
Измерение адронных сечений в секторе легких кварков с
детектором КМД-3 на электрон-позитронном коллайдере
ВЭПП-2000



Г.В.Федотович
СМД-3 collaboration
Budker Institute of Nuclear Physics
Novosibirsk, Russia

Физика частиц при средних
и высоких энергиях

ИФВЭ, Протвино
2-5 Июня, 2026

Краткое содержание презентации



- Коллайдер и детектор
- Эксперимент и моделирование
- Методика отбора сигнальных событий
- Адронных сечения и аппроксимация
- Заключение

Коллайдер ВЭПП-2000 (ИЯФ СО РАН)



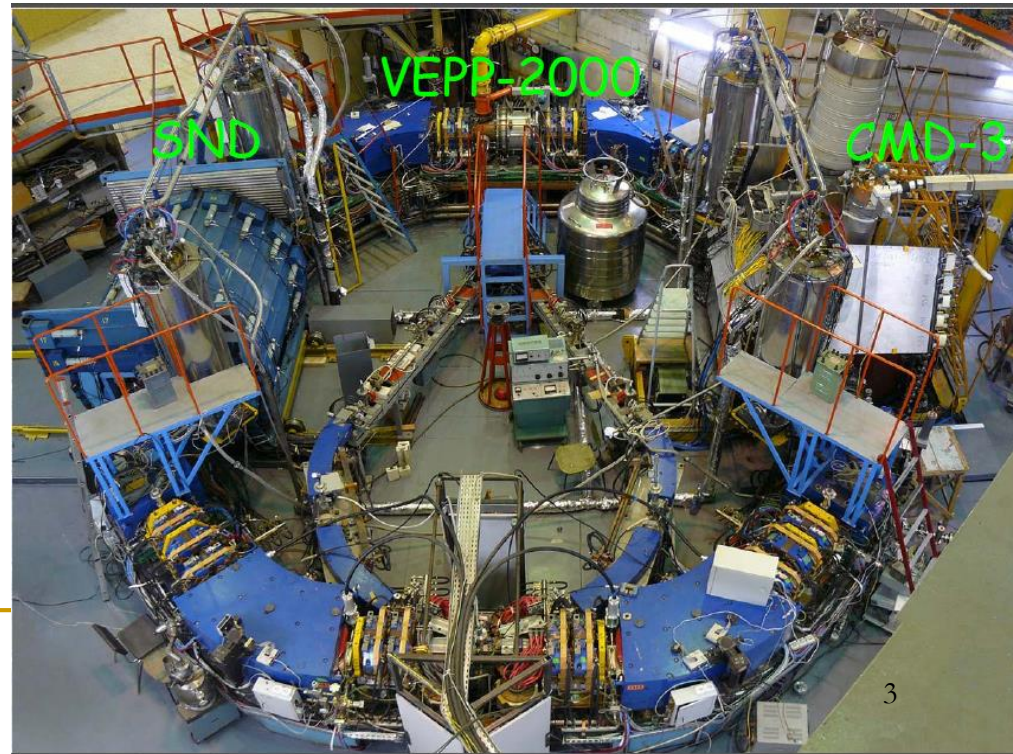
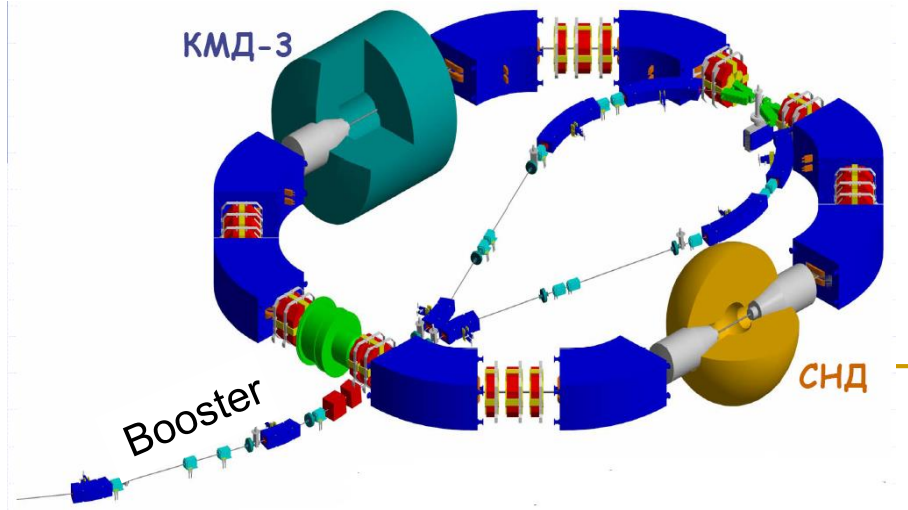
Область сканирования по энергии \sqrt{s} в диапазоне 0.32 до 2.01 GeV.

Во время набора статистики энергия пучков контролировалась путем измерения энергии фотонов при обратном рассеянии лазерного пучка света на встречном электронном пучке с точностью ~ 50 кэВ (каждые 10-20 минут)

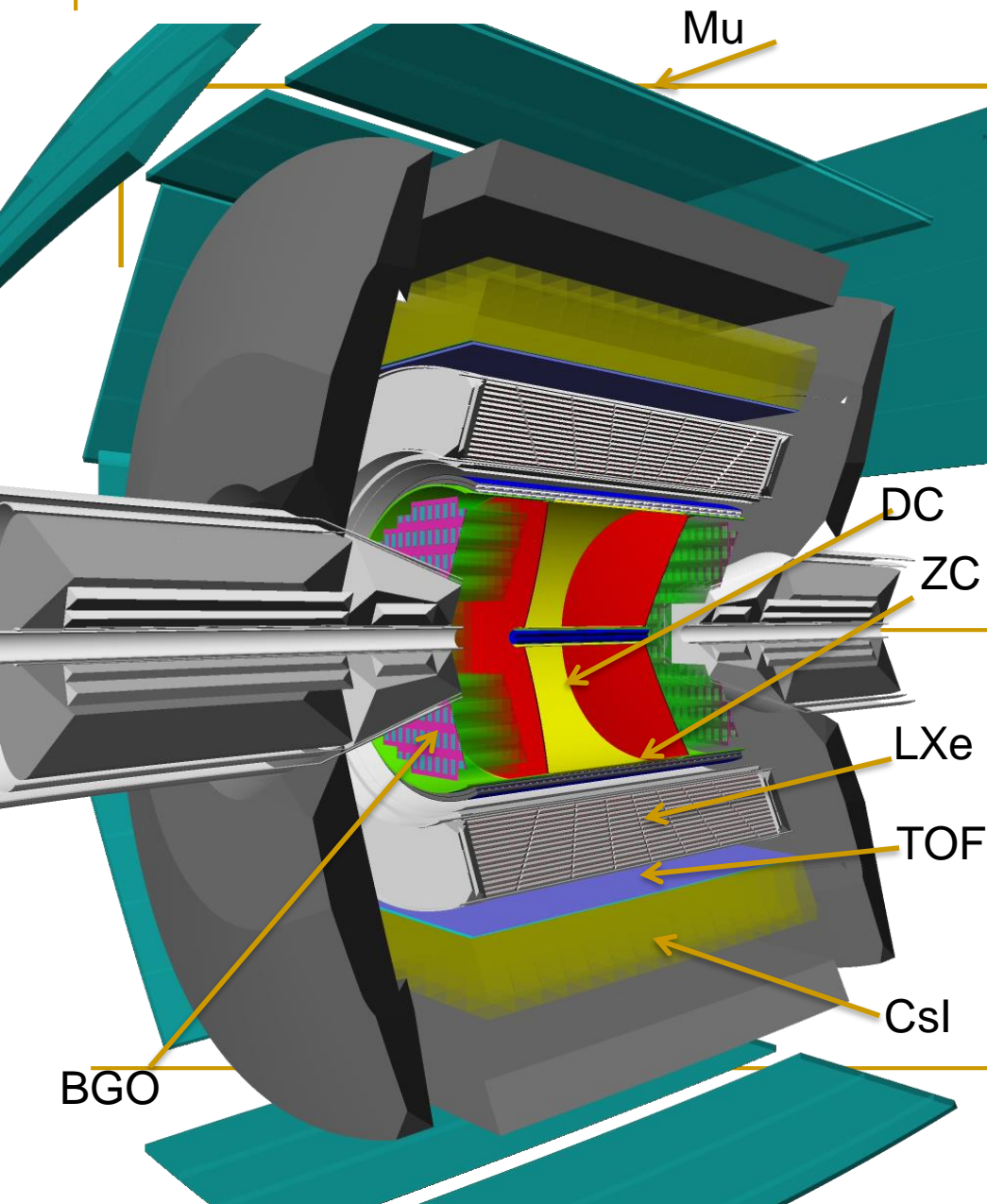
Впервые использована методика «круглых пучков». Вблизи места встречи установлены фокусирующие соленоиды с магнитным полем 13 Т)

Достигнутая светимость $\sim 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Набран рекордный интеграл светимости $\sim 1 \text{ fb}^{-1}$

Два детектора CMD-3 and SND установлены противоположно друг против друга вокруг VIP.

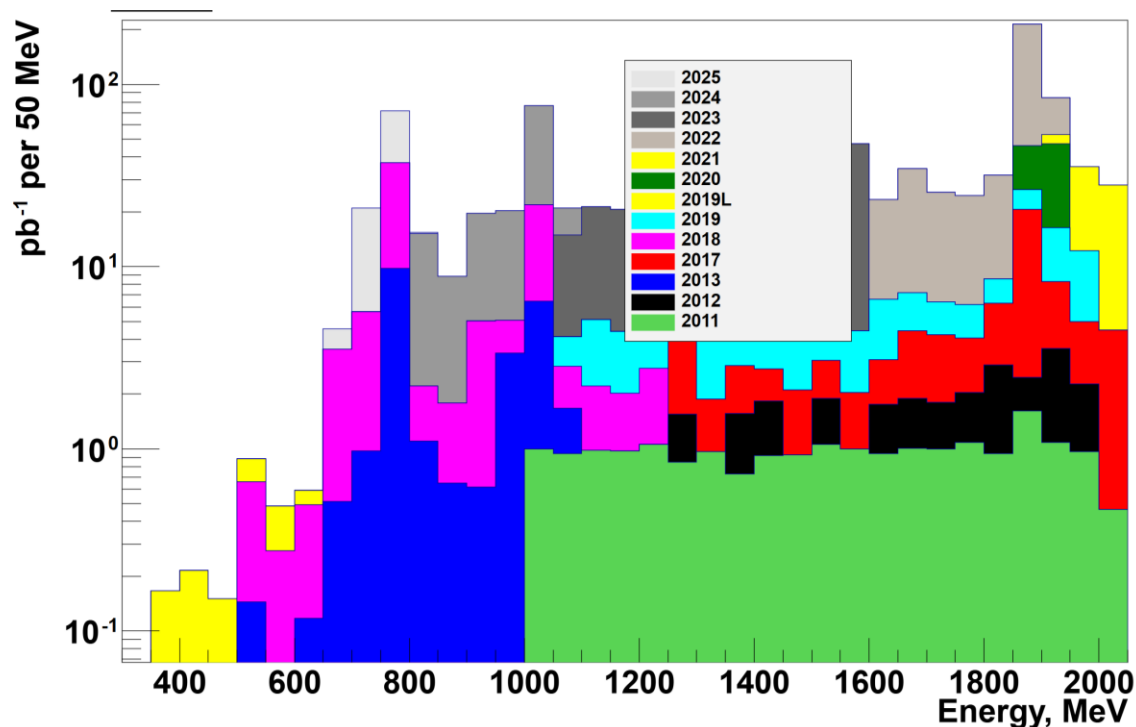


Детектор КМД-3



- DC – 1218 hexagonal cells with sensitive wires, W-Re alloy, 15μ in diameter, spatial resolution $\sim \sigma_{R\phi} \sim 100 \mu\text{m}$, $\sigma_z \sim 2.5\text{mm}$
 $\sigma_{P/P} \sim \sqrt{0.62 + (4.4 \cdot p[\text{GeV}])^2}$, %
- Z-chamber – start FLT, precise z-coordinate $\sim 500 \mu$ (detector acceptance)
- LXe calorimeter thickness $5,1X_0$, 196 towers & 1286 strips. Spatial resolution 1 – 2 mm, for photon point conversion
 $\sigma_E/E \sim 0.034/\sqrt{E} [\text{GeV}] \oplus 0.020$ - barrel
 $\sigma_E/E \sim 0.024/\sqrt{E} [\text{GeV}] \oplus 0.023$ – endcap
- Calorimeter with CsI crystals ($\sim 3,5$ t), 8 octants, number of crystals - 1152, $\sim 8X_0$
- TOF – 16 counters, time resolution ~ 0.5 ns mainly for anti neutron detection
- MR system – 8 octants (cosmic veto, $\sim 1\text{ns}$) particle ID
- Magnetic field is about 1.3 T

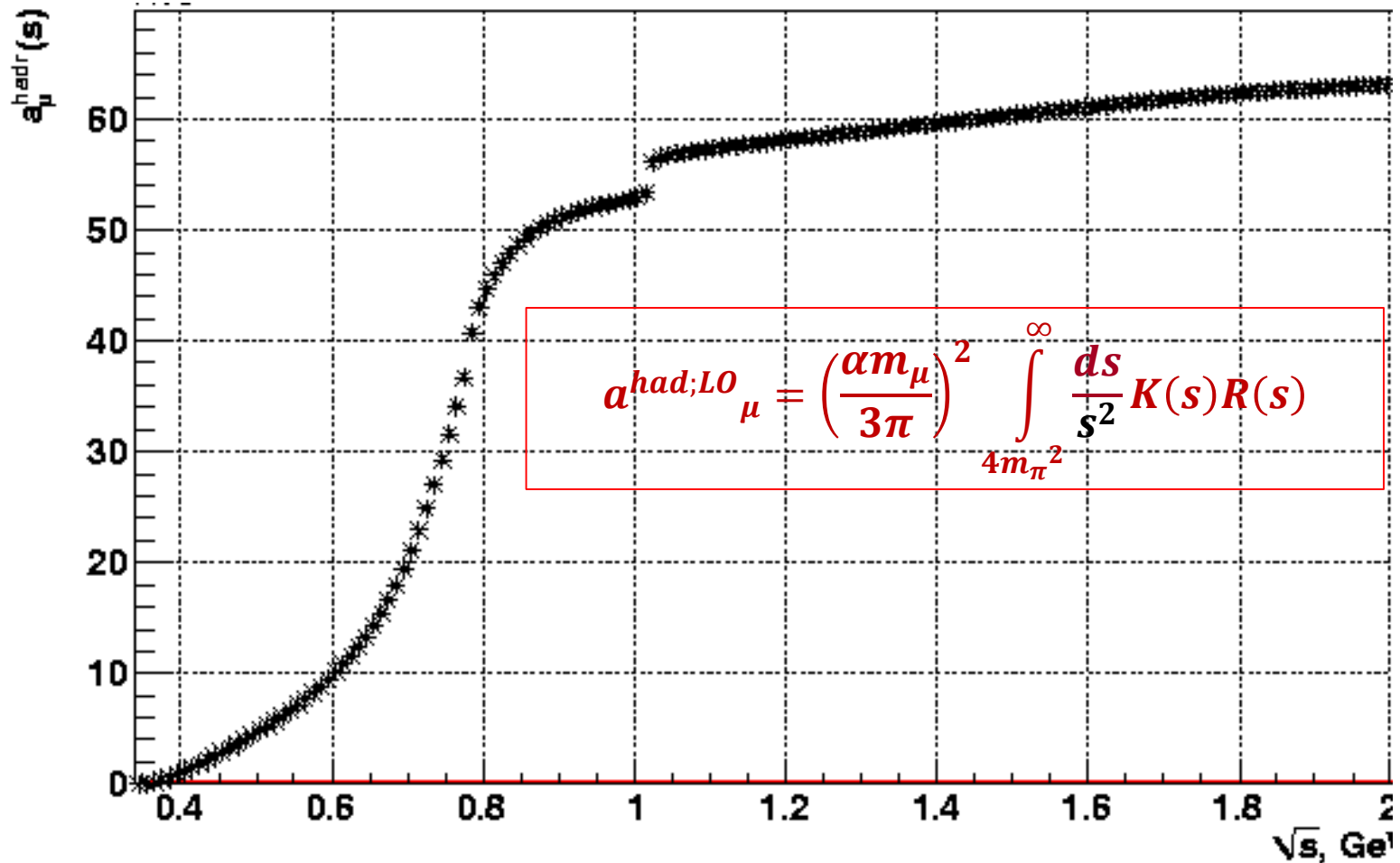
История набора статистики



Физическая программа детектора КМД-3:

- Прецизионно измерить формфактор пиона (<1%)
- Прецизионно измерить сечения процессов $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$, $\pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$, $\pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$, K^+K^- и $K_S K_L$ во всем диапазоне энергий коллайдера ВЭПП-2000
- Улучшить точность измерения параметров возбужденных состояний ρ' , ω' , ϕ'
- Измерить сечения процессов $K\bar{K}\pi$ (таких процессов больше десятка)
- Измерить или поставить верхние пределы на редкие распады векторных мезонов

Адронный вклад в АММ мюона в зависимости от энергии



Due to $1/s^2$ weighting the energy range of VEPP-2000 makes a dominant contribution of $\sim 93\%$ to the $a_{\mu}^{had;LO}$ and determines $\sim 70\%$ its uncertainty

This plot demonstrates how quickly integral reach the asymptotic value ~ 60 ppm.
For $\sqrt{s} > 2$ GeV the contribution is about ~ 7 ppm only

$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$: pion formfactor measurement



The basic idea of the measurement is: events with two back-to-back tracks large angle are selected. The selection criteria include cuts on momenta, vertex position along beam axis, average scattering angle, acollinearity angles $\Delta\phi$ and $\Delta\Theta$ and others.

The selected sample is composed by $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ events, accompanied by e^+e^- and $\mu^+\mu^-$ events and single cosmic muons, miss reconstructed as back-to-back particles originated near IP

➤ Two charged collinear tracks:

$$|\Delta\phi| < 0.15\text{rad}, |\Delta\theta| < 0.25\text{rad}$$

$$Q_1 + Q_2 = 0, |\Delta t| < 20\text{ns}$$

➤ Vertex position close to interaction point

$$\rho_{\text{average}} < 0.3\text{cm}, |Z_{\text{average}}| < 5\text{cm}$$

$$|\Delta\rho| < 0.3\text{cm}, |\Delta Z| < 5\text{cm}$$

➤ Fiducial volume inside good region of the DC

$$1.1 < (\pi + \theta^+ - \theta^-)/2 < \pi - 1.1 \text{ rad}$$

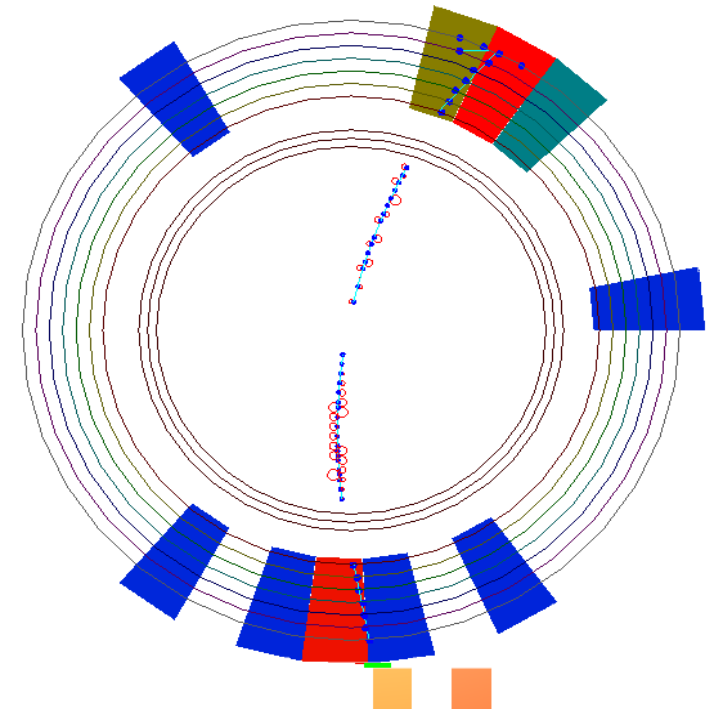
➤ Quality of selected tracks:

$$\chi^2/ndf < 10, N_{\text{hits}} \geq 10$$

➤ Filtration of low momentum and cosmic background

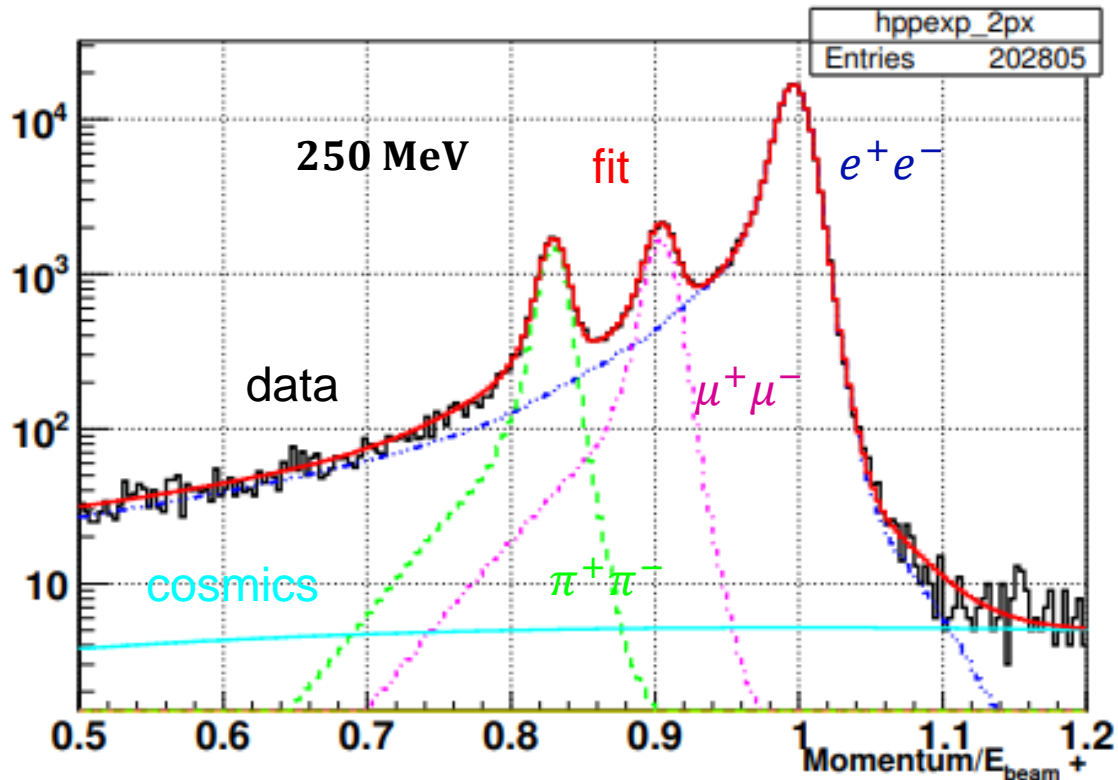
$$0.45E_{\text{beam}} < p_{\pm} < E_{\text{beam}} + 100 \text{ MeV}/c, p_{\pm} > 1.15p_{-(K_{\pm})}$$

Example of $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ event in CMD-3



Example of PID procedure

The momentum-based procedure, performs better at low energies ($\sqrt{s} \leq 0.9$ GeV) where the difference between momentum p_e , p_μ and p_π is large enough. For energy deposition-based procedure the p.d.f.s $f_i(E^+, E^-)$ are constructed purely empirical, with the shape to describe the data.



The final ratio $N_{\pi\pi}/N_{ee}$ is obtained as average results of two procedures weighted according to their estimated systematics whereas the ratio $N_{\mu\mu}/N_{ee}$ is kept fixed to QED prediction.



Consistency checks

The **second test** is the measurement of $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ cross section, predicted by QED and was done for momentum-based analysis for $\sqrt{s} < 0.7$ GeV only, where momentum resolution of the tracker allowed to separate muons from other particles.

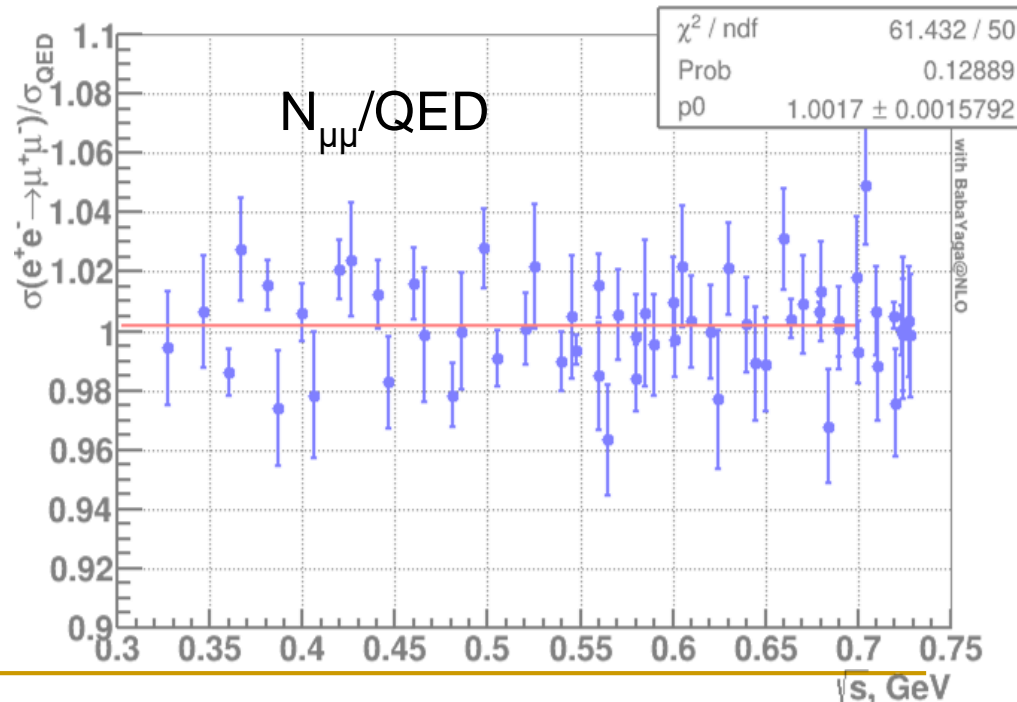
The number of $\mu^+\mu^-$ pairs is used for cross check QED-prediction ratio:

$$N_{\mu^+\mu^-}/N_{e^+e^-} = [\sigma_{\mu^+\mu^-}^0 \cdot (1 + \delta_{\mu^+\mu^-}) \cdot \epsilon_{\mu^+\mu^-}] / [\sigma_{e^+e^-}^0 \cdot (1 + \delta_{e^+e^-}) \cdot \epsilon_{e^+e^-}]$$

The observed average ratio of the measured cross section to the QED prediction is:

$$1.0017 \pm 0.0016$$

proves the consistency of the most parts of the analysis procedure, including separation procedure, detector effects, evaluation of the RC and etc.

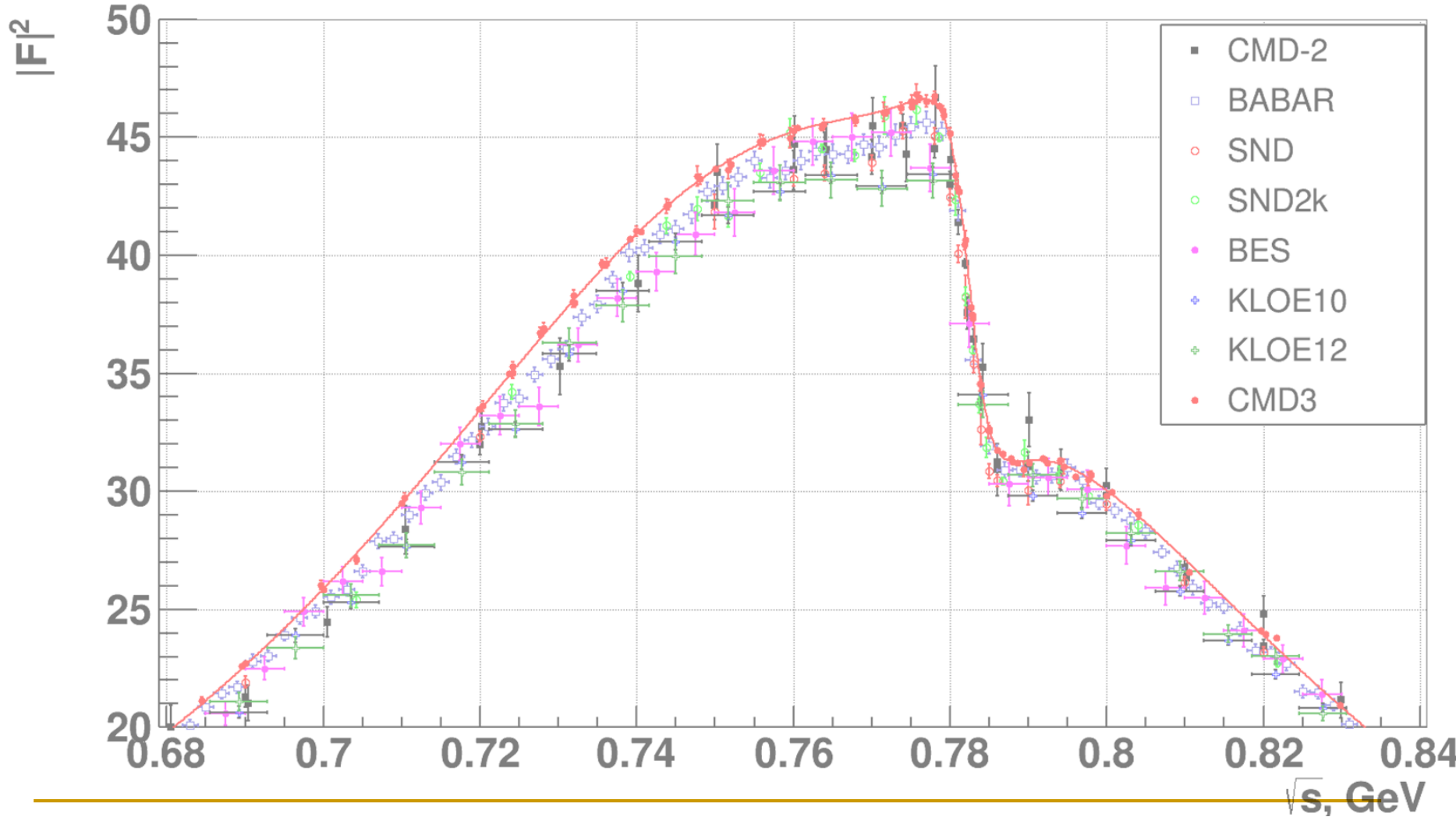


Many others consistency checks were performed too



Pion form factor

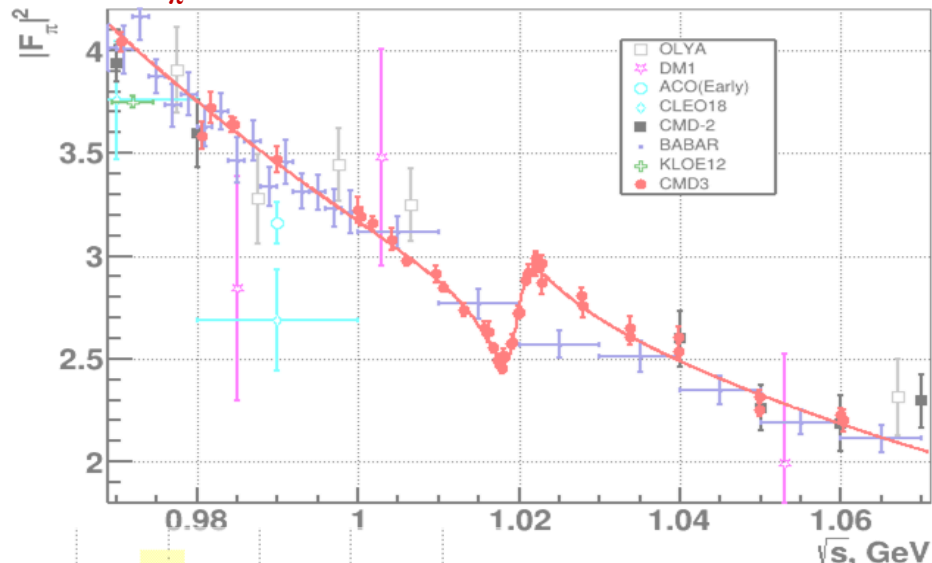
CMD3 vs other experiments



Прямое измерение редкого распада $\phi \rightarrow \pi^+\pi^-$ сильно подавленного G-четностью и правилом OZI



$|F_\pi|^2$ measurement around ϕ resonance



Previous measurement using detected $N_{\pi^+\pi^-}$ or visible cross-section by OLYA, ND, SND

SND

$$\psi_\pi = (-34 \pm 5)^\circ$$

$$B(\phi \rightarrow \pi^+\pi^-) = (7.1 \pm 1.1 \pm 0.9) \times 10^{-5}$$

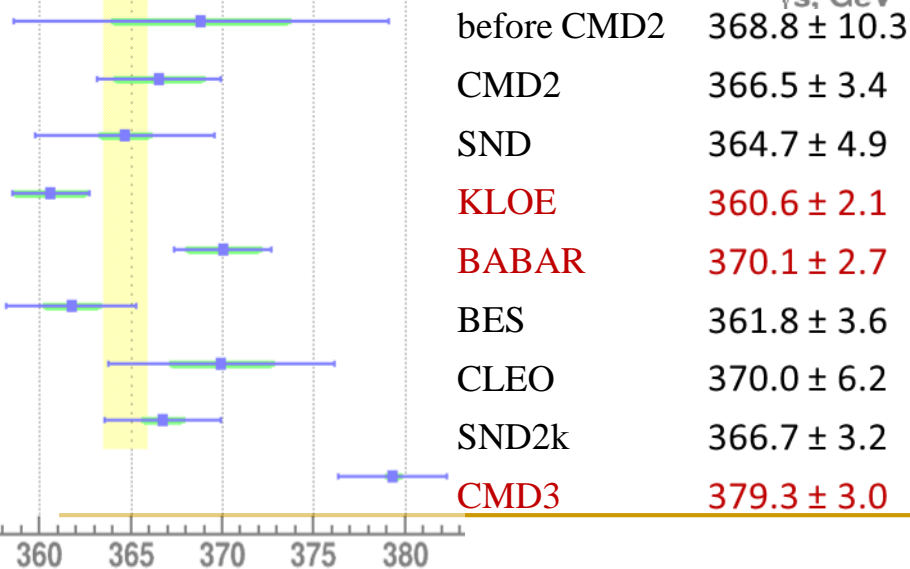
Phys. Lett. B 474 (2000)

CMD-3

$$\psi_\pi = (-21.3 \pm 2.0 \pm 10.0)^\circ$$

$$B(\phi \rightarrow e^+e^-)B(\phi \rightarrow \pi^+\pi^-) = (3.5 \pm 0.3 \pm 0.2) \cdot 10^{-8}$$

PDG 2022 год: $(2.2 \pm 0.2) \cdot 10^{-8}$



Horizontal axis: $a_\mu^{\pi\pi} \cdot 10^{-10}$

$\pi^+\pi^-$ contribution to a_μ^{had}

$$\text{RHO2013} \quad 380.06 \pm 0.61 \pm 3.64$$

$$\text{RHO2018} \quad 379.30 \pm 0.33 \pm 2.62$$

$$\text{Sum} \quad 379.35 \pm 0.30 \pm 2.95$$

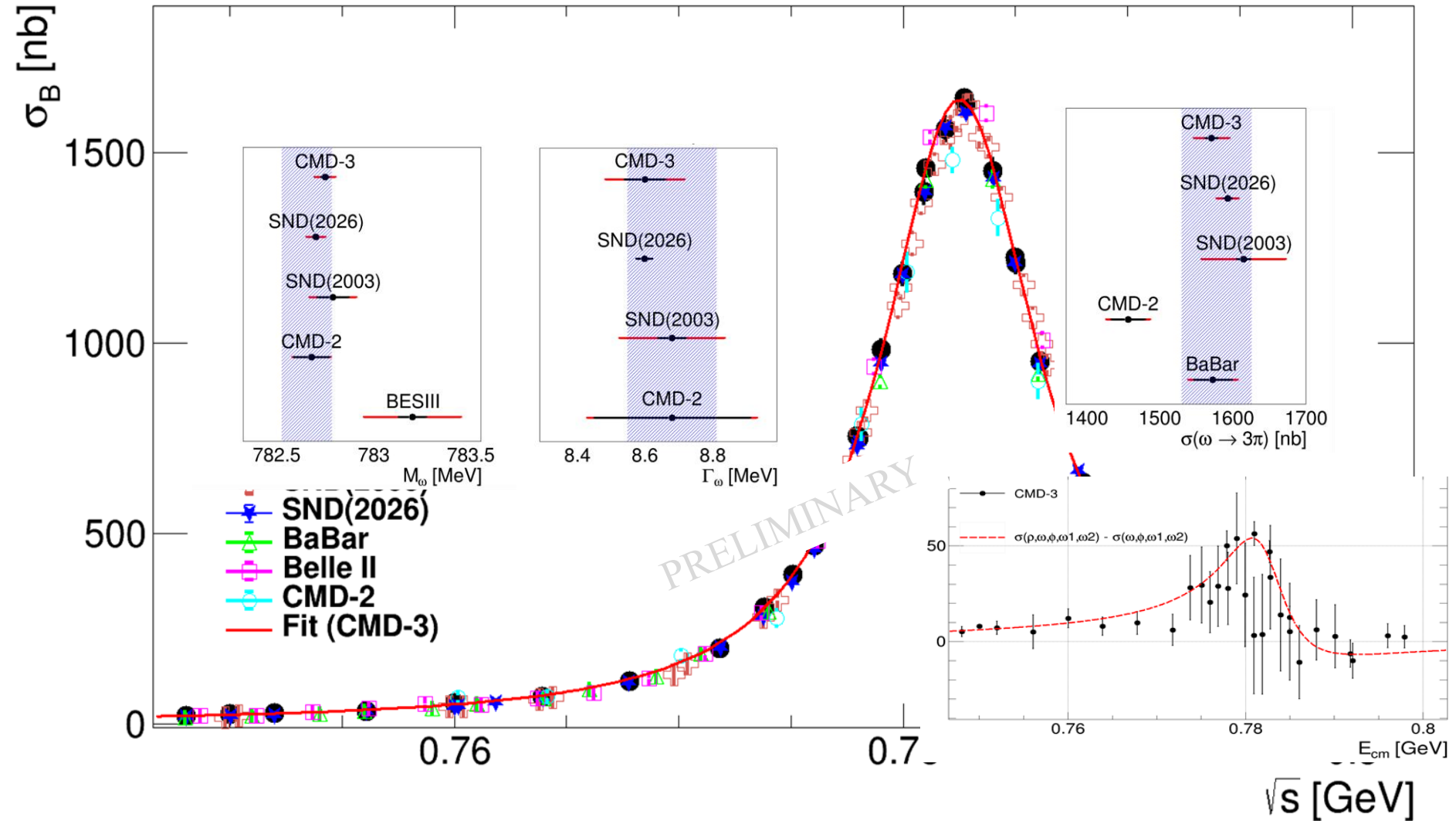
$$(g-2)_{\text{exp}} - \text{SM}(\text{with CMD3}) = (5.1 \pm 6.5) \cdot 10^{-10}, 0.8 \sigma$$

Phys.Rev.D 109 (2024) 11, 112002

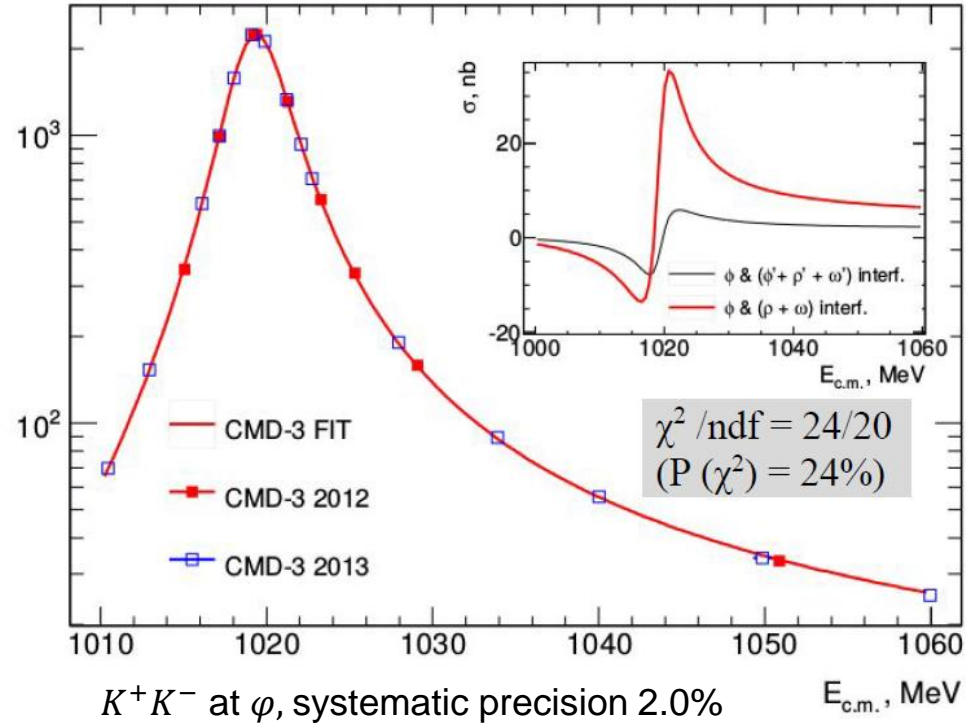
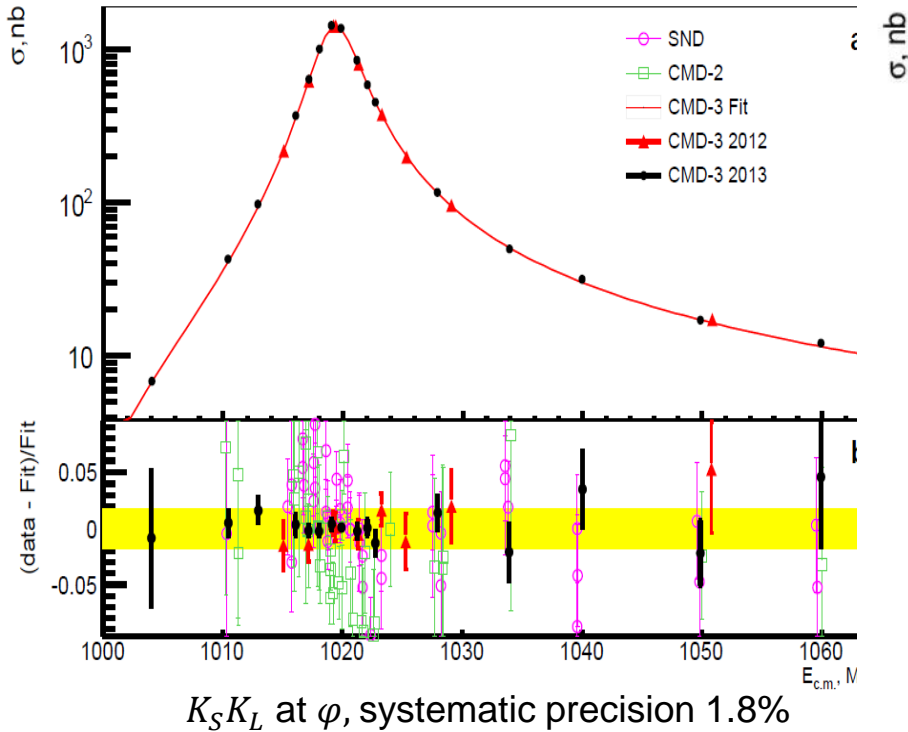
Процесс $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$



Experiments comparison (0.76-0.8 GeV)



$K_S K_L$ and $K^+ K^-$ @ $\phi(1020)$



Parameter	CMD-3	Other measurements	CMD-2
m_ϕ , MeV	$1019.469 \pm 0.006 \pm 0.060$	1019.461 ± 0.019 (PDG2016)	1019.504 ± 0.033
Γ_ϕ , MeV	$4.249 \pm 0.010 \pm 0.005$	4.266 ± 0.031 (PDG2016)	4.280 ± 0.031
$\Gamma_{\phi \rightarrow ee} B_{\phi \rightarrow K+K^-}$, keV	$0.669 \pm 0.001 \pm 0.022$	0.634 ± 0.008 (BaBar)	0.436 ± 0.048
$B_{\phi \rightarrow ee} B_{\phi \rightarrow K+K^-}$, 10^{-5}	$15.789 \pm 0.033 \pm 0.527$	14.24 ± 0.30 (PDG2016)	

Phys.Lett.B 760 (2016) 314-319, 4. Study of the process $e^+e^- \rightarrow K_S K_L$ in the center-of-mass energy range 1004--1060 MeV with the CMD-3 detector at the VEPP-2000 e^+e^- collider.

Study of the process $e^+e^- \rightarrow K^+ K^-$ in the center-of-mass energy range 1010--1060 MeV with the CMD-3 detector.

Phys.Lett.B 779 (2018) 64-71

$K_S K_L$ and $K^+ K^-$: $\rho - \varphi$ interference

$\rho - \varphi$ interference can be directly observed:

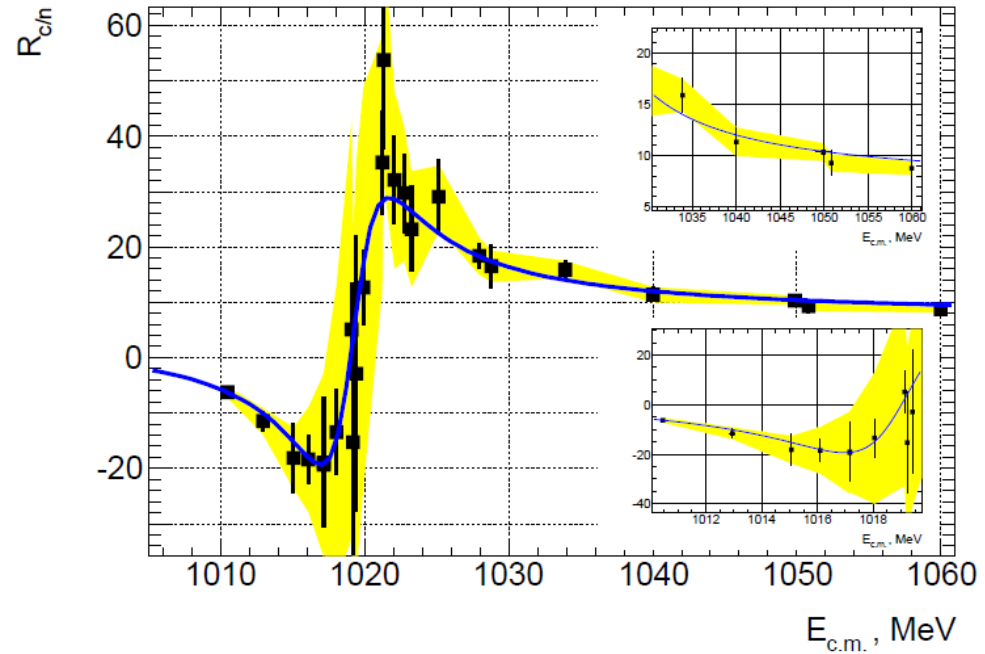
$$R_{c/n} = \sigma(e^+e^- \rightarrow K^+K^-) \times \frac{p_{K^0}^3(s)}{p_{K^\pm}^3(s)} \times \frac{1}{Z(s)} - \delta \times \sigma(e^+e^- \rightarrow K_S K_L)$$

- $r_{\rho,\omega} = 0.91 \pm 0.04$

deviation of SU(3) relations

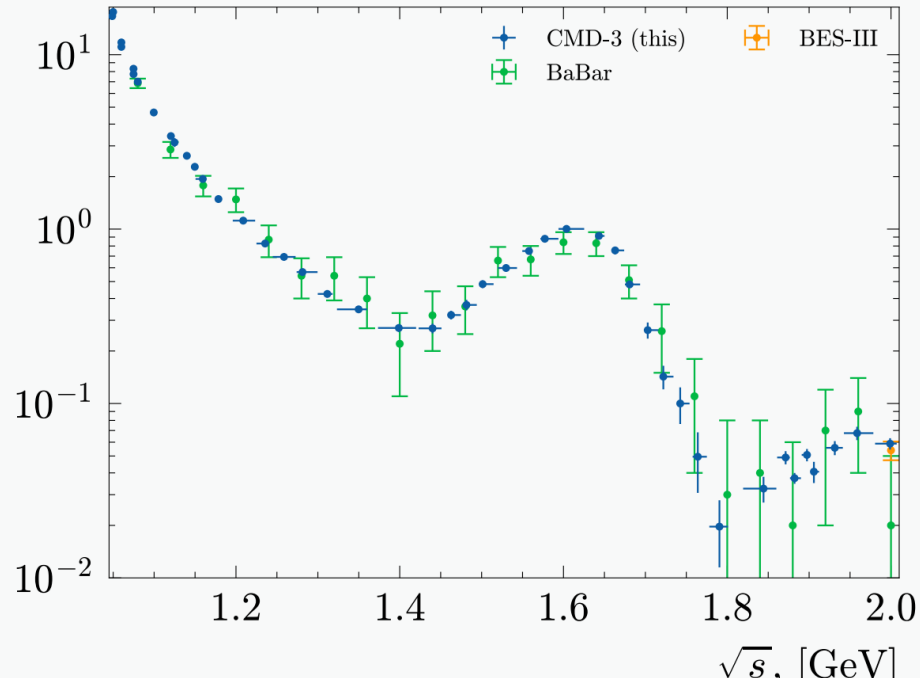
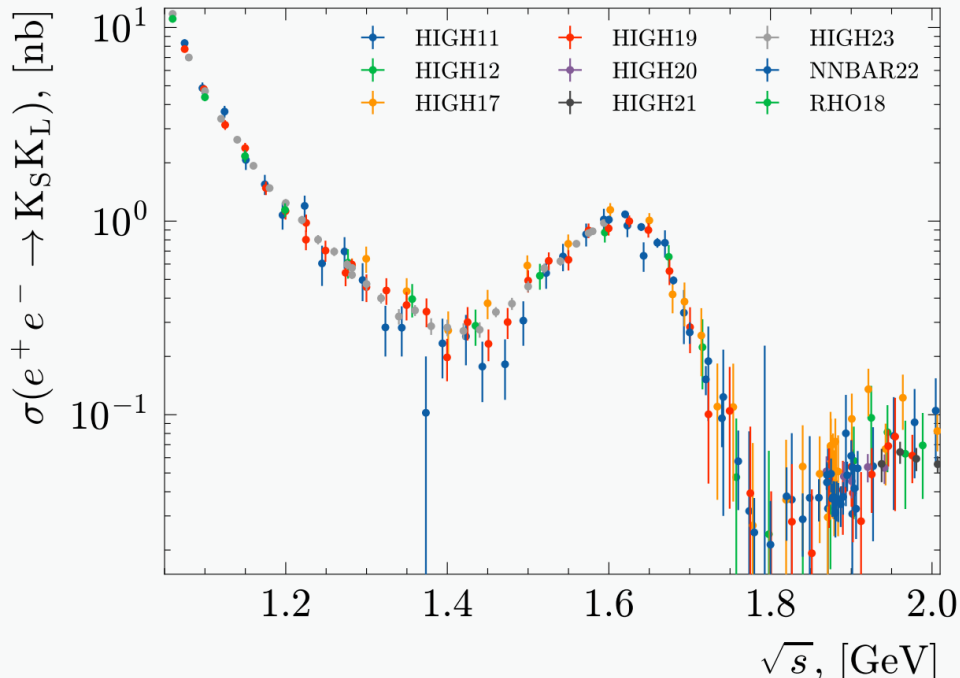
$$\begin{aligned} g_{\omega K^+ K^-} &= g_{\rho K^+ K^-} \\ &= -g_{\varphi K^+ K^-} / \sqrt{2} \end{aligned}$$

- $\delta = 0.989 \pm 0.003$



Процесс $e^+e^- \rightarrow K_S K_L$

(выше ϕ мезона)



Результаты всех сезонов сканирования

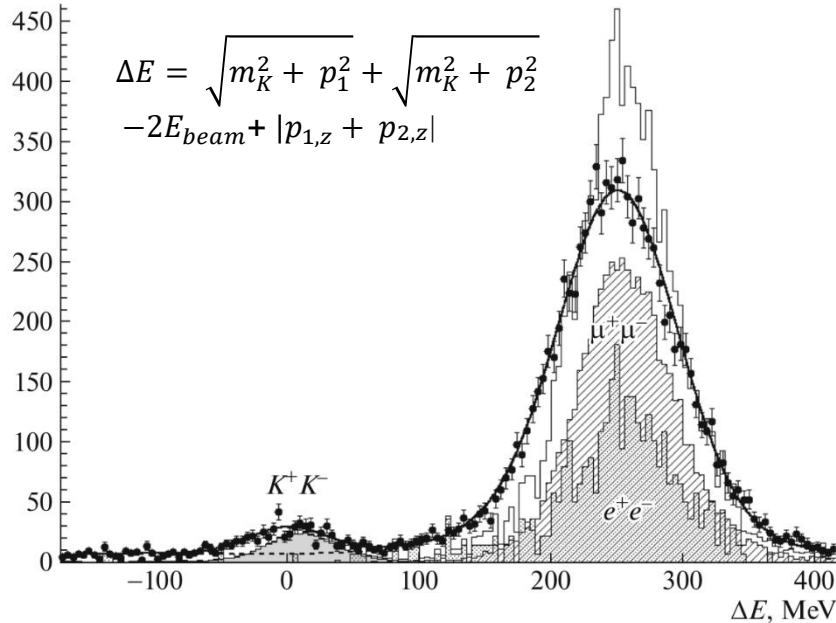
Усредненные результаты КМД-3 и сравнение с BaBar

- Интегральная светимость измерялась по двум процессам $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ и $\gamma\gamma$, точность измерения составила 1%.
- Анализ основан на интегральной светимости 763 pb^{-1} набранной в 209 точках по энергии, точность измерения которой примерно 50 кэВ (обратное комптоновское рассеяние фотонов лазера на встречном пучке).
- События выделялись в моде распада $K_S \rightarrow \pi^+\pi^-$ ($\sim 70\%$). Для анализа было отобрано $156\,566 \pm 641$ событий.
- Систематическая погрешность
 3.6% , $\sqrt{s} < 1.6 \text{ GeV}$; 4.2% , $1.6 \leq \sqrt{s} < 1.75 \text{ GeV}$; 40% , $1.75 \leq \sqrt{s} < 1.87 \text{ GeV}$; 11% , $\sqrt{s} \geq 1.87 \text{ GeV}$

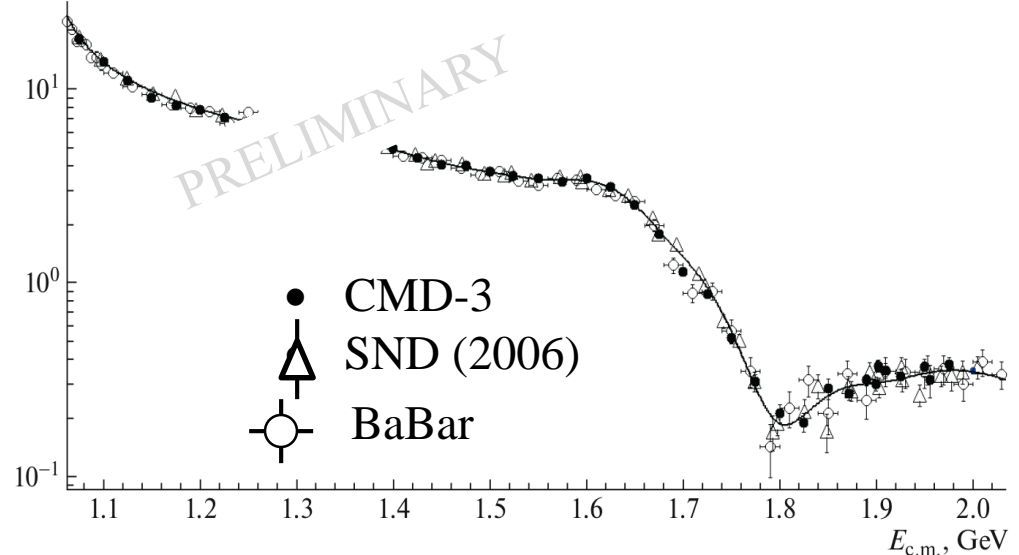
Процесс $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$ (выше ϕ мезона)



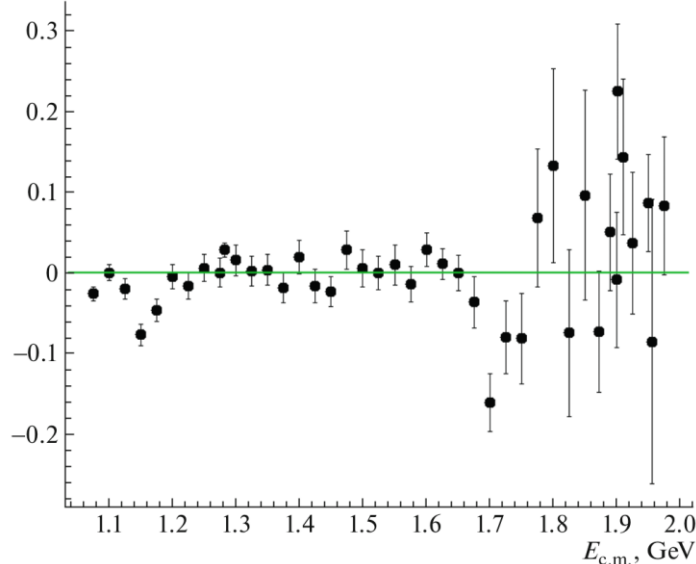
Number of events



$\sigma(e^+e^- \rightarrow K^+K^-)$, nb



$(\sigma_{CMD3} - fit)/fit$

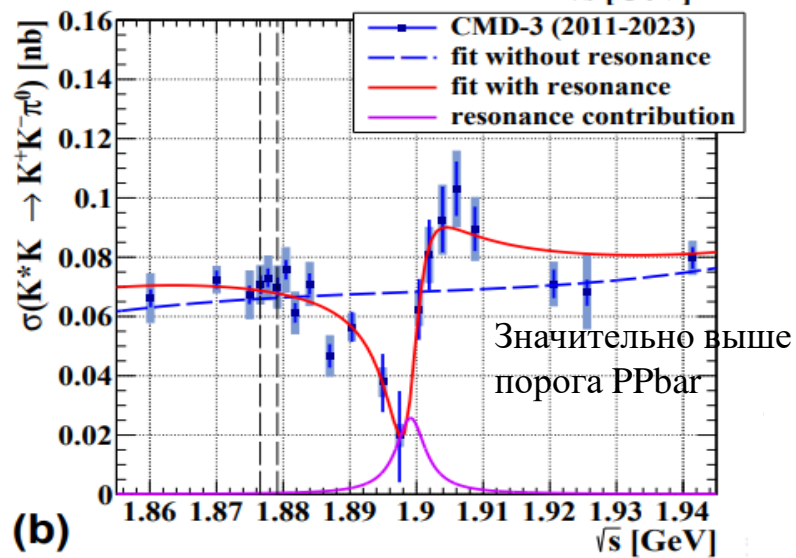
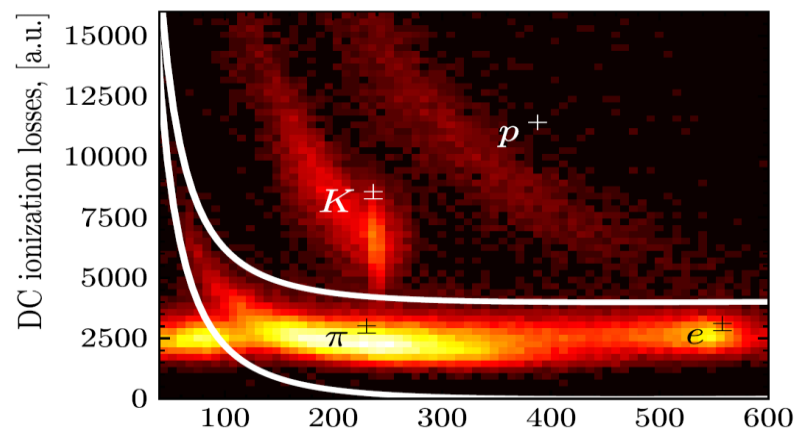
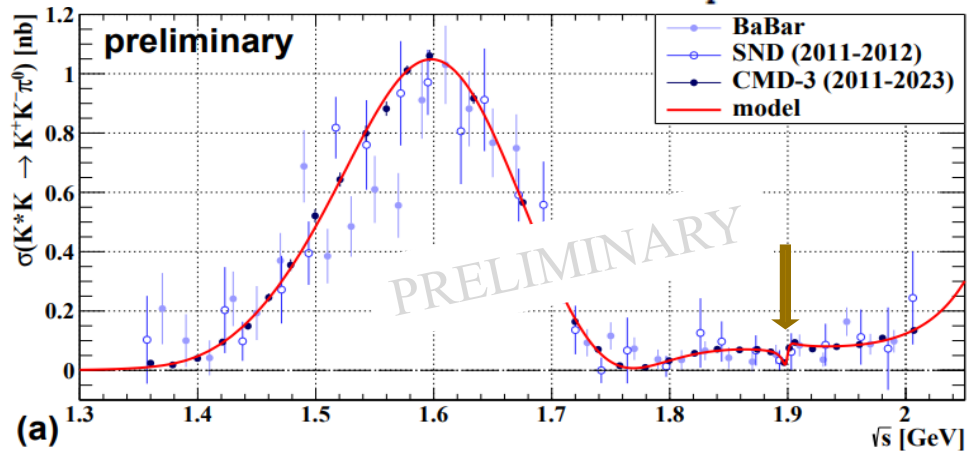
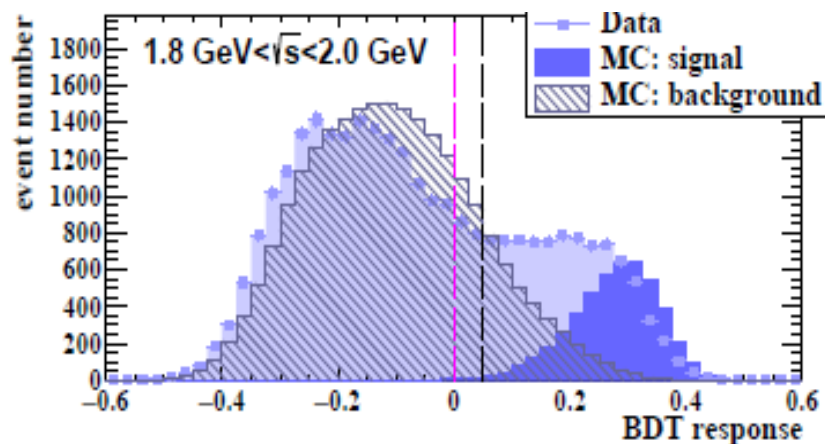


- Интегральная светимость измерялась по двум процессам $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ и $\gamma\gamma$, точность измерения составила 1% .
- Анализ основан на интегральной светимости $62,9 \text{ pb}^{-1}$ (673) набранной в 209 точках в диапазоне энергии от 1075 до 1975 МэВ, точность измерения которой примерно 50 кэВ (обратное комптоновское рассеяние фотонов лазера на встречном пучке).
- Подавление физического фона $e^+e^- \rightarrow e^+e^-(\gamma)$, $\mu^+\mu^-(\gamma)$, and $\pi^+\pi^-(\gamma)$ и космических мюонов основано на информации dE/dx в 14 слоях ксенонового калориметра
- Для каждого трека вычисляются классификаторы на основе решений (BDT), обученных для оптимального разделения различных пар заряженных частиц в определенных диапазонах углов и импульсов: BDT(e^\pm, μ^\pm), BDT(e^\pm, π^\pm), BDT(e^\pm, K^\pm), BDT(μ^\pm, π^\pm), BDT(μ^\pm, K^\pm) и BDT(π^\pm, K^\pm). Эти отклики используются для отбора каонов и подавления фоновых процессов, включающих e^\pm, μ^\pm и π^\pm .



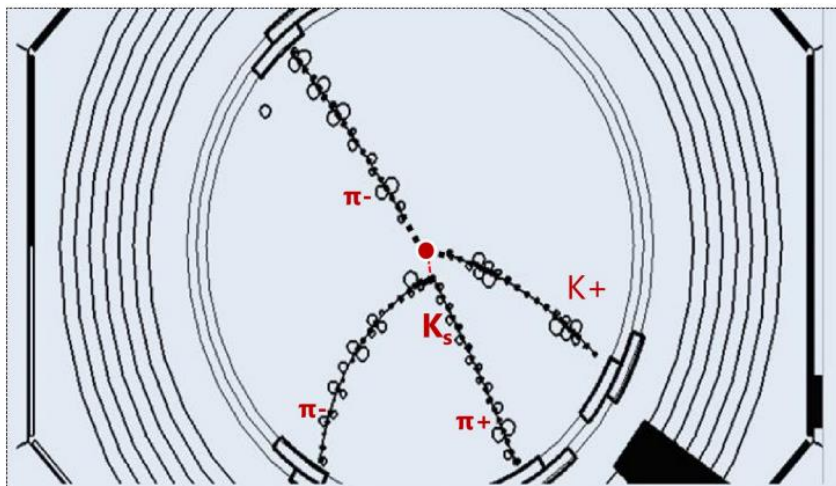
Анализ процесса $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^0$

- Данные набраны в диапазоне энергий от 1045 до 2006 МэВ, которая измерялась с точностью 50 кэВ.
- Анализ статистики основан на интегральной светимости $\sim 676 \text{ пб}^{-1}$, которая измерялась с точностью $\sim 1\%$.
- Основной физический фон составляли процессы $K^+K^-\pi^+\pi^-$, $\pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$, $K^\pm\pi^-/+K_S(K_S \rightarrow \pi^+\pi^-)$. Пионы эффективно подавляются условием на dE/dx в ДК и ксеноновом калориметре.
- K/π разделение основано на применении BDT с 15 входными аргументами, которая оптимально настроена на событиях моделирования.

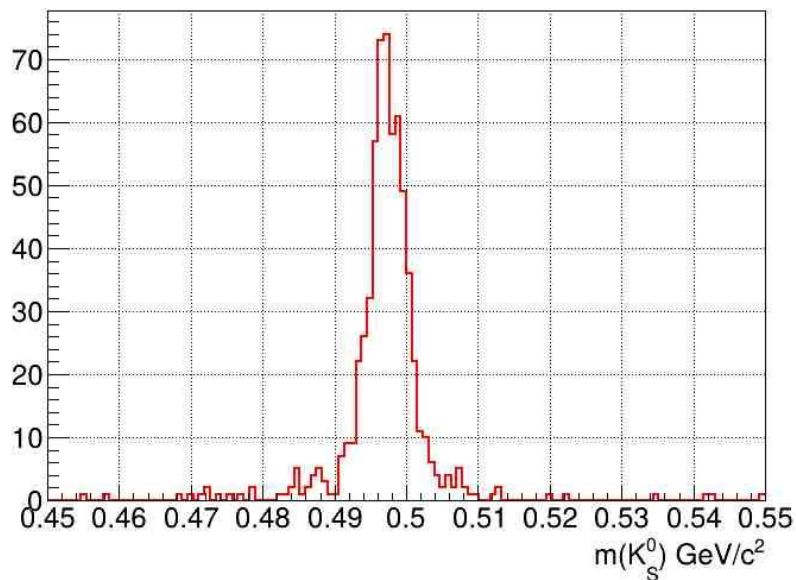
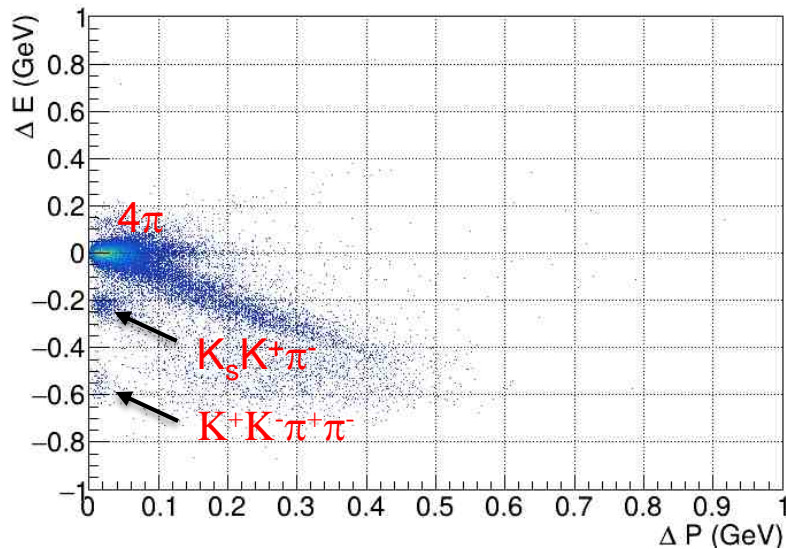




Процесс $e^+e^- \rightarrow K_S K \pi$ будет доклад П.А.Лукина



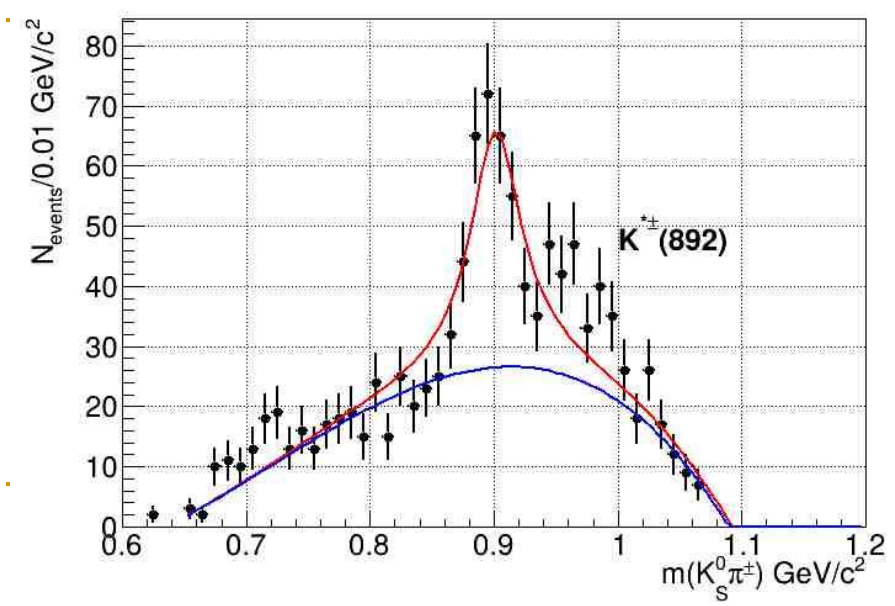
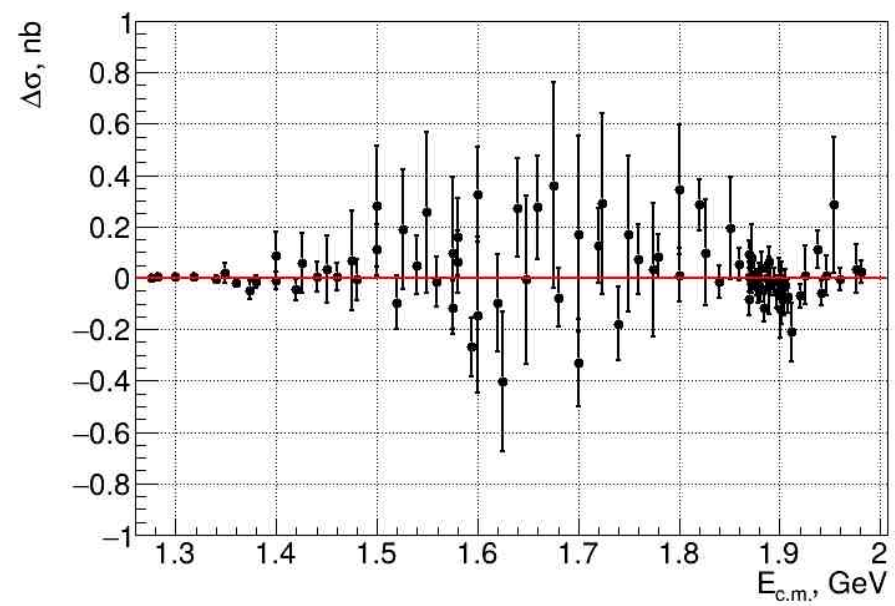
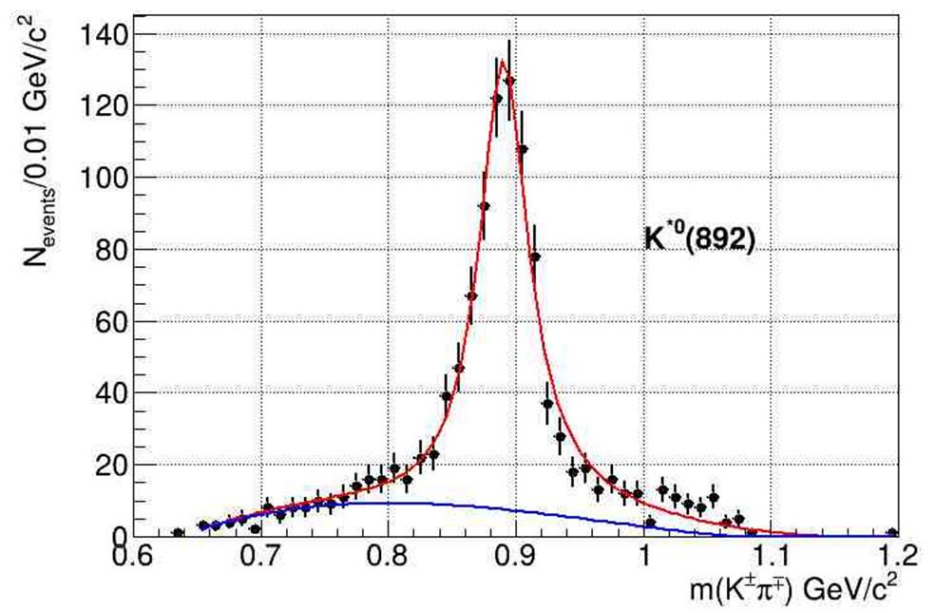
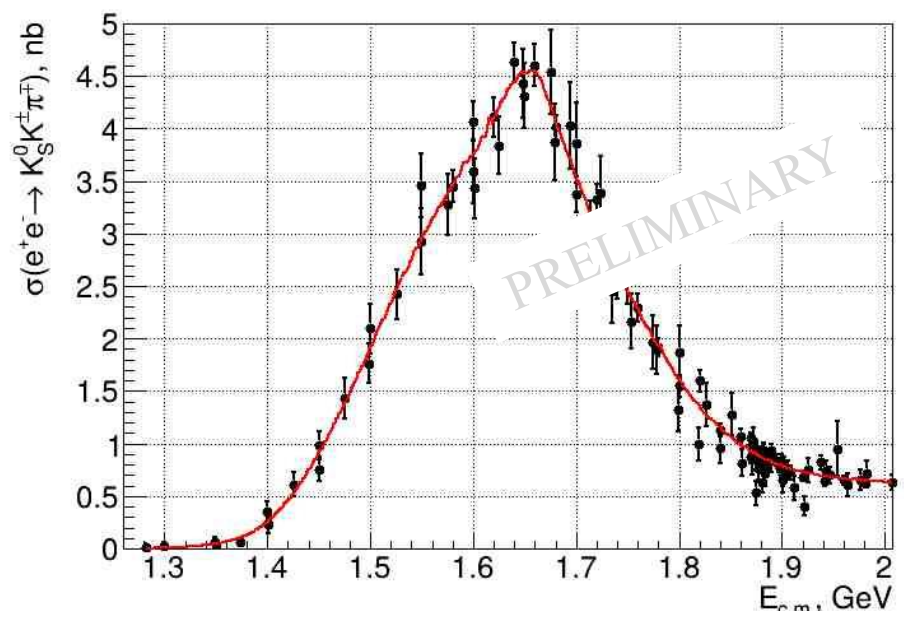
- 4 и более заряженных треков
- $r < 0.1$ см
- $|Z| < 12$ см
- $60 < P_{\text{tot}} < 800$ МэВ/с
- $N_{\text{hit}} > 10$
- $0.8 < \theta < \pi - 0.8$
- Трекам приписана масса пиона
- Полный заряд $Q_{\text{tot}} = 0$



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



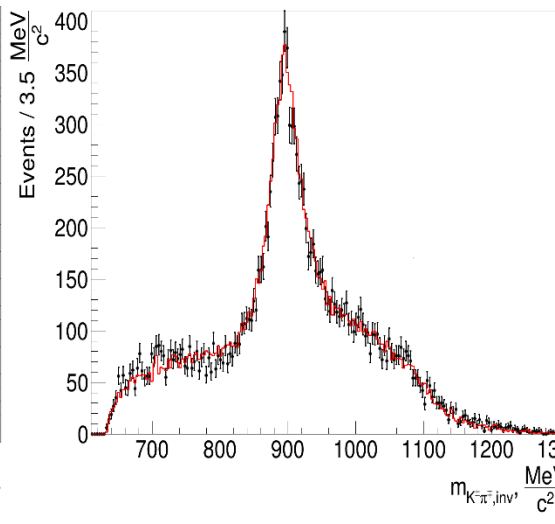
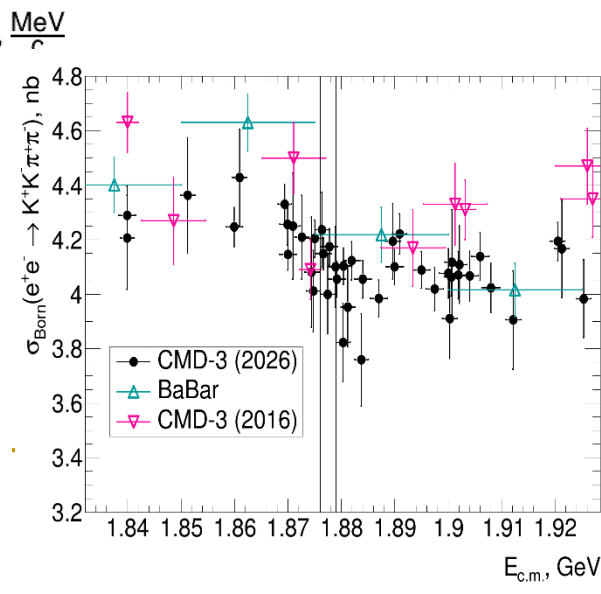
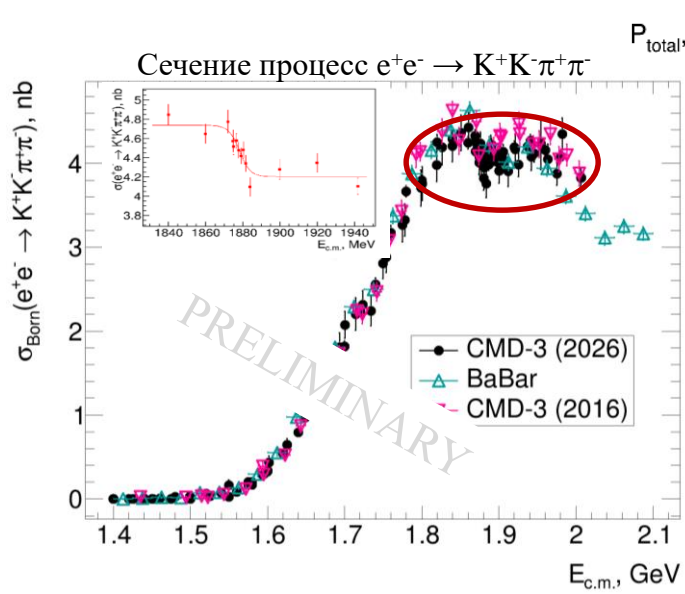
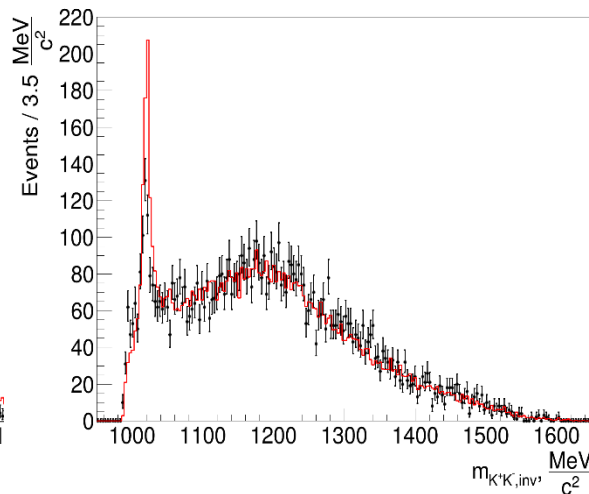
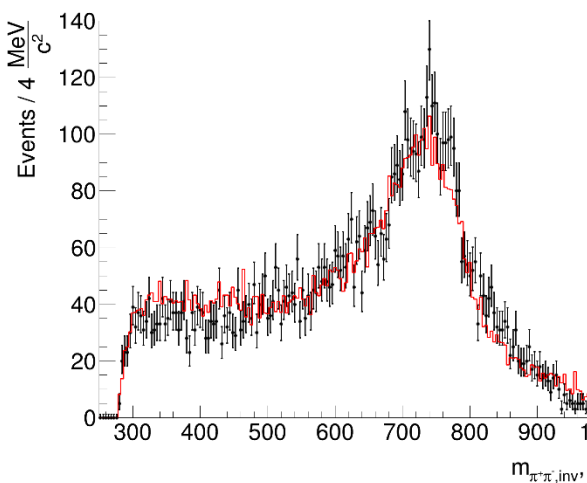
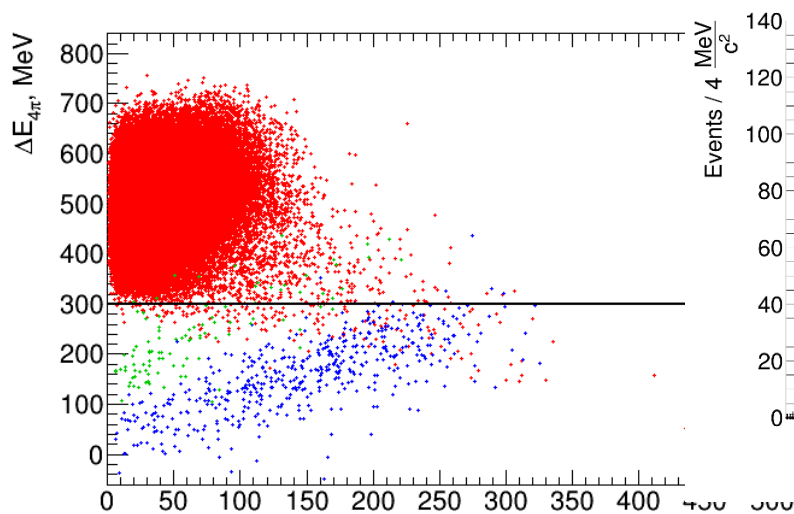
Аппроксимация сечения с ρ', ϕ', ρ''



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



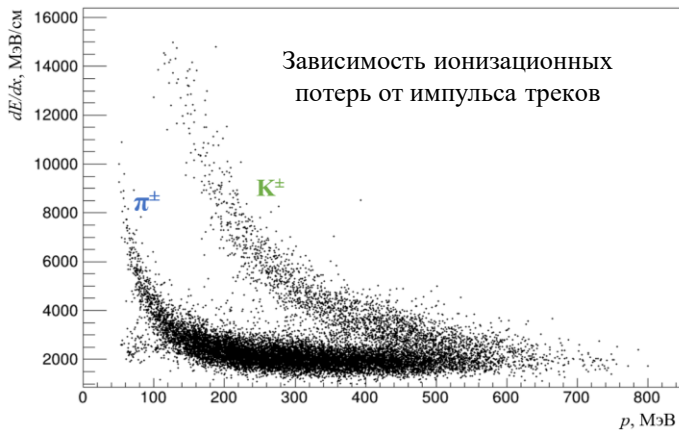
- Анализ основан на интегральной светимости 540 пб-1, набранной в сезонах 2017-2023 гг.
- Отбираются 4 хороших треков из VIP. В итоге отобрано примерно 150 000 событий
- К/π разделение основано на измерении ионизационных потерь в ДК
- Применяется кинематическая реконструкция для подавления физического фона (в основном 4π)
- Последний CUT – дисбаланс по энергии. Всем трекам приписана масса пионов





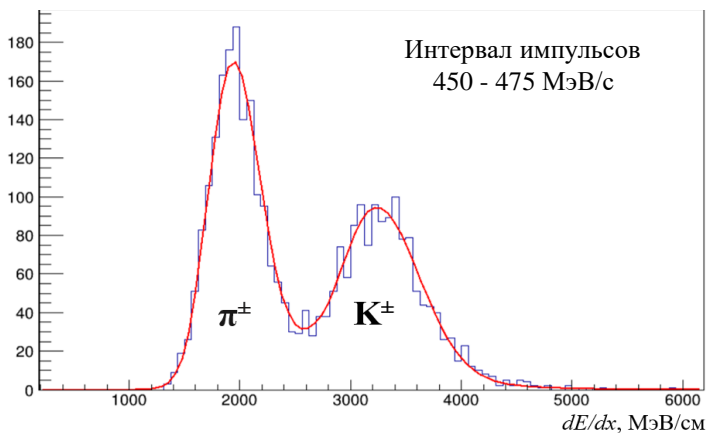
Процесс $e^+e^- \rightarrow K_S K_L \pi^+ \pi^-$

Для подавление событий с заряженными каонами применяется методика К/π разделения, основанная на измерении ионизационных потерь в ДК

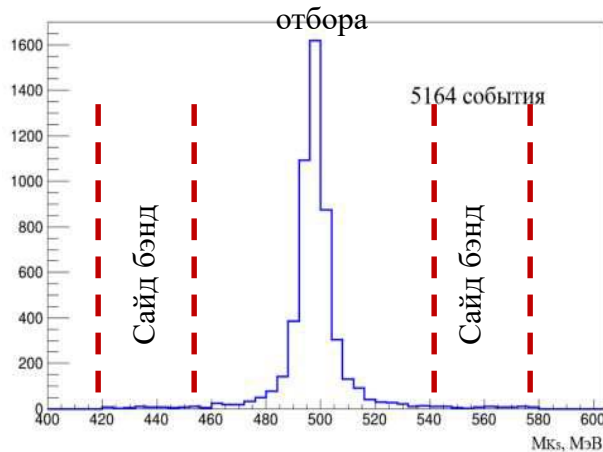


Распределение по ионизационным потерям: Каждая PDFфункция является суммой нормального и логарифмически-нормального распределения. На их основе строится логарифмическая функция правдоподобия в сигнальной гипотезе (4 заряженных пиона, i – индекс трека)

$$L_{\pi\pi\pi\pi} = \ln \frac{\prod f_{\pi}^i(p, dE/dx)}{\prod [f_{\pi}^i(p, dE/dx) + f_K^i(p, dE/dx)]}$$



Распределение сигнальных событий после всех критериев отбора



Фоновая подложка (метод «сайд-бэнд») составила ~ 3% (153 события)

Моделирование - пик в сигнальной области от процесса $e^+e^- \rightarrow K_S K_S \pi^+ \pi^-$ (5%, ~248)

Полное число событий с вычетом фона составило 4763 ± 72 .

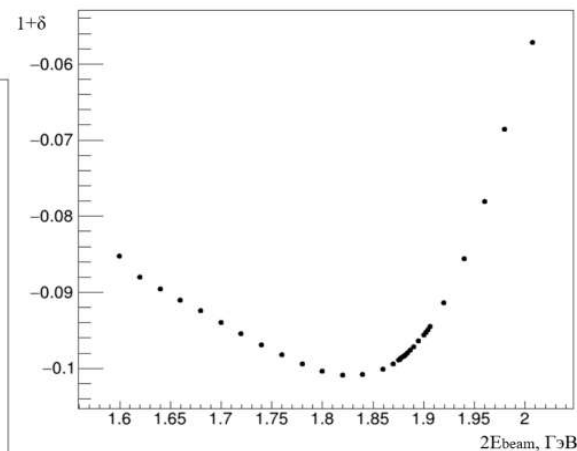
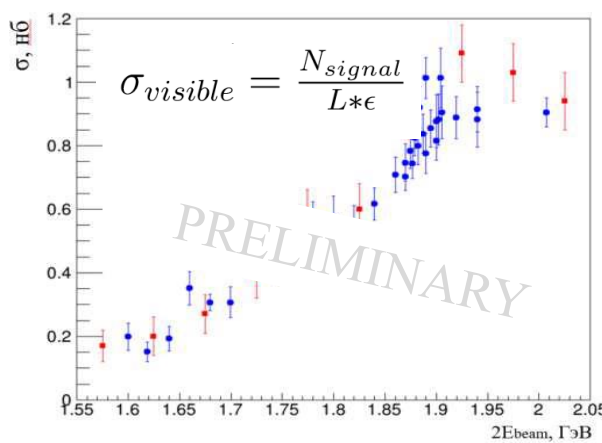
$$\sigma_{visible} = \frac{N_{signal}}{L * \epsilon}$$

$$\sigma_{born} = \sigma_{vis} / (1 + \delta)$$

$$\sigma_{visible}(s) = \int_0^{\epsilon} dx \sigma_{born}(s(1-x)) F(x, s)$$

Радиационная поправка $(1 + \delta)$ вычисляется итерационным методом. Достаточно 3 – 5 итераций, чтобы получить точность масштаба 1%.

Сечение процесс $e^+e^- \rightarrow K_S K_L \pi^+ \pi^-$





1. Measurement of the $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ cross section from threshold to 1.2 GeV with the CMD-3 detector, CMD-3 Collaboration Phys.Rev.D 109 (2024)11,112002. e-Print: 2302.08834. **323 citations**
2. Study of the process $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\eta$ with the CMD-3 detector at the VEPP-2000 collider Phys.Lett.B 798 (2019) 134946. **32 citations**
3. Study of the process $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$ in the center-of-mass energy range 1010--1060~MeV with the CMD-3 detector. Phys.Lett.B 779 (2018) 64-71, e-Print: 1710.02989 [hep-ex] **62 citations**
4. Study of the process $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\eta$ in the center-of-mass energy range 1004--1060 MeV with the CMD-3 detector at the VEPP-2000 e^+e^- collider. CMD-3 Collaboration. Phys.Lett.B 760 (2016) 314-319, e-Print: 1604.02981 [hep-ex] **63 citations**
5. Measurement of the $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^+\pi^-$ cross section with the CMD-3 detector at the VEPP-2000 collider. CMD-3 Collaboration. Phys.Lett.B 756 (2016) 153-160, e-Print: 1510.00654 [hep-ex] **8 citations**
6. Investigation of the processes $e^+e^- \rightarrow 2(\pi^+\pi^-\pi^0)$ and $e^+e^- \rightarrow 3(\pi^+\pi^-)$ with the aid of the CMD-3 detector. CMD-3 Collaboration. Phys.Atom.Nucl. 78 (2015) 3, 353-357, Yad.Fiz. 78 (2015) 5, 383-387 **14 citations**
7. Search for the process $e^+e^- \rightarrow \eta'(958)$ with the CMD-3 detector. Phys.Lett.B 740 (2015) 273-277, e-Print: 1409.1664 [hep-ex]. CMD-3 Collaboration. **33 citations**
8. Study of the process $e^+e^- \rightarrow 3(\pi^+\pi^-)$ in the c.m.energy range 1.5--2.0 gev with the cmd-3 detector. CMD-3 Collaboration. Phys.Lett.B 723 (2013) 82-89, e-Print: 1302.0053 [hep-ex]. **92 citations**
9. ~~Current status of the luminosity measurement with the CMD-3 detector at the VEPP-2000 e^+e^- collider. CMD-3 Collaboration. Nucl.Phys.B 225-227(2012) 69-71. **18 citations**~~



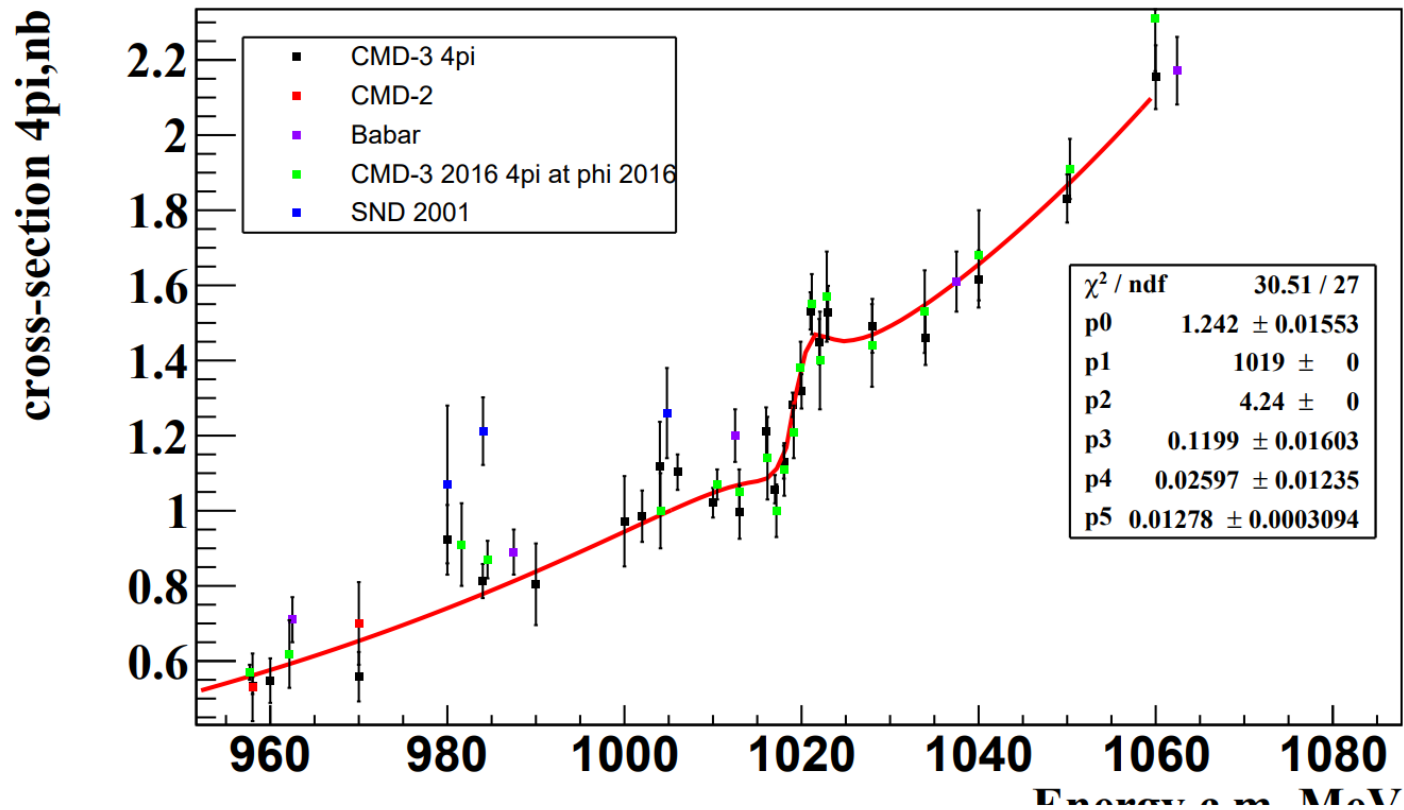
Заключение

- В области энергий коллайдера ВЭПП-2000 получены предварительные результаты измерения сечений основных процессов, дающих основной вклад в АММ мюон ($\sim 93\%$).
- Анализ основан на статистике, набранной во всех сезонах работы коллайдера ВЭПП-2000, начиная с 2011 до 2022 г, которая составила $\sim 1000 \text{ pb}^{-1}$.
- Текущая системат. погрешность адронных сечений, дающих основной вклад в АММ мюона, меняется от 0.7% до 3%. В будущем систематическую погрешность надо будет улучшить минимум в два раза. (BNL - 0,11 ppm).
- В настоящее время ведется новый набор статистики в области энергий ρ - ω мезонов (ниже 1 ГэВ), которая должна превысить предыдущую **примерно в два раза**.
- Энергия пучков в этих экспериментах измеряется с точностью 50 кэВ на основе методики ОКР фотонов лазера.
- В области энергий выше 1 ГэВ имеются десятки каналов типа ККпл и многопионные процессы, которые ждут своего тщательного анализа. **Приглашаем всех желающих для совместного анализа набранной и будущей статистики.**
- Добавить в анализ новую статистику, набранную в 23, 24 и 25 гг.
- Разработать дополнительные (универсальные) критерии выделения сигнальных событий и подавления физического фона.
- В следующем сезоне планируется продолжение набора статистики и затем остановка (условно на три года) на инженерную модернизацию комплекса ВЭПП-2000 и детекторов КМД-3 и СНД.

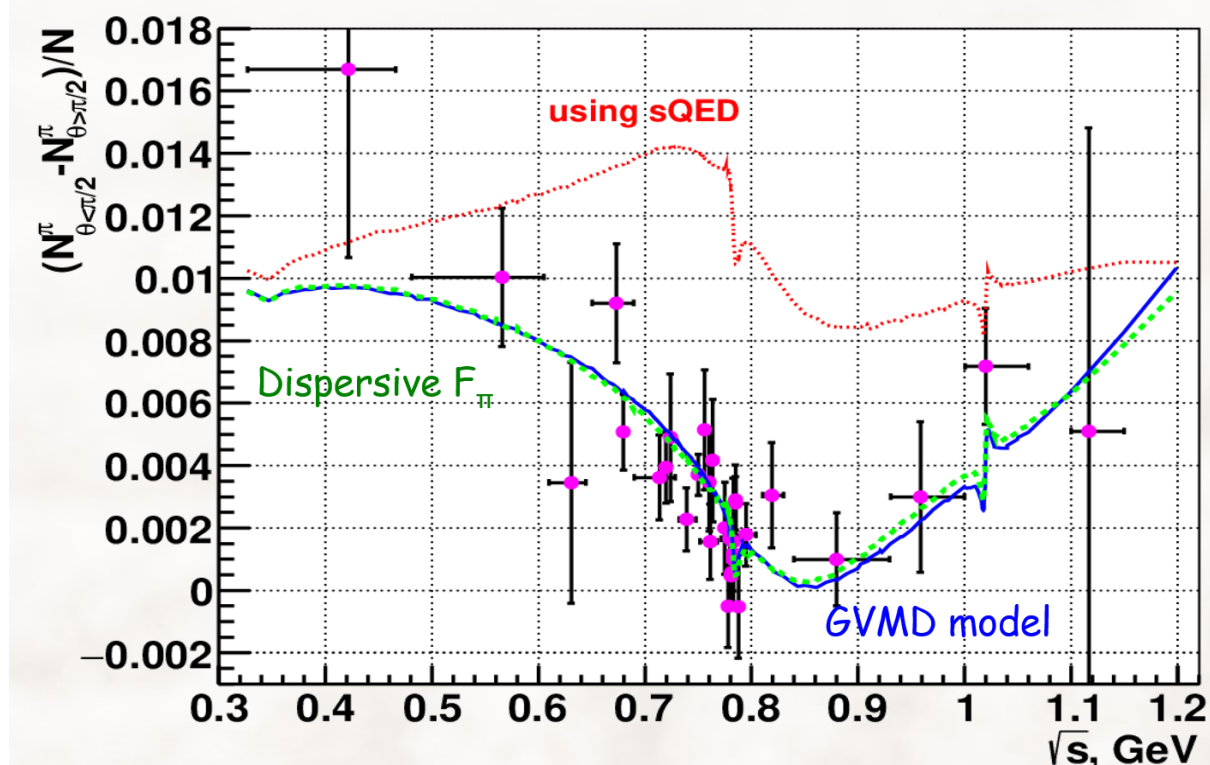
Сечение $e + e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+ \pi^-$: ϕ мезон

Предварительно:

Energy dependence of cross-section $2\pi+2\pi$



- Анализ закончен, ожидаем драфт статьи



Цель:

- Проверить зарядовую асимметрию
- Формфактор пиона
- Редкие процессы на \mathbf{r} и \mathbf{w}