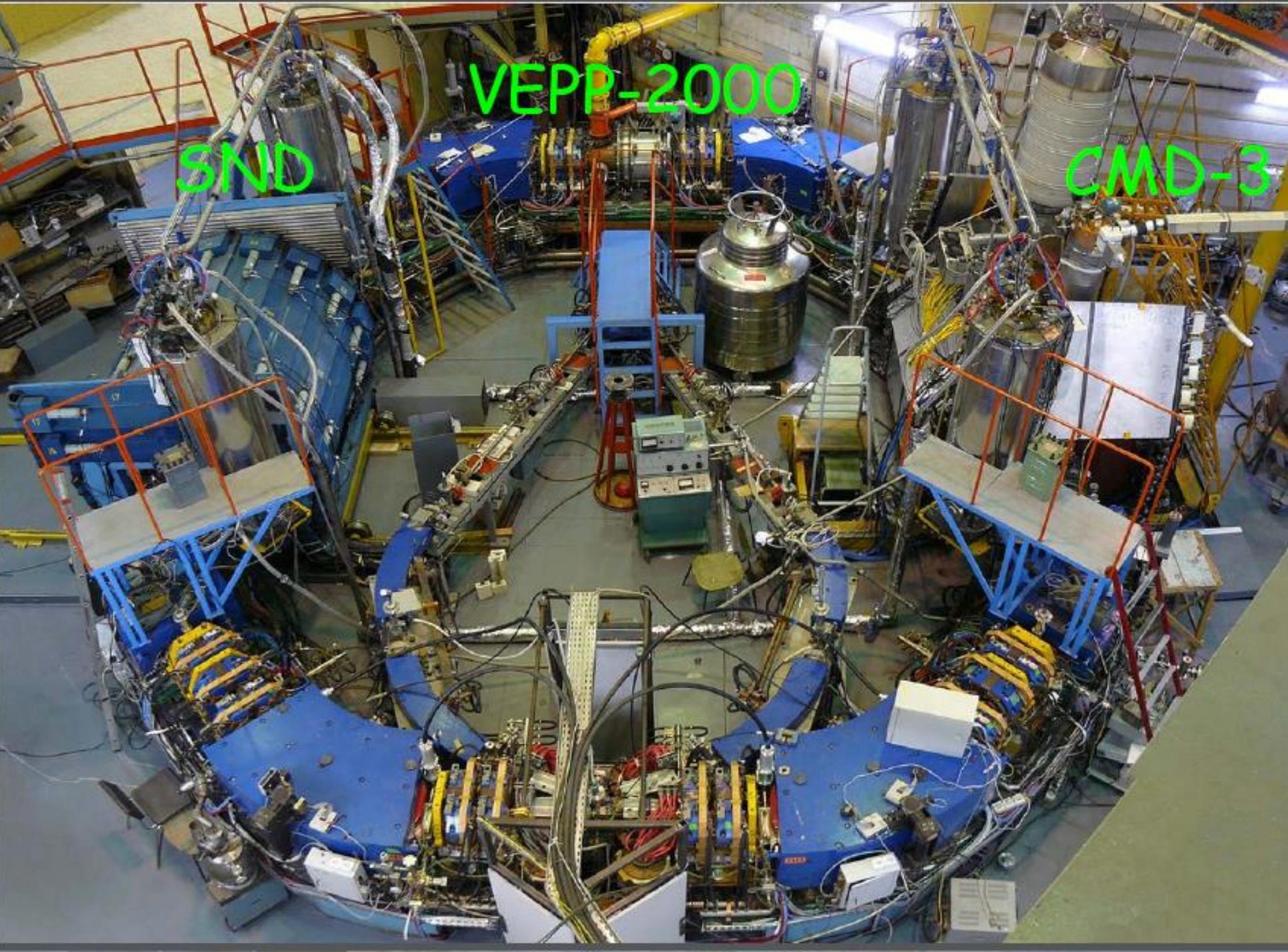
Превысили 1 фб⁻¹ !



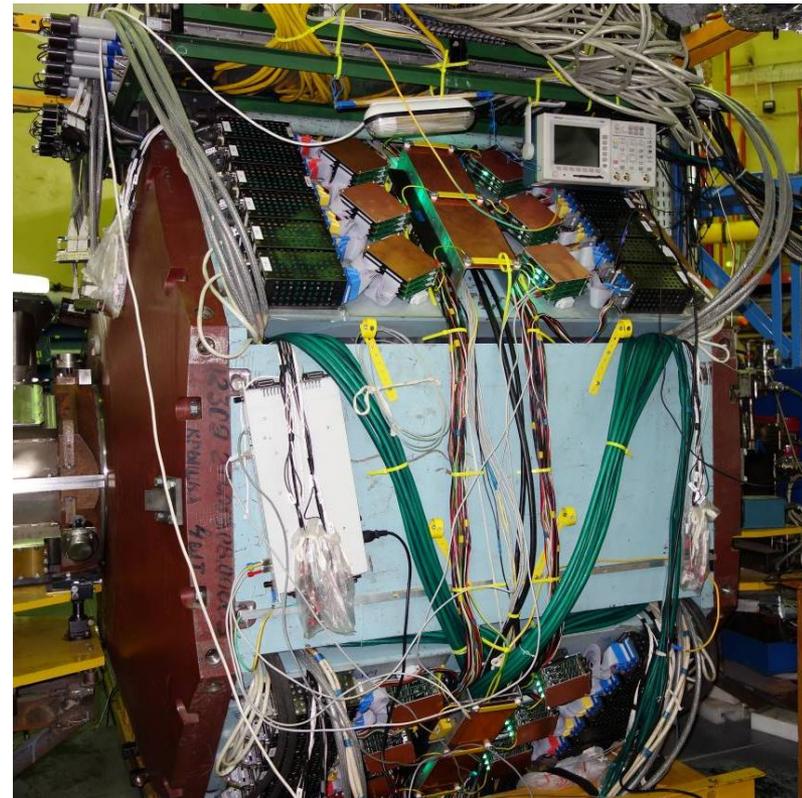
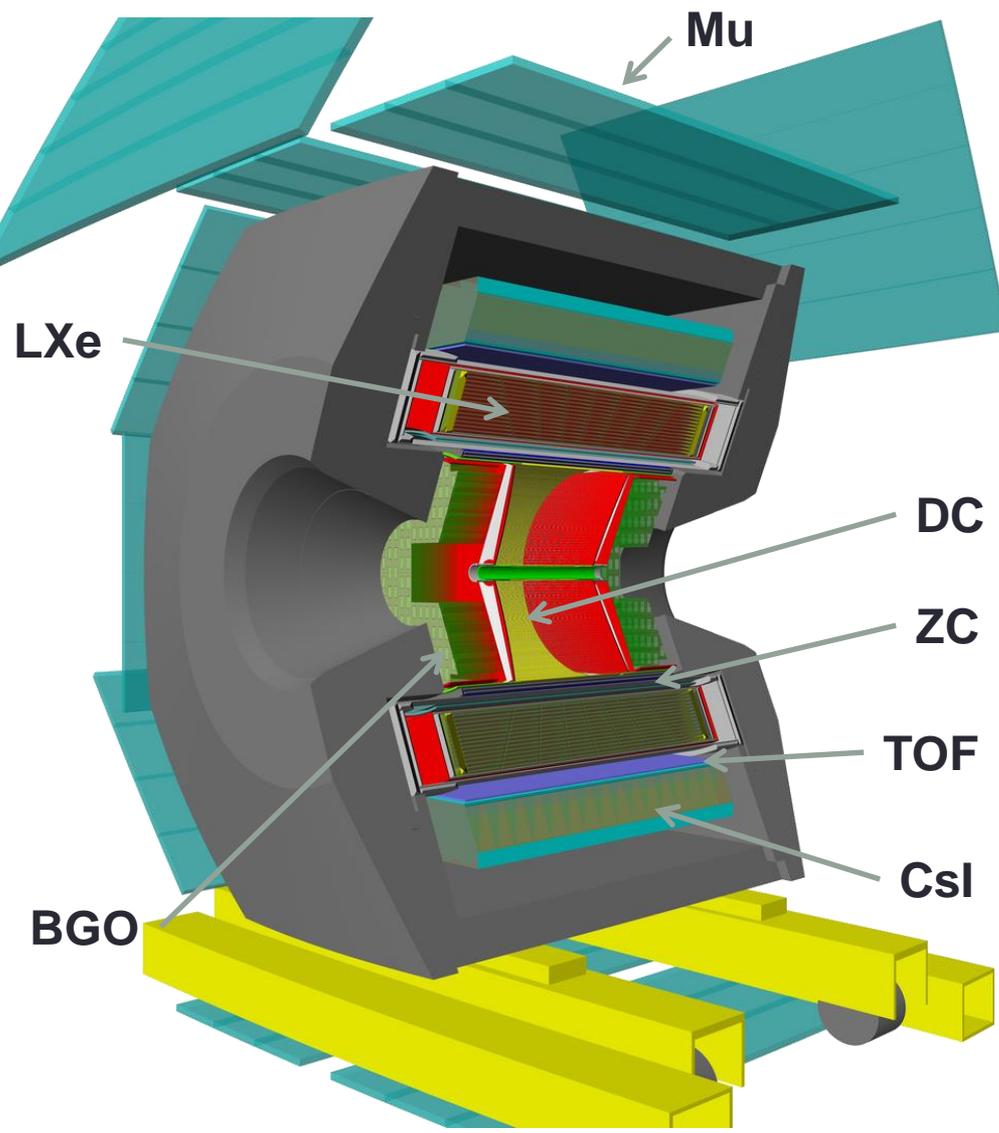
VEPP-2000

SND

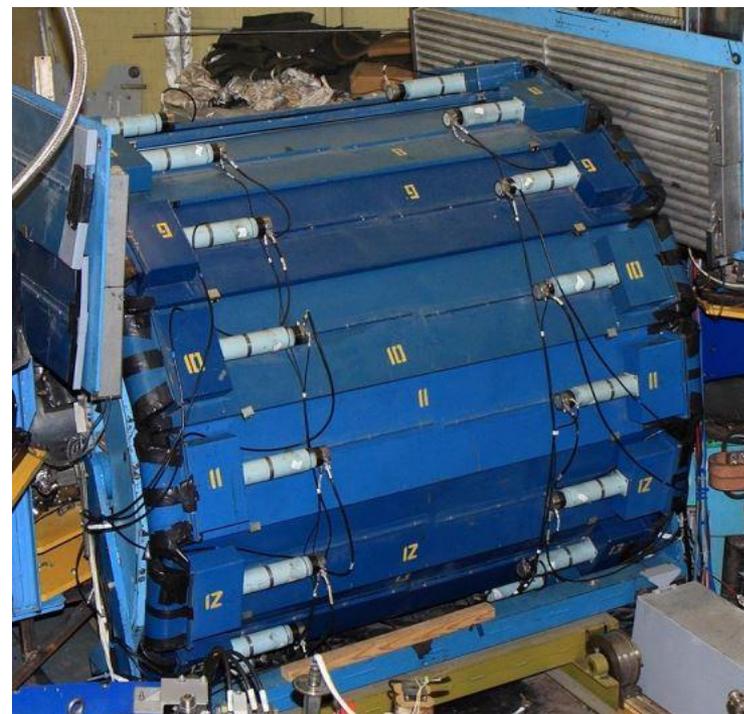
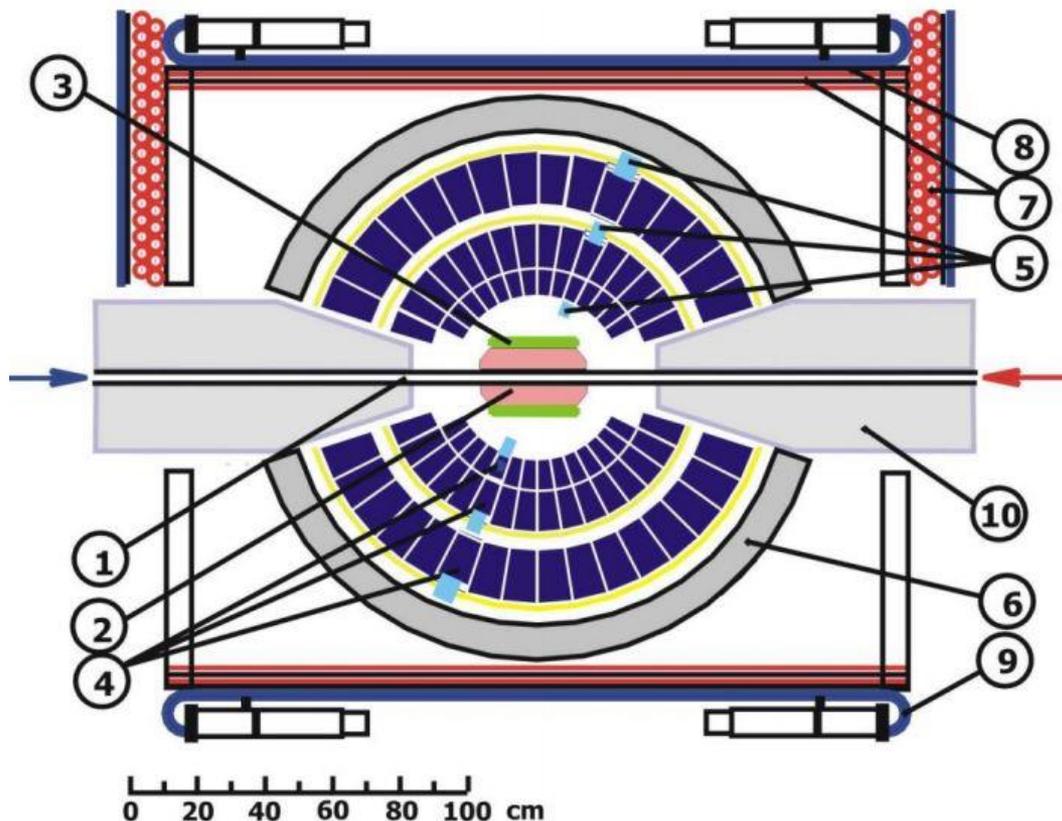
CMD-3



Детектор КМД-3

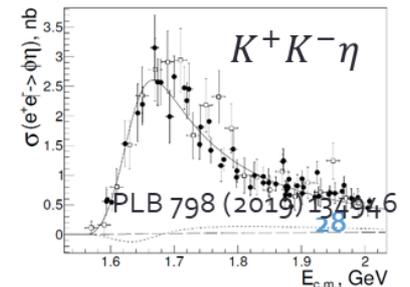
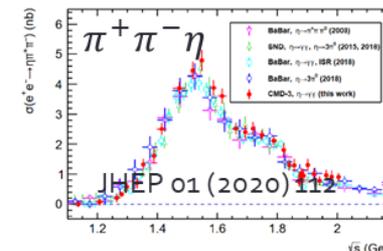
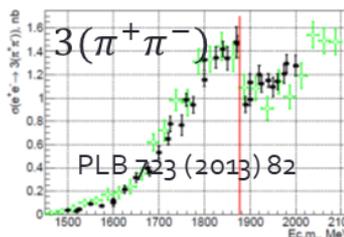
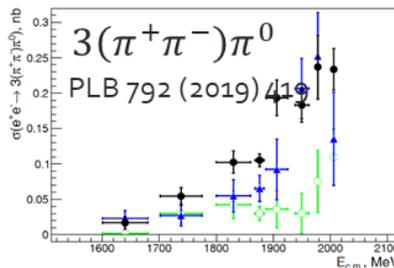
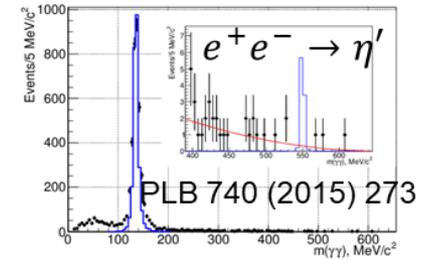
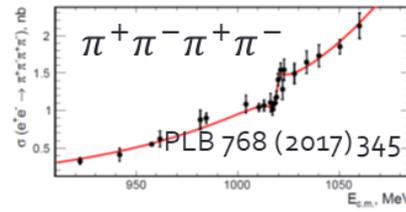
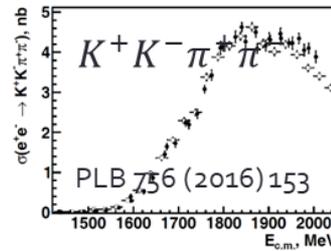
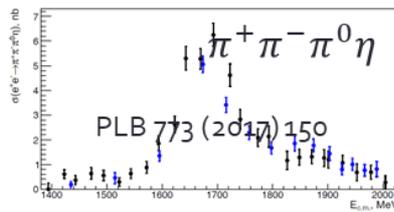
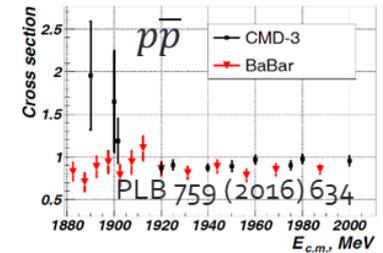
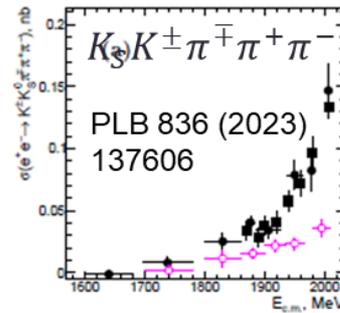
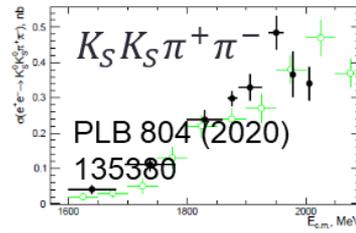
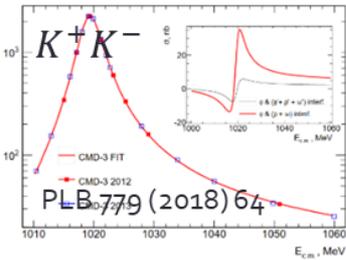
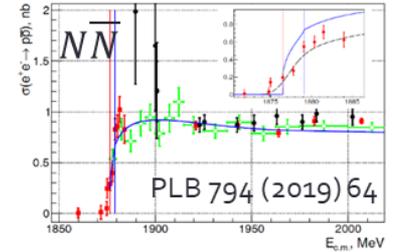
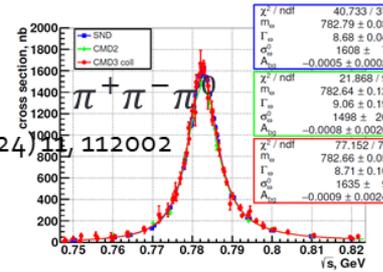
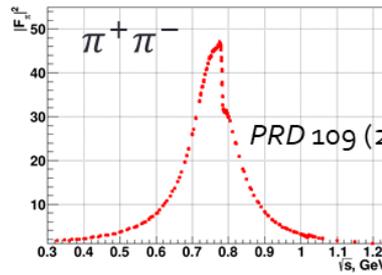
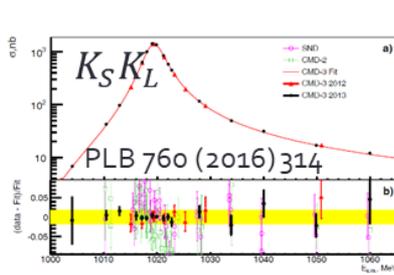


Детектор СНД



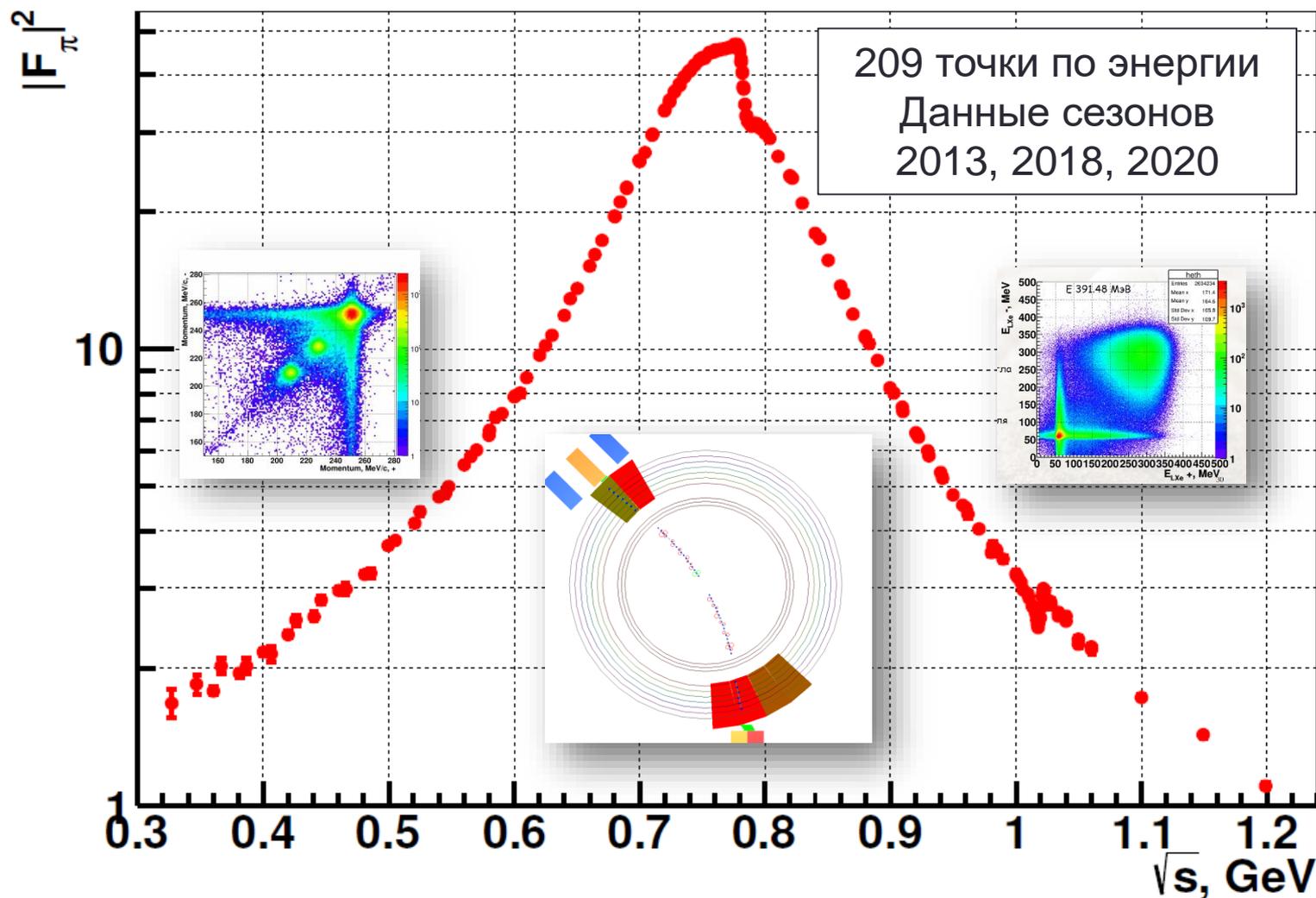
1 – beam pipe, 2 – tracking system, 3 – aerogel Cherenkov counters, 4 – NaI(Tl) crystals, 5 – phototriodes, 6 – iron muon absorber, 7–9 – muon detector, 10 – focusing solenoids.

Опубликованные результаты



$$e^+ e^- \rightarrow \pi^+ \pi^-$$

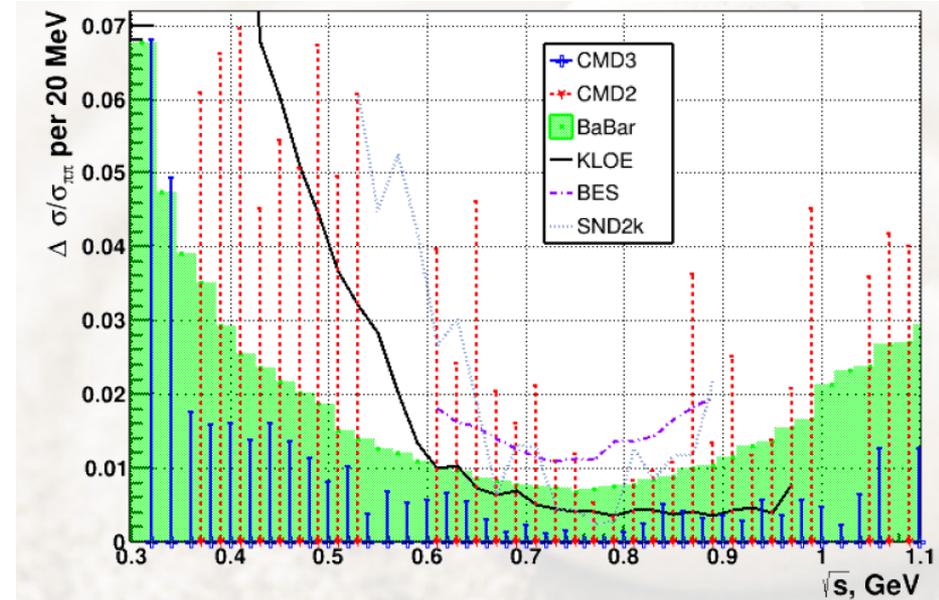
Важнейший результат!



Набор и анализ данных занял ~10 лет!

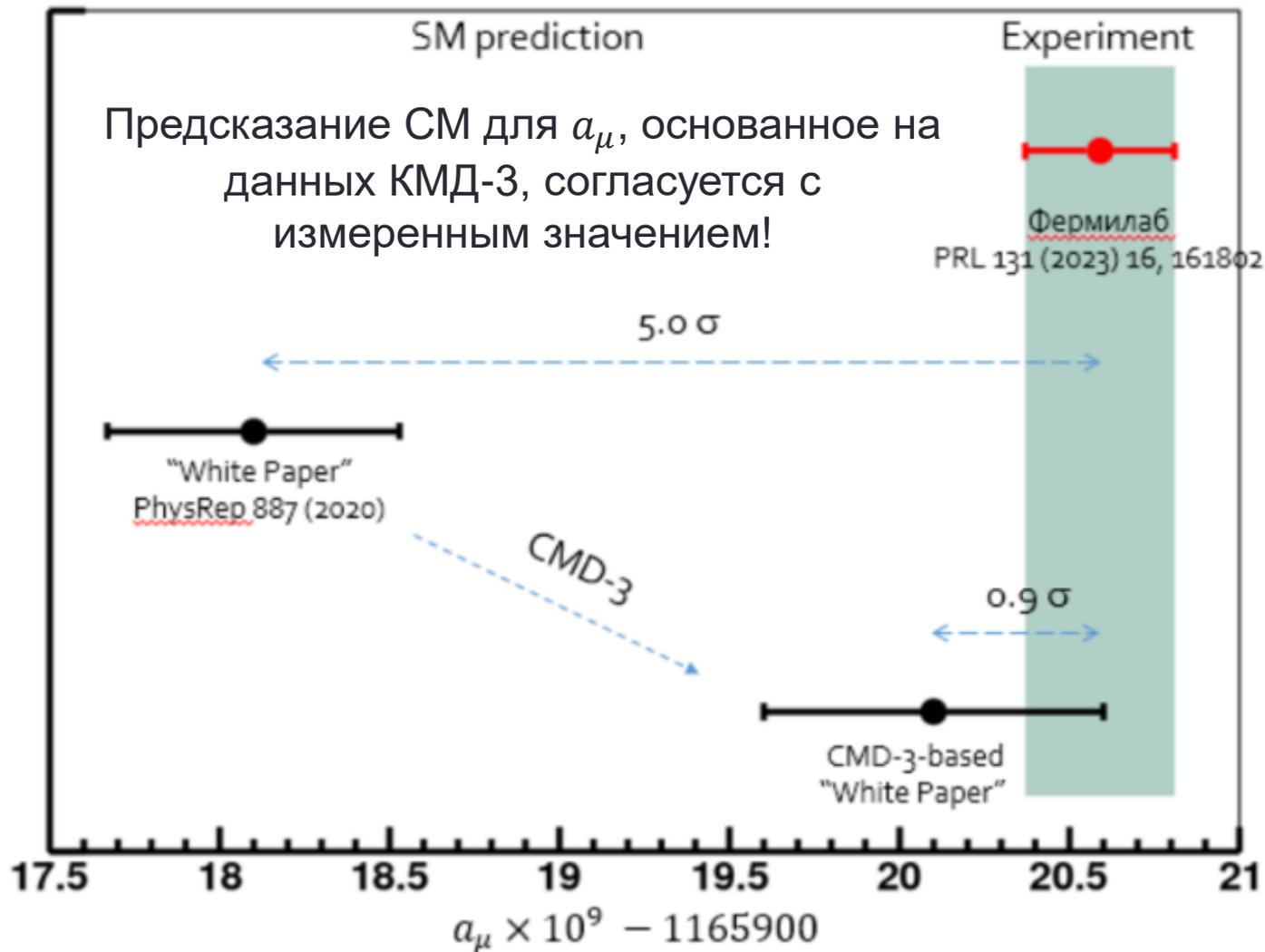


- Наибольшая статистика в мире
 - 34 000 000 $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$
 - 3 700 000 $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$
 - 44 000 000 $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$
- Глубокий анализ данных со встроенными перекрестными проверками
 - 3 метода идентификации частиц
 - 2 метода измерения углов вылета
 - Измерение $\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)$
 - Измерение зарядовой асимметрии
- Подробный анализ возможных источников систематических ошибок
- Систематическая точность 0.7-0.8%

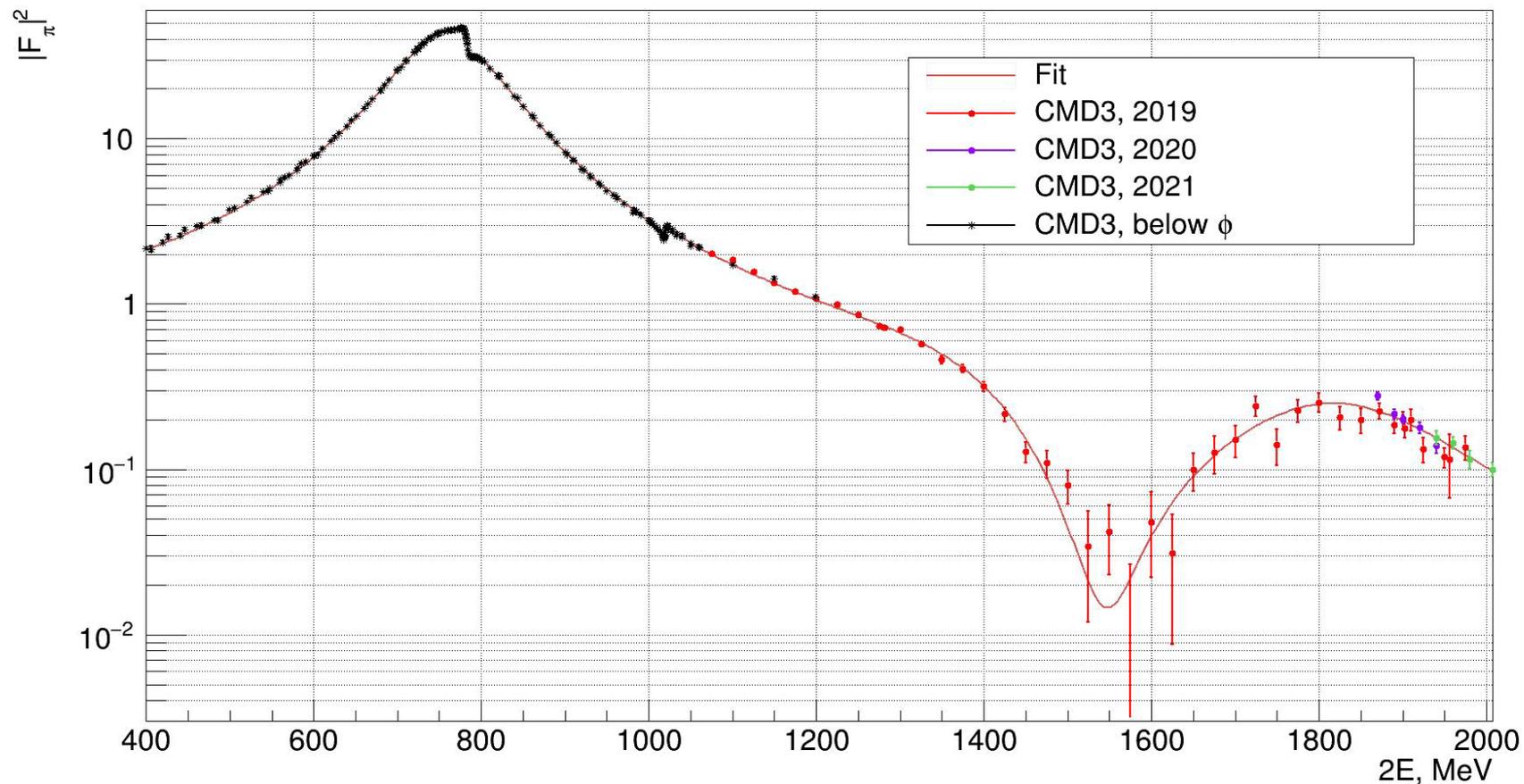


Статистическая точность разных измерений $\sigma(e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-)$

$$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^- \text{ И } a_\mu$$

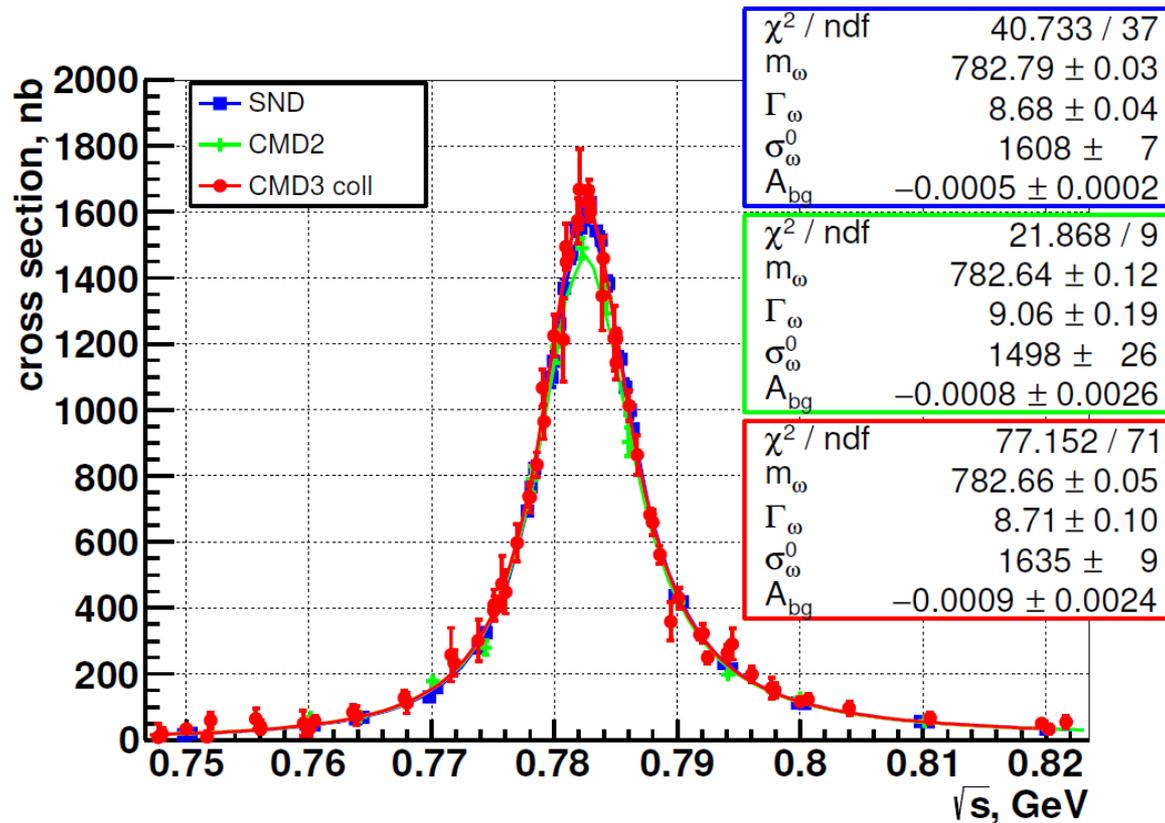


$$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$$



Предварительный результат измерения в области энергий выше 1 ГэВ

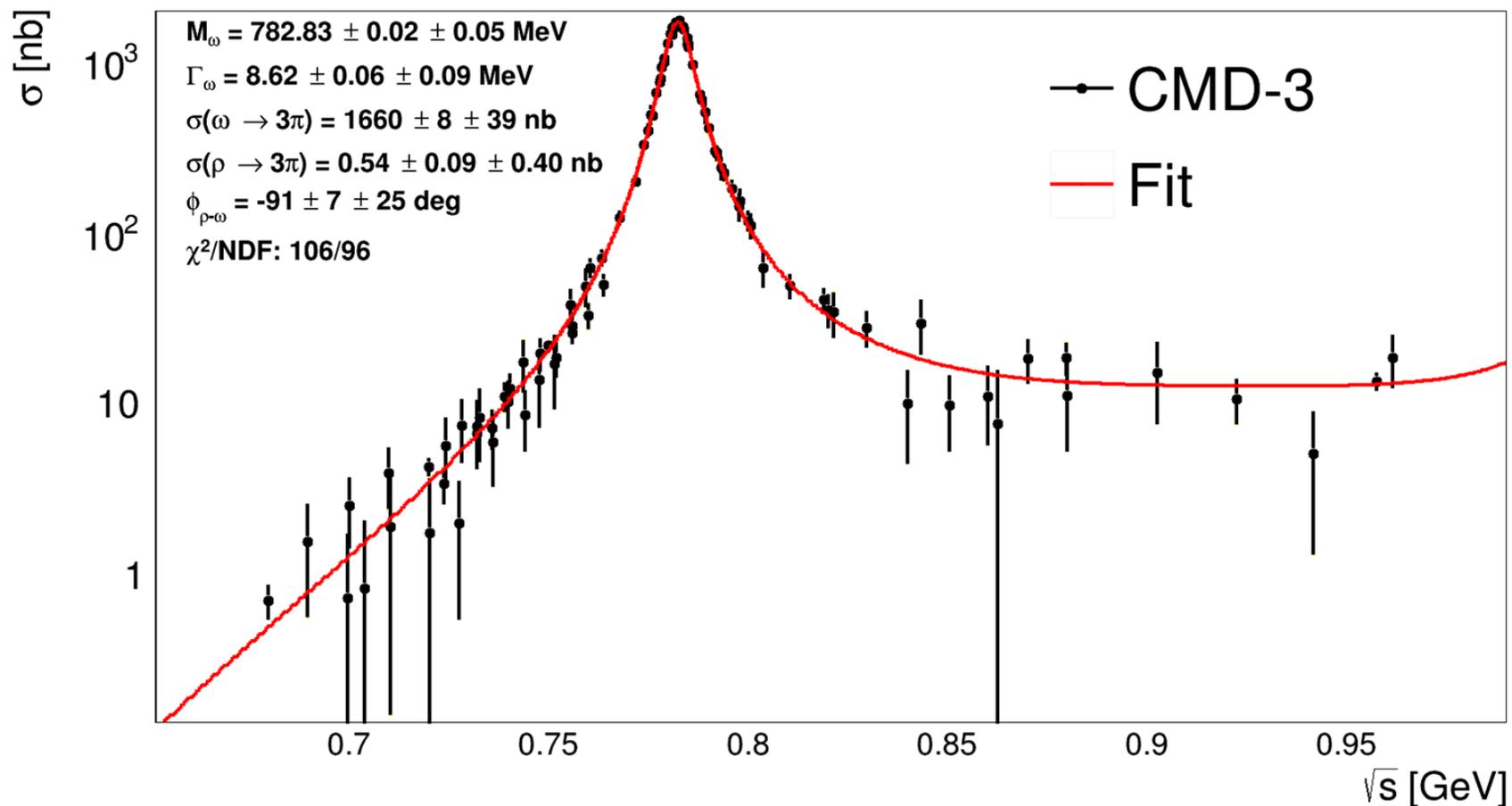
$$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$$



«Побочный» результат измерения $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$

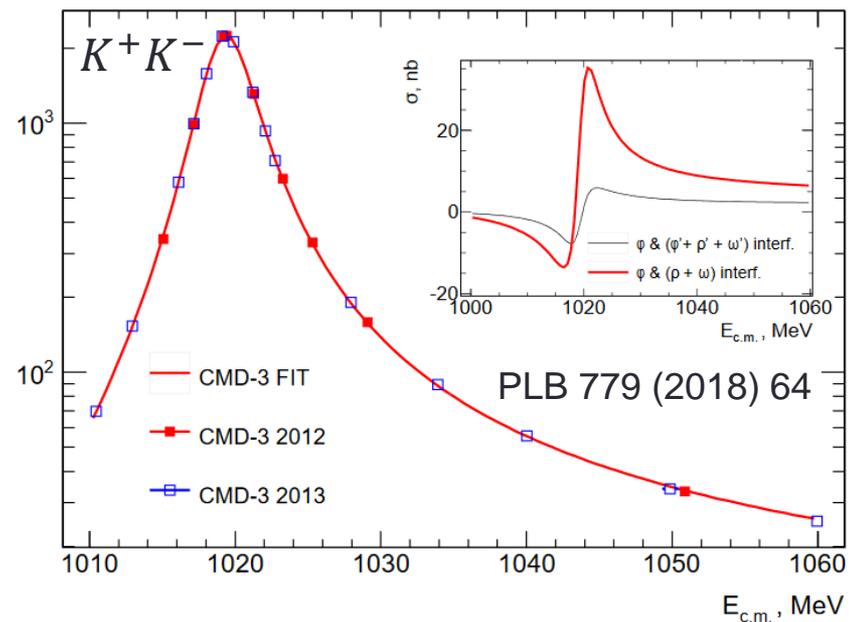
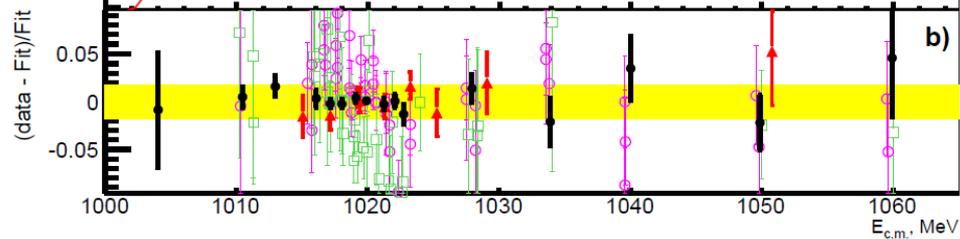
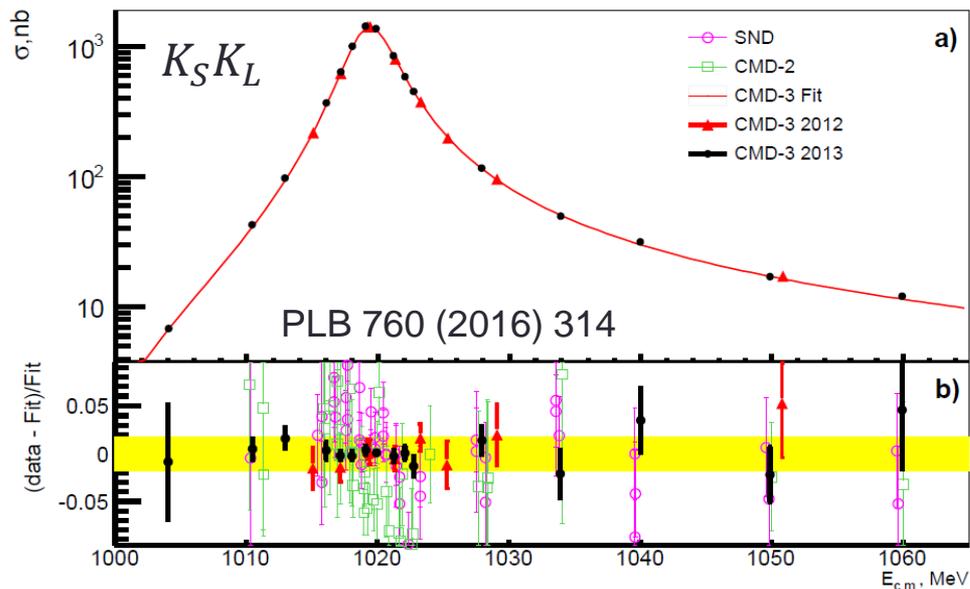
Основан на измерении числа фоновых событий $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$

Систематическая точность 3.3%



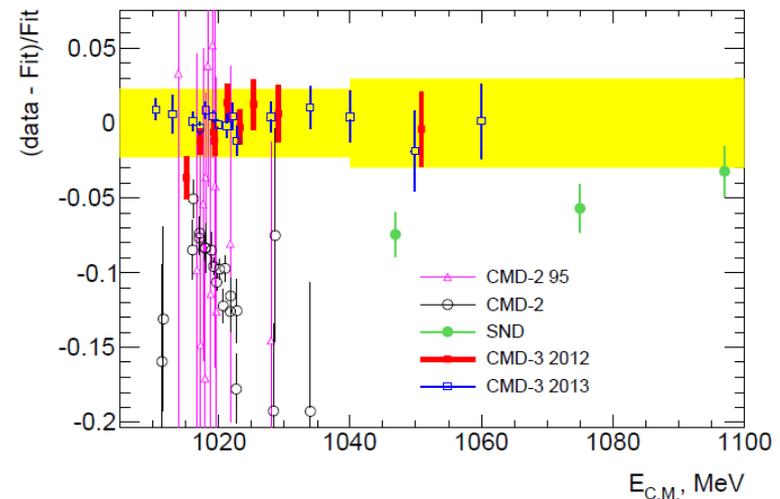
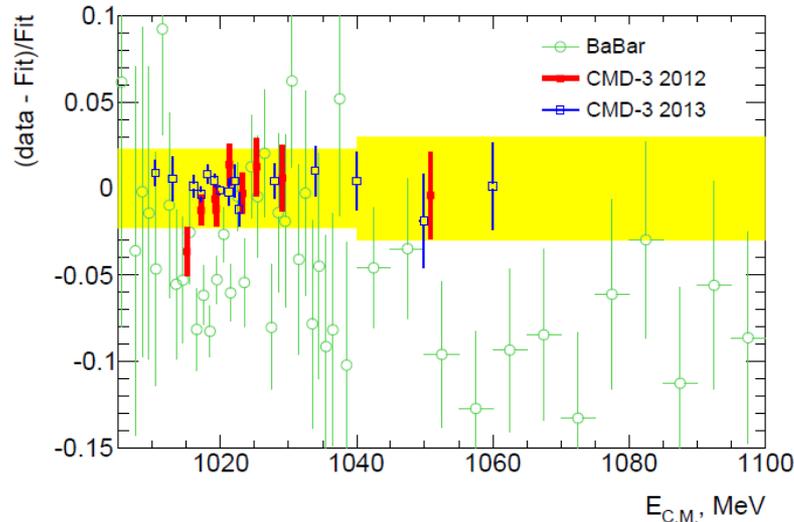
Предварительный результат анализа полной статистики
 $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$

$K_S K_L$ и $K^+ K^-$ @ $\varphi(1020)$



- $K_S K_L$, систематическая точность 1.8%
- $K^+ K^-$, систематическая точность 2.0% (2.8%)

K^+K^- : comparison with other measurements



$K_S K_L$ согласуется в разных экспериментах, а в канале $K^+ K^-$ наблюдаются отличия

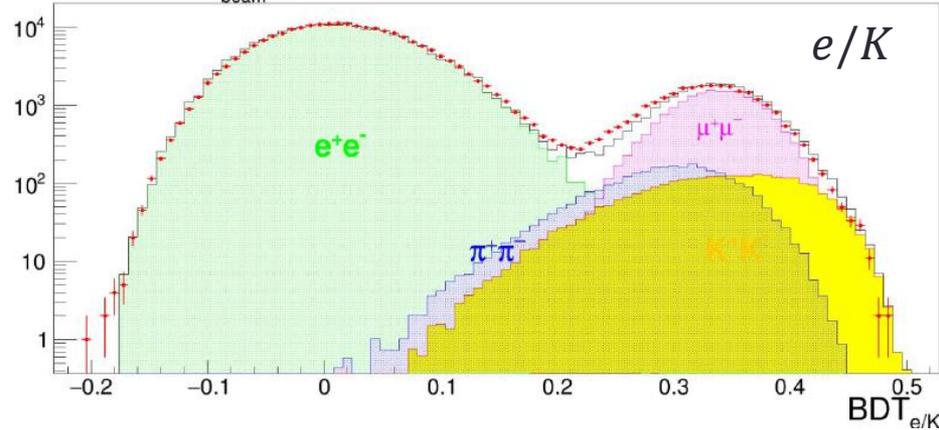
Измерение $K^+ K^-$ с детектором КМД-3 согласуется с изоспиновой симметрией

$$R = \frac{g_{\phi K^+ K^-}}{g_{\phi K_S K_L} \sqrt{Z(m_\phi)}} = 0.990 \pm 0.017$$

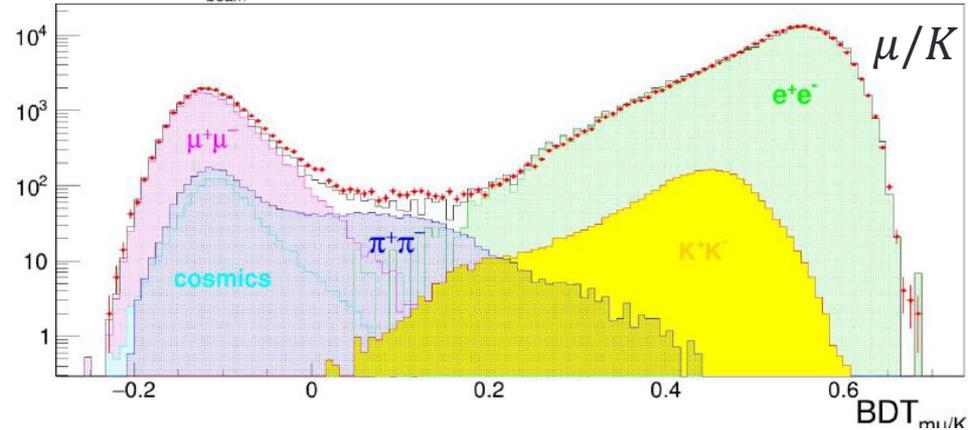
- $R_{SND} = 0.92 \pm 0.03 (2.6\sigma)$
- $R_{CMD-2} = 0.943 \pm 0.013 (4.4\sigma)$
- $R_{BaBar} = 0.972 \pm 0.017 (1.5\sigma)$

Идентификация частиц в LXe (КМД-3)

HIGH 2019, $E_{\text{beam}} = 750 \text{ MeV}$



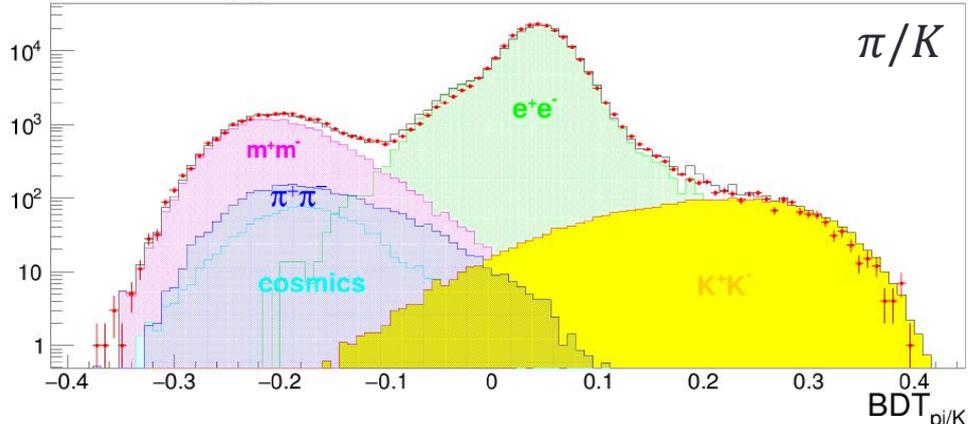
HIGH 2019, $E_{\text{beam}} = 750 \text{ MeV}$

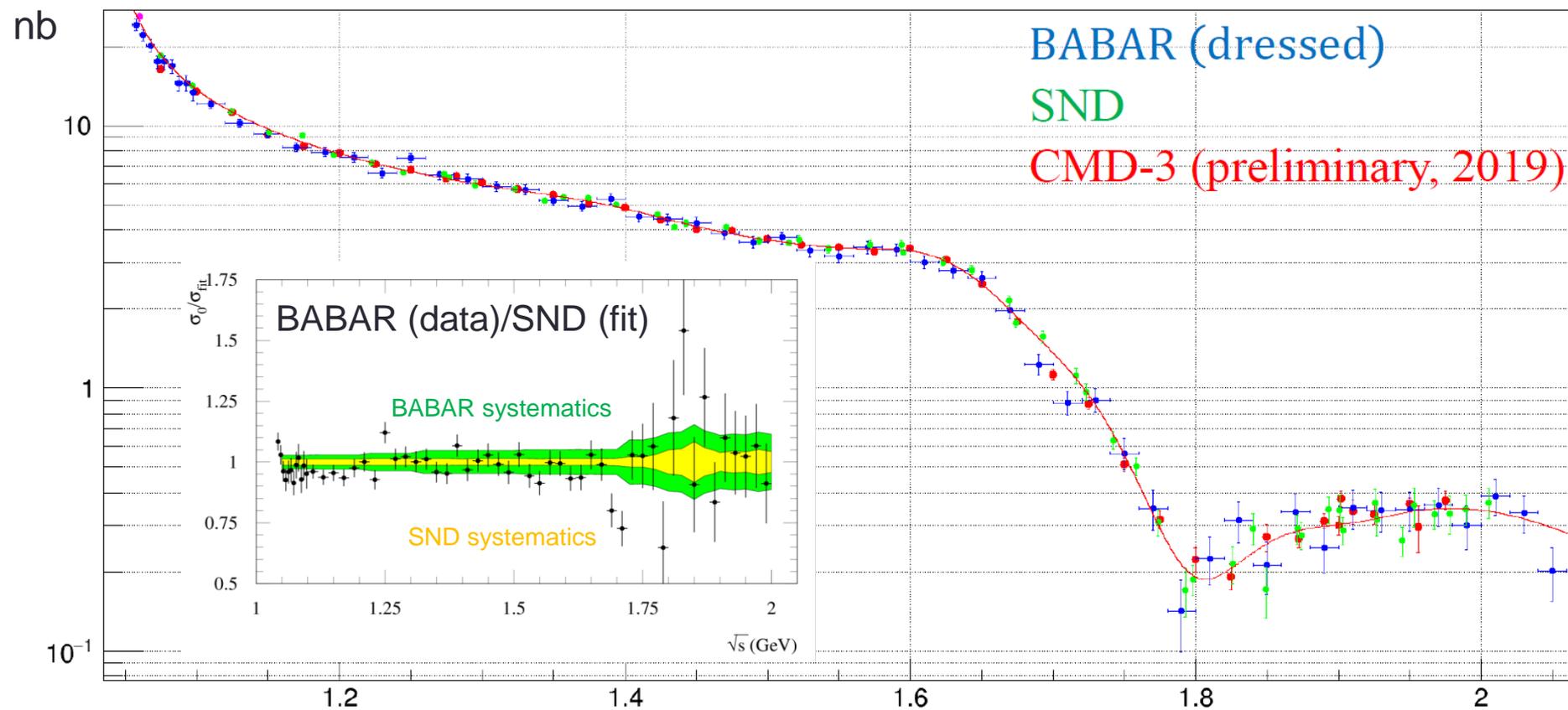


LXe калориметр измеряет профиль энергвыделения, который можно использовать для идентификации частиц.

Классификаторы, построенные с помощью методов машинного обучения

HIGH 2019, $E_{\text{beam}} = 750 \text{ MeV}$



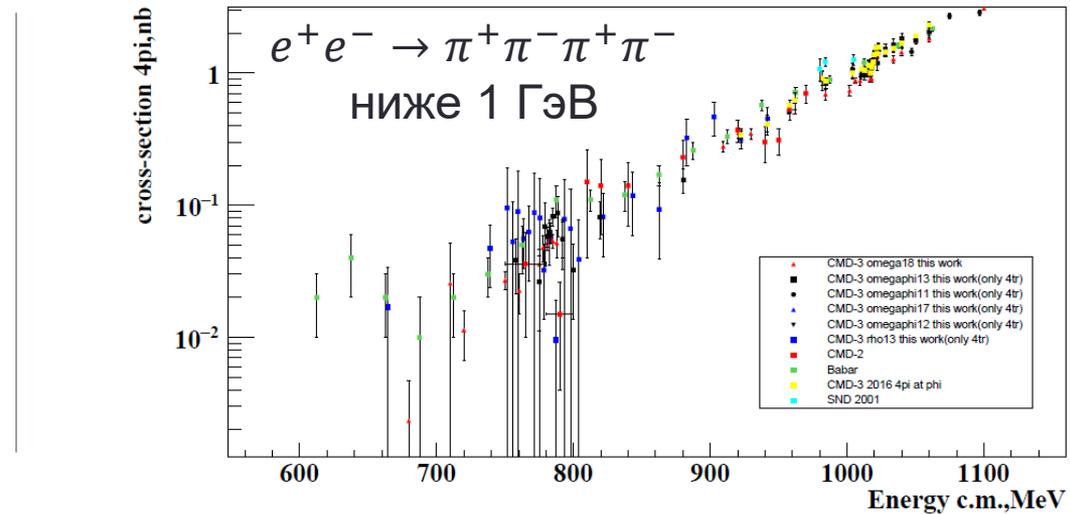
$e^+e^- \rightarrow K^+K^-$ @SND and @CMD-3

Предварительные результаты измерения в диапазоне энергий выше 1 ГэВ

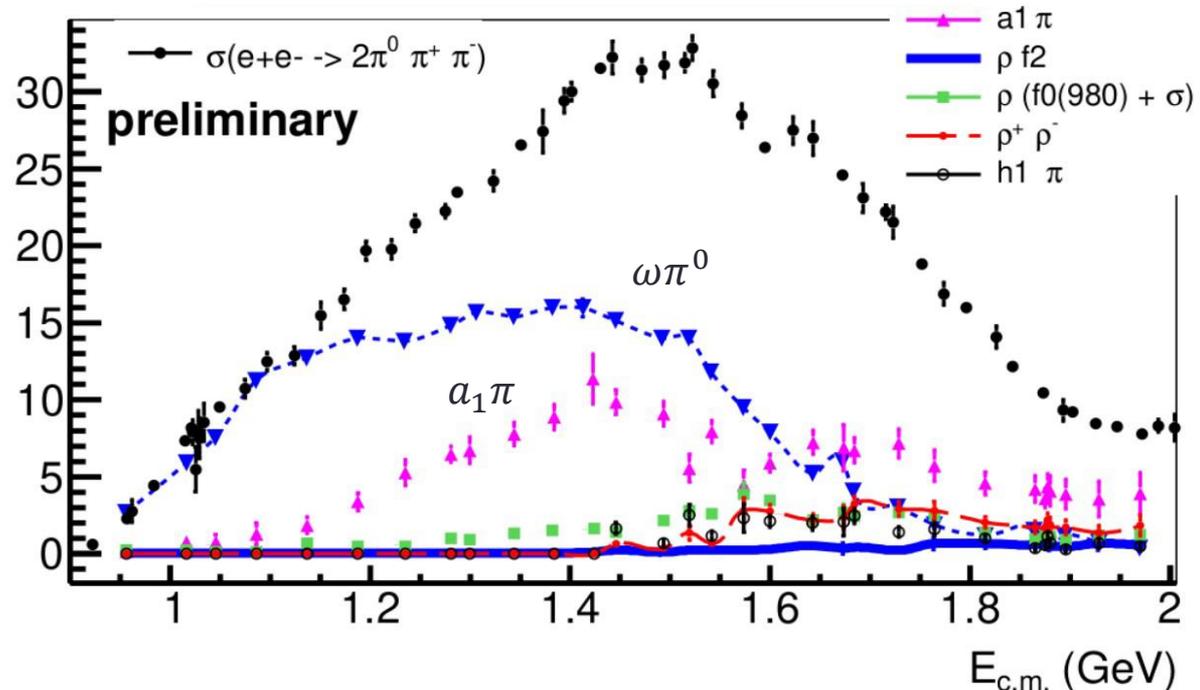
$$e^+e^- \rightarrow 4\pi$$

Изучение динамики
 $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ и
 $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$

- $\omega[1^{--}]\pi^0[0^{-+}]$
- $a_1(1200)[1^+]\pi[0^-]$
- $\rho[1^{--}]f_0/\sigma[0^{++}]$
- $\rho f_2(1270)[2^{++}]$
- $\rho^+\rho^-$
- $a_2(1320)[2^{++}]\pi$
- $h_1(1170)[1^{+-}]\pi^0$
- $\pi'(1300)(0^{-+})\pi$

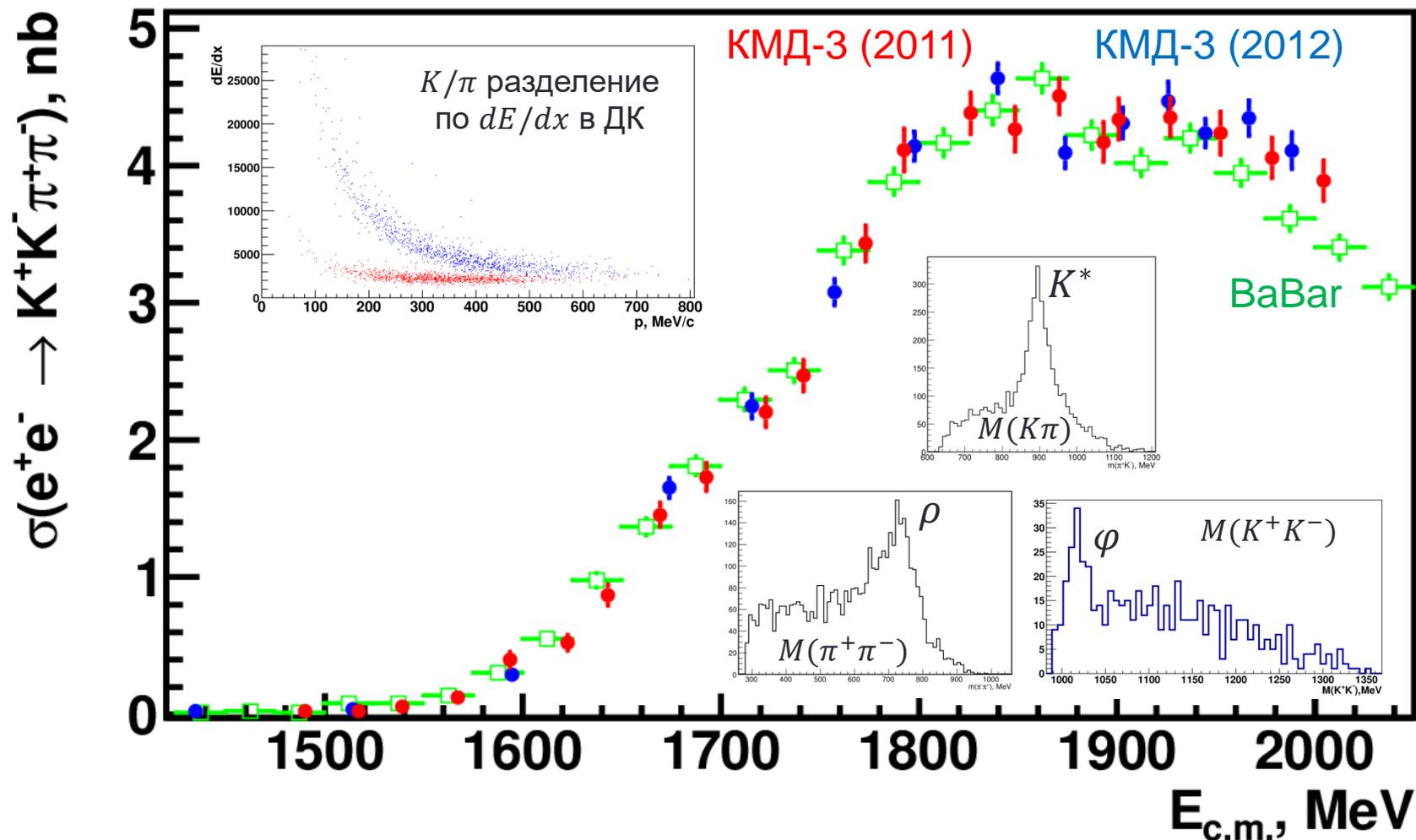


cross section (nb)



$$e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^+\pi^-$$

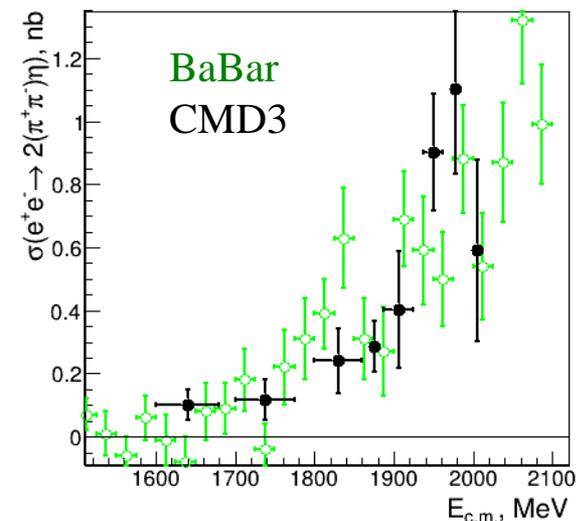
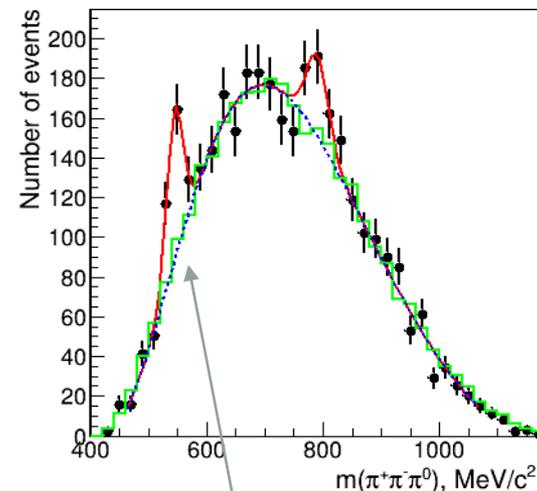
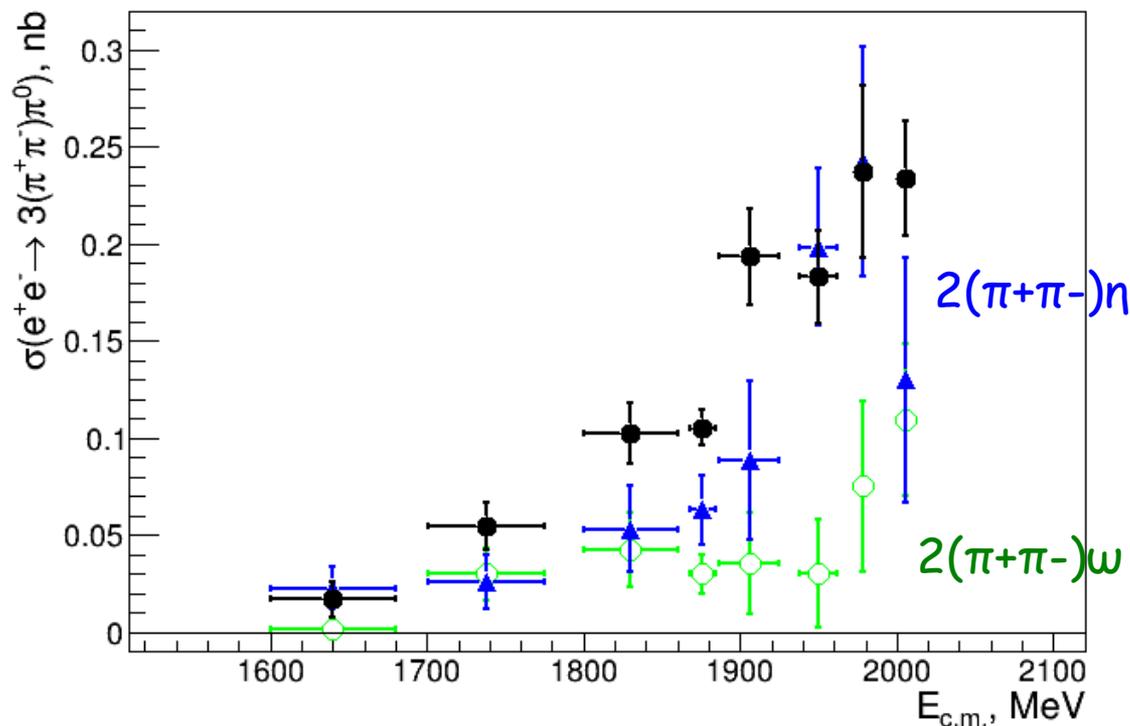
PLB 756 (2016) 153

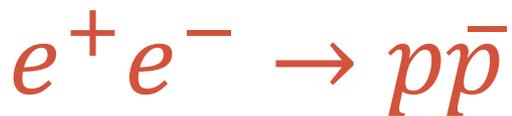


$$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-\pi^+\pi^-\pi^0$$

Впервые измерено полное сечение $e^+e^- \rightarrow 3(\pi^+\pi^-)\pi^0$

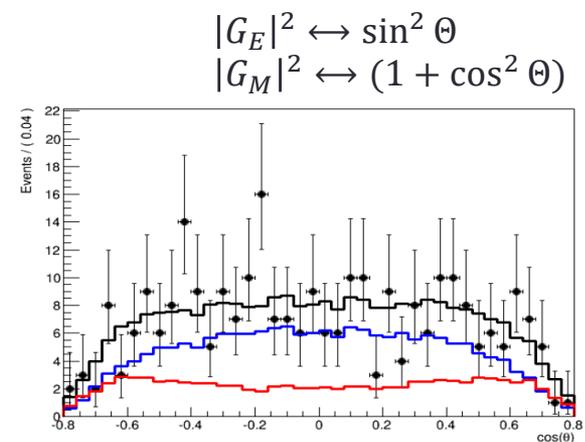
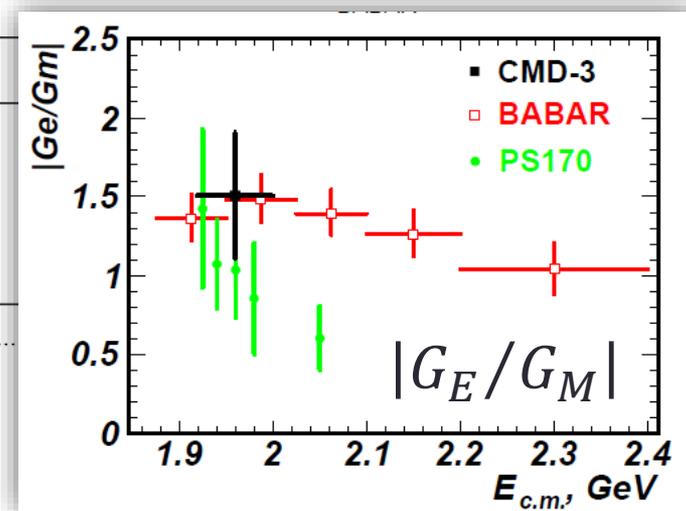
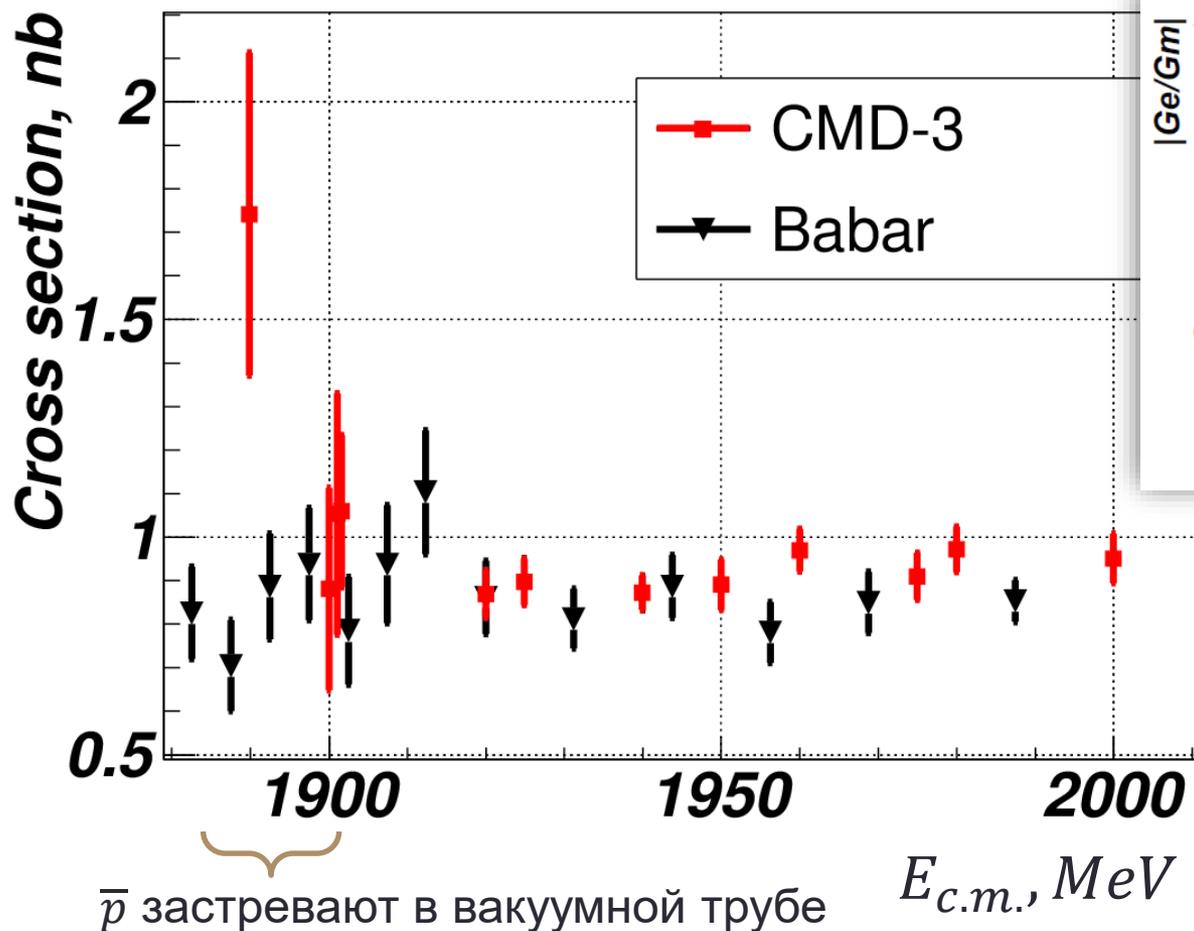
Показано, что доминируют каналы
 $2(\pi^+\pi^-)\eta$ и $2(\pi^+\pi^-)\omega$





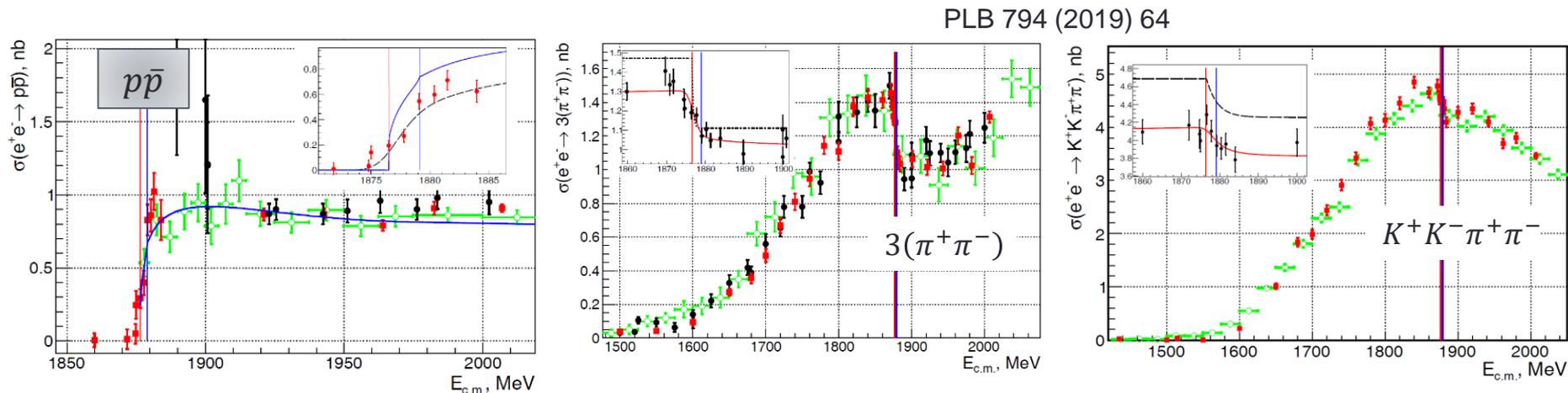
PLB 759 (2016) 634

Данные 2011-2012



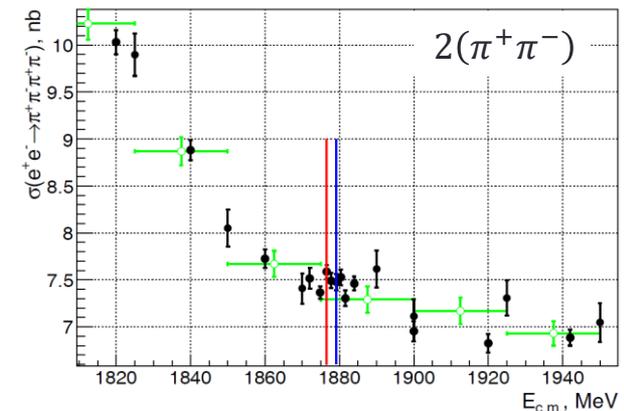
Адронные сечения на пороге $N\bar{N}$

Уникальные возможности по сканированию порогов $p\bar{p}$ и $n\bar{n}$

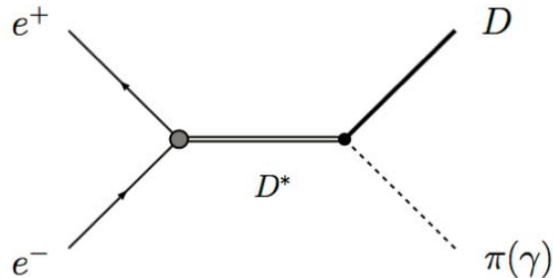


- наблюдаются резкие структуры $e^+e^- \rightarrow p\bar{p}$, $3(\pi^+\pi^-)$, $K^+K^-\pi^+\pi^-$
- ширина $\sim 1\text{МэВ}$ согласуется с разрешением по энергии
- загадка – не видна структура в $e^+e^- \rightarrow 2(\pi^+\pi^-)$

Ведется широкая программа изучения динамики на пороге $N\bar{N}$



Поиск редкого распада: $e^+ e^- \rightarrow D^{*0}$



КМД-3 набрал 25 пб⁻¹ при энергии 2007 МэВ

Чувствительность:

$$B_{D^{*0} \rightarrow e^+e^-} \geq \frac{4 \times 10^{-10}}{\epsilon \int L dt [pb^{-1}]} \times \frac{\sigma_{2E}}{\Gamma_{D^{*0}} [60 keV]}$$

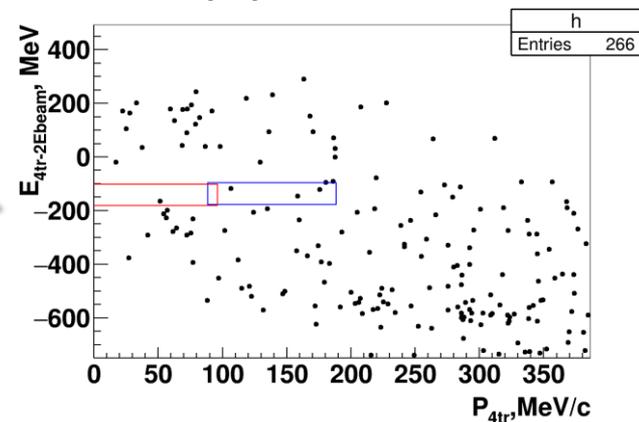
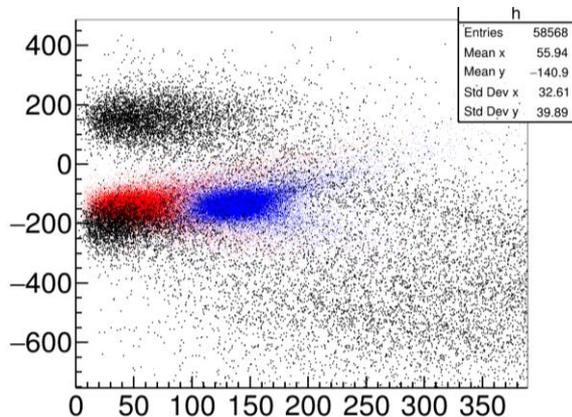
Предсказание СМ:

$$B_{D^{*0} \rightarrow e^+e^-} \approx (0.1 \div 7) \times 10^{-19}$$

$$B(D^{*0} \rightarrow e^+e^-) < 3.7 \cdot 10^{-7}$$

Возможные бранчинги в Новой физике:

$$B_{D^{*0} \rightarrow e^+e^-}^{Z'} < 2.5 \times 10^{-11}$$



Заключение

- ВЭПП-2000 и детекторы КМД-3 и СНД продолжают набор статистики в области энергий $0.32 \leq \sqrt{s} \leq 2.0$ ГэВ. Набрано более 1 фб^{-1} на детектор – самый большой объем статистики в мире в этой области энергий.
- Опубликован ряд результатов по измерению адронных сечений с наилучшей в мире точностью. Продолжается измерение эксклюзивных сечений и динамики рождения адронов.
- ВЭПП-2000 предоставляет уникальные возможности по измерению поведения адронных сечений на пороге рождения пары $N\bar{N}$.
- Результат КМД-3 по измерению сечения $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ привел к пересмотру устоявшегося мнения о наличии противоречия между измеренной величиной аномального магнитного момента мюона и предсказанием Стандартной модели