

КМД-3 (Криогенный Магнитный Детектор)



Логашенко И.Б.

Научная сессия ИЯФ, 2 марта 2023

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

Коллектив ~50 человек

Лаборатории 2, 3-3, 3-13,...

Физическая программа ВЭПП-2000



- Измерение сечений рождения во всем диапазоне энергий
- Изучение динамики (промежуточных состояний)

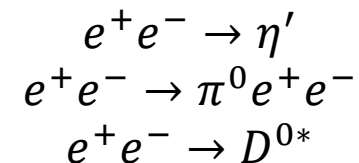
Изучение рождения адронов
в аннигиляции e^+e^-

- Измерение параметров резонансов
- Адронный вклад в $g-2$ мюона

ВЭПП-
2000

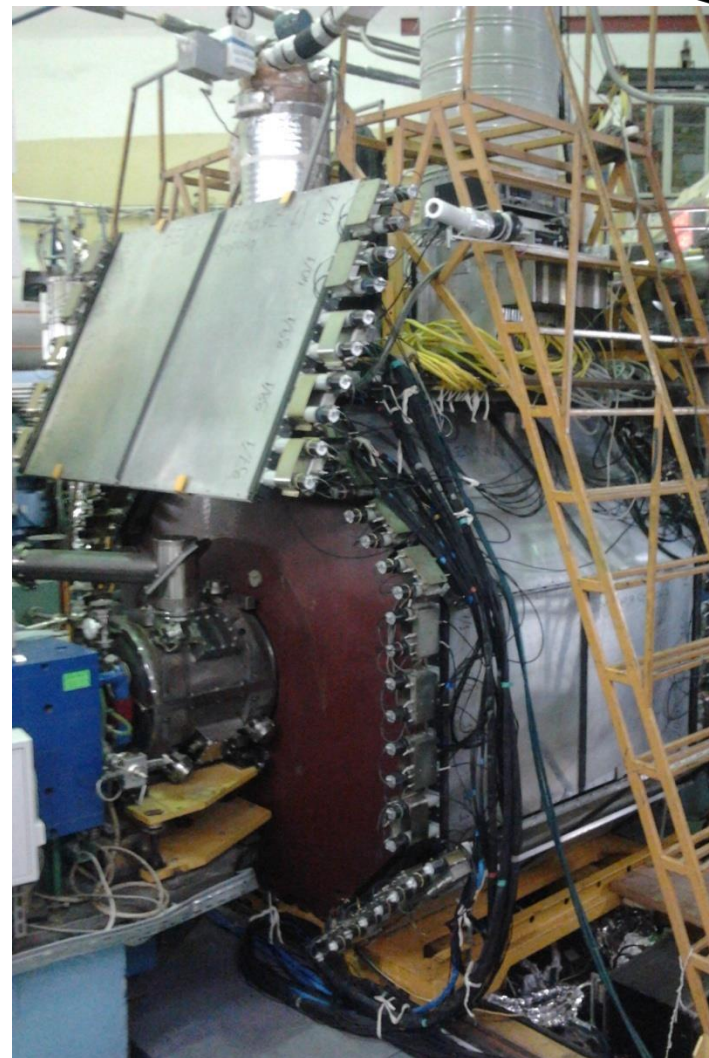
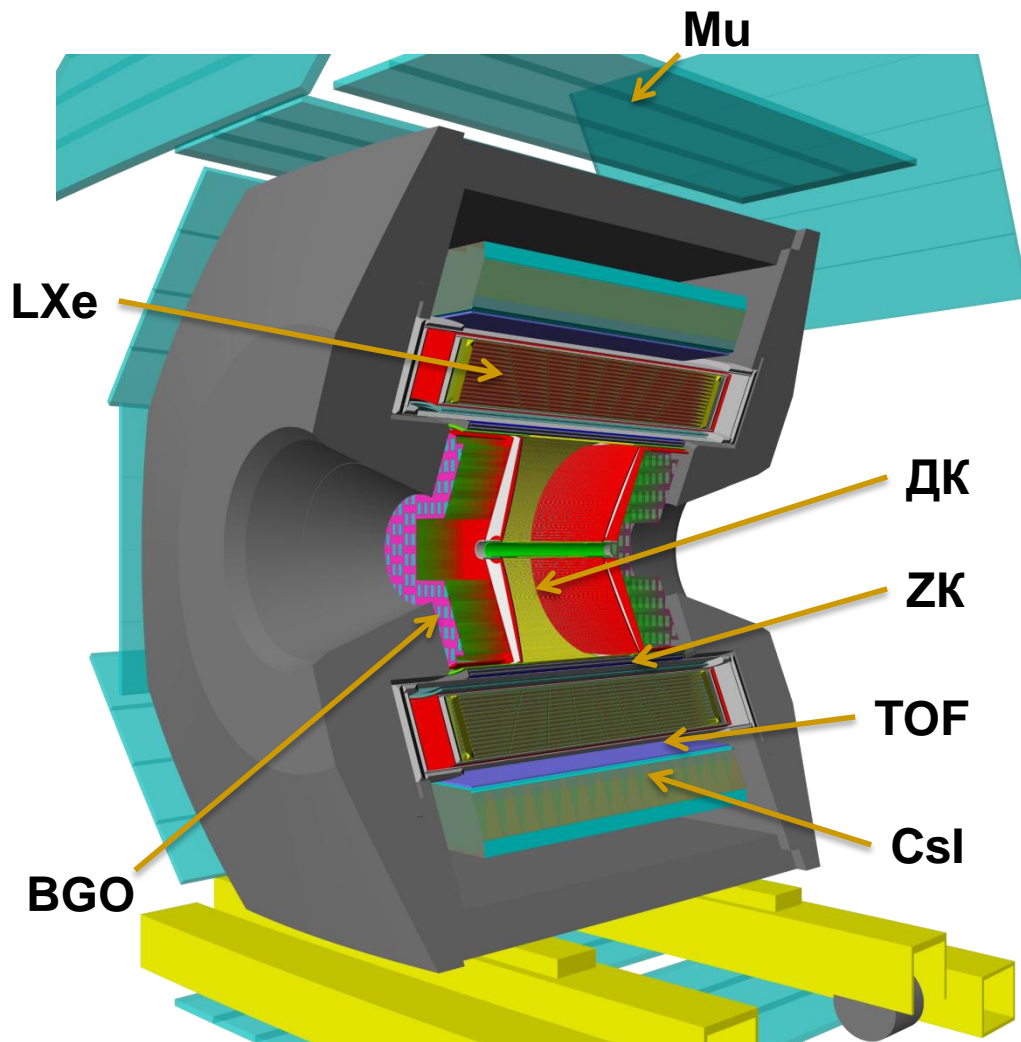
Изучение рождения адронов
вблизи порога $N\bar{N}$

Отдельные
задачи

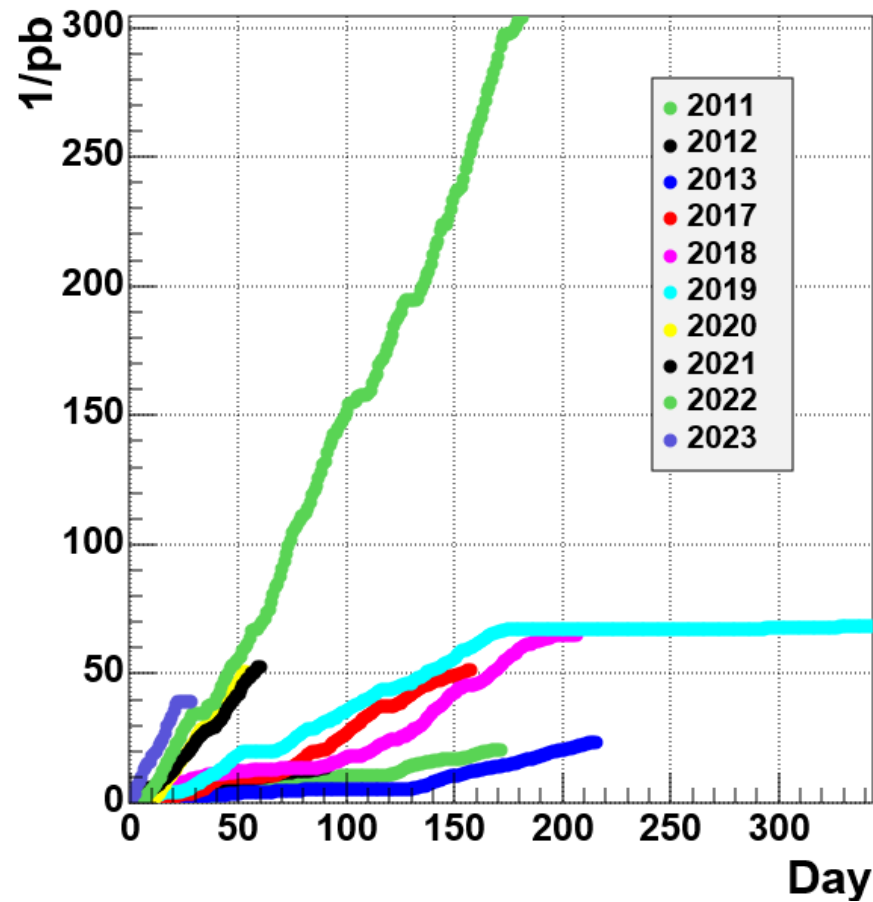
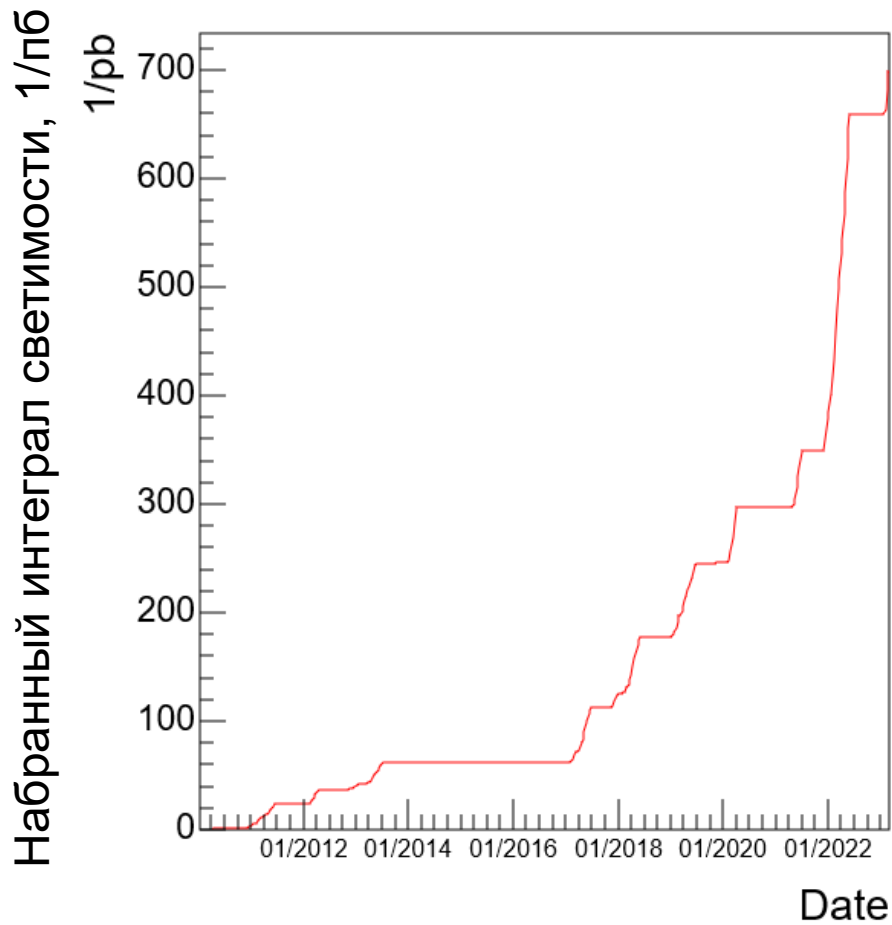


- Электромагнитные формфакторы нуклонов
- Поведение адронных сечений на пороге

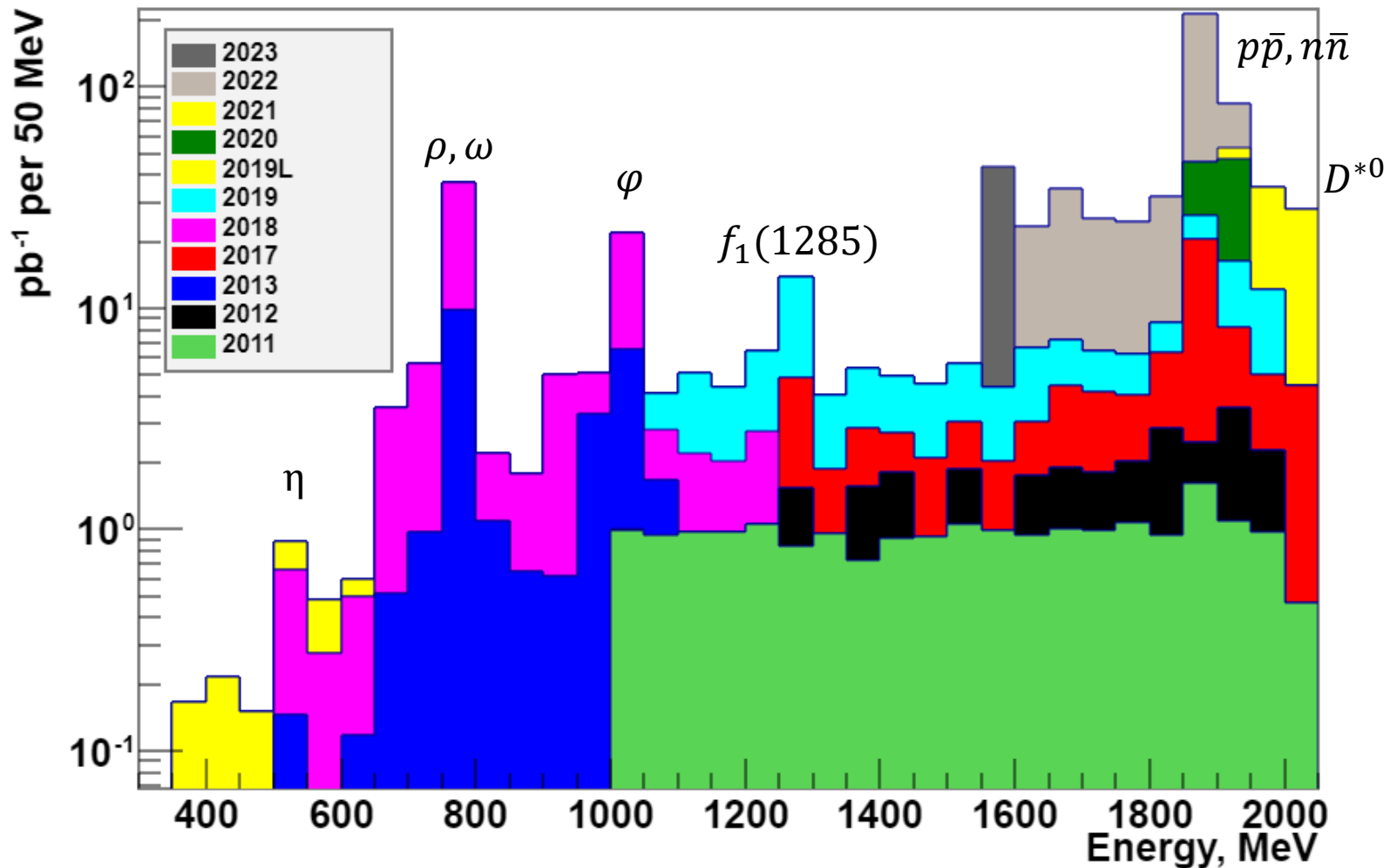
Детектор КМД-3



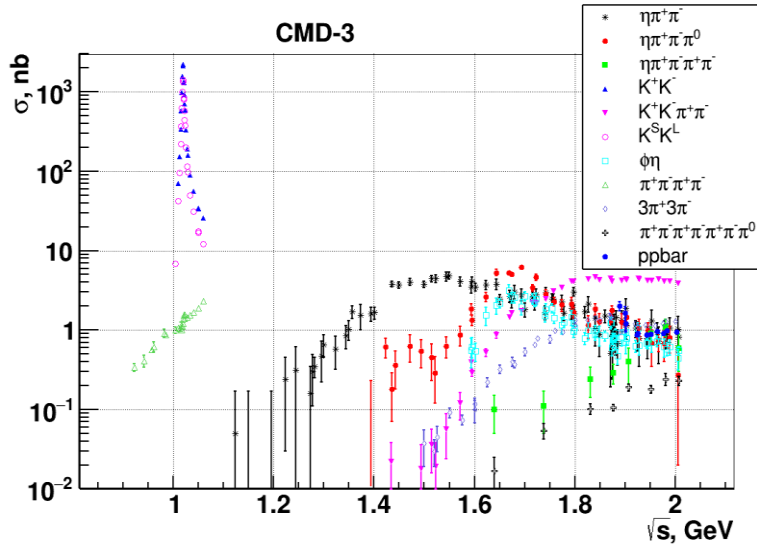
История набора статистики



История набора статистики



Анализ данных

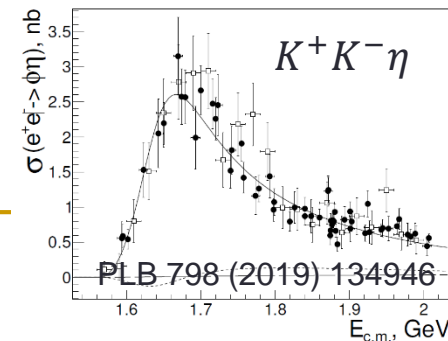
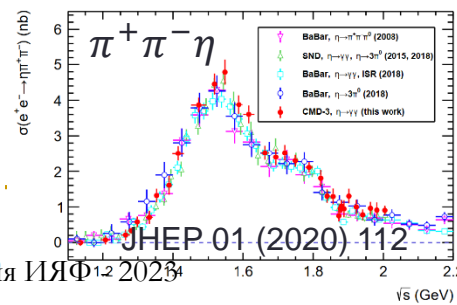
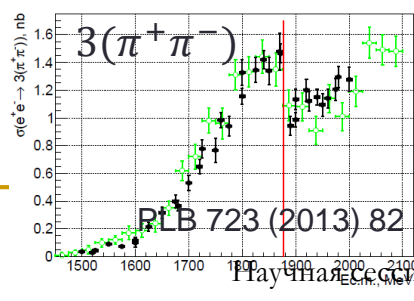
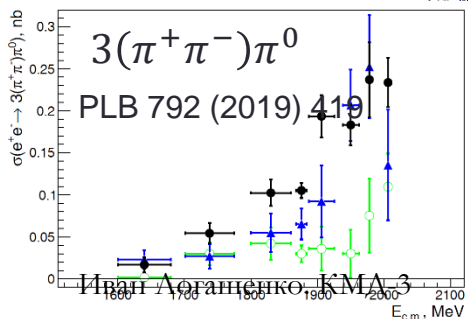
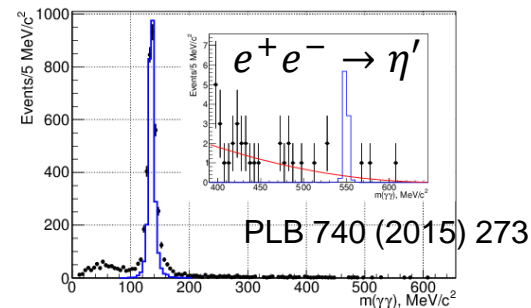
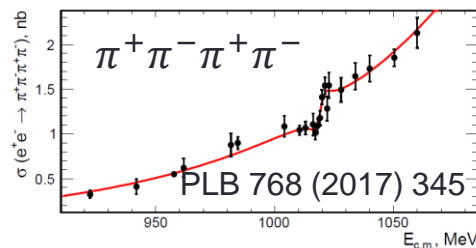
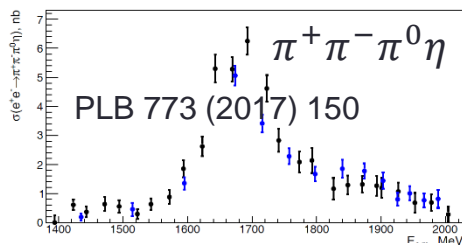
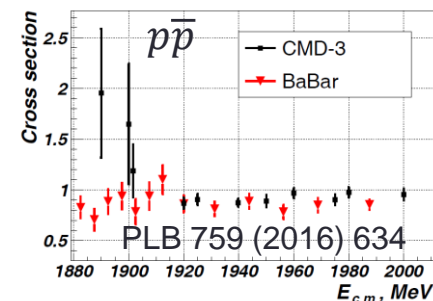
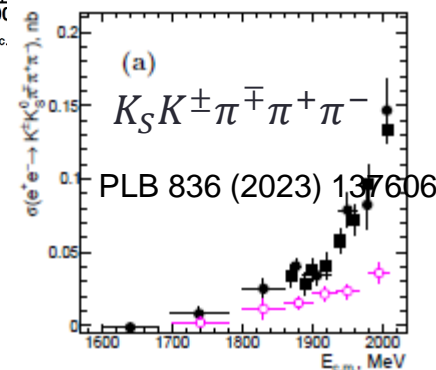
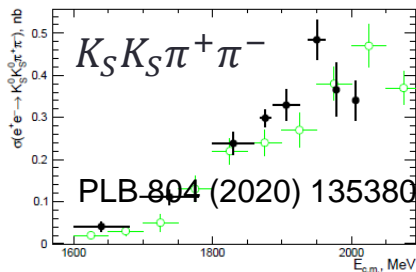
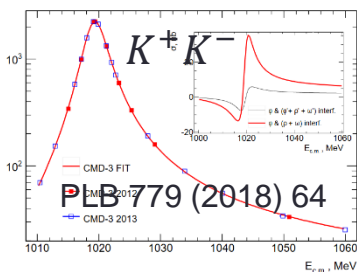
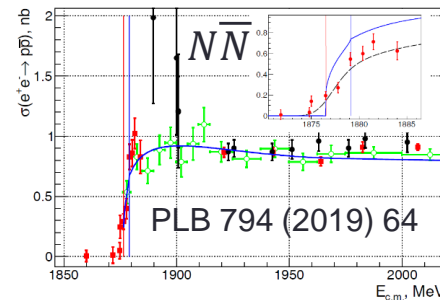
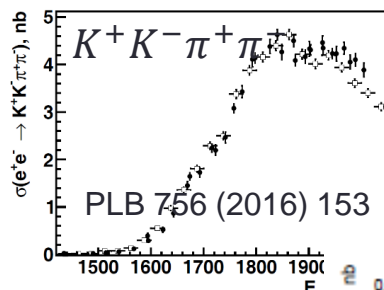
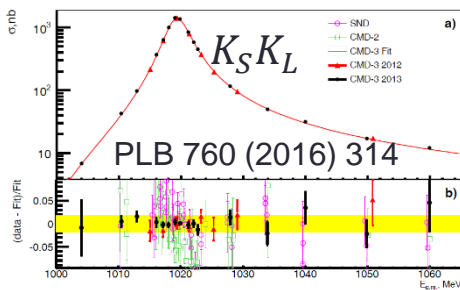


Ведется независимый анализ данных для каждого конечного состояния (десятки)

Скорость получения результатов определяется количеством людей, занимающихся анализом

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	$2(\pi^+\pi^-)\pi^0, 2\pi^+2\pi^-2\pi^0, \pi^+\pi^-\eta, \pi^+\pi^-\omega, 2\pi^+2\pi^-\eta, K^+K^-\omega, K_S K_S\pi^+\pi^0$
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	$n\pi, \pi^0e^+e^-, \eta e^+e^-$
Rare decays	$\eta', D^*(2007)^0$

CMD-3 published results



Пакет кинематической реконструкции



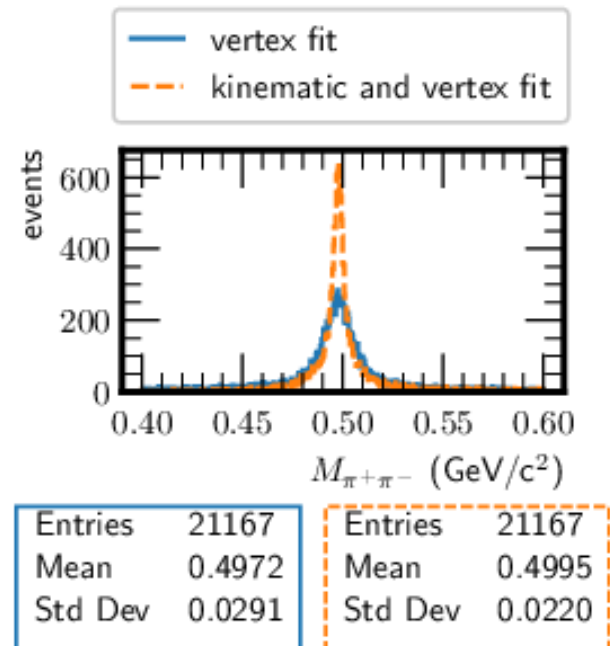
arXiv:2208.11569 -> JINST

Предназначение пакета:

1. для анализа данных с детектором КМД-3;
2. прототип пакета кинематической реконструкции для Super-Charm-Tau фабрики.

Особенности и возможности пакета:

1. кинематическое и вершинное фитирование;
2. параметризации четырех-импульсов и траекторий для различных типов частиц, например, заряженных частиц, фотонов, промежуточных и потерянных частиц;
3. наличие условий выполнения законов сохранения энергии-импульса, вершинных условий и условий на инвариантную массу.



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

$$e^+e^- \rightarrow K_S K^\pm \pi^\mp \pi^+ \pi^-$$



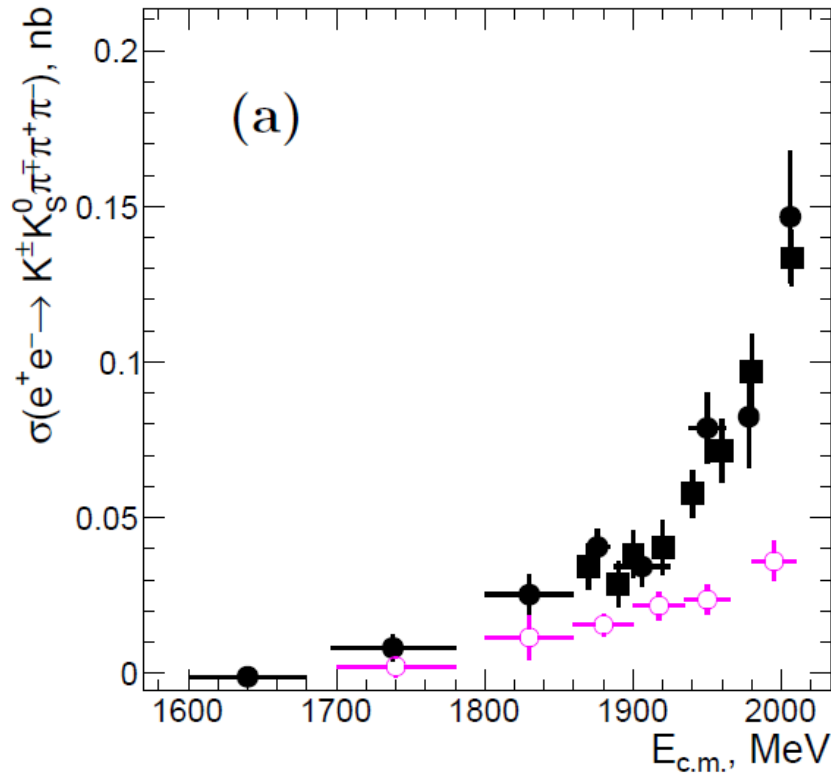
1. $e^+e^- \rightarrow K^+ K^- \pi^+ \pi^- \pi^0$ - the only measured XS – BaBar
Phys.Rev. D76 (2007) 092005
2. $e^+e^- \rightarrow K^+ K^- \pi^0 \pi^0 \pi^0$ - No info . Partly from $\phi\eta$
3. $e^+e^- \rightarrow K_S K_L \pi^0 \pi^0 \pi^0$ - No info . Partly from $\phi\eta$
 $e^+e^- \rightarrow K_S K_L \pi^+ \pi^- \pi^0$
4. $e^+e^- \rightarrow K^+ K_{S,L} \pi^+ \pi^0 \pi^0$ - No info – similar to $\pi^+ \pi^- \pi^+ \pi^- \pi^0 \pi^0$
5. $e^+e^- \rightarrow K_S K_S \pi^+ \pi^- \pi^0$ - No info – similar to $K_S K_S \pi^+ \pi^-$
 $e^+e^- \rightarrow K_L K_L \pi^+ \pi^- \pi^0$
6. $e^+e^- \rightarrow K^+ K_{S,L} \pi^+ \pi^+ \pi^-$ - No info – 6 tracks, good for CMD-3

$$e^+e^- \rightarrow K_S K^\pm \pi^\mp \pi^+ \pi^-$$

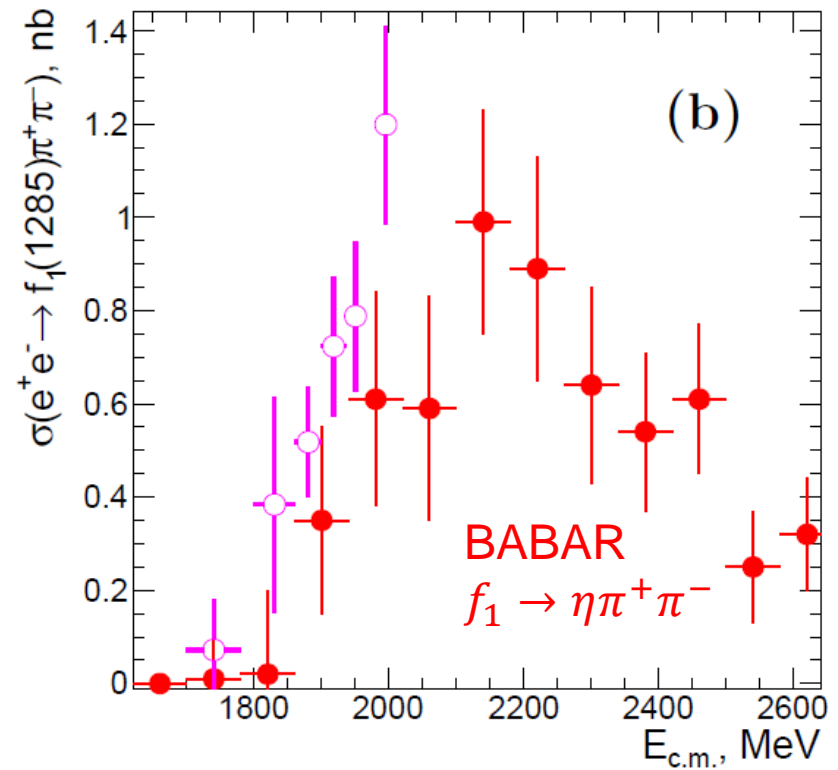
PLB 836 (2023) 137606



185 1/pb, 2011-2021 data



Полное сечение



$e^+e^- \rightarrow f_1(1285)\pi^+\pi^- \rightarrow K_S K^\pm \pi^\mp \pi^+ \pi^-$

Систематическая ошибка ~15%

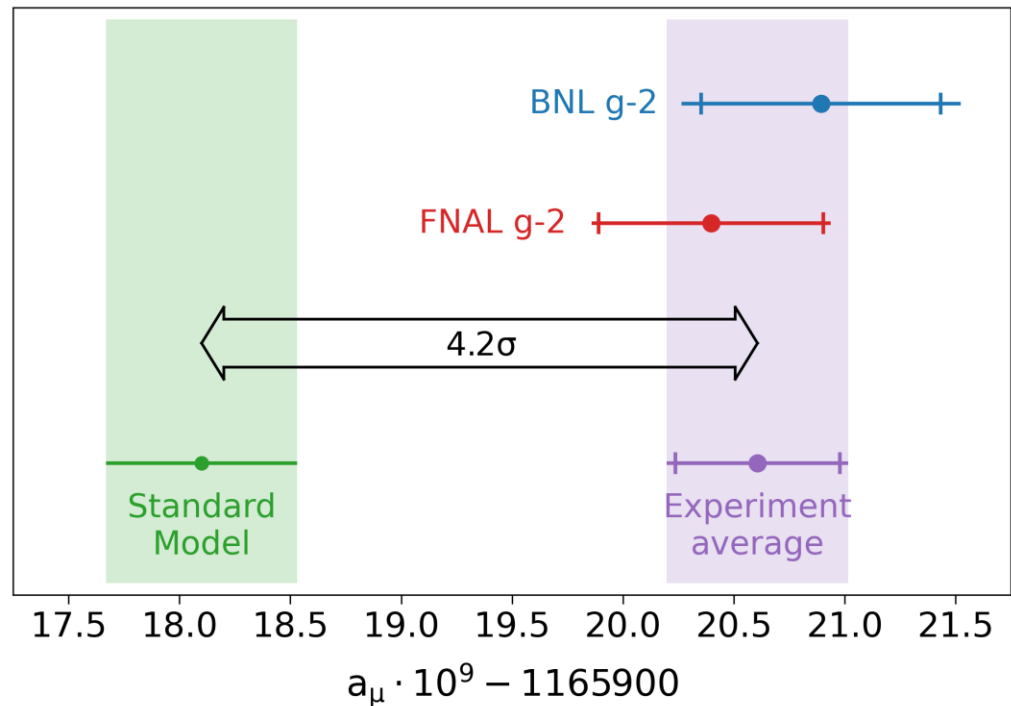
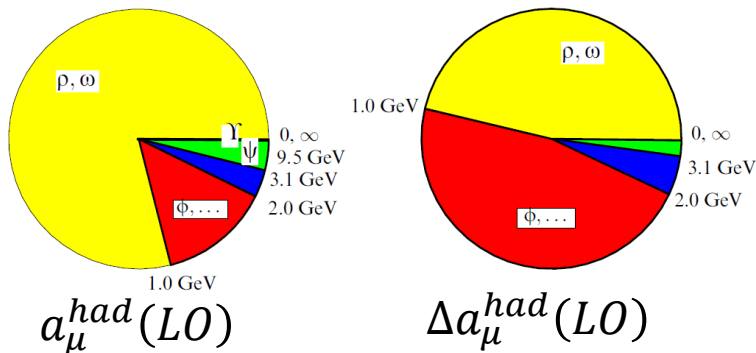
Аномальный магнитный момент мюона



$$a_\mu = a_\mu^{QED} + a_\mu^{Had} + a_\mu^{Weak}$$

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

$$R(s) = \frac{\sigma^0(e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow hadrons)}{4\pi\alpha^2/3s}$$



Основной вклад вносит $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ (>70%),
80% из которого набирается в области 0.6-1.0 ГэВ

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

arXiv:2302.08834



Данные 2013, 2018, 2020

0.32-1.2 GeV

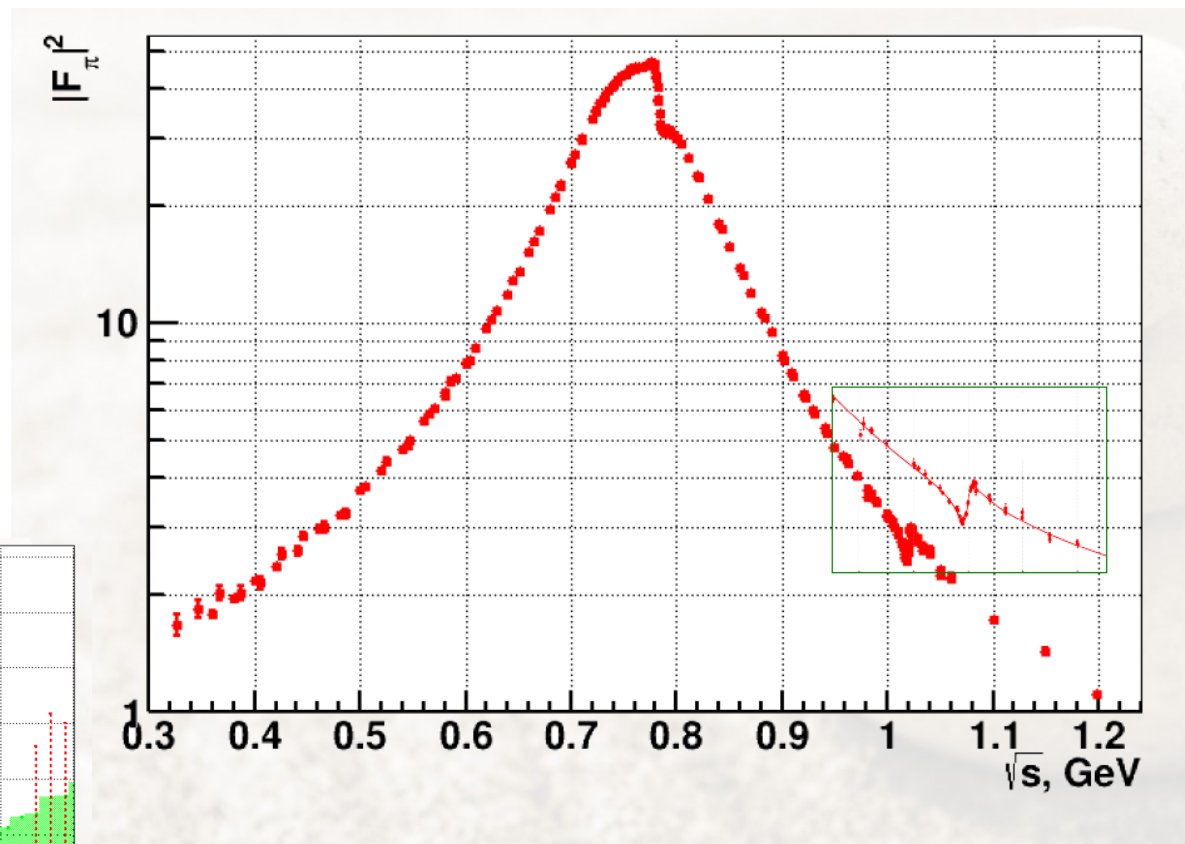
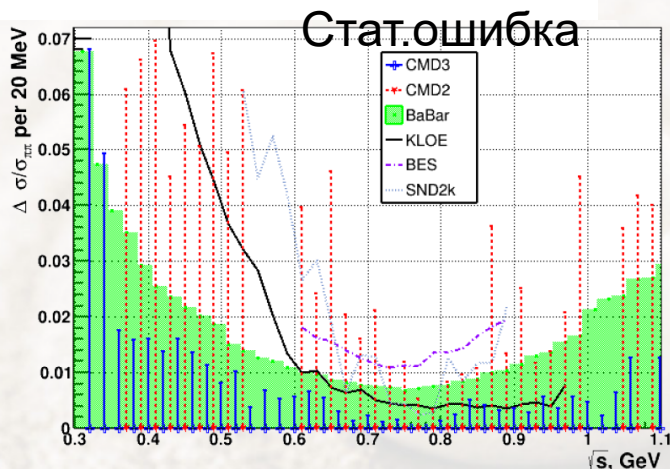
62 1/pb ниже 1 GeV

25 1/pb выше 1 GeV

$34 \times 10^6 \pi^+\pi^-$

$44 \times 10^6 e^+e^-$

$3.7 \times 10^6 \mu^+\mu^-$



0.8% (low) - 0.7% (ρ) - 1.6% (φ)
 1.1% (low) - 0.9% (ρ) - 2.0% (φ) (RHO2013)

Систематическая ошибка



arXiv:2302.08834

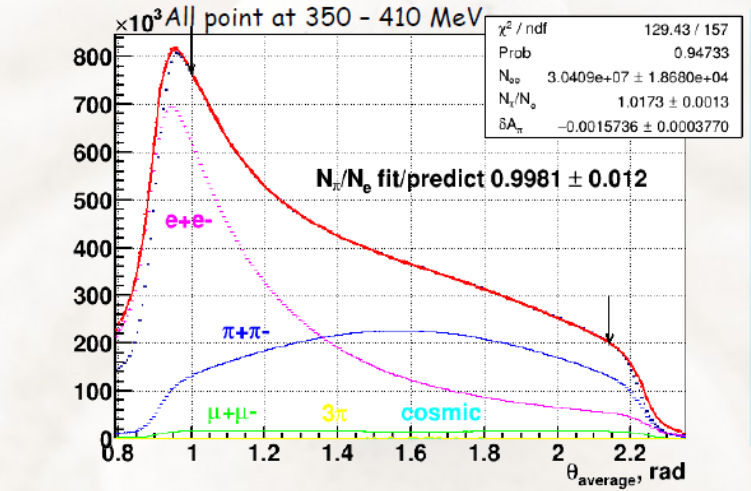
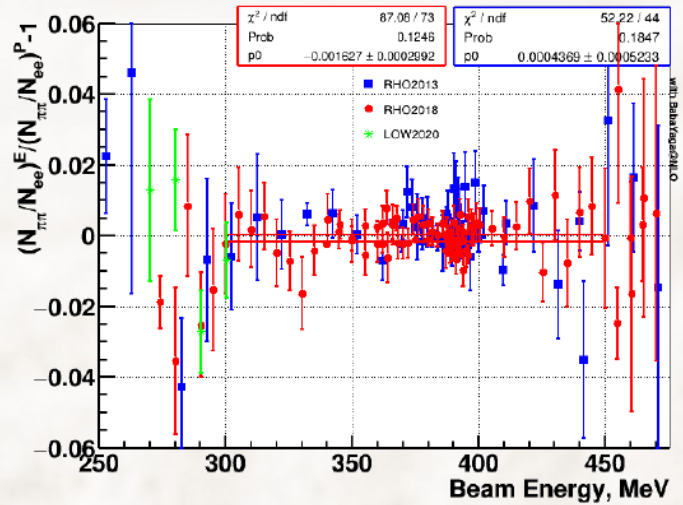


Впервые! – три независимых метода идентификации частиц в одном анализе

3 methods for $N_{\pi\pi} / N_{ee}$ determination based on independent informations:

- 1) Momentum from DCH
- 2) Energy deposition in LXe
- 3) angles in DCH

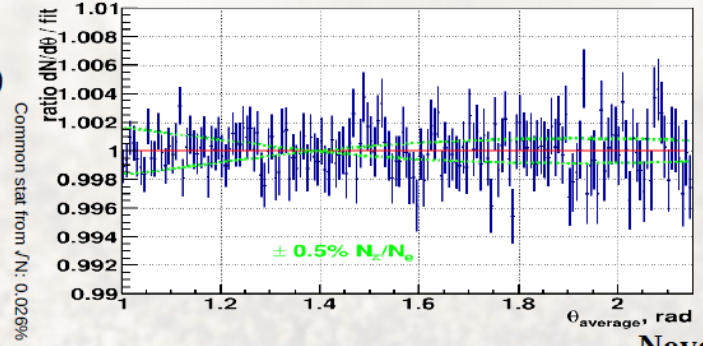
E vs P separations



Fit by θ distribution

For sum of 350-410 MeV points
by momenta in DCH: $N_{\pi\pi} / N_{ee} = 1.0193 \pm 0.00030$
by energies in LXe $\Delta N_{\pi\pi} / N_{ee} = -0.09 \pm 0.024\%$
from theta with free δA : $= -0.20 \pm 0.12\%$
with fixed $\delta A=0$: $= +0.21 \pm 0.07\%$

consistency at ~ 0.2%



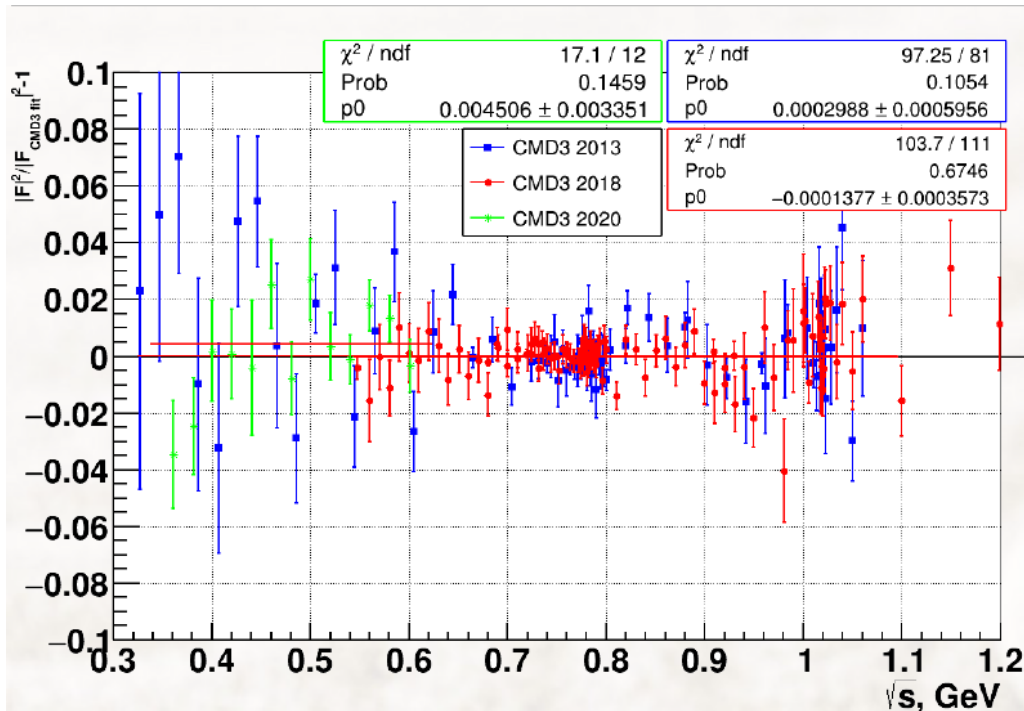
February 2023

Novosibirsk

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



Сравнение сезонов, $\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)$



Result consistent between seasons
within < 0.1%

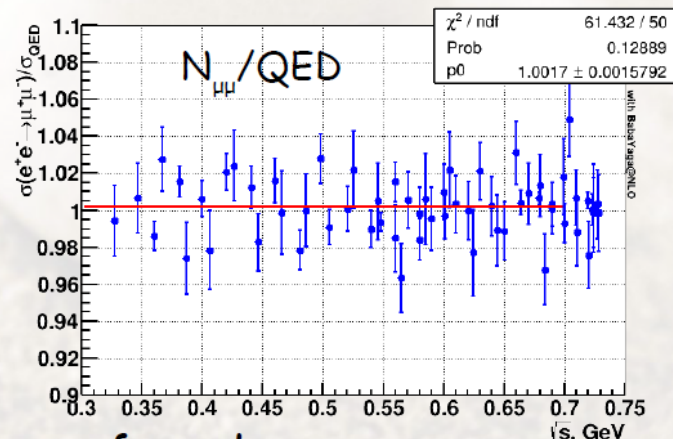
DCH was in very different conditions:
 x correlated noise
 x 4 middle layers off (HV-related) in 2013
 x etc...
 as result it gives ~x2 difference in some
 corrections

Good check of angle/tracking related
systematics

$|F_\pi|^2$ RHO2018/RHO2013 $\Delta = -0.04 \pm 0.07 \%$

LOW2020/RHO2013 $\Delta = -0.5 \pm 0.6 \%$

$N_{\mu\mu}/QED$ $\Delta = +0.17 \pm 0.16 \%$



February 2023

Many others consistency checks were performed

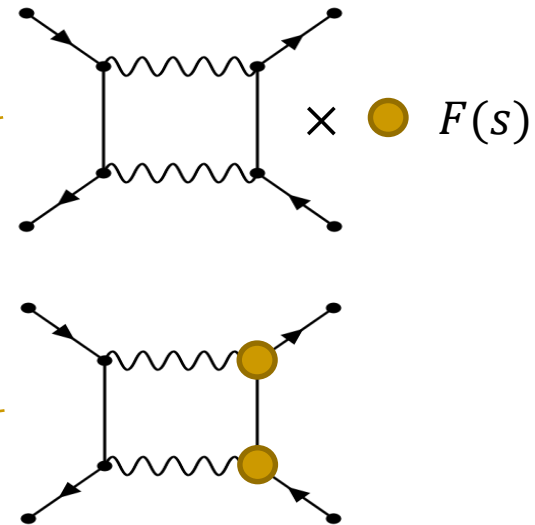
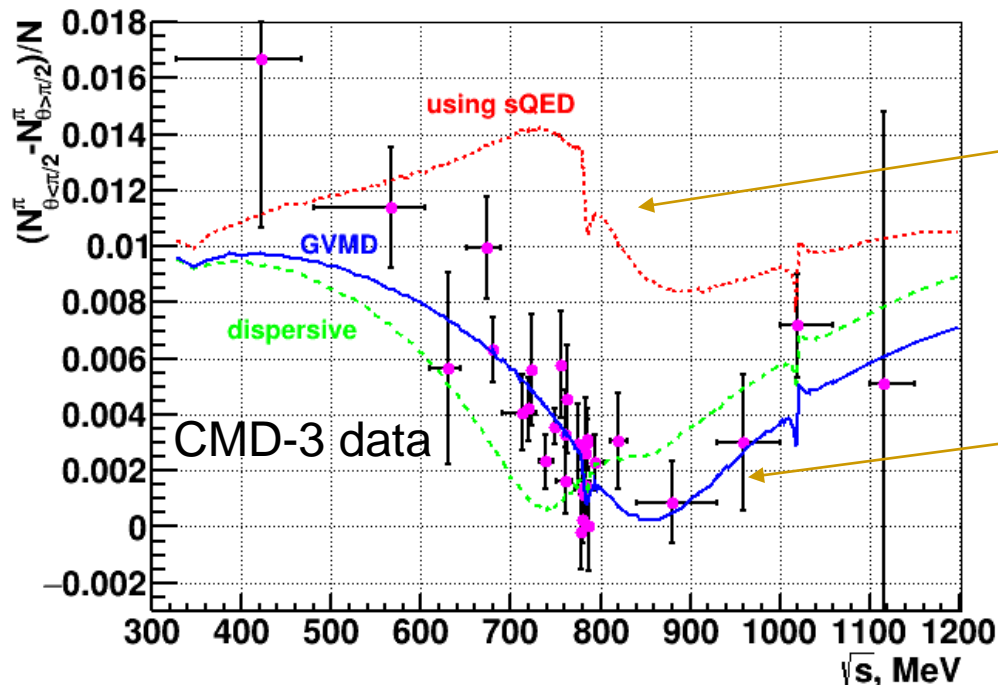
Novosibirsk

$e^+ e^- \rightarrow \pi^+ \pi^-$: зарядовая асимметрия



Charge asymmetry in $e^+ e^- \rightarrow \pi^+ \pi^-$ is due to interference between ISR/FSR and between one- and two-photon exchange

$$A = (N_{\Theta < \pi/2}^{\pi} - N_{\Theta > \pi/2}^{\pi}) / N$$



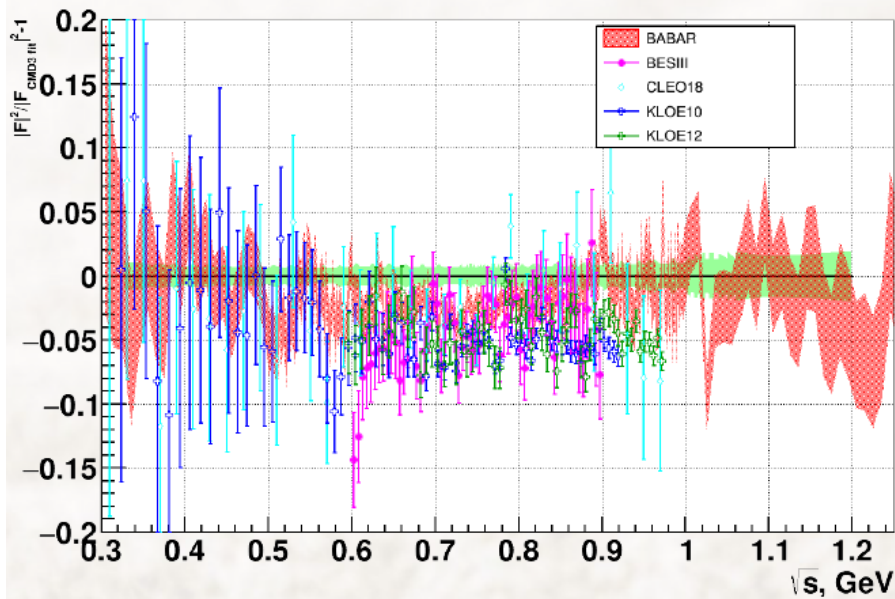
The theoretical model by Lee, Ignatov, **PLB 833 (2022) 137283** (GVDM) describes well the CMD-3 data

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

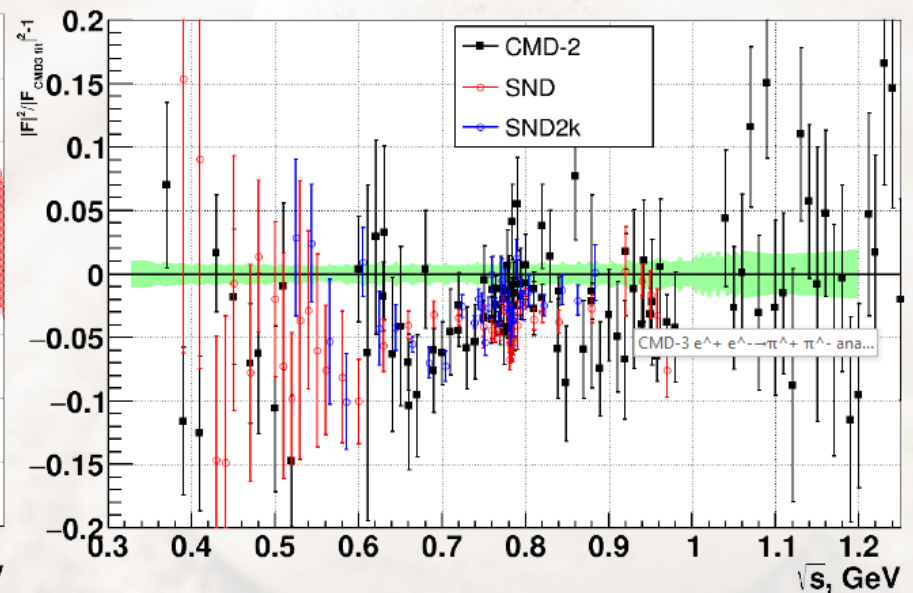


Relative to CMD-3 fit, yellow band - systematic value

vs ISR



vs direct scan

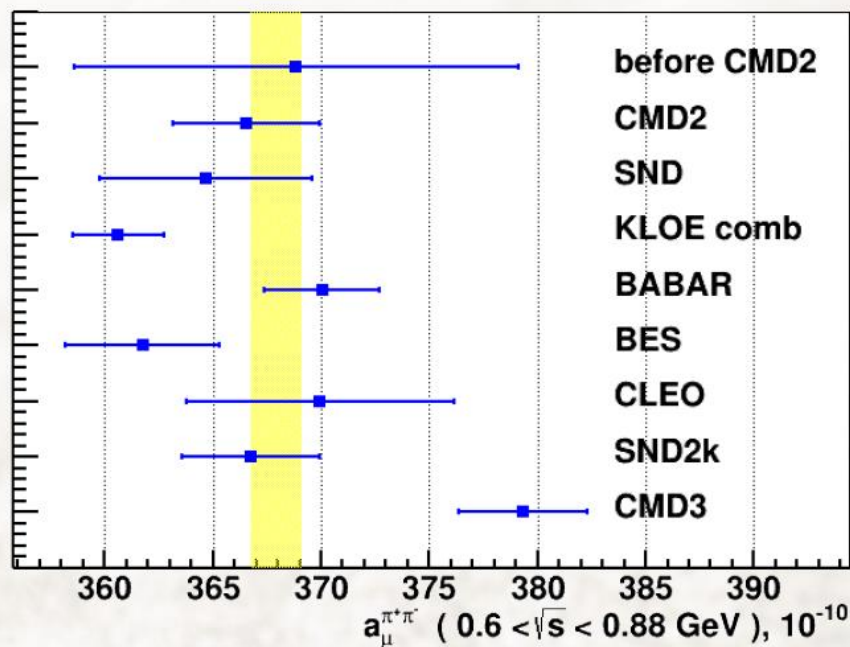


$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$: вклад в $a_\mu^{had}(LO)$



$$a_\mu^{had,LO} = \frac{m_\mu^2}{12\pi^3} \int_{4m_\pi^2}^{\infty} \frac{\sigma_{e^+e^- \rightarrow \gamma^* \rightarrow hadrons}(s) K(s)}{s} ds$$

$0.6 < \sqrt{s} < 0.88 \text{ GeV}$

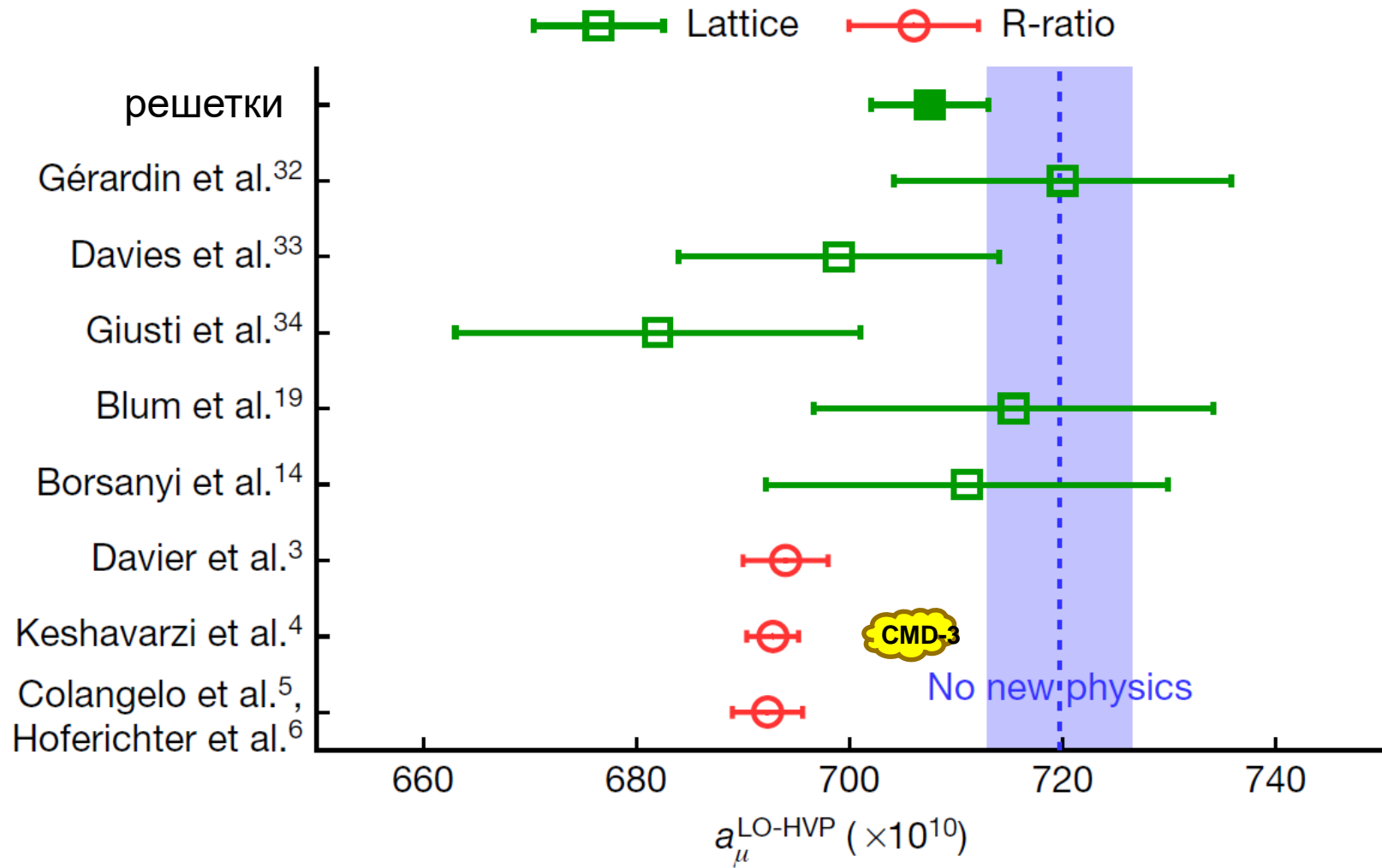


$a_\mu^{\pi\pi, LO}, 10^{-10}$

before CMD2	368.8 ± 10.3
CMD2	366.5 ± 3.4
SND	364.7 ± 4.9
KLOE	360.6 ± 2.1
BABAR	370.1 ± 2.7
BES	361.8 ± 3.6
CLEO	370.0 ± 6.2
SND2k	366.7 ± 3.2
CMD3	379.3 ± 3.0
RHO2013	$380.06 \pm 0.61 \pm 3.64$
RHO2018	$379.30 \pm 0.33 \pm 2.62 \times 10^{-10}$
Sum	$379.35 \pm 0.30 \pm 2.95$

CMD-3 $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ ana...

$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$: вклад в $a_\mu^{had}(LO)$



Предположительные долгосрочные планы

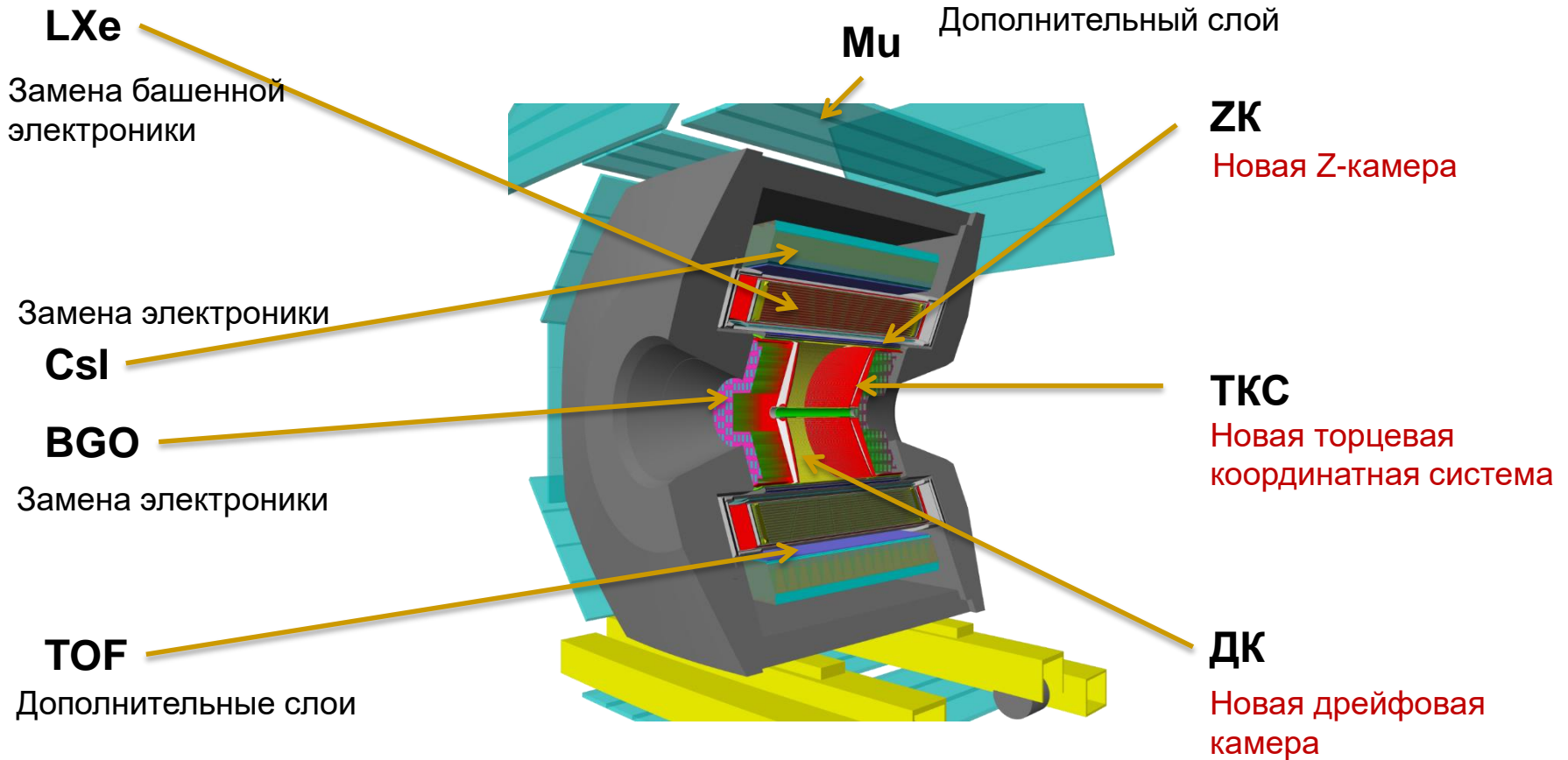


- Набор данных
 - Завершить сканирование выше 1 ГэВ – 2023
 - Ниже 1 ГэВ, ρ , ω – 2024
 - Добрать недобранное (самые низкие энергии, или С-четные резонансы, или GE/GM,...) – до лета 2025

- Останавливаемся летом 2025 (2026?)
- Начинаем сборку летом 2027
- Начинаем набор данных в начале 2028 года
 - Приоритетная задача: формфактор пиона с точностью $<0.25\%$ в области ρ (и много другого)
 - Характеристики ВЭПП-2000 такие же (светимость не возрастет)

4-5 лет на подготовку

Долгосрочные планы модернизации детектора



CDR – 2023 год