

Последние новости с детектора КМД-3 на коллайдере ВЭПП-2000 (ИЯФ СО РАН)

Петр Анатольевич Лукин
(Коллаборация КМД-3)



9 октября 2025 года, Томский Государственный
Университет



План

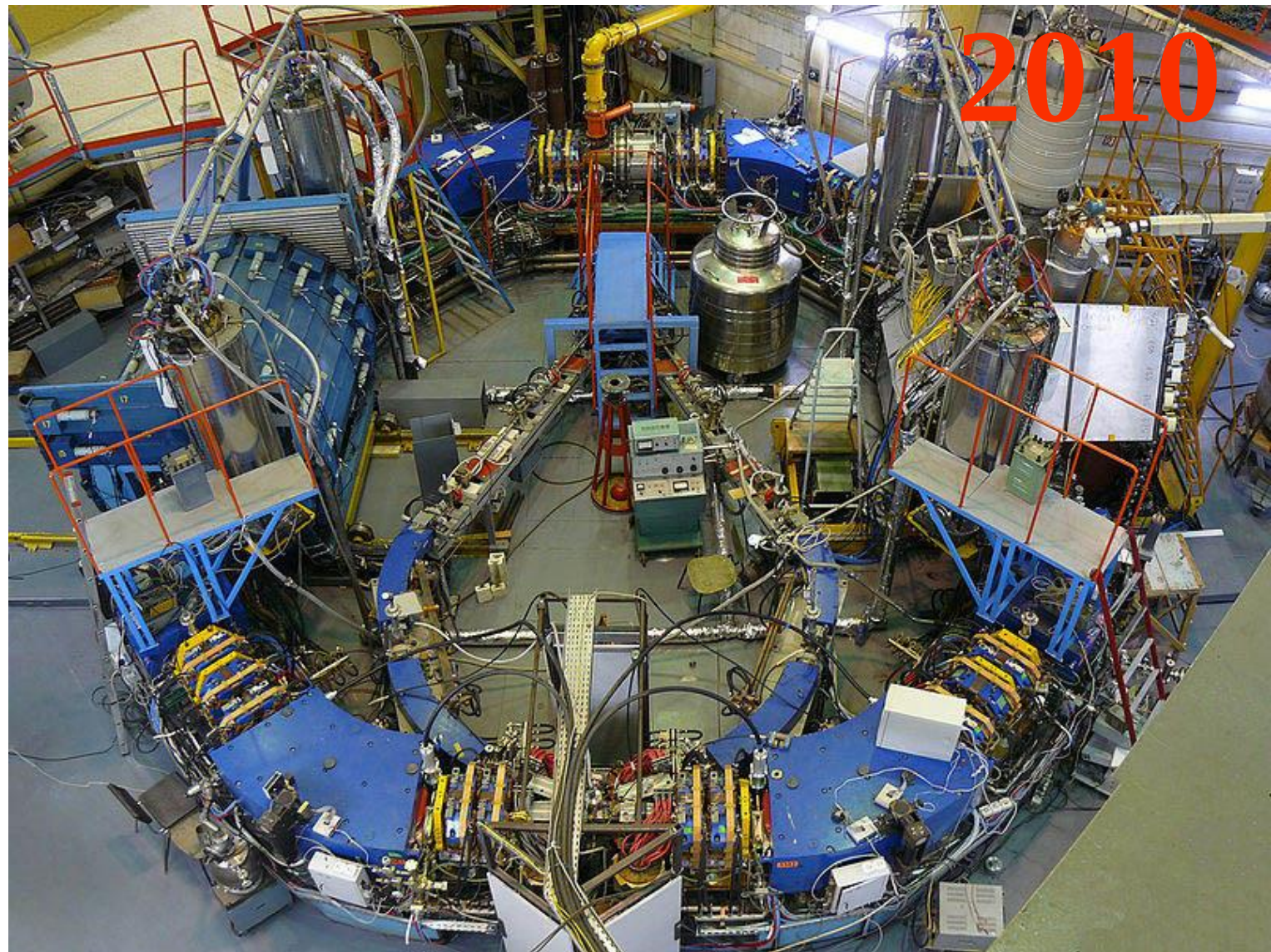
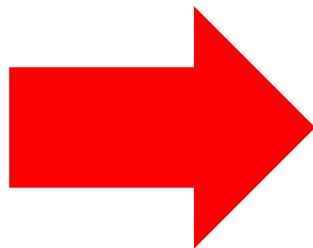
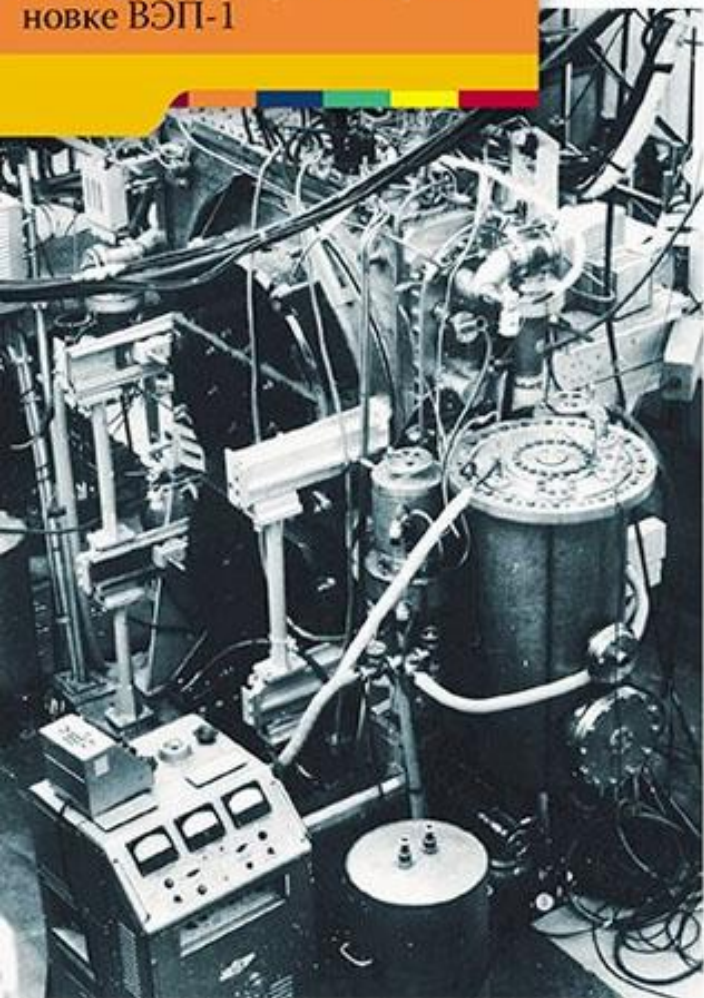
- ☐ История
- ☐ Коллайдер
- ☐ Детектор
- ☐ Эксперимент
- ☐ Проект нового коллайдера ИЯФ
- ☐ Заключение

ИЯФ ИМЕНИ Г.И. БУДКЕРА СО РАН



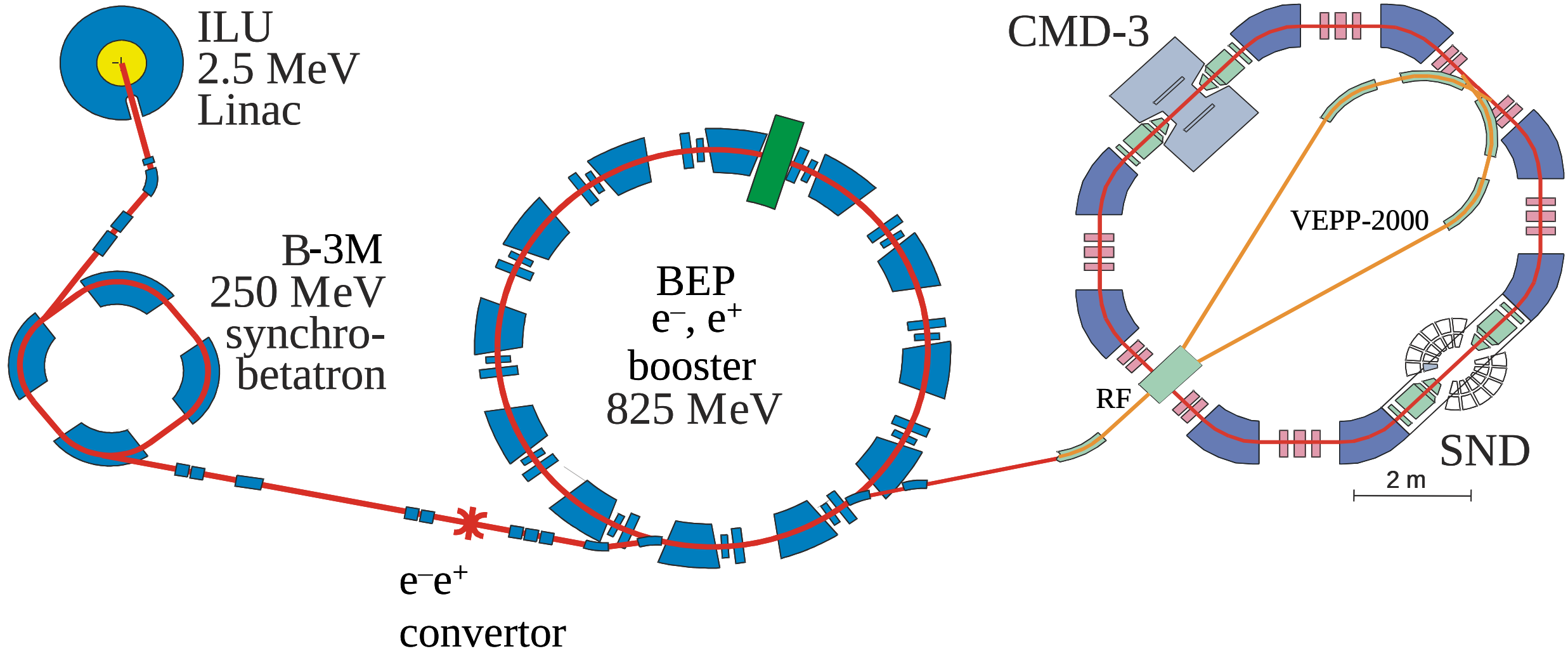
ИСТОРИЯ

1964 Получены
первые встречные
электронные пучки на уста-
новке ВЭП-1

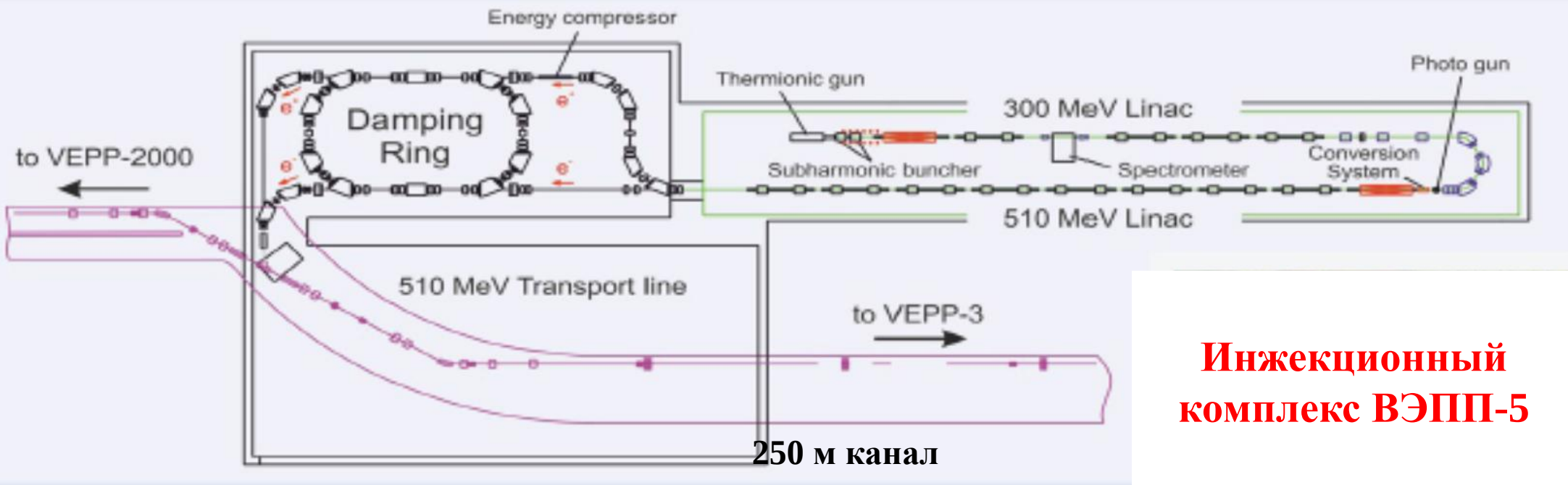


2010

ВЭПП-2000 (2010-2013)



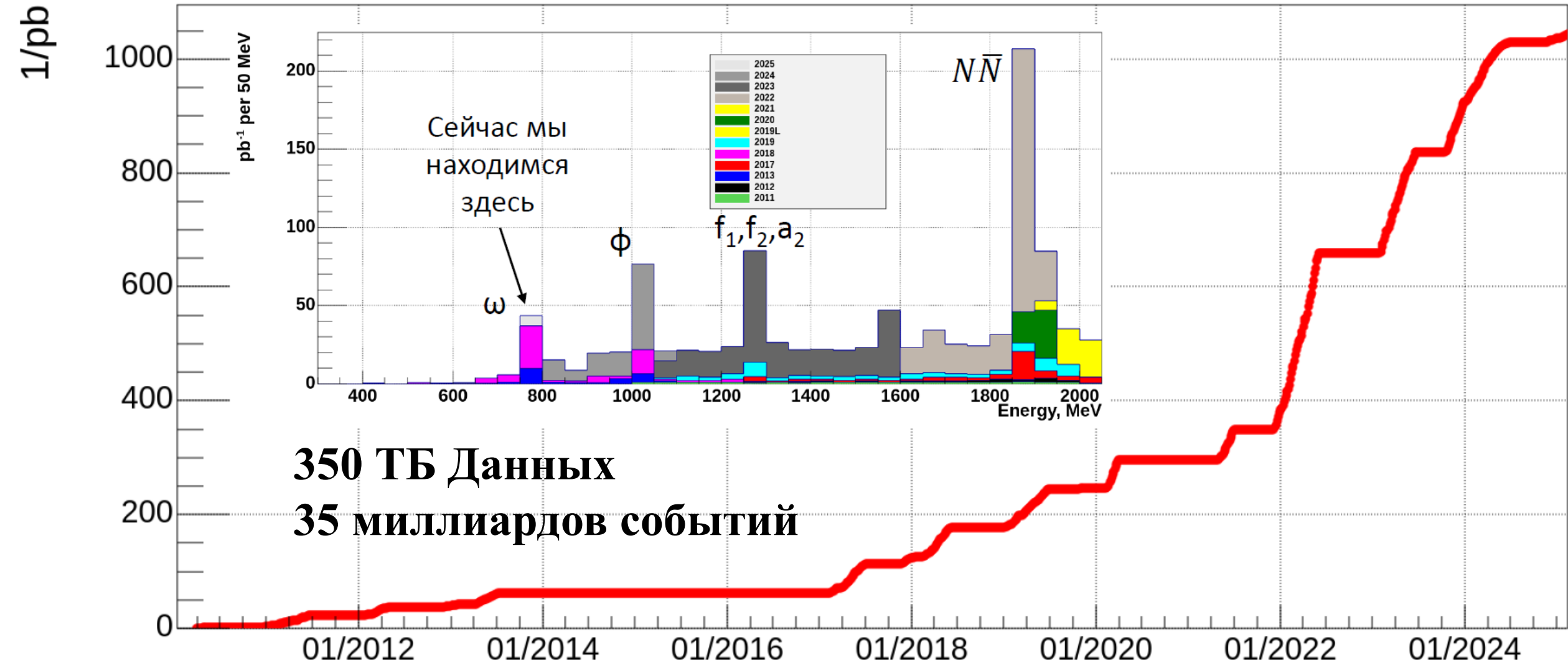
Модернизация ВЭПП-2000 в 2013 – 2016 (Инжекционный комплекс)



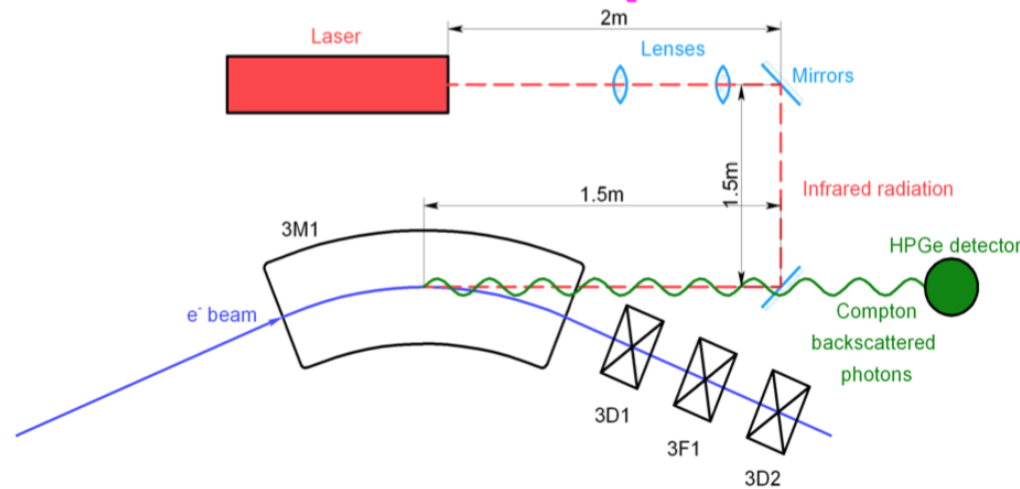
**Инжекционный
комплекс ВЭПП-5**



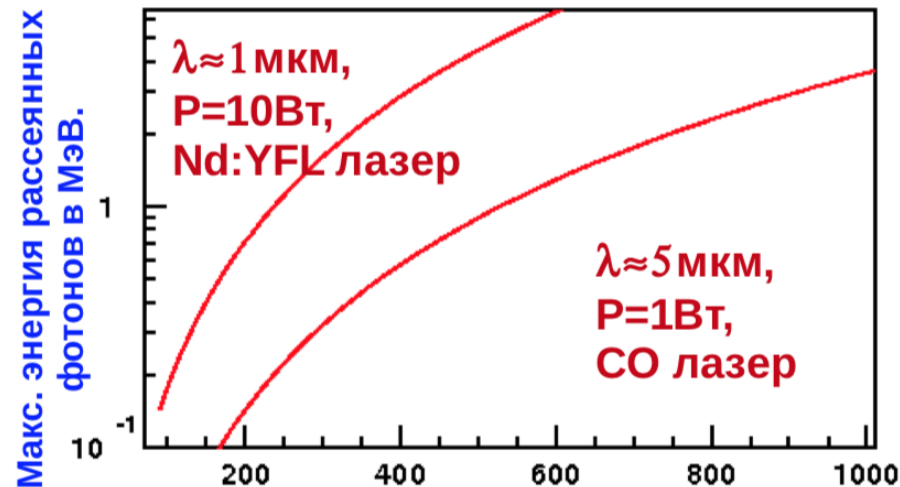
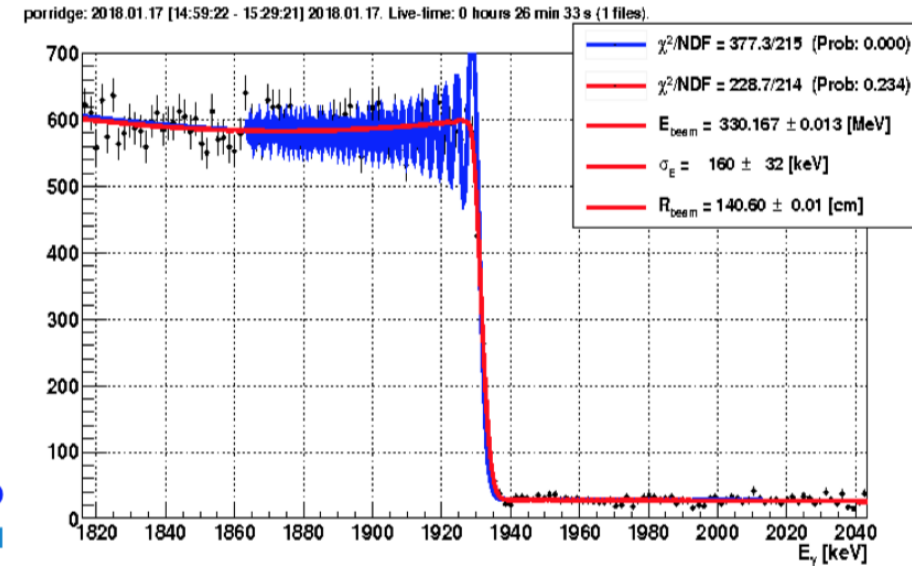
НАБОР ДАННЫХ НА ВЭПП-2000



ИЗМЕРЕНИЕ ЭНЕРГИИ ПУЧКА В ВЭПП-2000



Энергия пучка ВЭПП-2000 измеряется по положению края спектра рассеянных фотонов. Точность измерения около 30кэВ.



Энергия пучка ВЭПП-2000 в МэВ.

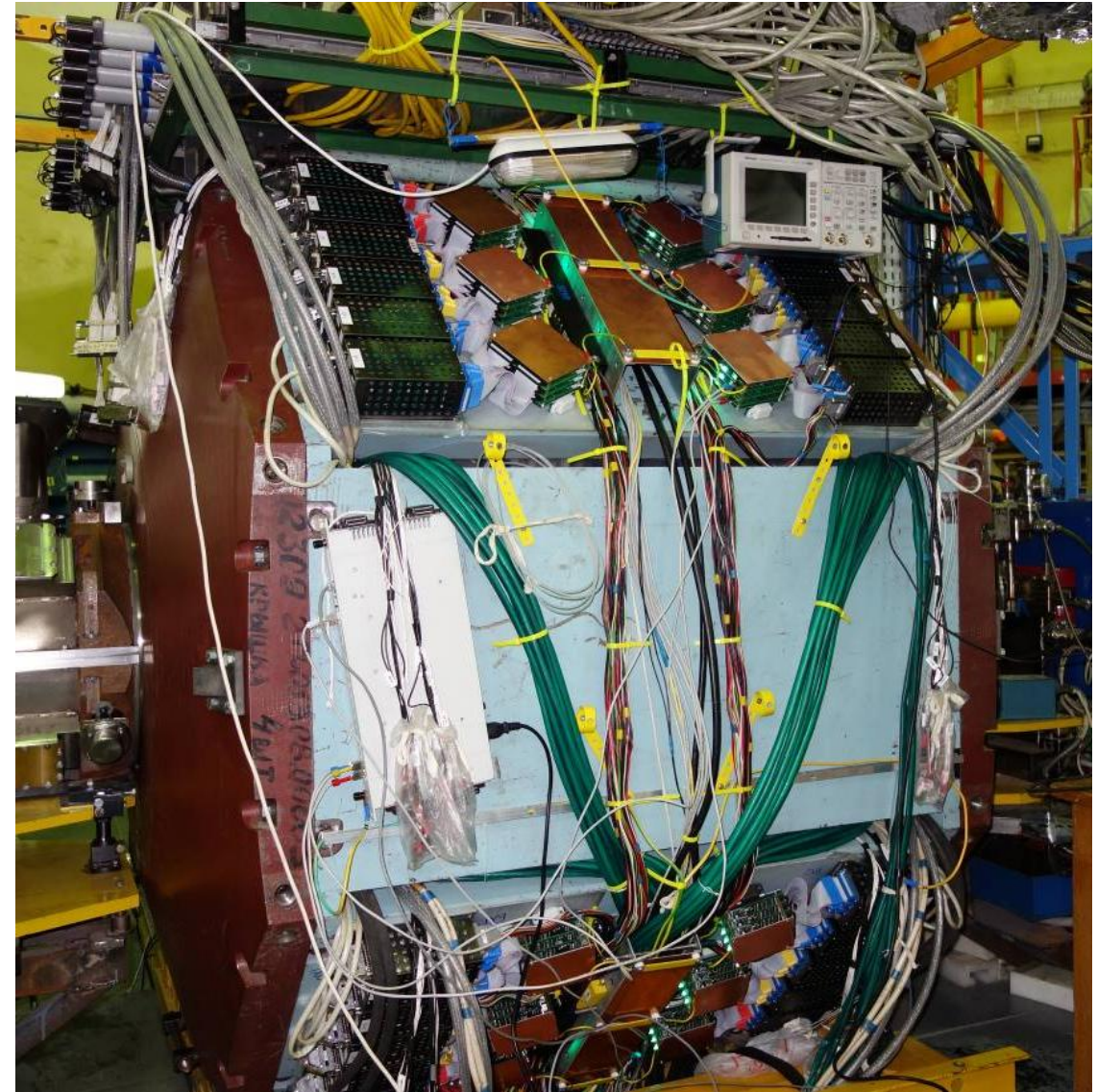
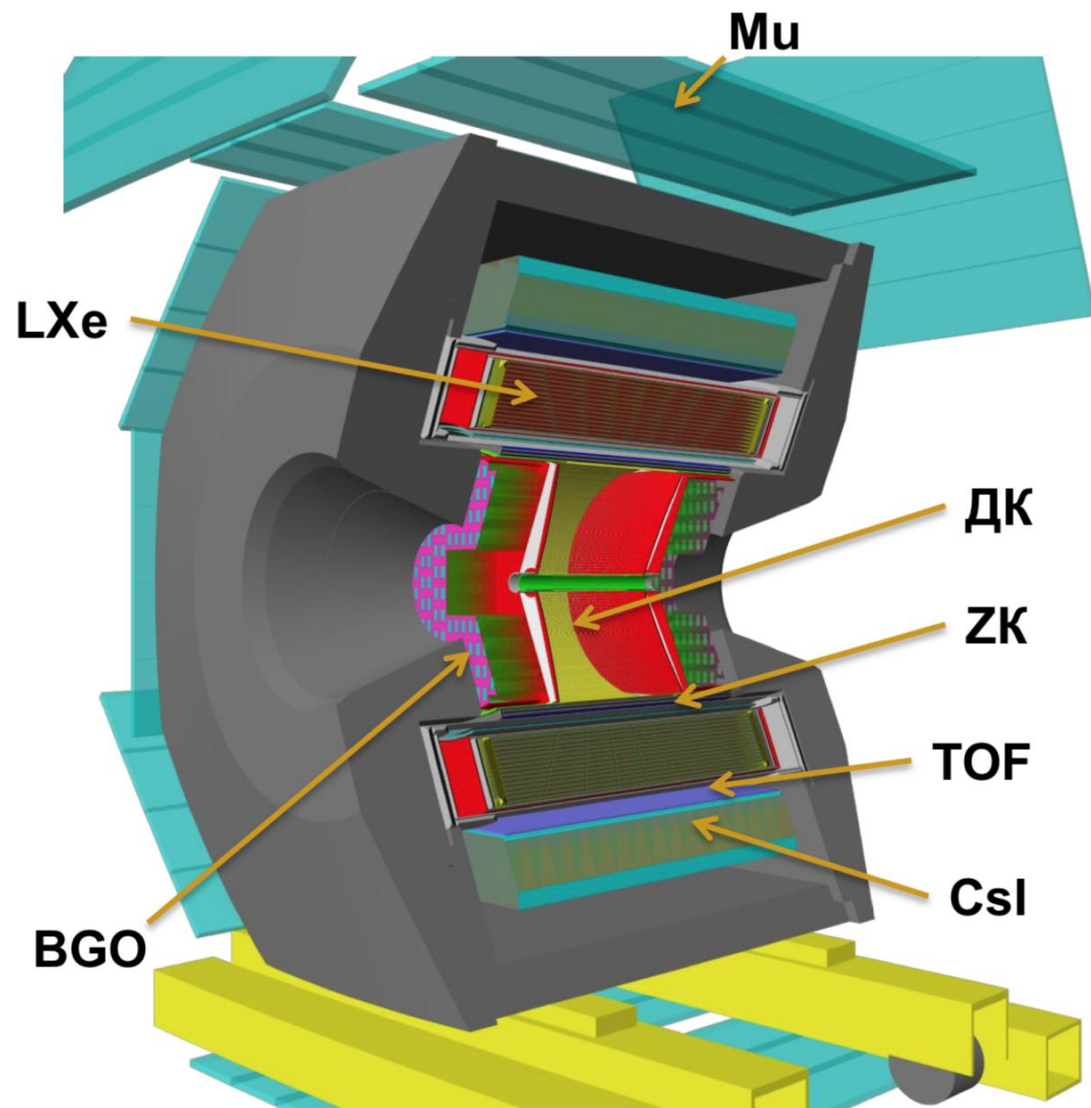
Два источника фотонов:

иттербиевый и СО лазеры.

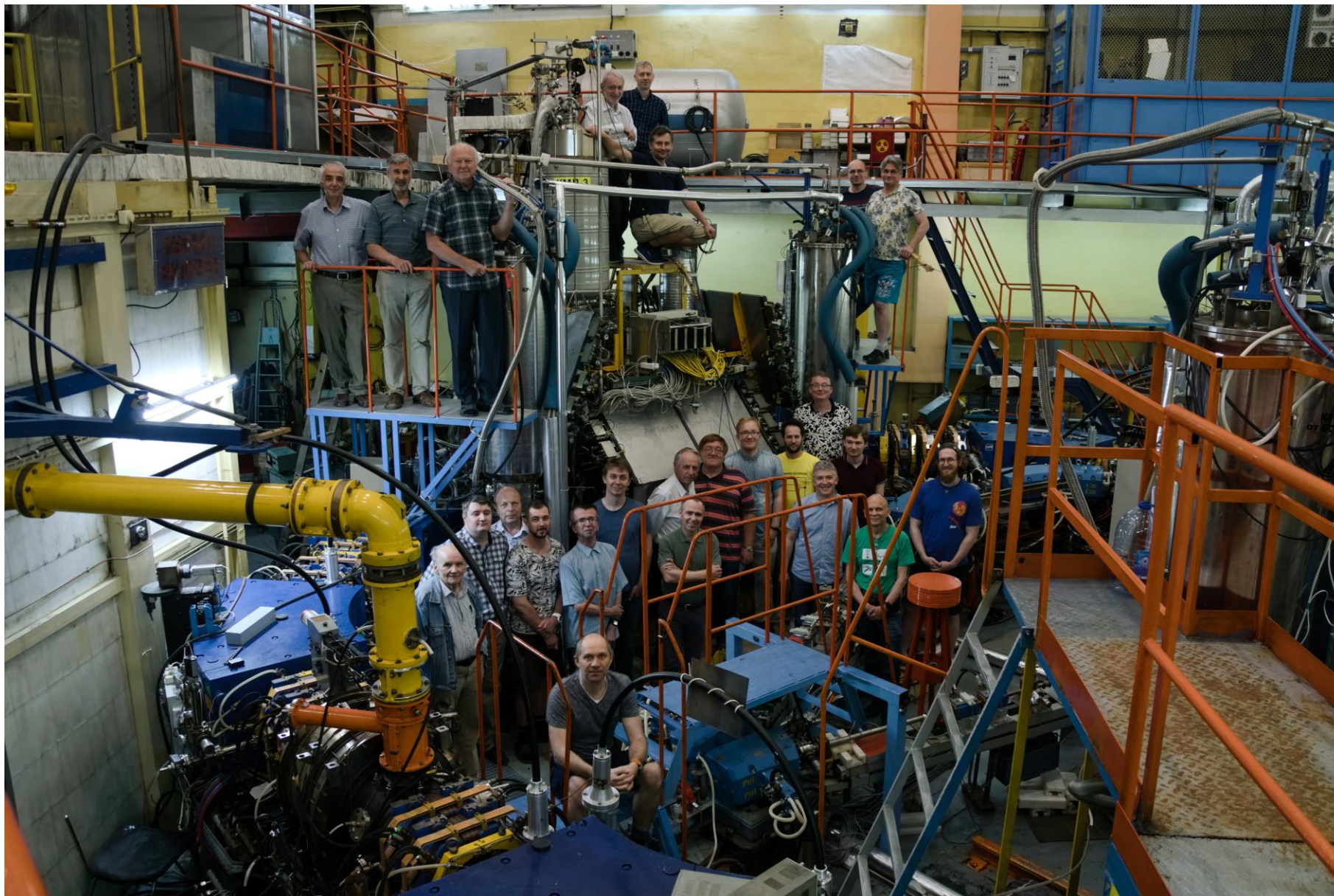
СО для энергии выше 500 МэВ,

Nd:YAG для энергии до 500 МэВ.

ДЕТЕКТОР КМД-3



КОМАНДА ДЕТЕКТОРА КМД-3



Что мы измеряем ?

$$\sigma = \frac{N_{\text{канд}} - N_{\text{фон}}}{\int \mathcal{L} dt \cdot \varepsilon \cdot (1 + \delta)}$$

$N_{\text{канд}}$ — число событий «кандидатов»

$N_{\text{фон}}$ — число фоновых событий

$\int \mathcal{L} dt$ — интегральная светимость

ε — эффективность регистрации

$(1 + \delta)$ — радиационная поправка

Эксклюзивные процессы $e^+e^- \rightarrow hadrons$

- 2 заряженные

$$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-, K^+K^-, K_S K_L, p\bar{p}$$

- 2 заряженные + γ

$$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0, \pi^+\pi^-\eta, K^+K^-\pi^0, K^+K^-\eta, K_S K_L \pi^0, \pi^+\pi^-\pi^0\eta, \\ \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0, \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0\pi^0, \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0\pi^0\pi^0$$

- 4 заряженные

$$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-, K^+K^-\pi^+\pi^-, K_S K^*$$

- 4 заряженные + γ

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

- 6 заряженных

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

- Только γ

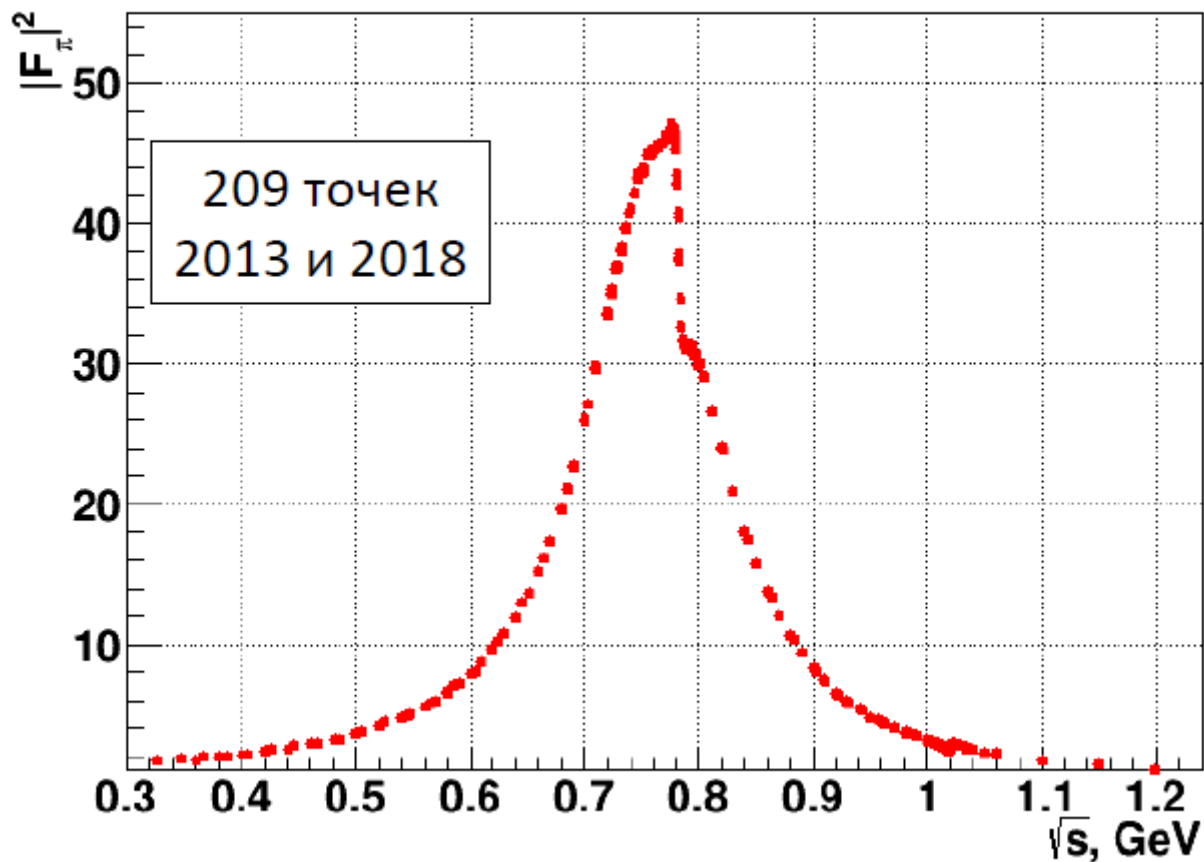
$$e^+e^- \rightarrow \pi^0\gamma, \eta\gamma, \pi^0\pi^0\gamma, \pi^0\eta\gamma, \pi^0\pi^0\pi^0\gamma, \pi^0\pi^0\eta\gamma$$

- остальные

$$e^+e^- \rightarrow n\bar{n}, \pi^0 e^+e^-, \eta e^+e^-$$

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

$$\sigma(\pi^+\pi^-) = \frac{\pi\alpha^2}{3s} \beta_\pi^3 |F_\pi|^2$$



Эксперимент длился 10 лет

Большая статистика

- 34 000 000 $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$
- 3 700 000 $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$
- 44 000 000 $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$

Перекрестные проверки

3 метода разделения e , π и μ

2 метода измерения полярного угла

Измерение $\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)$ ниже 0.73 ГэВ

Измерение зарядовой асимметрии

Детальный анализ источников систематики

Phys.Rev.Lett. 132 (2024) 23, 231903

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

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

Phys.Rev.Lett. 132 (2024) 23, 231903

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

PHYSICAL REVIEW LETTERS **132**, 231903 (2024)

Editors' Suggestion

Measurement of the Pion Form Factor with CMD-3 Detector and Its Implication to the Hadronic Contribution to Muon ($g-2$)

F. V. Ignatov^{1,2,*} R. R. Akhmetshin,^{1,2} A. N. Amirkhanov,^{1,2} A. V. Anisenkov,^{1,2} V. M. Aulchenko,^{1,2} N. S. Bashtovoy,¹ D. E. Berkaev,^{1,2} A. E. Bondar,^{1,2} A. V. Bragin,¹ S. I. Eidelman,^{1,2} D. A. Epifanov,^{1,2} L. B. Epshteyn,^{1,2,3} A. L. Erofeev,^{1,2} G. V. Fedotovitch,^{1,2} A. O. Gorkovenko,^{1,3} F. J. Grancagnolo,⁴ A. A. Grebenuk,^{1,2} S. S. Gribov,^{1,2} D. N. Grigoriev,^{1,2,3} V. L. Ivanov,^{1,2} S. V. Karpov,¹ A. S. Kasaev,¹ V. F. Kazanin,^{1,2} B. I. Khazin,¹ A. N. Kirpotin,¹ I. A. Koop,^{1,2} A. A. Korobov,^{1,2} A. N. Kozyrev,^{1,2,3} E. A. Kozyrev,^{1,2} P. P. Krokovny,^{1,2} A. E. Kuzmenko,¹ A. S. Kuzmin,^{1,2} I. B. Logashenko,^{1,2} P. A. Lukin,^{1,2} A. P. Lysenko,¹ K. Yu. Mikhailov,^{1,2} I. V. Obraztsov,^{1,2} V. S. Okhapkin,¹ A. V. Otboev,¹ E. A. Perevedentsev,^{1,2} Yu. N. Pestov,¹ A. S. Popov,^{1,2} G. P. Razuvaev,^{1,2} Yu. A. Rogovsky,^{1,2} A. A. Ruban,¹ N. M. Ryskulov,¹ A. E. Ryzhenenkov,^{1,2} A. V. Semenov,^{1,2} A. I. Senchenko,¹ P. Yu. Shatunov,¹ Yu. M. Shatunov,¹ V. E. Shebalin,^{1,2} D. N. Shemyakin,^{1,2} B. A. Schwartz,^{1,2} D. B. Shwartz,^{1,2} A. L. Sibidanov,⁵ E. P. Solodov,^{1,2} A. A. Talyshev,^{1,2} M. V. Timoshenko,¹ V. M. Titov,¹ S. S. Tolmachev,^{1,2} A. I. Vorobiov,¹ Yu. V. Yudin,^{1,2} I. M. Zemlyansky,¹ D. S. Zhadan,¹ Yu. M. Zharinov,¹ and A. S. Zubakin¹

(CMD-3 Collaboration)

¹Budker Institute of Nuclear Physics, SB RAS, Novosibirsk 630090, Russia

²Novosibirsk State University, Novosibirsk 630090, Russia

³Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk 630092, Russia

⁴Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Lecce, Lecce, Italy

⁵University of Victoria, Victoria, BC V8W 3P6, Canada

Ⓢ (Received 26 September 2023; revised 6 March 2024; accepted 2 May 2024; published 4 June 2024)

PHYSICAL REVIEW D **109**, 112002 (2024)

Editors' Suggestion

Measurement of the $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ cross section from threshold to 1.2 GeV with the CMD-3 detector

F. V. Ignatov^{1,2,*} R. R. Akhmetshin,^{1,2} A. N. Amirkhanov,^{1,2} A. V. Anisenkov,^{1,2} V. M. Aulchenko,^{1,2} N. S. Bashtovoy,¹ D. E. Berkaev,^{1,2} A. E. Bondar,^{1,2} A. V. Bragin,¹ S. I. Eidelman,^{1,2} D. A. Epifanov,^{1,2} L. B. Epshteyn,^{1,2,3} A. L. Erofeev,^{1,2} G. V. Fedotovitch,^{1,2} A. O. Gorkovenko,^{1,3} F. J. Grancagnolo,⁴ A. A. Grebenuk,^{1,2} S. S. Gribov,^{1,2} D. N. Grigoriev,^{1,2,3} V. L. Ivanov,^{1,2} S. V. Karpov,¹ A. S. Kasaev,¹ V. F. Kazanin,^{1,2} B. I. Khazin,¹ A. N. Kirpotin,¹ I. A. Koop,^{1,2} A. A. Korobov,^{1,2} A. N. Kozyrev,^{1,3} E. A. Kozyrev,^{1,2} P. P. Krokovny,^{1,2} A. E. Kuzmenko,¹ A. S. Kuzmin,^{1,2} I. B. Logashenko,^{1,2} P. A. Lukin,^{1,2} A. P. Lysenko,¹ K. Yu. Mikhailov,^{1,2} I. V. Obraztsov,^{1,2} V. S. Okhapkin,¹ A. V. Otboev,¹ E. A. Perevedentsev,^{1,2} Yu. N. Pestov,¹ A. S. Popov,^{1,2} G. P. Razuvaev,^{1,2} Yu. A. Rogovsky,^{1,2} A. A. Ruban,¹ N. M. Ryskulov,¹ A. E. Ryzhenenkov,^{1,2} A. V. Semenov,^{1,2} A. I. Senchenko,¹ P. Yu. Shatunov,¹ Yu. M. Shatunov,¹ V. E. Shebalin,^{1,2} D. N. Shemyakin,^{1,2} B. A. Schwartz,^{1,2} D. B. Shwartz,^{1,2} A. L. Sibidanov,⁵ E. P. Solodov,^{1,2} A. A. Talyshev,^{1,2} M. V. Timoshenko,¹ V. M. Titov,¹ S. S. Tolmachev,^{1,2} A. I. Vorobiov,¹ I. M. Zemlyansky,¹ D. S. Zhadan,¹ Yu. M. Zharinov,¹ A. S. Zubakin,¹ and Yu. V. Yudin^{1,2}

(CMD-3 Collaboration)

¹Budker Institute of Nuclear Physics, SB RAS, Novosibirsk, 630090, Russia

²Novosibirsk State University, Novosibirsk, 630090, Russia

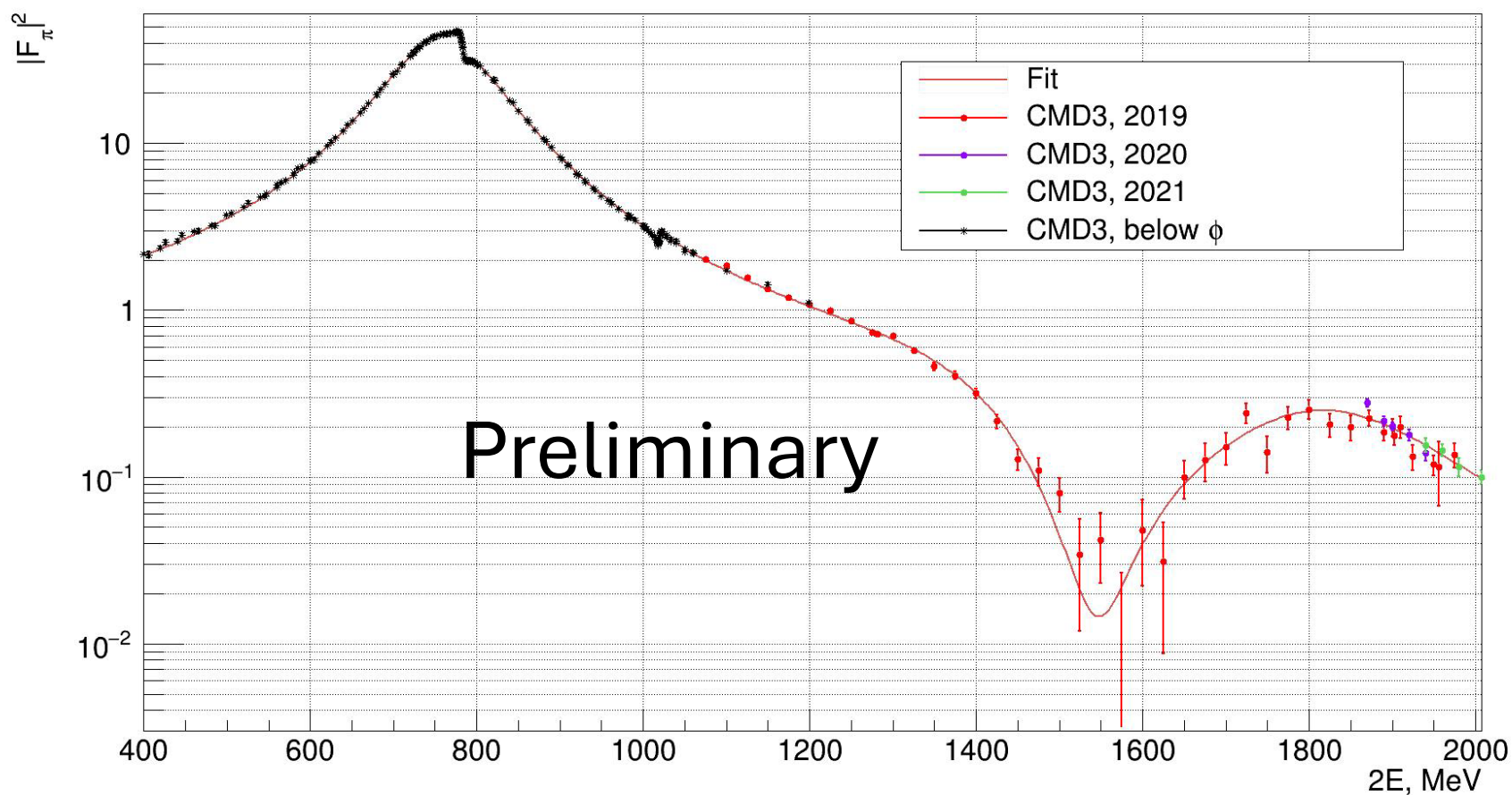
³Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, 630092, Russia

⁴Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Lecce, Lecce, Italy

⁵University of Victoria, Victoria, British Columbia, Canada V8W 3P6

Ⓢ (Received 26 September 2023; accepted 26 February 2024; published 4 June 2024)

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



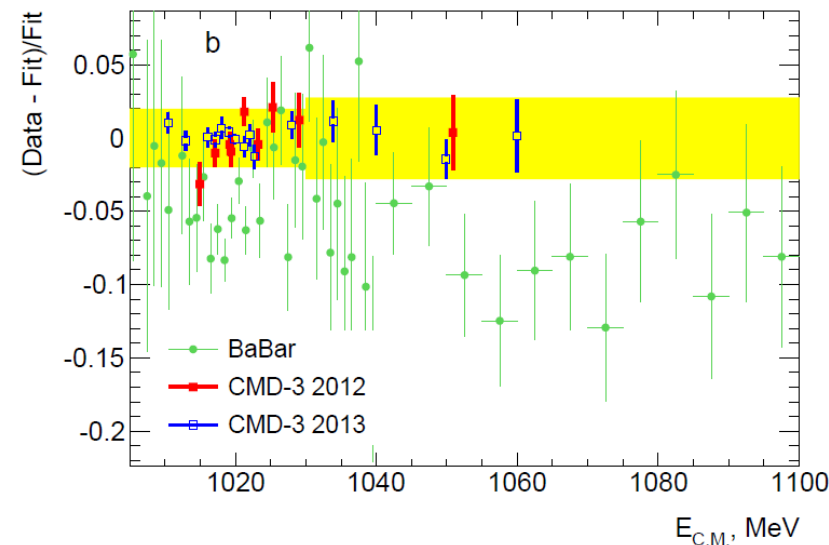
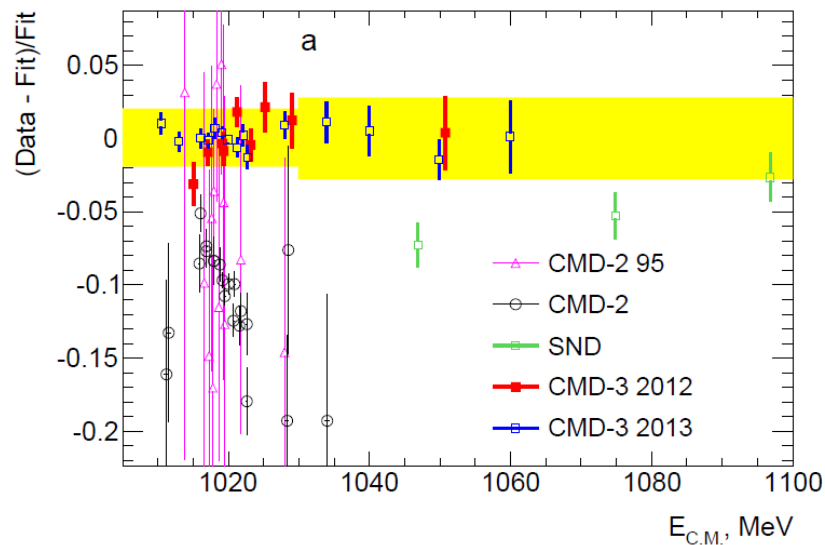
Estimated systematic error
(preliminary)

0.8%

7%

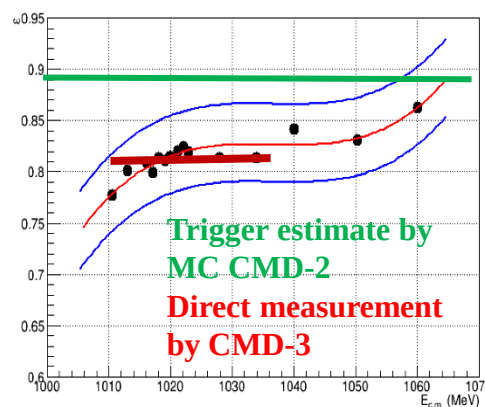
Unfortunately analysis has been frozen – lack of people.
Analysis of 2022-2024 data (x4-5) has not started yet

Процесс $e^+e^- \rightarrow K^+ K^-$

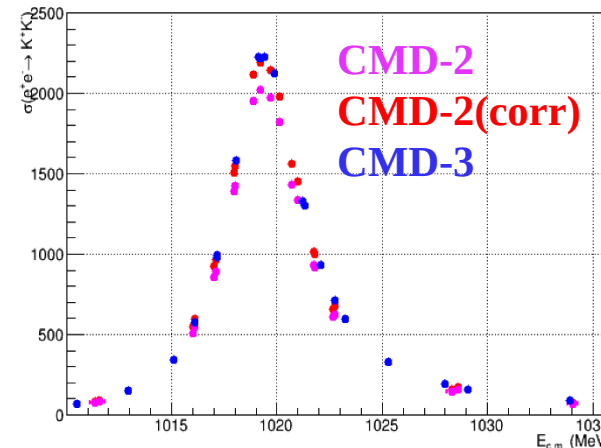


CMD-2 measured K^+K^- cross section
~10% lower than CMD-3

Suspect: trigger efficiency. At CMD-2 it was estimated by MC. At CMD-3 we've measured it and found 9.5% bias to CMD-2 estimate.



Measured CMD-2 trigger efficiency for K^+K^-

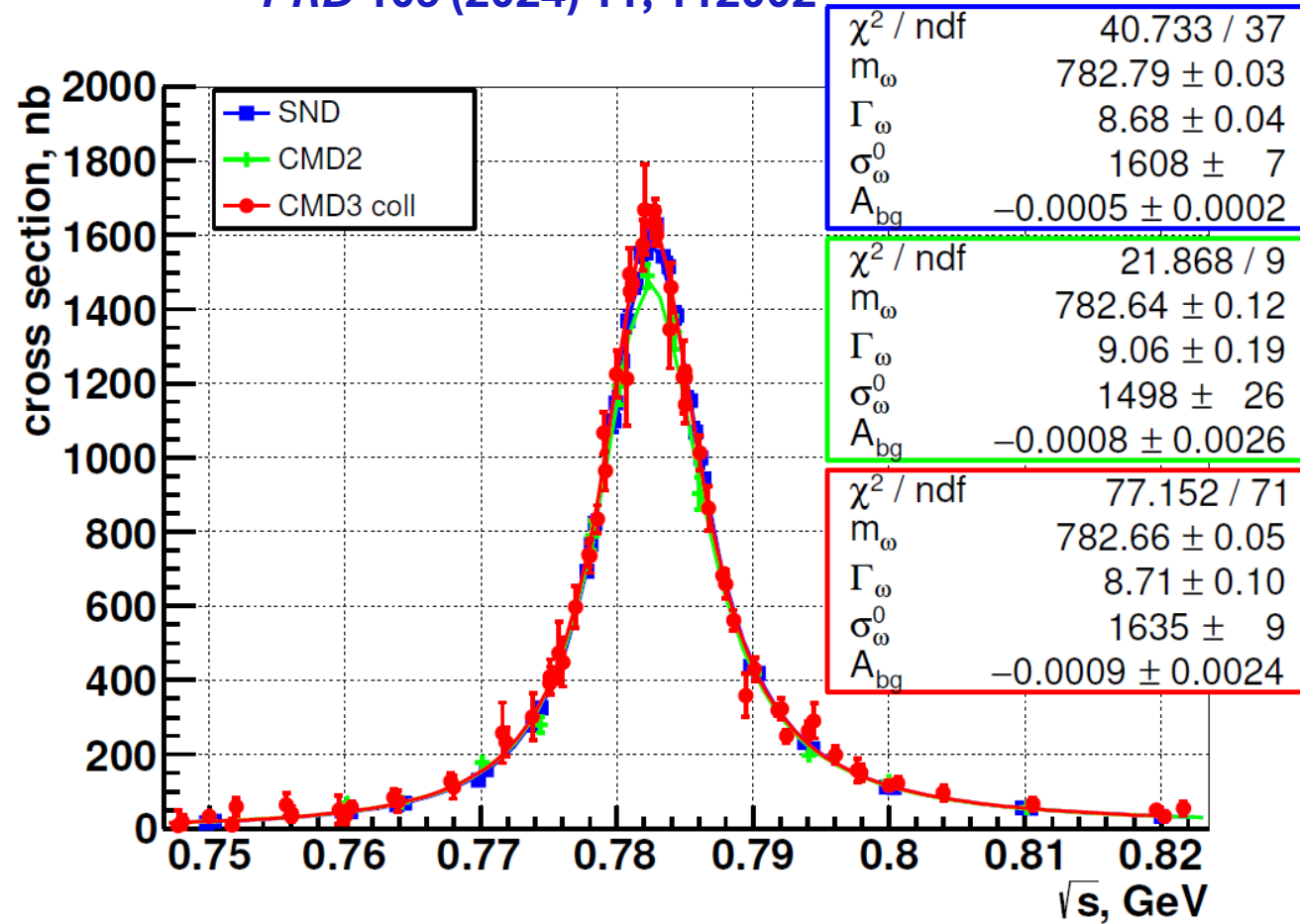


Effect of the correction on K^+K^- cross section

Not published

$\sigma(e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0)$ CMD-3 (2023)

PRD 109 (2024) 11, 112002



By-product of $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ analysis

Based on small subset of $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ sample (“collinear” selection cuts, π^0 nearly at rest)

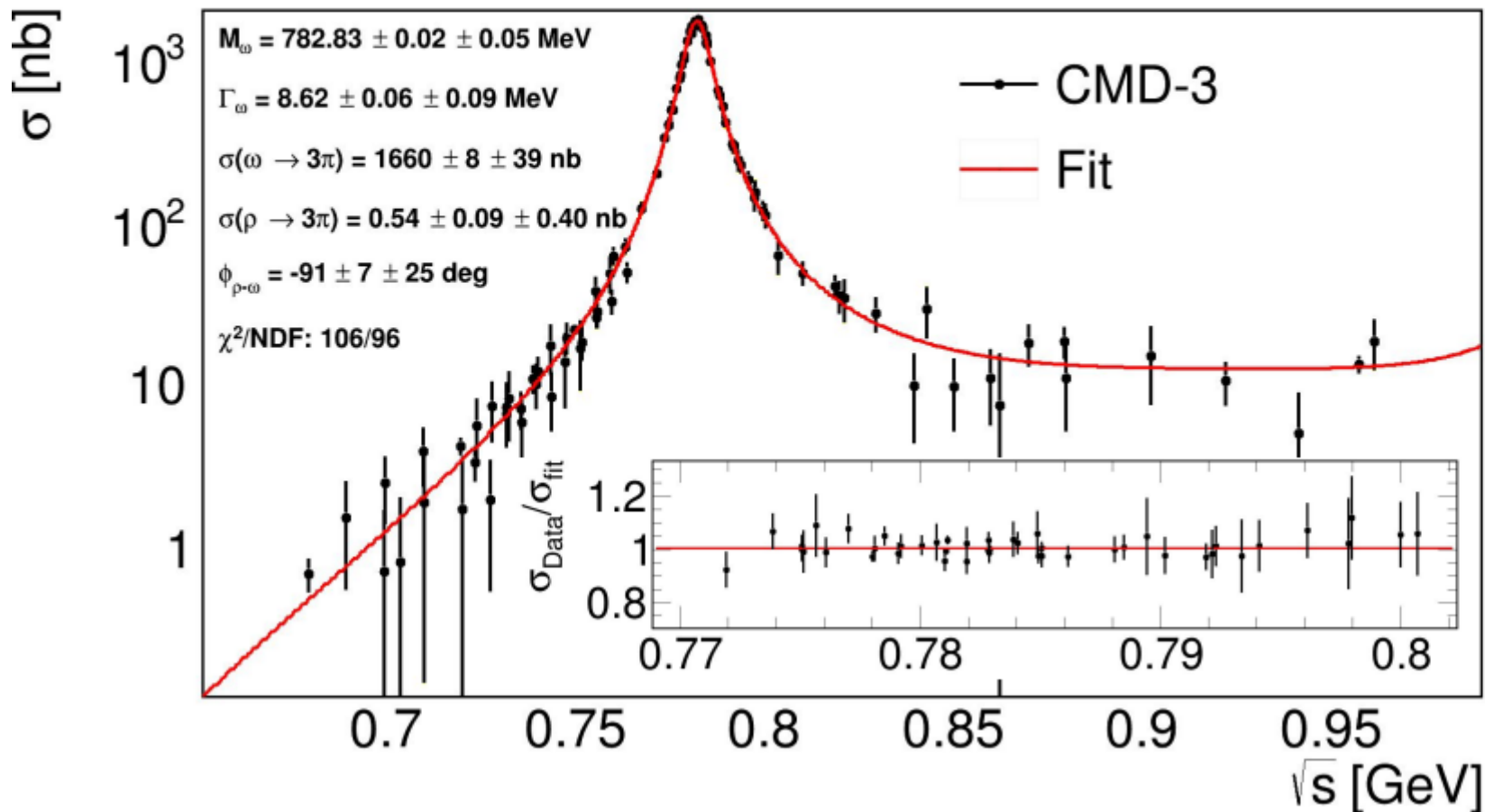
Estimated systematic uncertainty is 3.3%

2.2 σ tension with CMD-2 measurement

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

$$\sigma(s) = \frac{F_{3\pi}(s)}{s^{3/2}} \left| \sum_{V=\rho,\omega,\phi,\omega',\omega''} e^{i\phi_{\omega V}} \sqrt{\frac{\sigma(V \rightarrow 3\pi) M_V}{F_{3\pi}(M_V^2)} \frac{\Gamma_V M_V^2}{D_V(s)}} \right|^2 \quad F_{3\pi}(s) = \frac{(4\pi\alpha)^2 \sqrt{s}}{12\pi} \int [\vec{P}_+ \times \vec{P}_-]_{\perp}^2 \left| \sum_{i=0,+,-} \frac{g_{\rho^i \pi \pi}}{D_{\rho^i}(P_{\rho^i}^2)} \right|^2 d\Phi_{3\pi}$$

Preliminary fit ($E_{\text{c.m.}} = 0.66 - 0.97$ GeV)

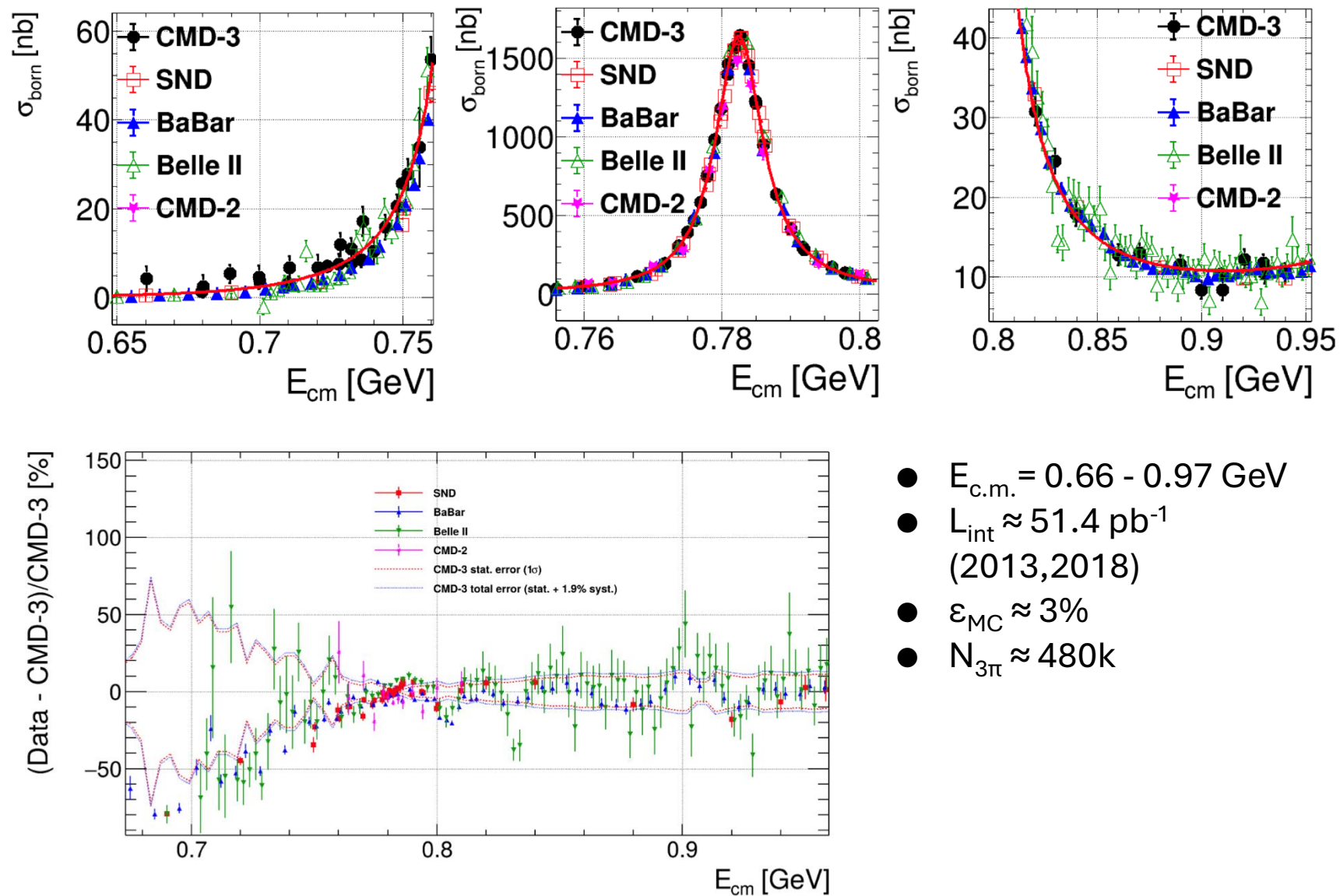


- Учен только ртп механизм
- Учтена зависимость ширины от энергии
- При аппроксимации массы и ширины резонансов ρ , ϕ , ω' , ω'' были зафиксированы на их значениях из PDG
- фаза $\omega - \phi = 162^\circ$ (SND)
- фаза $\omega - \omega' = 90^\circ$ (SND)
- фаза $\omega - \omega'' = 180^\circ$ (SND)

$N_{3\pi} \approx 480k$

Сезоны 2013 – 2018

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



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

Source	Contribution (%)	Estimation method
Luminosity	1.5	Difference between $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ and $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$
Track reconstruction	0.2	Calculation in different selection criteria
π^0 reconstruction	0.5	Comparison with cross section without π^0 reconstruction
Trigger efficiency	<0.1	–
Energy spread	0.3	Calculation of radiative correction without taking account for beam energy spread
Model in MC	< 0.7	Discrepancy with the Phase Space MC
ISR in MC	0.3	Different cross-sections
Selection criteria	0.5	Variation of selection criteria
Background subtraction	0.3	Different event counting procedures

Total systematic uncertainty of cross section: 1.9%

$$a_\mu^{had,3\pi} = \frac{1}{4\pi^3} \int_{s_{\min}}^{s_{\max}} \sigma_{\text{born}}^{3\pi}(s) |1 - \Pi(s)|^2 \cdot K(s) ds$$

$\sigma_{\text{born}}^{3\pi}(s)$ – Born cross section function after approximation of experimental data

$a_\mu^{had,3\pi}$ in range $0.62 < \sqrt{s} < 1.1 \text{ GeV}/c^2$

- **CMD-3** $(44.3 \pm 0.2 \pm 0.8) \times 10^{10}$ (**Function**) [**Preliminary**]

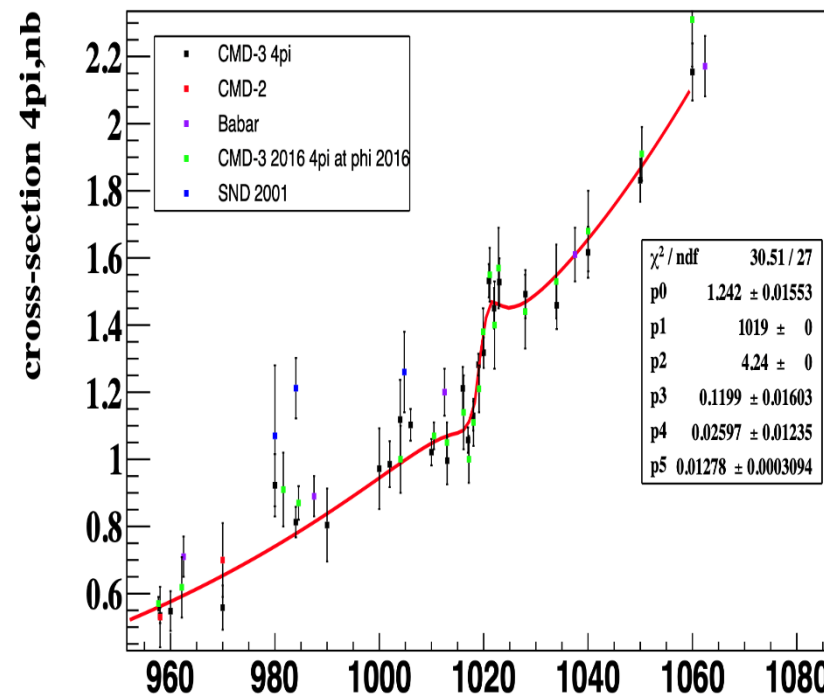
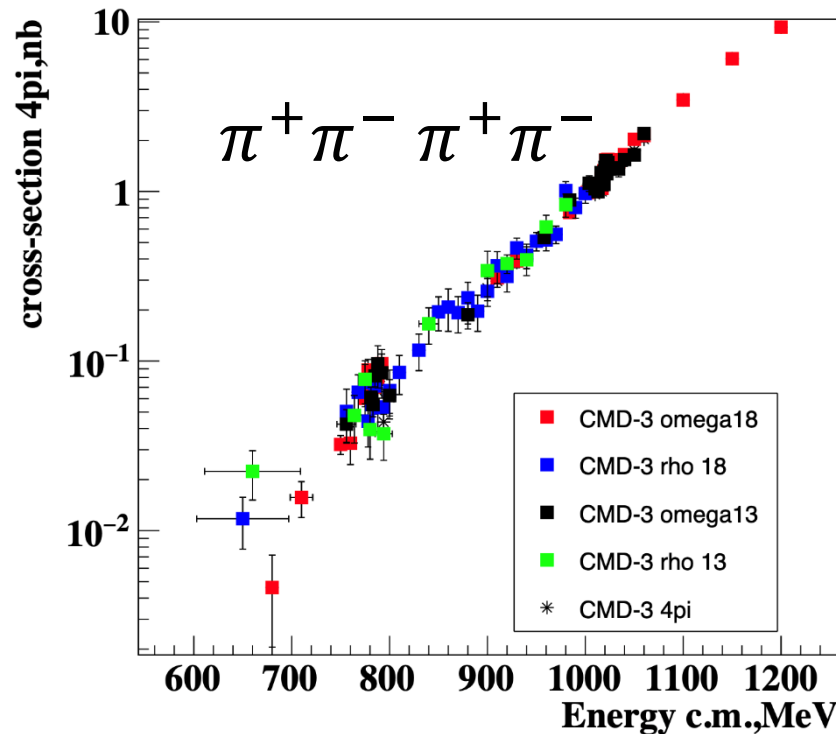
- BaBar $(42.91 \pm 0.14 \pm 0.55 \pm 0.09) \times 10^{10}$ ($\Delta = (1.4 \pm 1) \times 10^{10}$)

$a_\mu^{had,3\pi}$ in range $0.65 < \sqrt{s} < 0.98 \text{ GeV}/c^2$

- **CMD-3** $(38.0 \pm 0.2 \pm 0.8) \times 10^{10}$ (**Function**) [**Preliminary**]

- **CMD-3** $(38.2 \pm 0.2 \pm 0.8) \times 10^{10}$ (**Linear approximation**, $\Delta = (0.2 \pm 1.2) \times 10^{10}$)

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



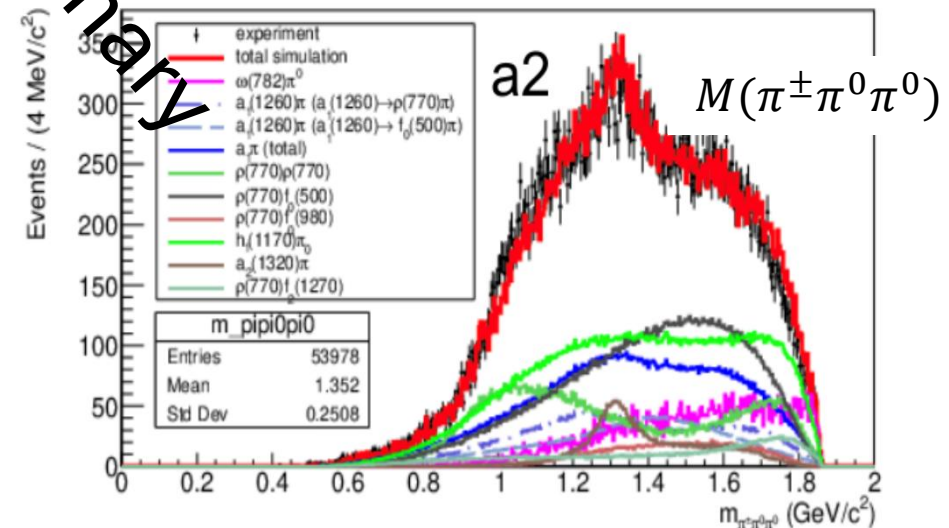
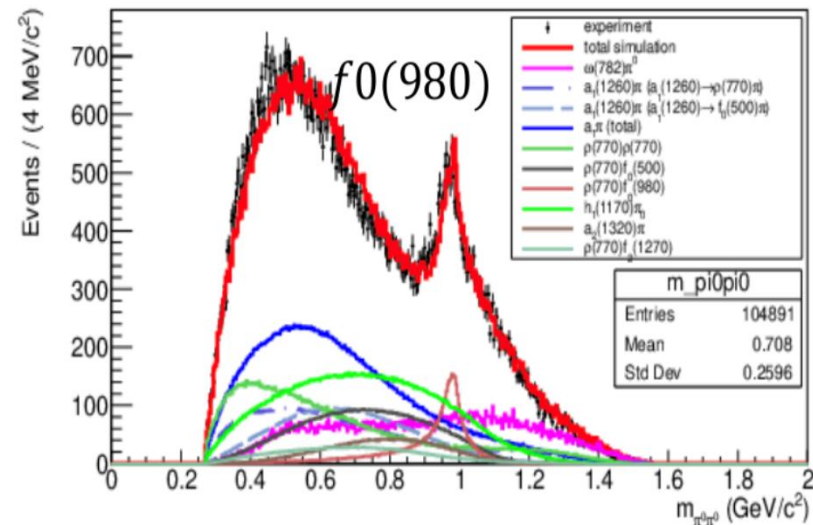
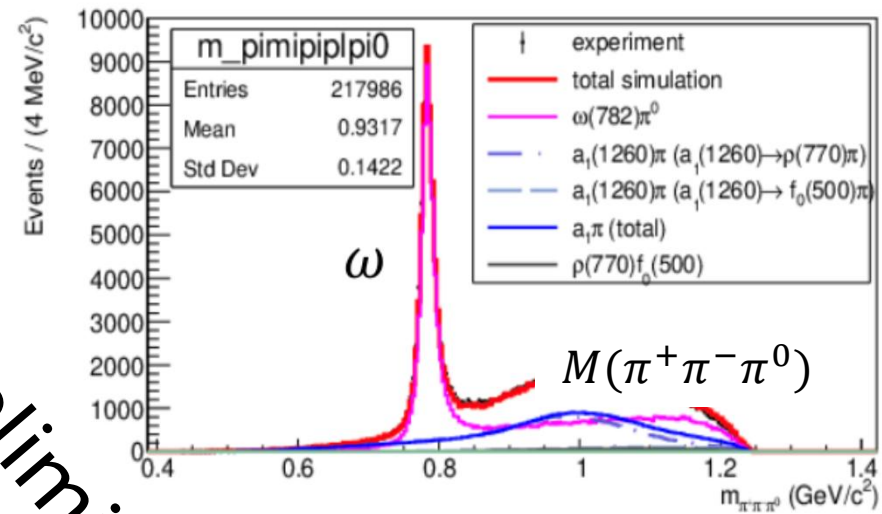
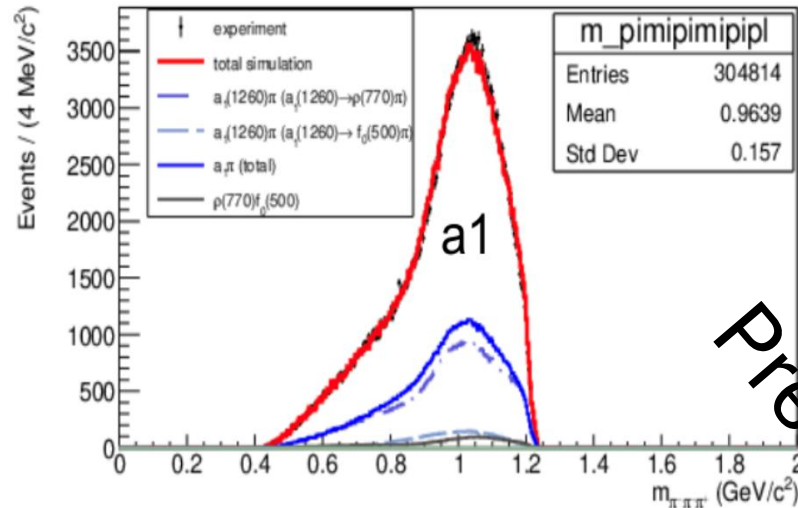
$$B(\phi \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-) = (4.5 \pm 1.3) * 10^{-6}$$

PDG data $(3.9+2.8-2.2) * 10^{-6}$

CMD-3 2017 - $(6.5 \pm 2.7 \pm 1.6) * 10^{-6}$

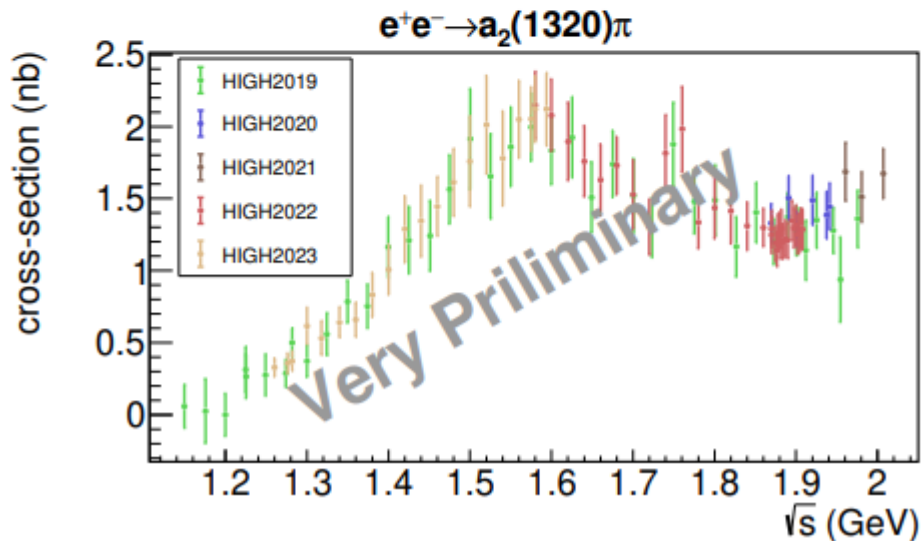
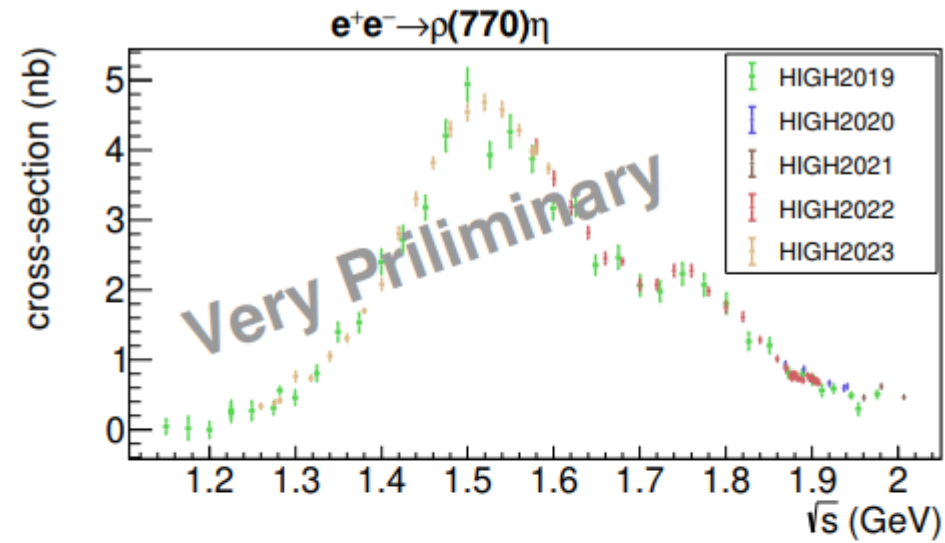
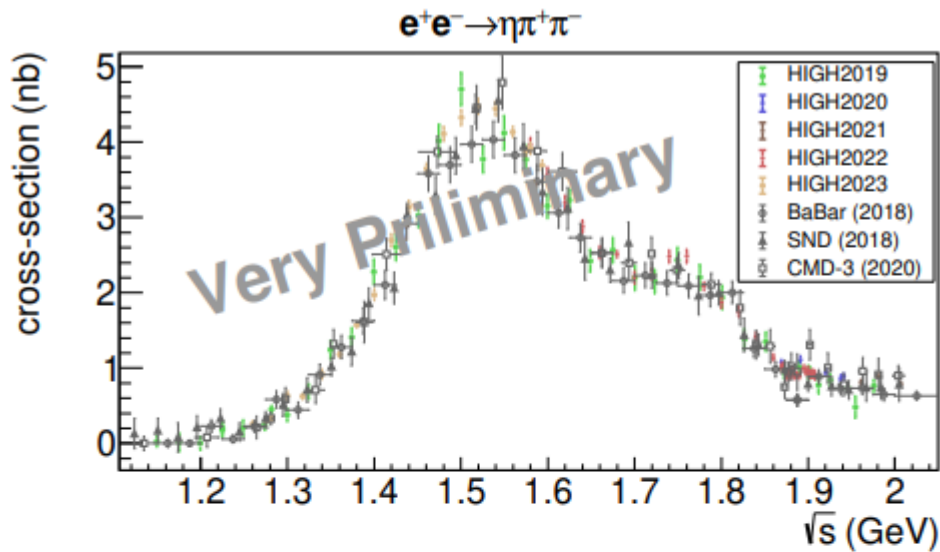
Analysis in progress with more recent data
work on systematic uncertainties

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



Large data sample allows to perform the amplitude analysis to reduce a model-dependent systematic uncertainties. Work is in progress

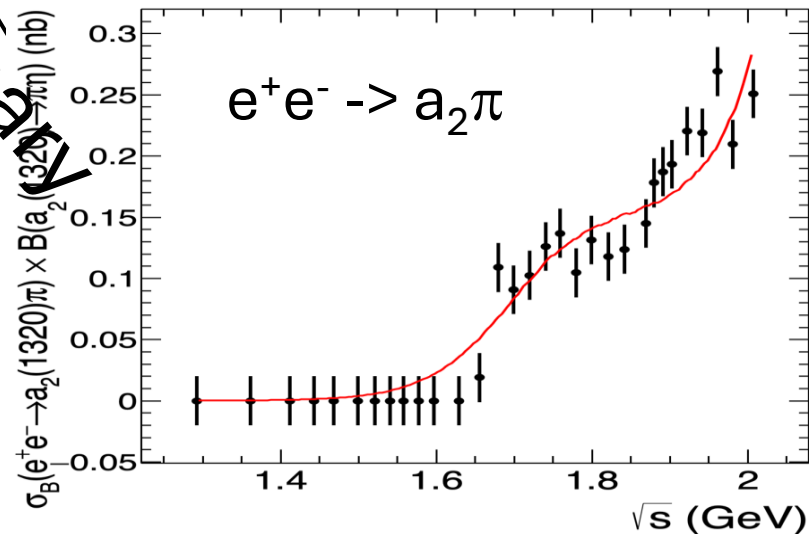
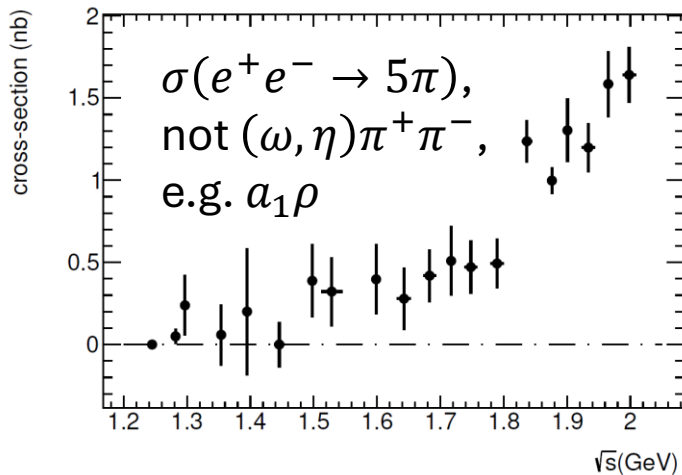
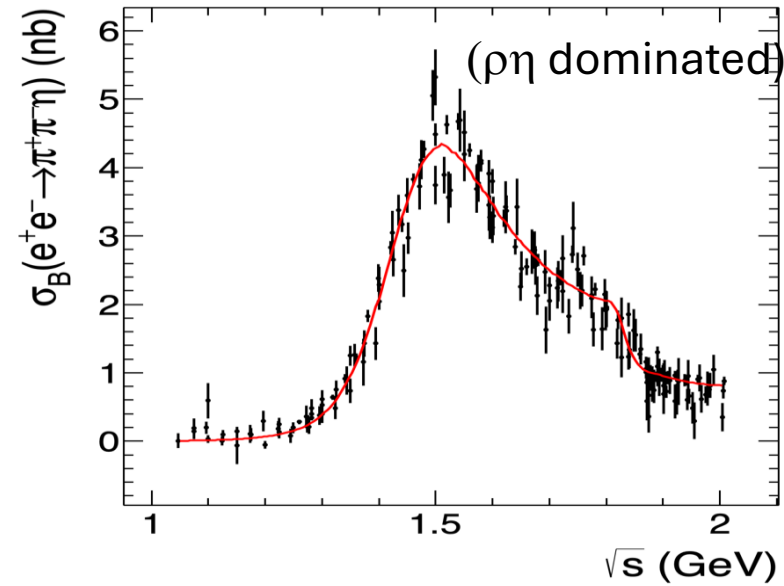
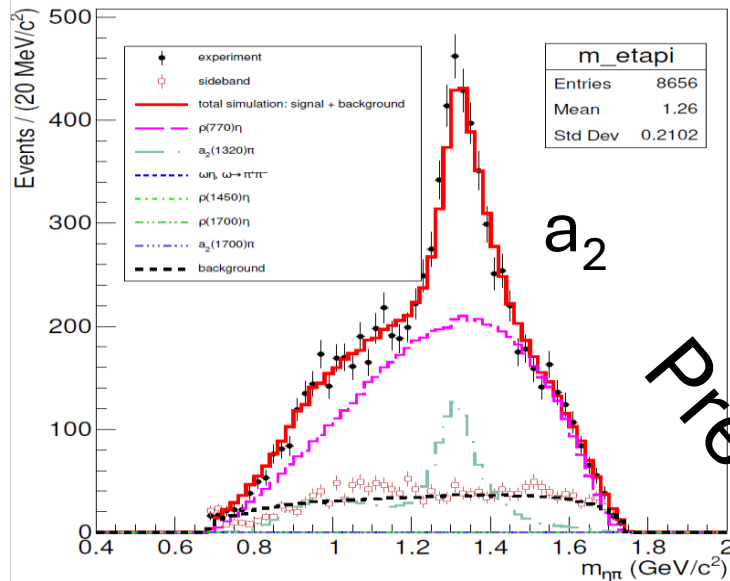
Процесс $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-\pi^0$



Разработан фреймворк для
амплитудного анализа
Получены предварительные
результаты по изучению
динамики процесса $e^+e^- \rightarrow \eta\pi^+\pi^-$

Процесс $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\eta$, $\eta \rightarrow 3\pi, \gamma\gamma$

Amplitude analysis shows
a contribution from $a_2(1320)$

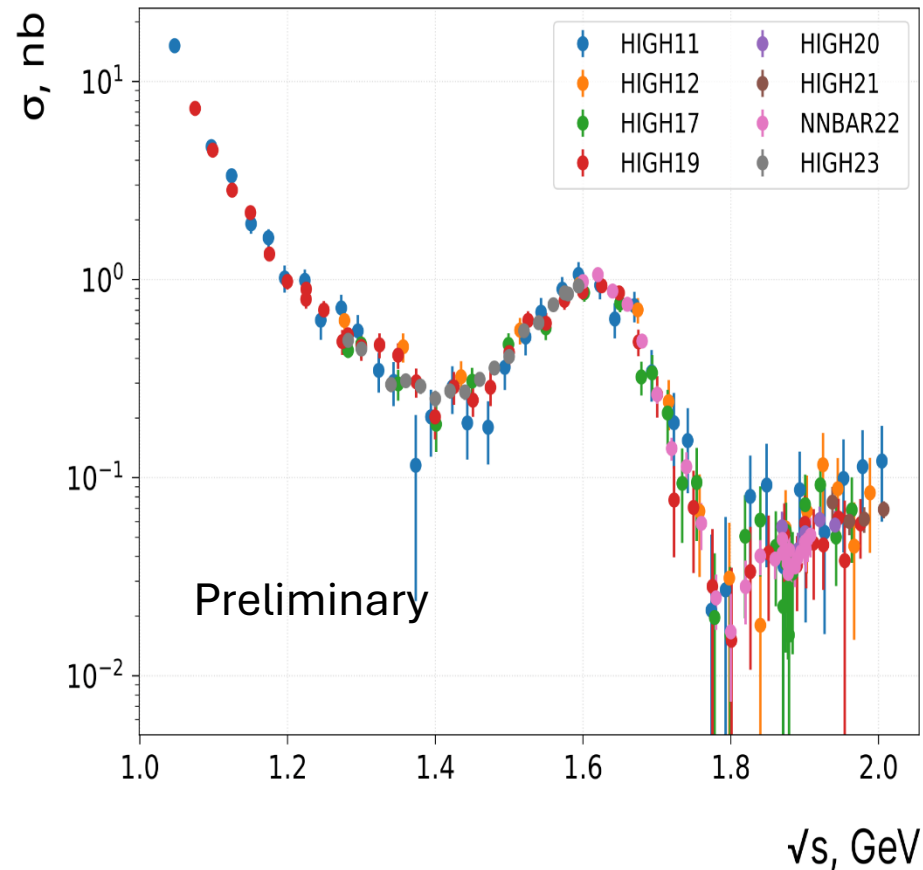


Preliminary

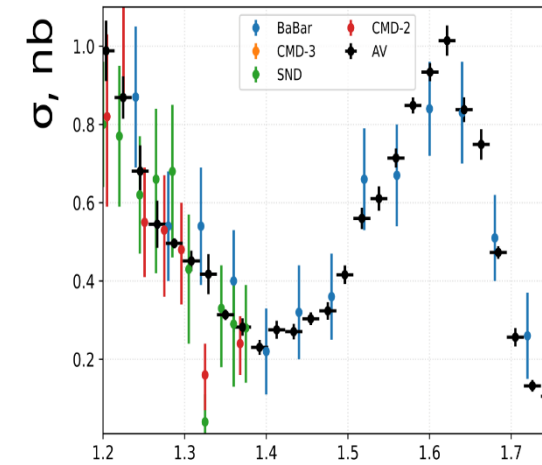
ПРОЦЕСС $e^+e^- \rightarrow K_L^0 K_S^0$

CMD-3 published $K_S K_L, K^+ K^-$ at $\phi(1020)$ only.

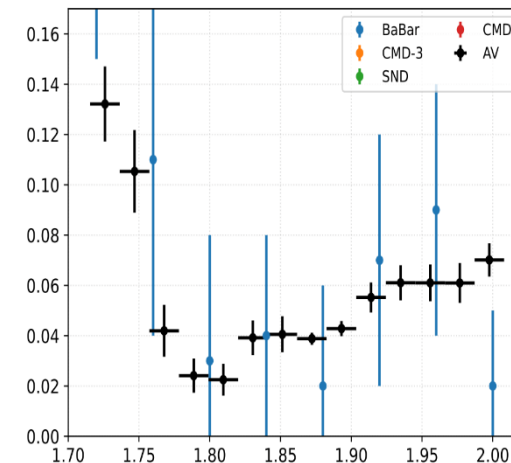
The data analysis at energies above ϕ is ongoing for both channels.



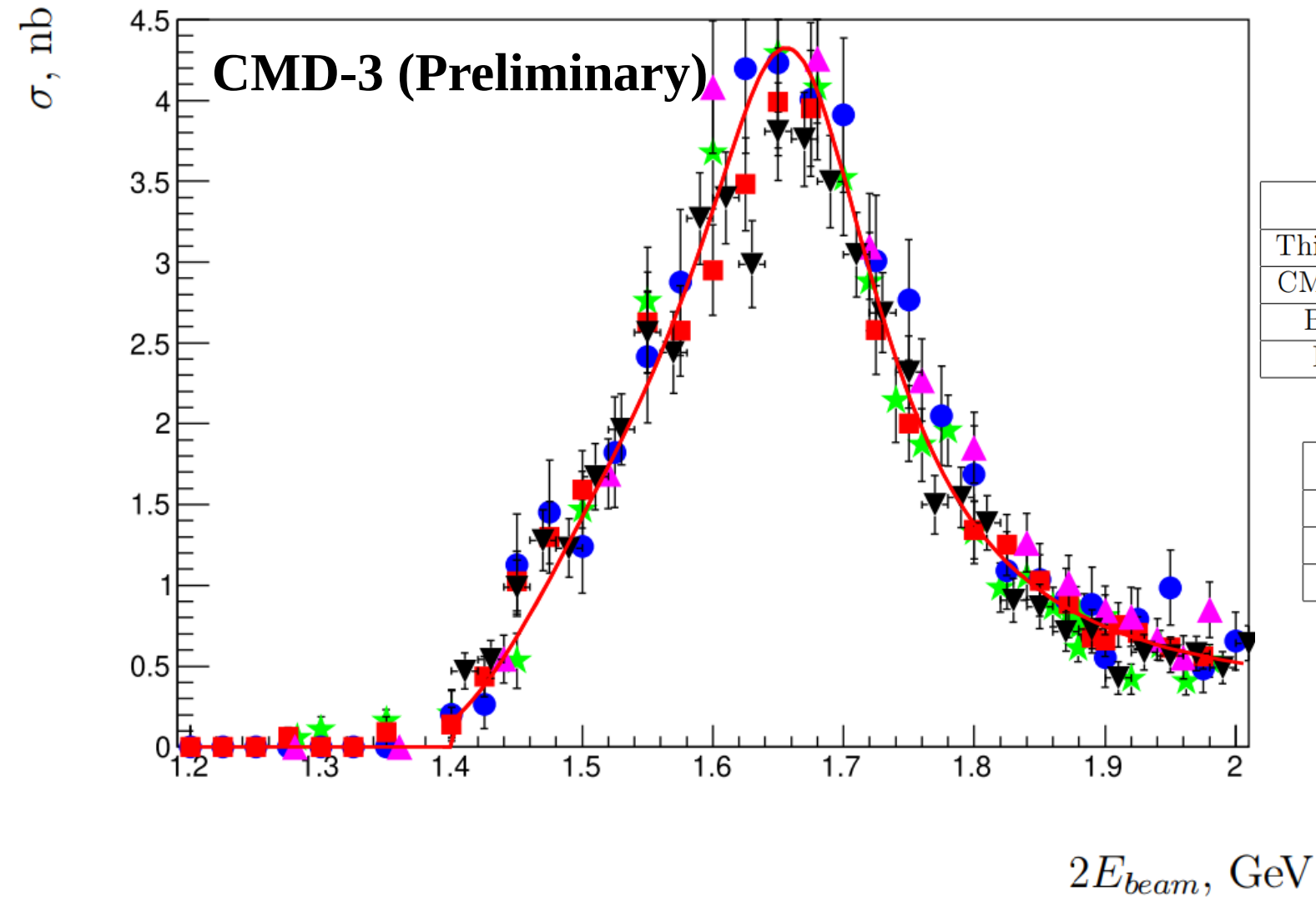
Paper for $K_S K_L$ is in preparation



$\sigma/20 \text{ MeV}$



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



	$\Gamma_{ee}^{\varphi'} Br_{KK^*(892)}^{\varphi'} (eV)$	$M_{\varphi'} (MeV)$	$\Gamma_{\varphi'} (MeV)$
This paper	$427 \pm 40 \pm 21$	$1694 \pm 5 \pm 15$	$204 \pm 18 \pm 22$
CMD-3 [7]	-	$1667 \pm 5 \pm 11$	$176 \pm 23 \pm 38$
BaBar	367 ± 50	1709 ± 19	325 ± 68
PDG	-	1680 ± 20	150 ± 50

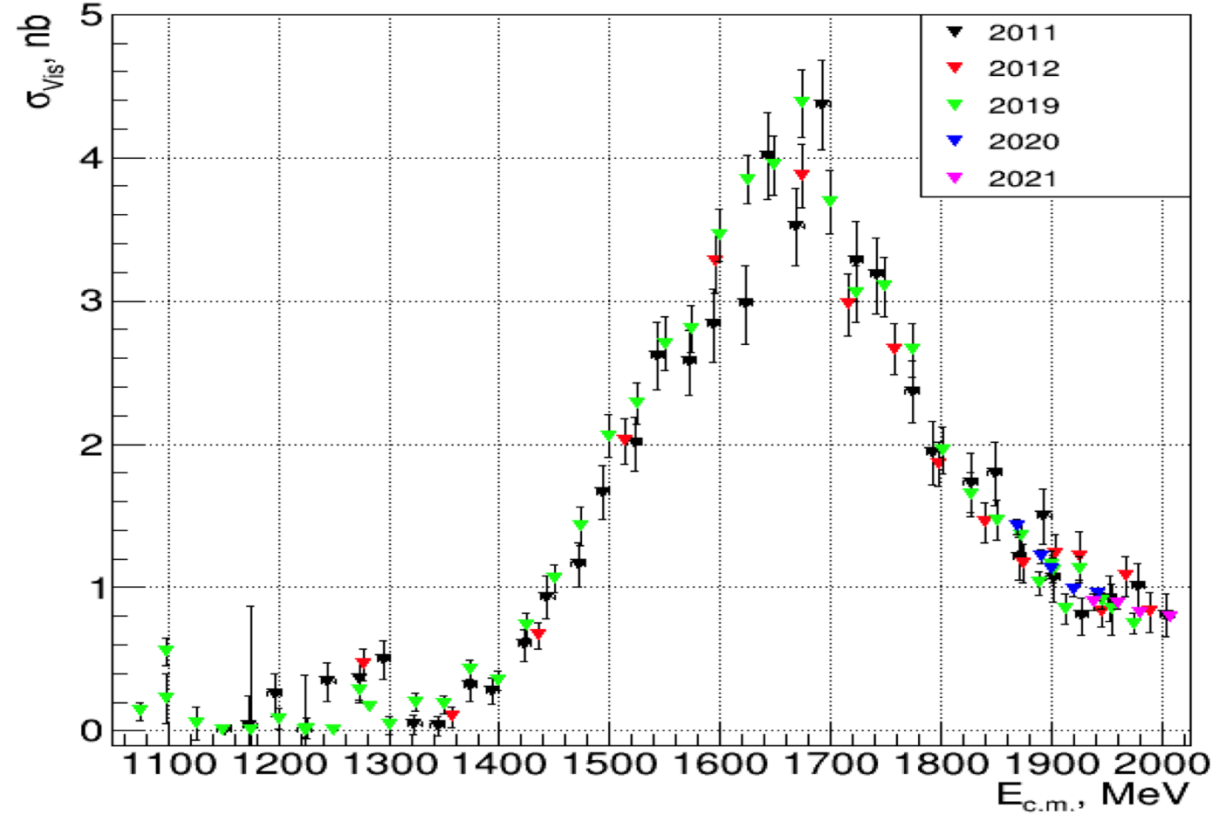
	$\Gamma_{ee}^{\rho'} Br_{KK^*(892)}^{\rho'} (eV)$	$M_{\rho'} (MeV)$	$\Gamma_{\rho'} (MeV)$
This paper	$119 \pm 14 \pm 15$	1502 ± 11	315 ± 27
BaBar	129 ± 15	1508 ± 19	418 ± 26
PDG	-	1465 ± 25	400 ± 60

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

PRELIMINARY

$\sigma(e^+e^- \rightarrow K_S K_L \pi^0)$
CMD-3

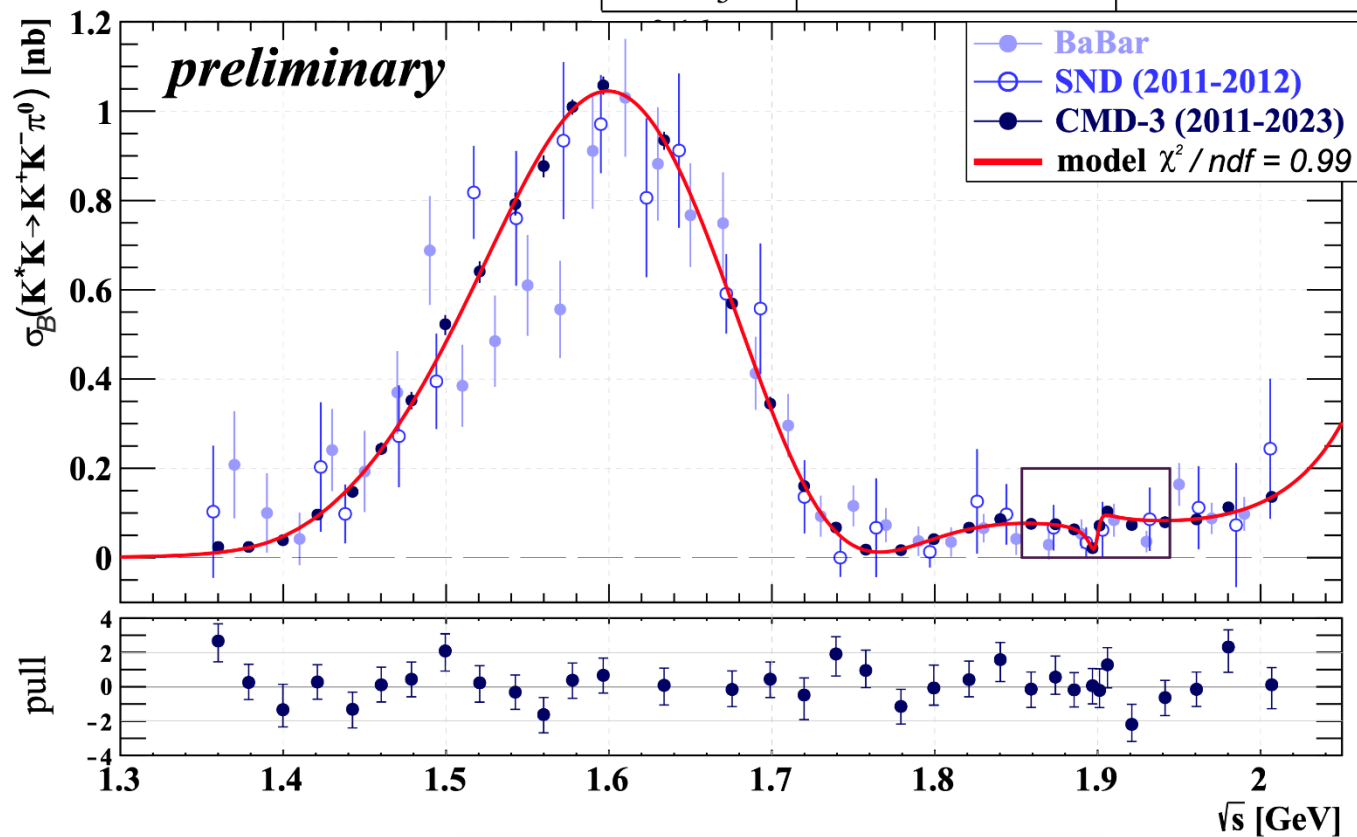
Analysis is ongoing ...



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

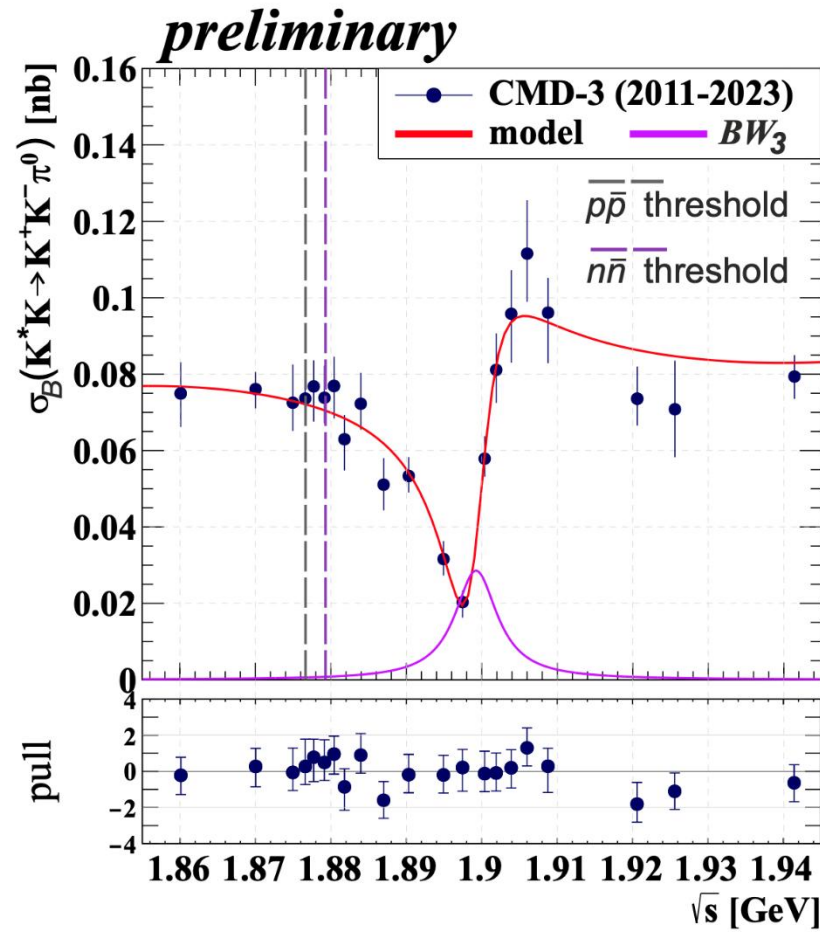
$\sigma(e^+e^- \rightarrow \varphi\pi^0)$ excluded – under separate consideration

	mass [GeV]	width [GeV]
BW_1	1.752 ± 0.008	0.194 ± 0.01
BW_2	1.598 ± 0.005	0.325 ± 0.015
$\rho(1700)$	1.72 (fixed)	0.25 (fixed)
$\omega(1650)$	1.67 (fixed)	0.315 (fixed)
$\varphi(2170)$	2.175 (fixed)	0.061 (fixed)
BW_3	1.8992 ± 0.0013	0.0069 ± 0.0024



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

Parameters of the introduced resonance: ?
 $m = 1.8992 \pm 0.0013$ GeV and $\Gamma = 6.9 \pm 2.4$ MeV.



$\rho(1900)$

$$J^{PC} = 1^+(1^--)$$

OMITTED FROM SUMMARY TABLE

See the review on "Spectroscopy of Light Meson Resonances."

$\rho(1900)$ MASS

VALUE (MeV)	EVTS	DOCUMENT ID	TECN	COMMENT
• • • We do not use the following data for averages, fits, limits, etc. • • •				
1880 ± 10		¹ ABLIKIM 22L BES3	2.0-3.08 $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^0$	
$1909 \pm 17 \pm 25$	54	² AUBERT 08S BABR	$10.6 e^+e^- \rightarrow \phi\pi^0\gamma$	
1880 ± 30		AUBERT 06D BABR	$10.6 e^+e^- \rightarrow 3\pi^+3\pi^-\gamma$	
1860 ± 20		AUBERT 06D BABR	$10.6 e^+e^- \rightarrow 2(\pi^+\pi^-\pi^0)\gamma$	
1910 ± 10		^{3,4} FRABETTI 04 E687	$\gamma p \rightarrow 3\pi^+3\pi^-p$	
1870 ± 10		ANTONELLI 96 SPEC	$e^+e^- \rightarrow \text{hadrons}$	

¹ From a partial wave amplitude analysis at $\sqrt{s} = 2.125$ GeV which includes all the possible intermediate states that match J^{PC} conservation in the subsequent two-body decay. The intermediate states are parameterized with the relativistic Breit-Wigner functions. Statistical error only.

² From the fit with two resonances.

³ From a fit with two resonances with the JACOB 72 continuum.

⁴ Supersedes FRABETTI 01.

$\rho(1900)$ WIDTH

VALUE (MeV)	EVTS	DOCUMENT ID	TECN	COMMENT
• • • We do not use the following data for averages, fits, limits, etc. • • •				
69 ± 15		¹ ABLIKIM 22L BES3	2.0-3.08 $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^0$	
$48 \pm 17 \pm 2$	54	² AUBERT 08S BABR	$10.6 e^+e^- \rightarrow \phi\pi^0\gamma$	
130 ± 30		AUBERT 06D BABR	$10.6 e^+e^- \rightarrow 3\pi^+3\pi^-\gamma$	
160 ± 20		AUBERT 06D BABR	$10.6 e^+e^- \rightarrow 2(\pi^+\pi^-\pi^0)\gamma$	
37 ± 13		^{3,4} FRABETTI 04 E687	$\gamma p \rightarrow 3\pi^+3\pi^-p$	
10 ± 5		ANTONELLI 96 SPEC	$e^+e^- \rightarrow \text{hadrons}$	

¹ From a partial wave amplitude analysis at $\sqrt{s} = 2.125$ GeV which includes all the possible intermediate states that match J^{PC} conservation in the subsequent two-body decay. The intermediate states are parameterized with the relativistic Breit-Wigner functions. Statistical error only.

² From the fit with two resonances.

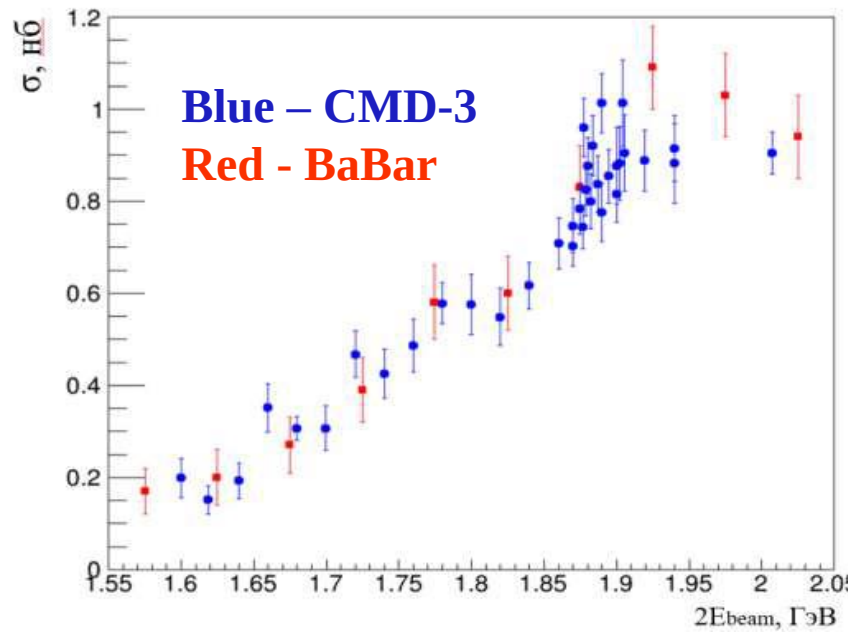
³ From a fit with two resonances with the JACOB 72 continuum.

⁴ Supersedes FRABETTI 01.

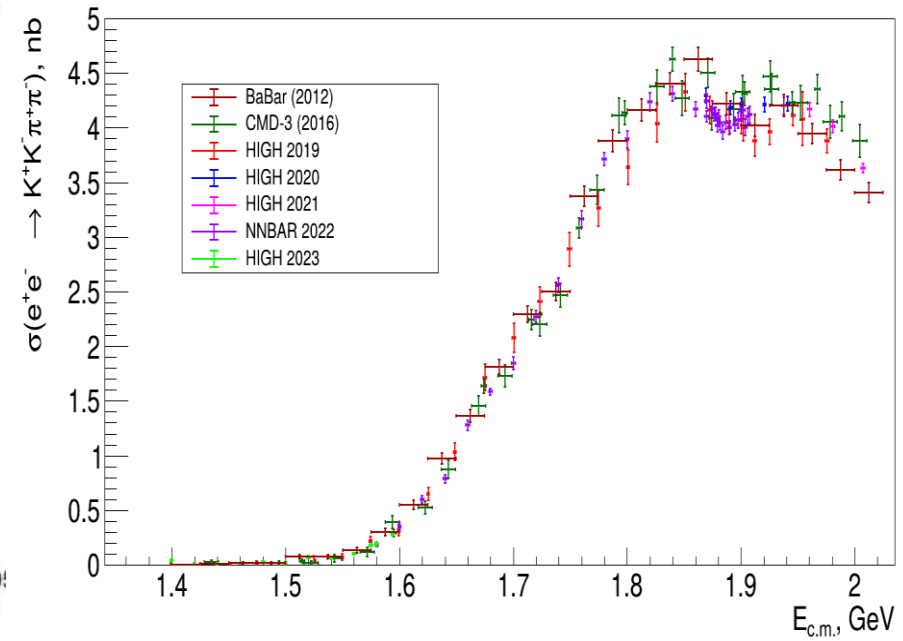
Interesting observation!

PRELIMINARY

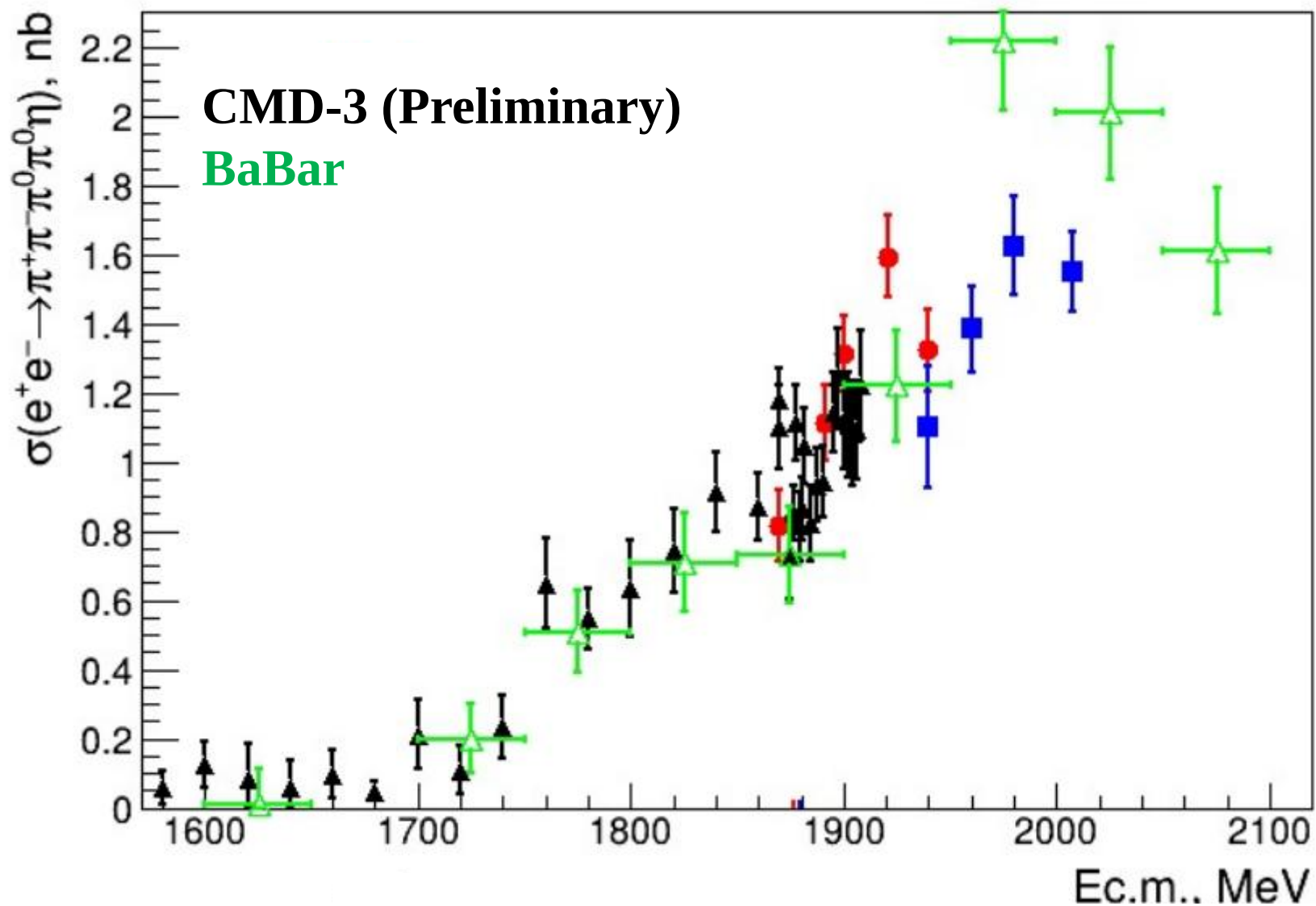
$$e^+e^- \rightarrow K_S K_L \pi^+ \pi^-$$



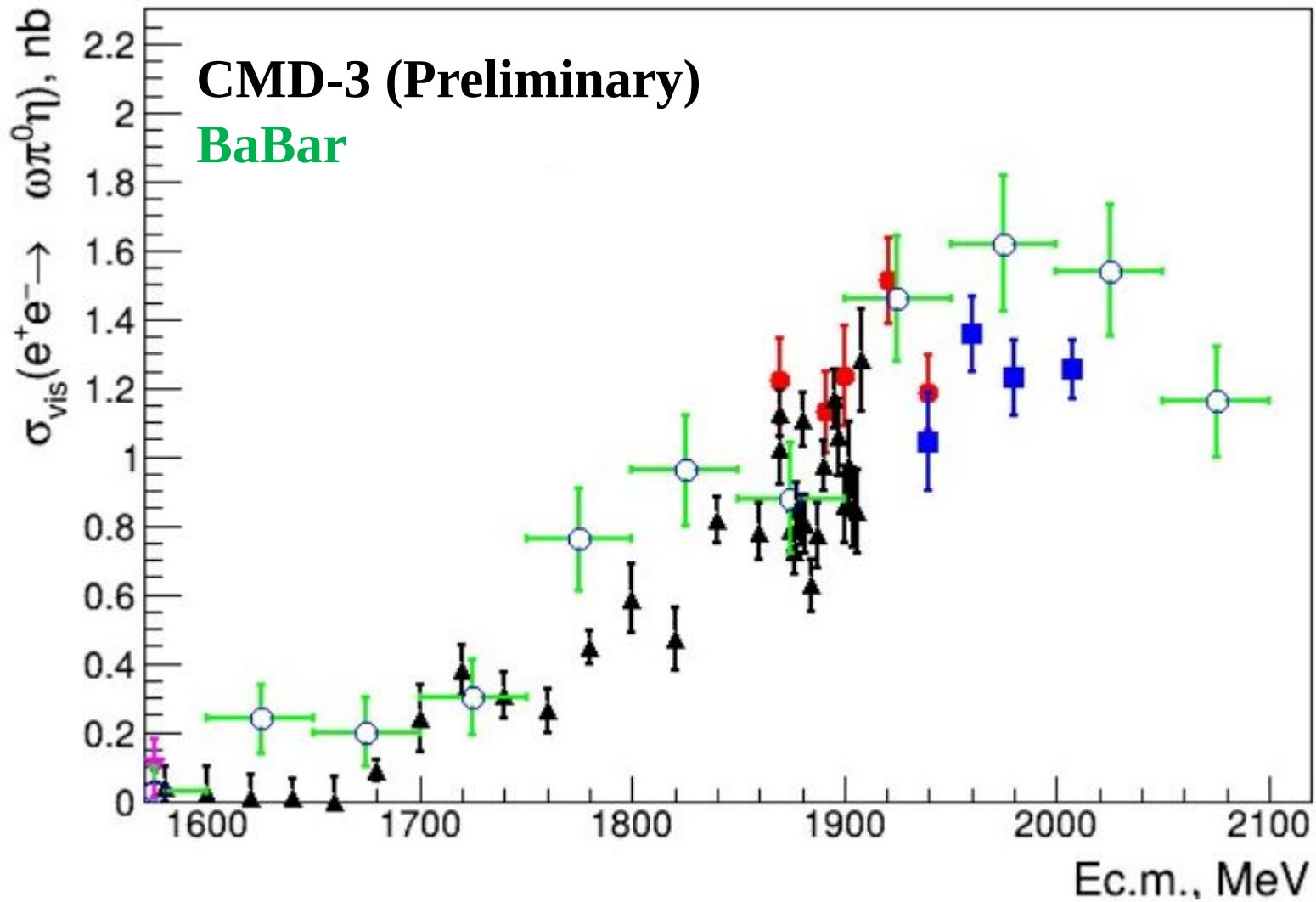
$$e^+e^- \rightarrow K^+ K^- \pi^+ \pi^-$$



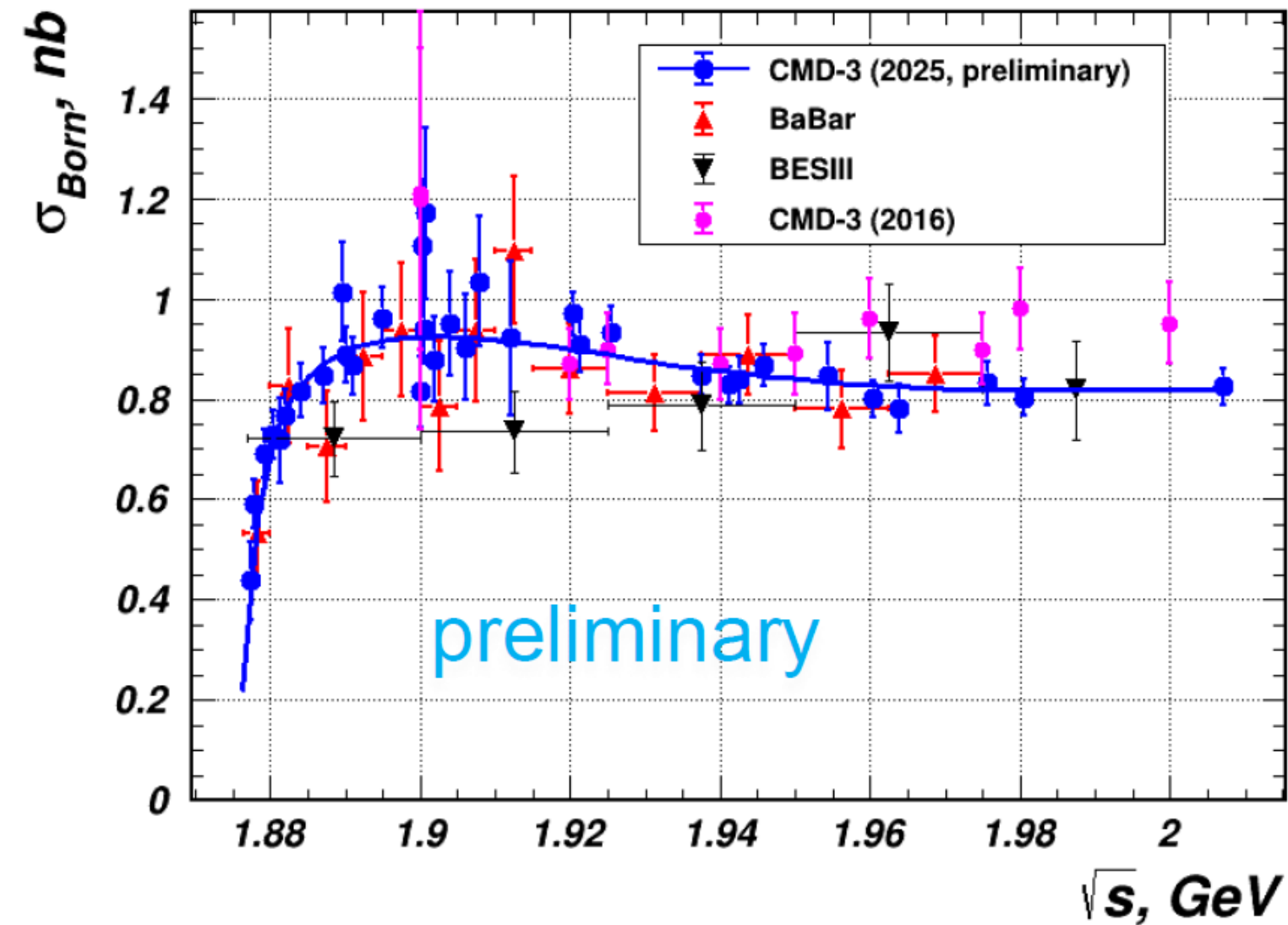
Процесс $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0\eta$



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

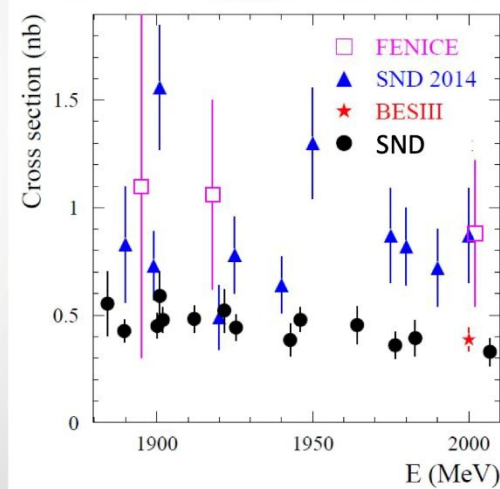
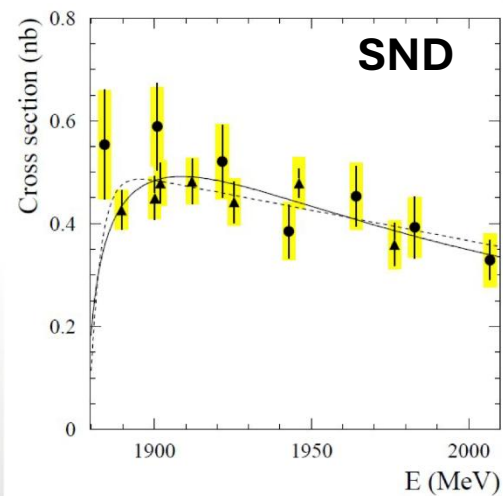
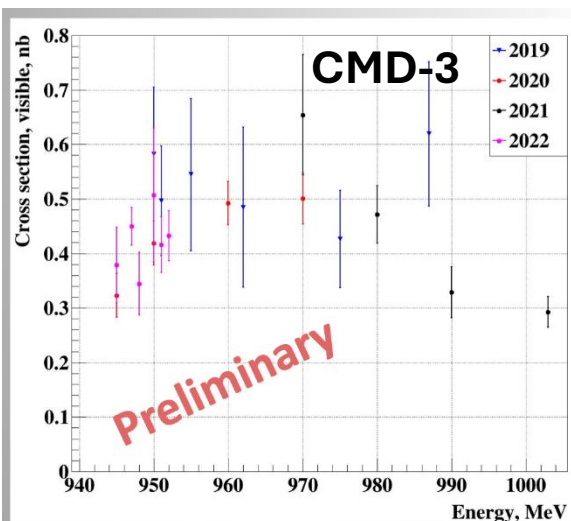
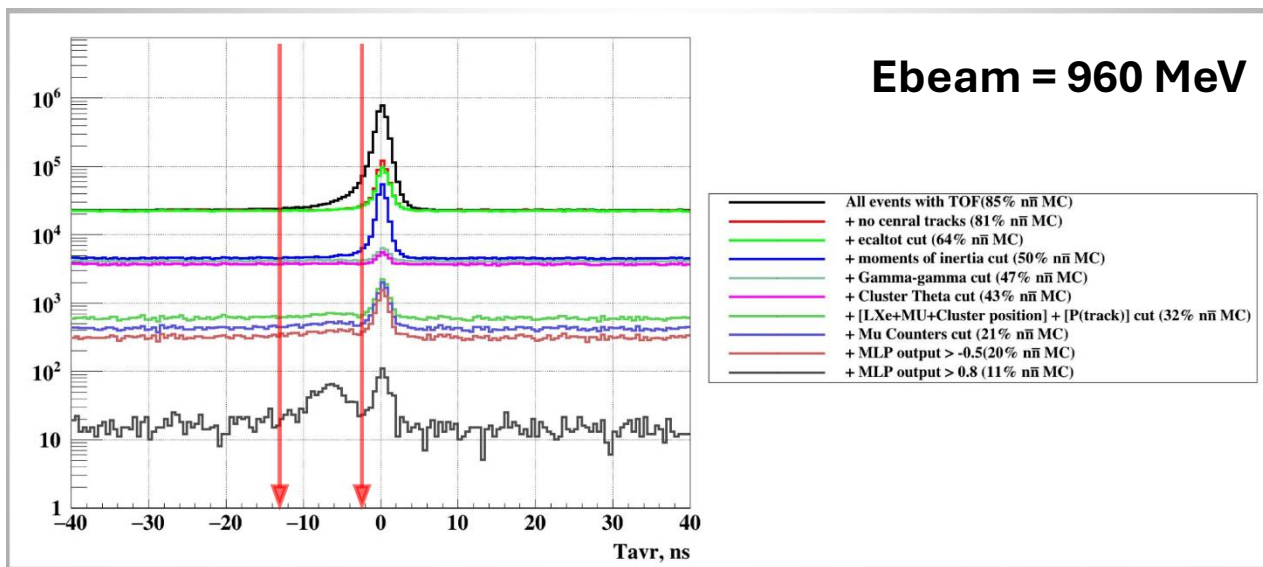


Процесс $e^+e^- \rightarrow p\bar{p}$



- ✓ Предварительный результат КМД-3: самое точное измерение сечения $e^+e^- \rightarrow p\bar{p}$ от порога до 2 ГэВ.
- ✓ Поведение сечения похоже на поведение $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$.
- ✓ Кривая – результат аппроксимации в модели A.I.Milstein and S.G.Salnikov, Phys. Rev. D **106**, 074012 (2022)).

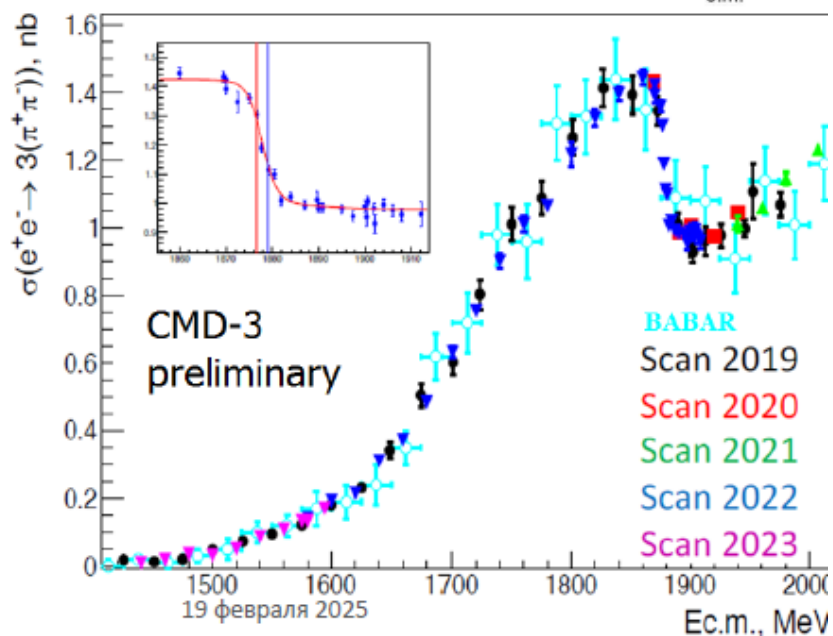
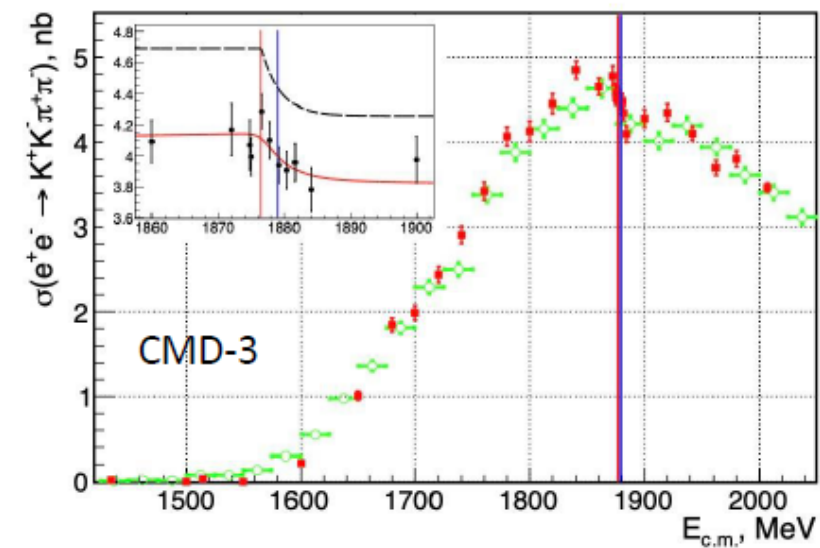
Процесс $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$



CMD-3 Time-Of-Flight system is used with single large cluster in calorimeter:
5-order of background suppression!

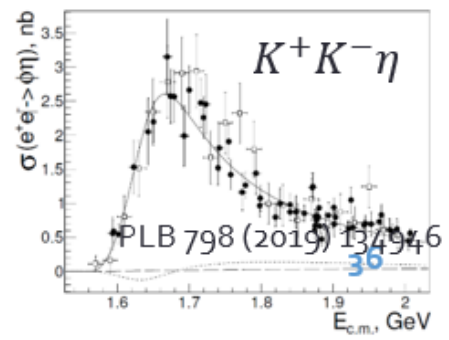
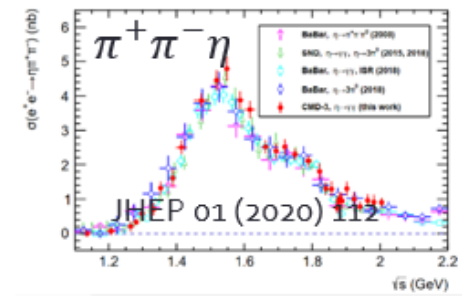
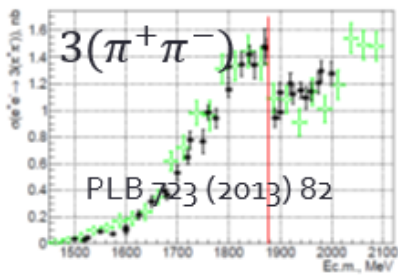
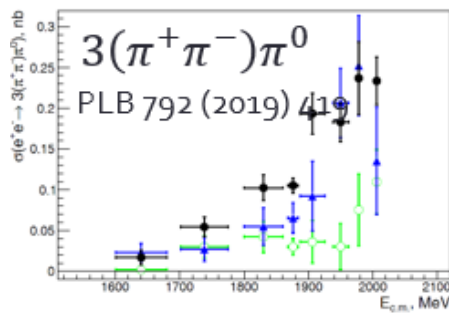
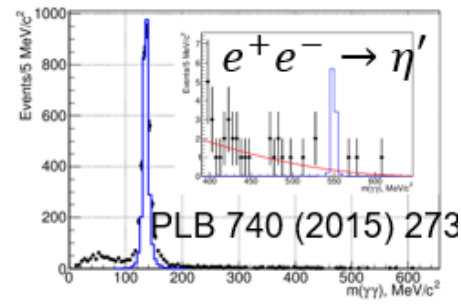
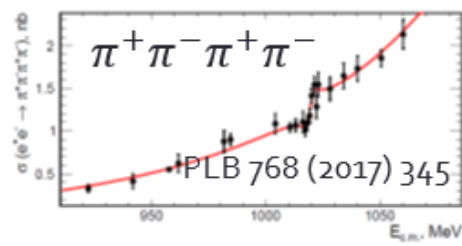
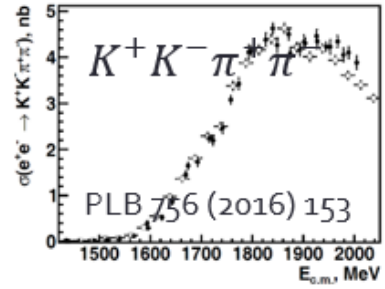
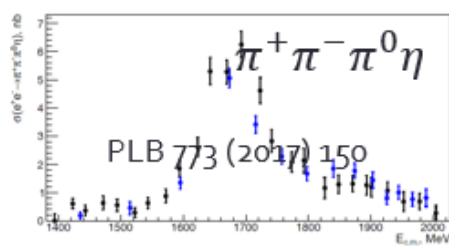
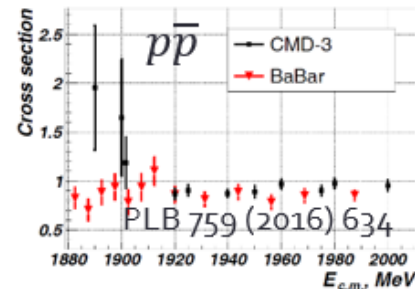
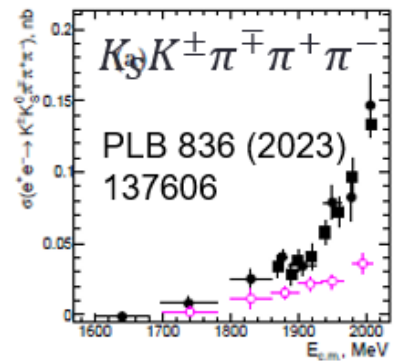
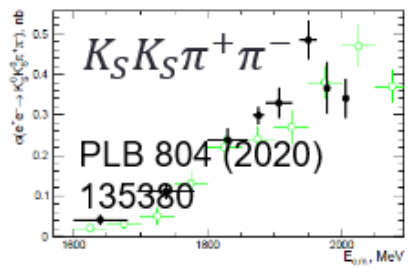
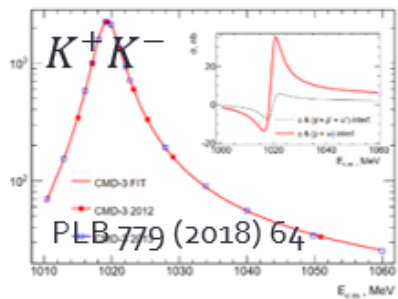
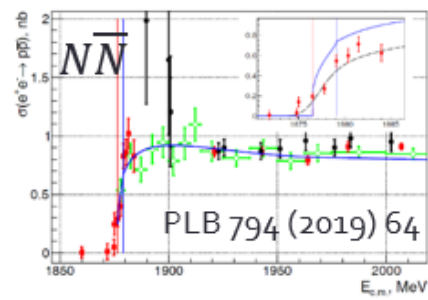
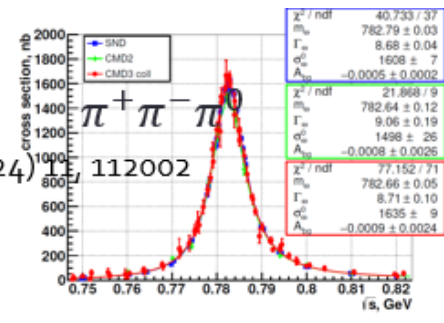
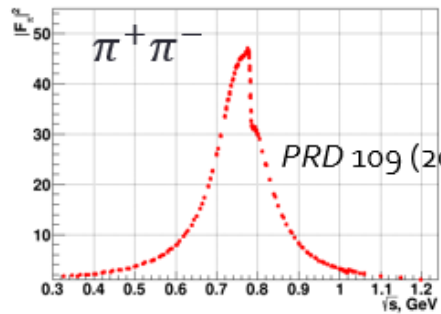
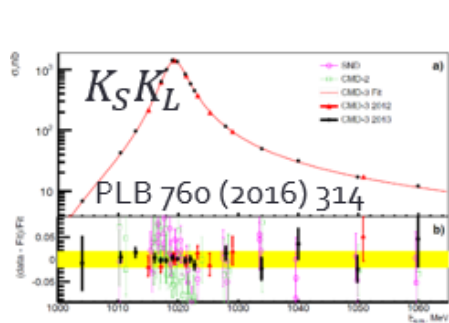
Порог $N\bar{N}$ в многоадронных реакциях

Phys. Lett. B 794 (2019) 64



- Открытие реакций $e^+e^- \rightarrow N\bar{N}$ проявляется как ступенька в сечениях реакций $e^+e^- \rightarrow 6\pi$ и $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^+\pi^-$.
- Ширина ступеньки ~ 2 МэВ
- В сечениях $e^+e^- \rightarrow 3\pi$, 4π и др. такого поведения не видно.
- Модель с взаимодействием в конечном состоянии (A.I.Milstein and S.G.Salnikov) объясняет возникновение ступеньки вкладом от промежуточного состояния $N\bar{N}$. Максимальный вклад ожидается в процессах с $I = 1$.
- Неожиданным выглядит наличие большого скачка (~ 0.3 нб) в сечении процесса с каонами. Его величина сравнима со скачком (~ 0.4 нб) в сечении $e^+e^- \rightarrow 3(\pi^+\pi^-)$

Published CMD-3 results



VEPP-2000 /CMD-3 plans

We plan to finish low-energy scan and take some dedicated high energy data over next two years (*potential systematics tests: reverse beams – **DONE!**, no LXe,...*)

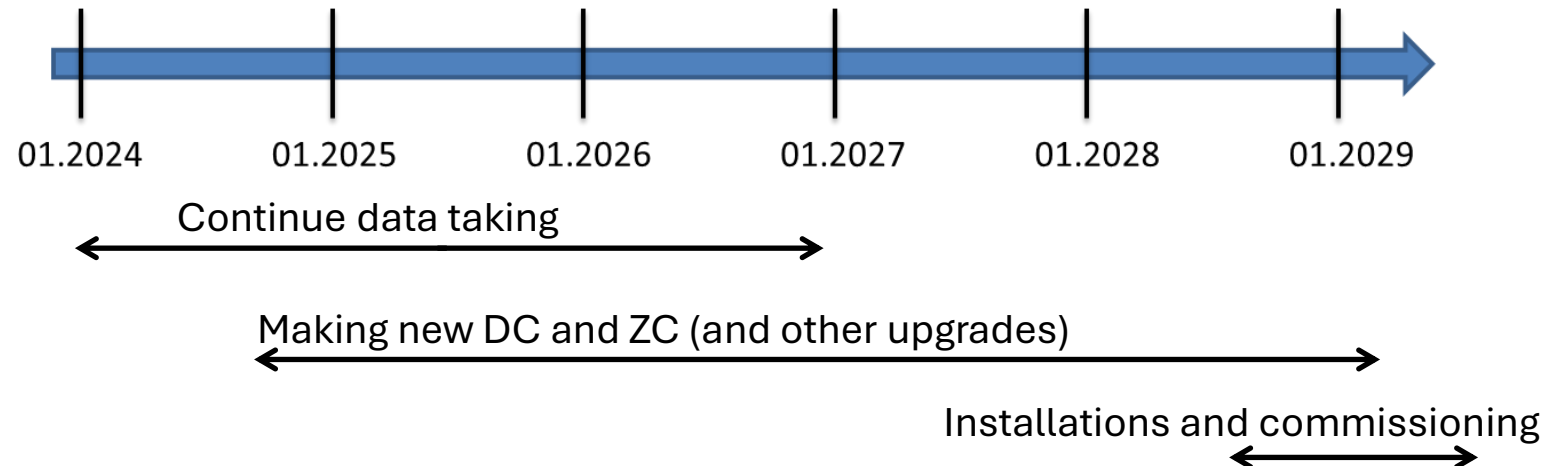
Then we plan to have 3 year break for detectors upgrades

CMD-3 planned upgrades:

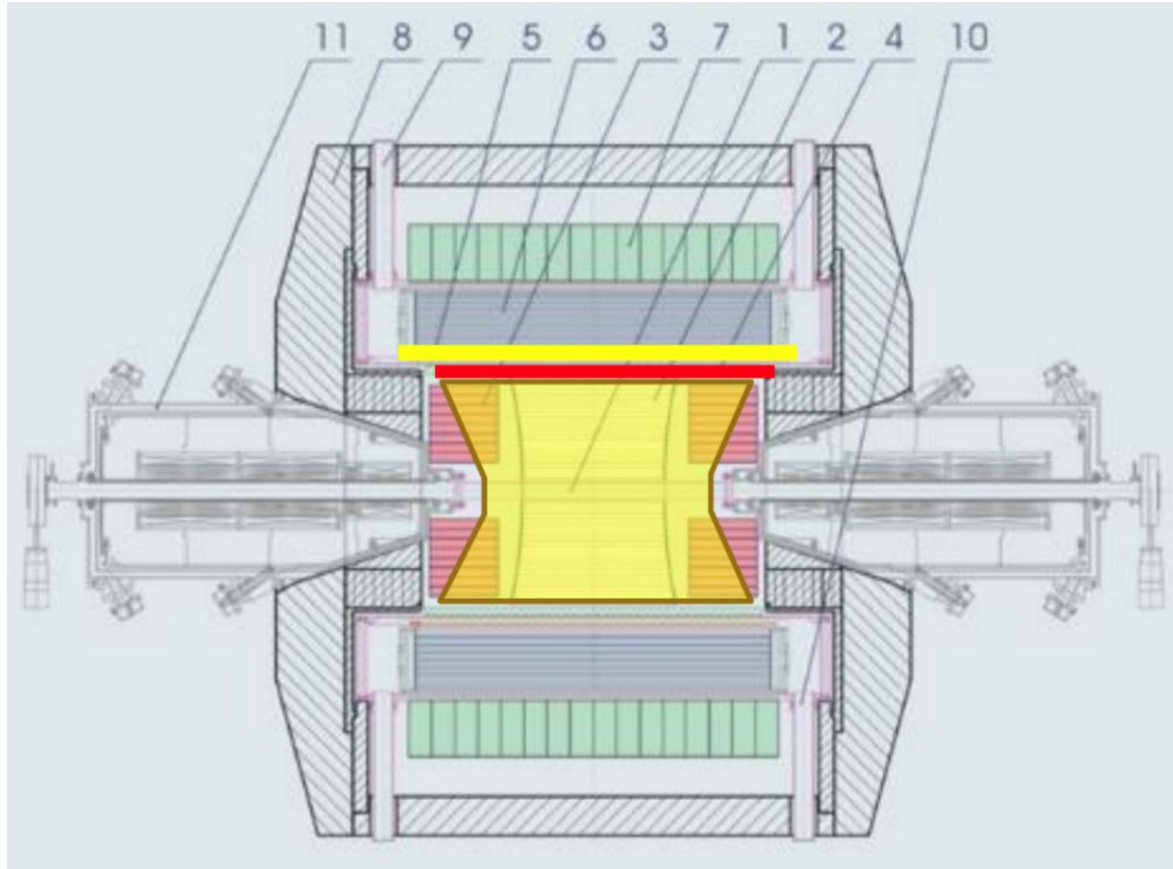
- new drift chamber with semi-conductor strip detector at the inner radius
- new Z-chamber at outer radius
- upgrade of electronics

Various options are discussed: longer DC, larger DC, larger magnetic field,...

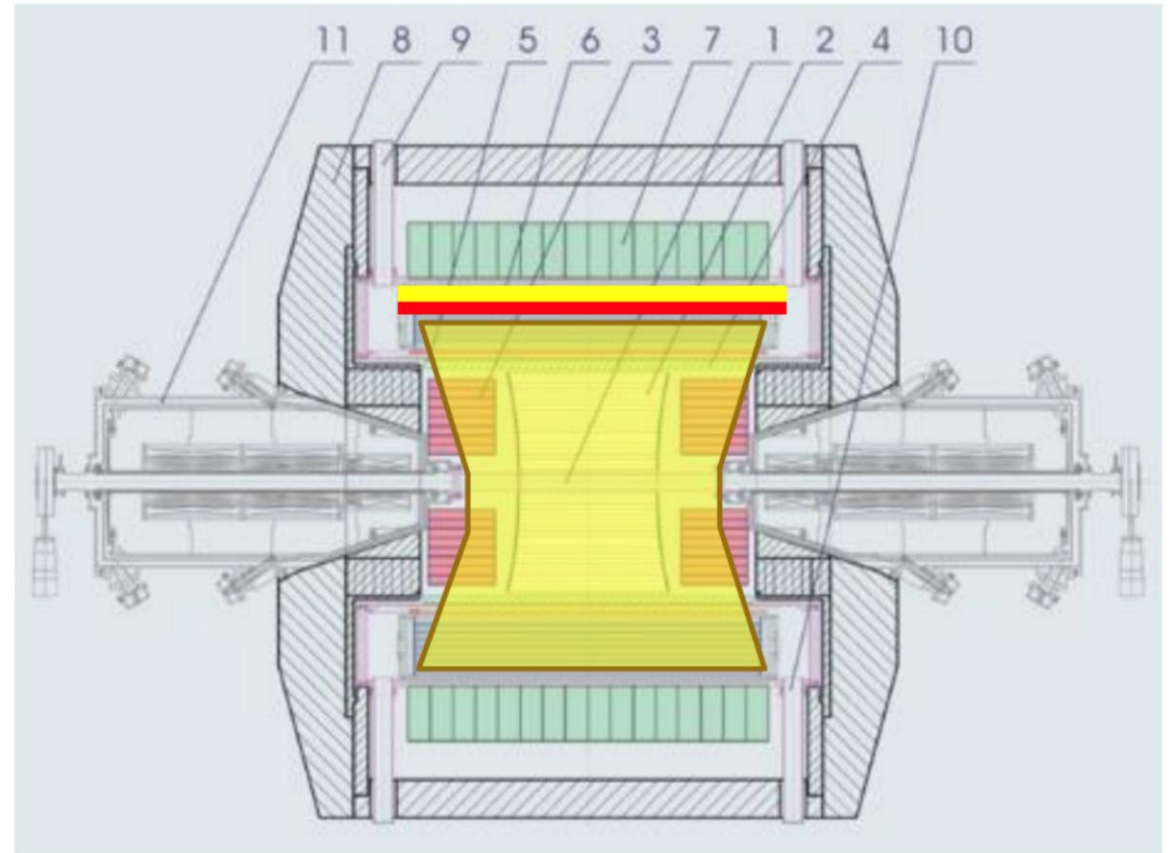
The goal is to reach $\sim 0.2\text{-}0.3\%$ in $\sigma(e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-)$



МОДЕРНИЗАЦИЯ ДЕТЕКТОРА (КМД-3 → КМД-3М)



**ДЛИННАЯ ДРЕЙФОВАЯ
КАМЕРА**



**БОЛЬШАЯ ДРЕЙФОВАЯ
КАМЕРА**

ПРОЕКТ ВЭПП-6 (ИЯФ СО РАН)

- Двухкольцевой электрон-позитронный коллайдер с одним местом встречи.
- Метод встречи Crab Waist – пересечение под достаточно большим углом (30-60 мрад), который теоретически позволяет поднять светимость в 10-100 раз.
- Максимально использовать технологии, компетенции, инфраструктуру (инженерную, тоннели, здания) уже существующие в ИЯФ для уменьшения стоимости и сроков.
- Оптимизировать светимость от 1000 МэВ/пучок до области (J/ψ - τ) с возможностью работы от ≈ 500 МэВ/пучок до ≈ 2100 МэВ/пучок.
- Светимость в оптимизируемой области должна быть существенно выше, чем у предшественников.

Концепция:

Не стремиться за экстремальными параметрами ускорителя (ток, β_y^* , ξ_y , малые эмиттансы, малая бетатронная связь и т.д.), а выбрать надежно реализуемые и посмотреть, какая получается светимость – интересная для экспериментов или нет.

РАСЧЕТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ВЭПП-6

E(MeV)	500	1000	1550	2100
$\Pi(\text{m})$	383.805559893499			
$F_{RF}(\text{MHz})$	349.935048478849			
$2\theta(\text{mrad})$	60			
$\beta_x^*/\beta_y^*(\text{mm})$	100/3			
I(A)	0.4	0.6	1.5	1.5
$N_{e/bunch} \times 10^{-10}$	0.8	1.2	2.8	4.6
N_b / q	403/448	403/448	403/448	260/448
$U_0(\text{keV}) / V_{RF}(\text{kV})$	6.6/365	34/742	118/1220	312/1850
ν_s	0.0145	0.0146	0.015	0.0158
$\delta_{RF}(\%)$	1.58	1.56	1.54	1.53
$\sigma_e \times 10^3$ (SR/IBS+WG)	0.15/0.76	0.3/0.8	0.5/0.8	0.6/0.9
$\sigma_s(\text{mm})$ (SR/IBS+WG)	2.6/12.8	5/13	8/14	10/14
$\varepsilon_x(\text{nm})$ (SR/IBS+WG)	0.8/28	3.3/8.1	8/6	14.7/10
$\varepsilon_y/\varepsilon_x$	0.02	0.02	0.02	0.02
$L_{HG} \times 10^{-34}(\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1})$	0.029	0.12	0.77	1
ξ_x/ξ_y	0.002/0.02	0.002/0.03	0.002/0.05	0.003/0.05
$\tau_{Touschek}(\text{s})$	716	827	865	2050
$N_{cells}(\mu)$	24($\pi/3$)			

можно рассчитывать на
светимость:

500 МэВ: $1 \div 3 \cdot 10^{32} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$

$\approx 1 \cdot \text{DAPHNE}$

1000 МэВ: $1 \cdot 10^{33} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$

$\approx 10 \cdot \text{VEPP-2000}$

1550 МэВ: $0.5 \div 1 \cdot 10^{34} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$

$\approx 20 \cdot \text{БЕРСИ}$

ФИЗИЧЕСКАЯ ПРОГРАММА КОЛЛАЙДЕРА ВЭПП-6

Прецизионное исследование свойств легких адронов

ВЭПП-6 будет являться J/ψ фабрикой. Ожидаемая статистика распадов J/ψ мезона – 5×10^{11} (5×10^8 η и 3×10^9 η' , 10^{10} a_2 и f_2 , 10^9 Λ и Σ).

- ✓ Измерение масс, ширин, вероятностей распадов.
- ✓ Исследование динамики распадов.
- ✓ Поиск редких и запрещенных в Стандартной модели распадов и явлений.

Заключение

- ❑ Цель экспериментов КМД-3 на коллайдере ВЭПП-2000 – измерение эксклюзивных сечений $e^+e^- \rightarrow hadrons$ от 0.32 до 2.007 ГэВ
- ❑ В 2010-2024 КМД-3 набрал статистику > 1 фб⁻¹ в диапазоне энергий $0.32 \leq \sqrt{s} \leq 2.007$ ГэВ, доступном на ВЭПП-2000.
- ❑ В 2026-2028 предполагается модернизация детектора КМД-3, эксперимент возобновится в 2029
- ❑ Ведется анализ данных $e^+e^- \rightarrow hadrons$. Результаты уже опубликованы в > 120 статьях в международных реферерируемых журналах.
- ❑ В ИЯФ СО РАН разрабатывается проект коллайдера следующего поколения ВЭПП-6, который также станет рекордсменом в области энергий $2 \times (0.5-2.0)$ ГэВ

Backup Slides

Аномальный магнитный момент мюона (I)

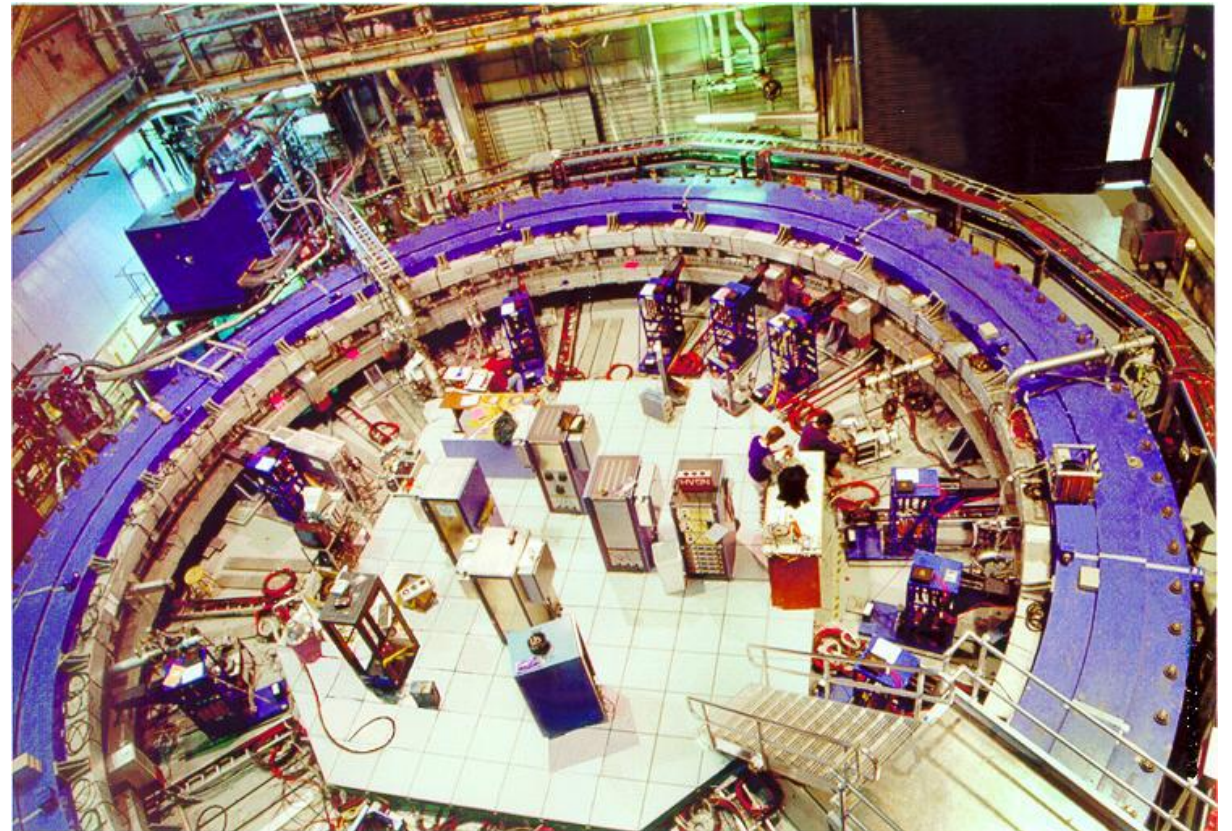
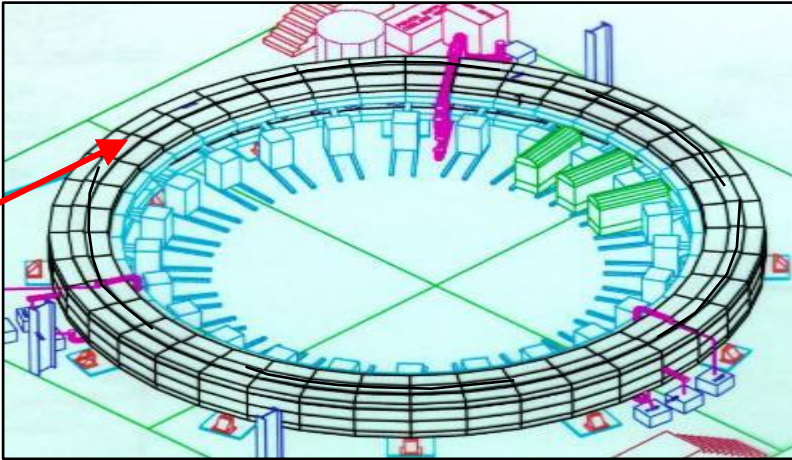
- Гиромагнитное отношение g для
 - – Точечного фермиона: $g = 2$
 - – Вклады высших порядков: $g \neq 2$
- Мюонная аномалия
 - – $a_\mu = (g-2)/2$

$$\vec{\mu} = g \frac{e\hbar}{2mc} \vec{S}$$

E821 Experiment @ BNL (1997-2001):

J. Muller et al., Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. Vol. 62(2012), 237

$$a_\mu = (11\,659\,208.9 \pm 6.3) \cdot 10^{-10} (0.54 \text{ ppm})$$



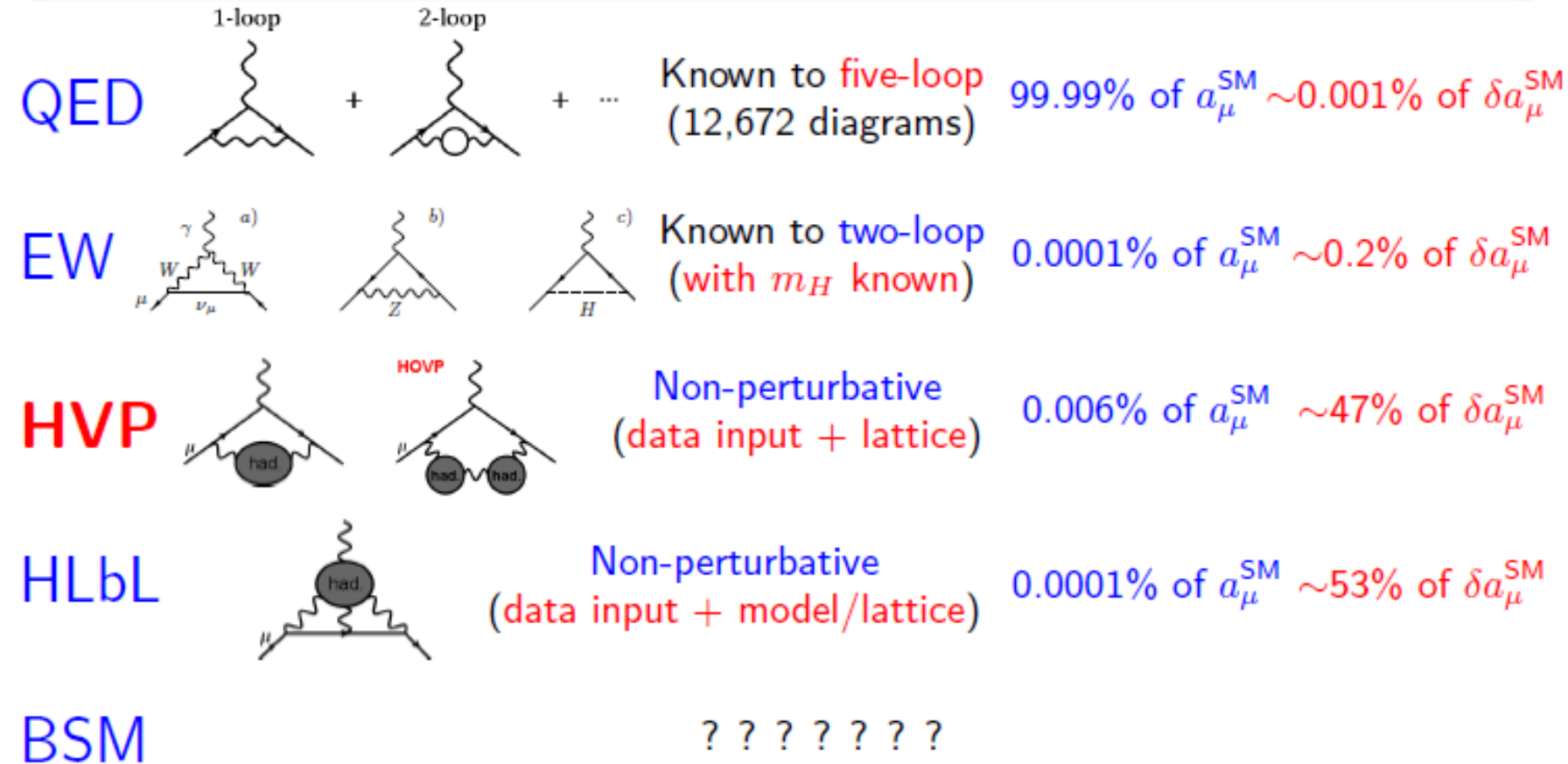
$$\omega_s = \frac{geB}{2m} + (1 - \gamma) \frac{eB}{\gamma m} \quad \omega_c = \frac{eB}{\gamma m}$$

$$\omega_a = \omega_s - \omega_c = a \frac{eB}{m}$$

Аномальный магнитный момент мюона (II)

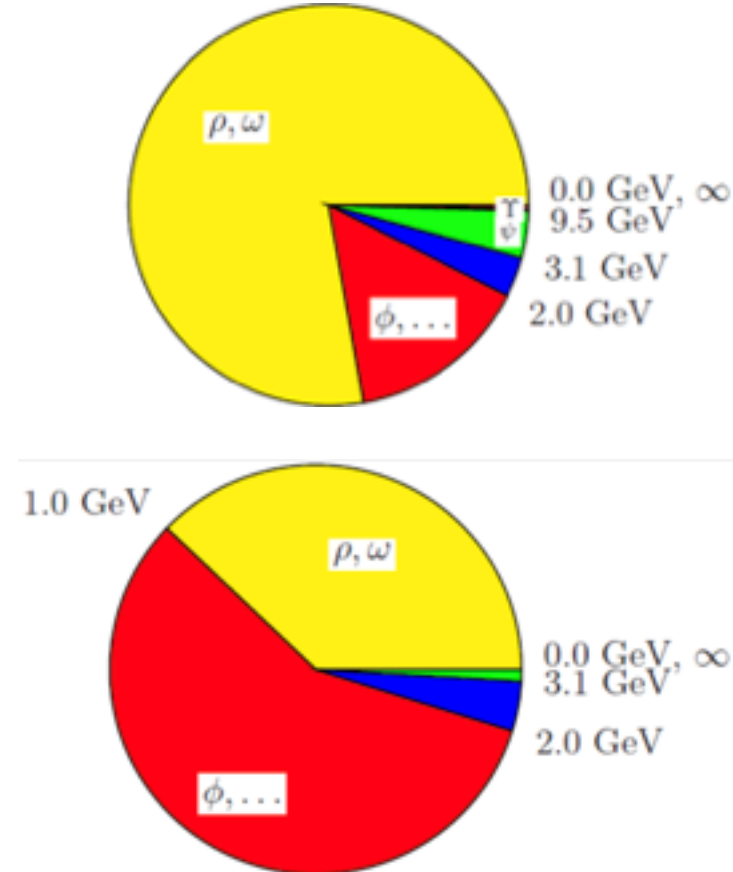
The Standard Model determination of a_μ

$$a_\mu^{\text{SM}} = a_\mu^{\text{QED}} + a_\mu^{\text{EW}} + a_\mu^{\text{had, VP}} + a_\mu^{\text{had, LbL}} + a_\mu^{\text{BSM??}}$$

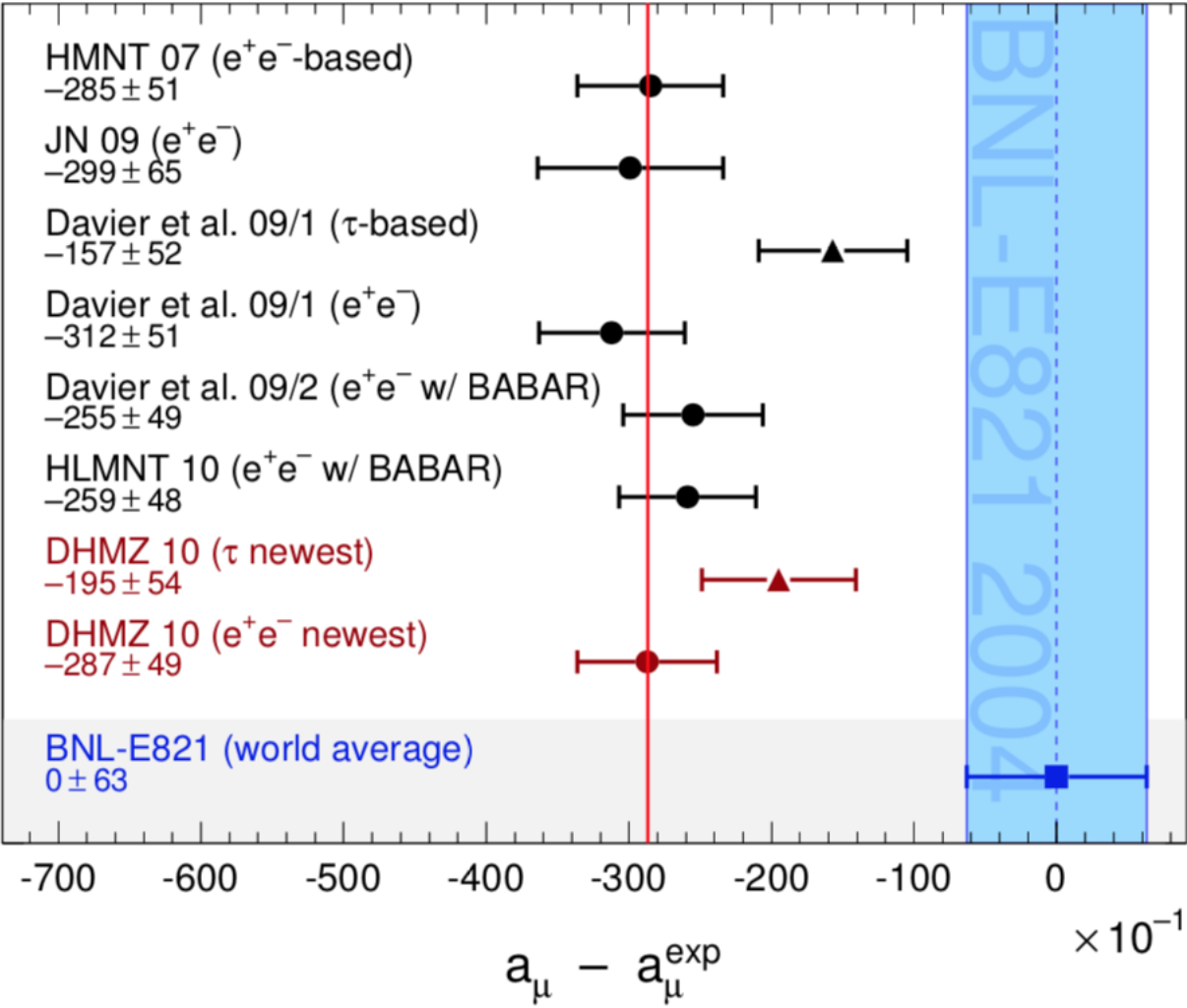


$$a_\mu^{\text{had}} = \frac{\alpha^2}{3 \cdot \pi^2} \int_{4m_\pi^2}^{\infty} ds \cdot \frac{K(s)}{s} \cdot R(s)$$

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



Аномальный магнитный момент мюона (III)



$$a_\mu^{\text{SM}} = 11\,659\,182.05 (3.56) \times 10^{-10} \text{ (Теория)}$$

$$a_\mu^{\text{EX}} = 11\,659\,208.9 (6.4) \times 10^{-10} \text{ (Эксперимент E821)}$$

$$a_\mu^{\text{EXP}} - a_\mu^{\text{SM}} = 3.6\sigma$$

(M. Davier et al., EPJC71(2011)1515)

Вклад	Значение, $\times 10^{-10}$	Ошибка, 10^{-10}
КЭД	11 658 471.895	0.008
Слабый	15.4	0.2
Адронный	693.0	4.9
E821 (БНЛ)	11 659 208.9	6.4
E821 -	28.7	8.0

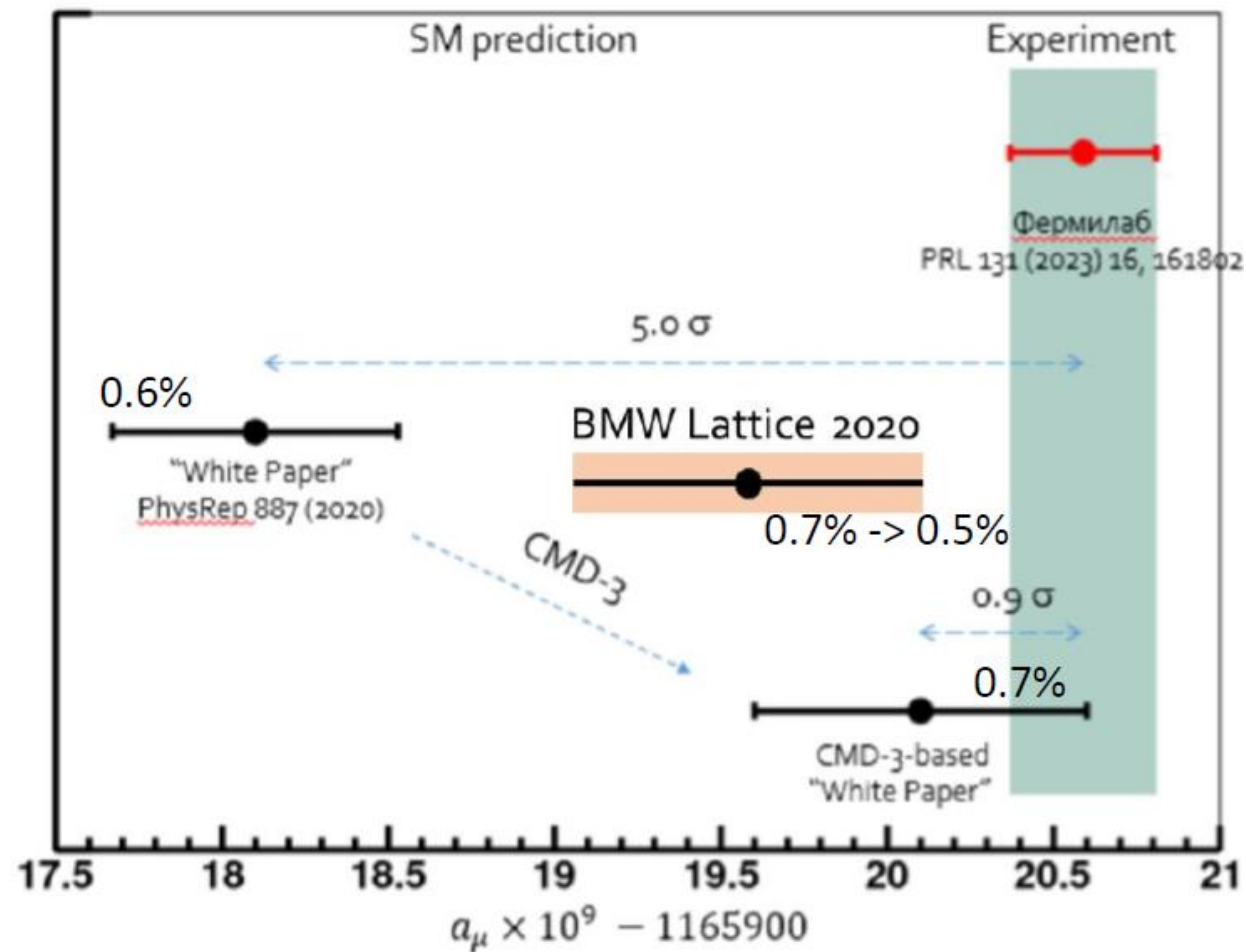
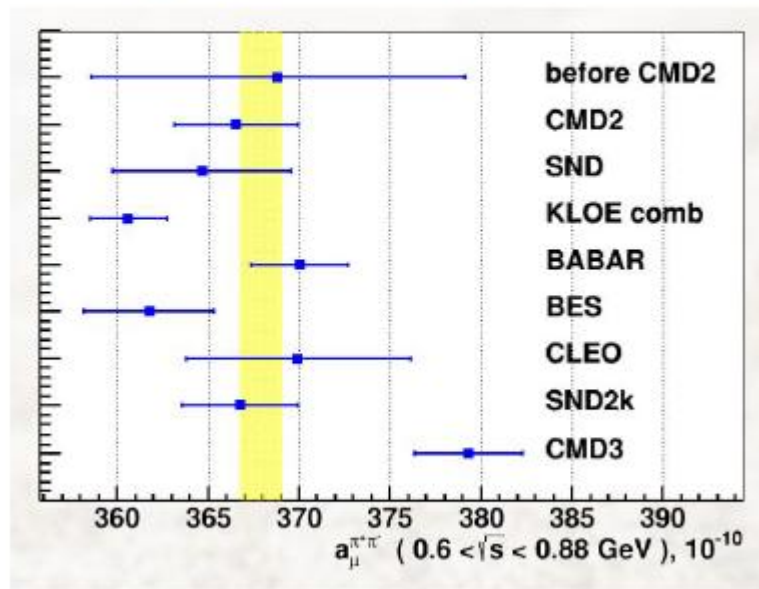
Новая физика ? Флуктуация ? Нужны новые точные измерения $(g-2)/2$, новые точные измерения σ_{had}

Эксперимент E969 в лаборатории имени Э. Ферми (Чикаго, США)



Текущий статус a_μ

Сравнение результатов
разных экспериментов



2.9%

Будущие эксперименты

Эксперимент E34 (J-PARC), 2030 -
Точность: 0.1 ppm

