

КМД-3  
Криогенный Магнитный Детектор

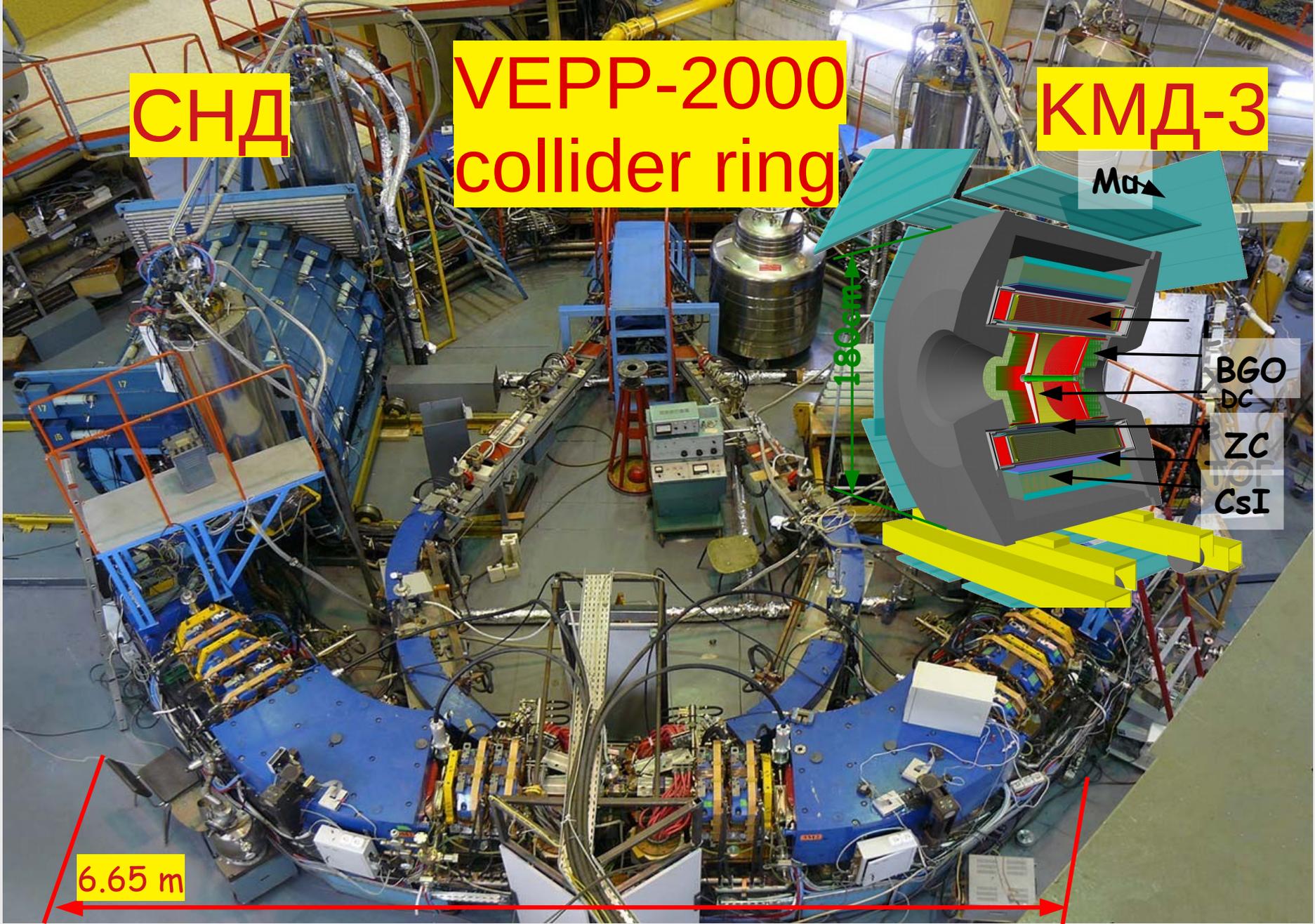
Евгений Козырев  
Коллаборация КМД-3

Научная Сессия ИЯФ  
март 10 2022

СНД

VEPP-2000  
collider ring

КМД-3

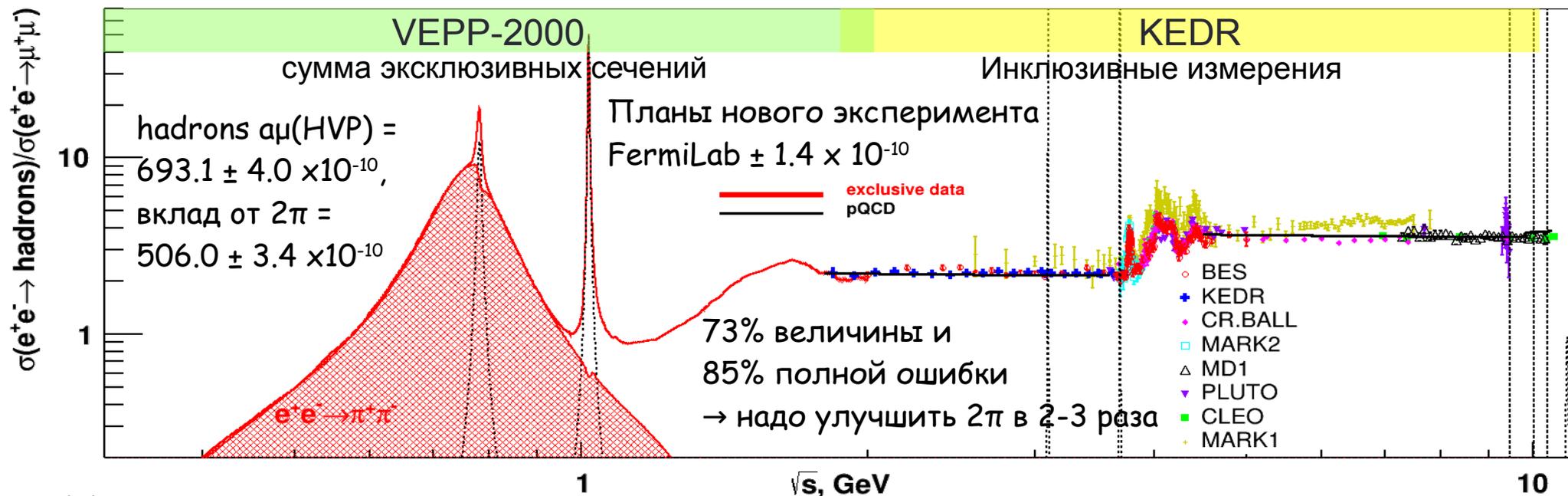


6.65 m

180 cm

BGO  
DC  
ZC  
CsI

# Физическая программа



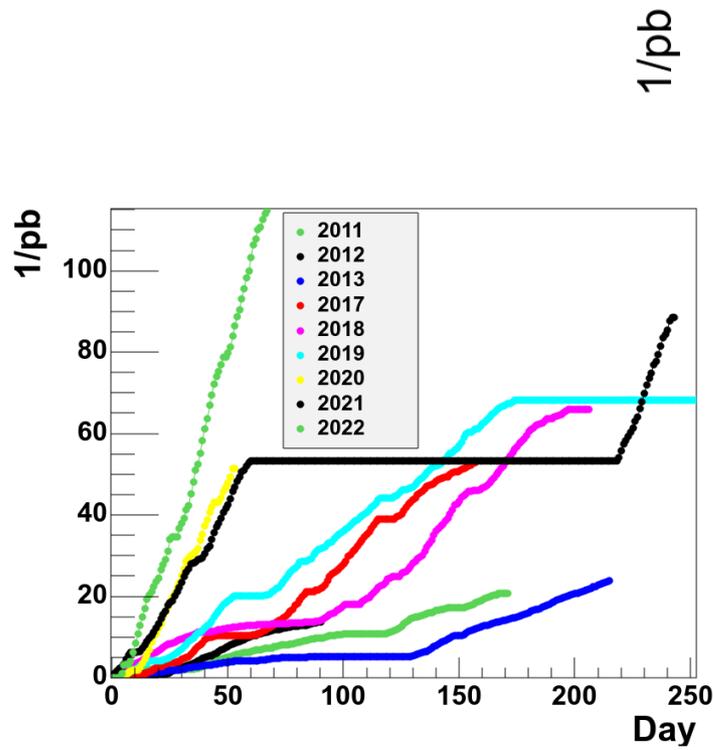
$R(s)$  = полное сечение рождения адронов используется в дисперсионных интегралах для теоретического предсказания  $(g-2)_\mu(\text{had})$ ,  $\alpha_{\text{QED}}(M_Z)$ ,  $\Lambda_{\text{QCD}} \dots$

- × Изучение динамики рождения
- × Свойства легких векторных мезонов
- × Электромагнитные формфакторы нуклонов на пороге
- × Двухфотонная физика,
- × Проверка CVC, поиск экзотики и т.д.

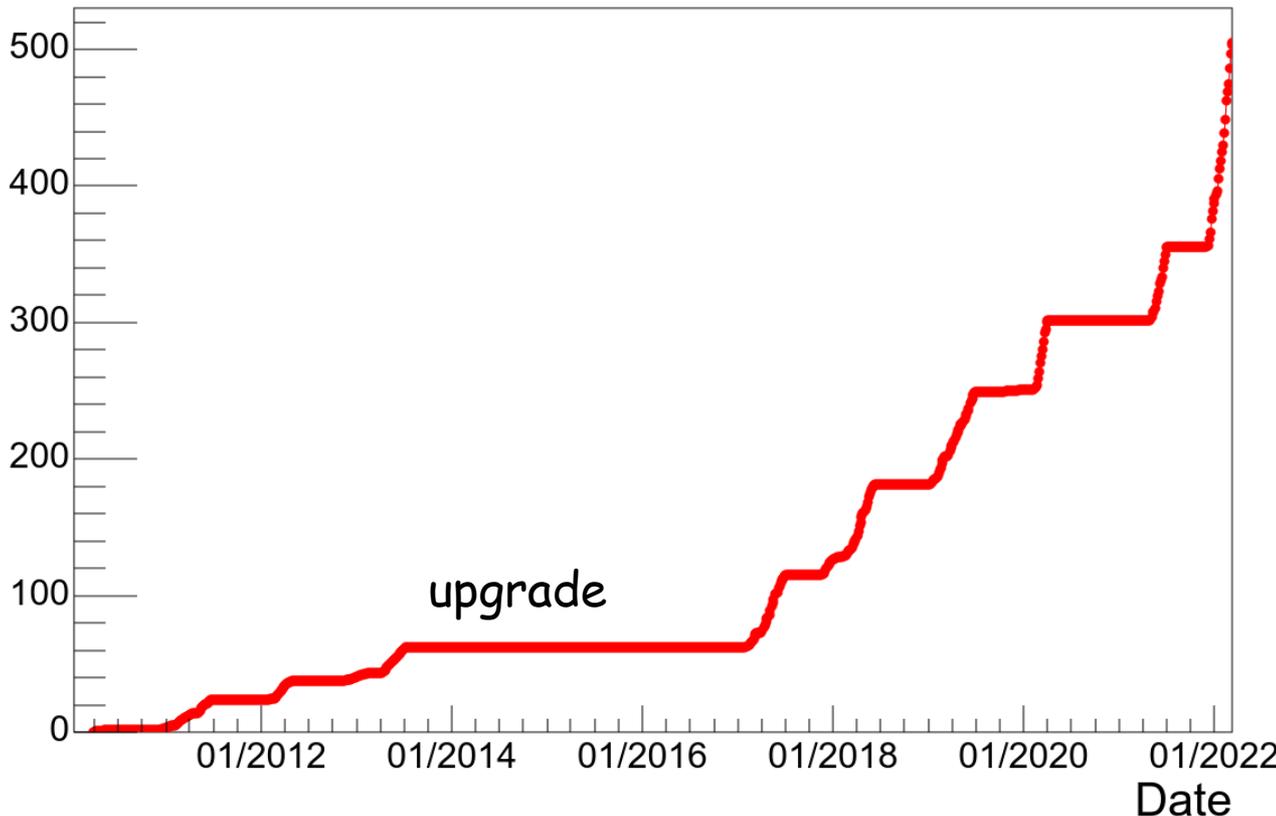
Изучение рождения адронов в аннигиляции  $e^+ e^-$  :

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

# История набора данных с КМД-3



## Collected 1/nb



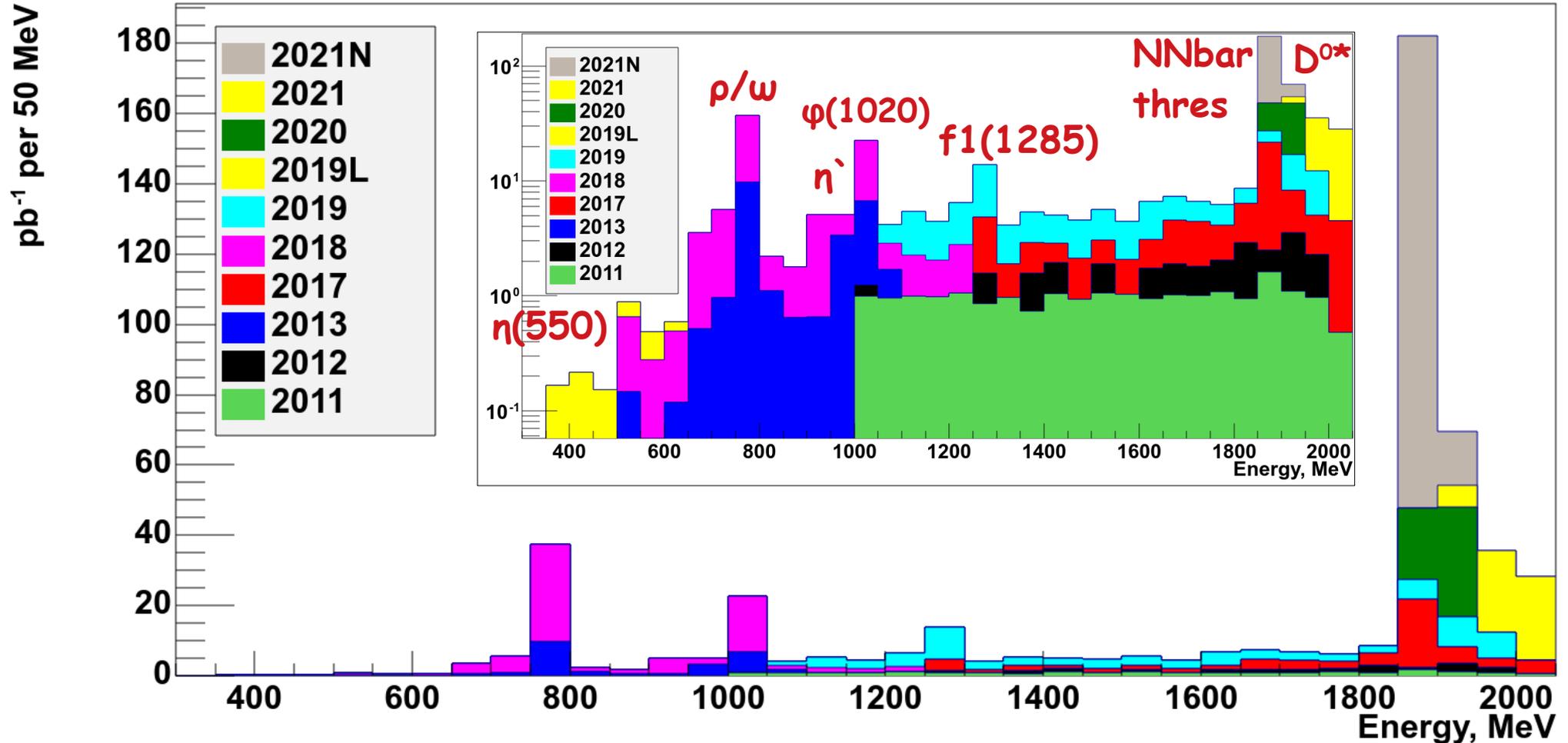
Начали набирать статистику на коллайдере в конце 2010

Проведено 8 сезонов набора данных

Ближайший ориентир интегральной светимости  $1\text{fb}^{-1}$

# Набранная светимость

## CMD-3 integral



# Электроника Детектора



Более 10 разных типов оцифровывающей электроники ~ 400 плат  
Часть была изготовлена более 10-25 лет назад.

Ведется постоянная плановая модернизация (необходимы постоянные ресурсы и т.д.):

- 1) увеличение пропускной способности ССД
- 2) конвейерная обработка без мертвого времени
- 3) повышение надежности
- 4) понижение шумов
- 5) компактность

В 2021 заменили турбомолекулярные насосы на новые импортные с дистанционным контролем состояния и без водяного охлаждения.

При вводе поля были отключения источников напряжения в блоке питания СП преобразователя.  
Закупаем новые источники.

# Работы по обновлению электроники

## BGO

2021 — сделаны компактные ЗЧУ (24 канала (из 680) установлены в детекторе).

## LXe координатная система:

Уже испытан новый полосковый ЗЧУ (старые уже физически устарели):

меньше шумы, меньше энергопотребление, более удобный конструктив блока плат для оперативного ремонта

Проведены тесты с разным временем формировки, готов к производству

## LXe калориметрическая часть:

Есть желание добавить измерение времени, оцифровывать форму сигнала, пока нет решения по дизайну

## Мюонная система:

начало 2021 — введены в строй новые источники HV (Дубна вместо старых LeCroy)

Удалось подавить наводку на части торцевых счетчиков с помощью аттенюатора

## Система сбора данных, увеличение пропускной способности:

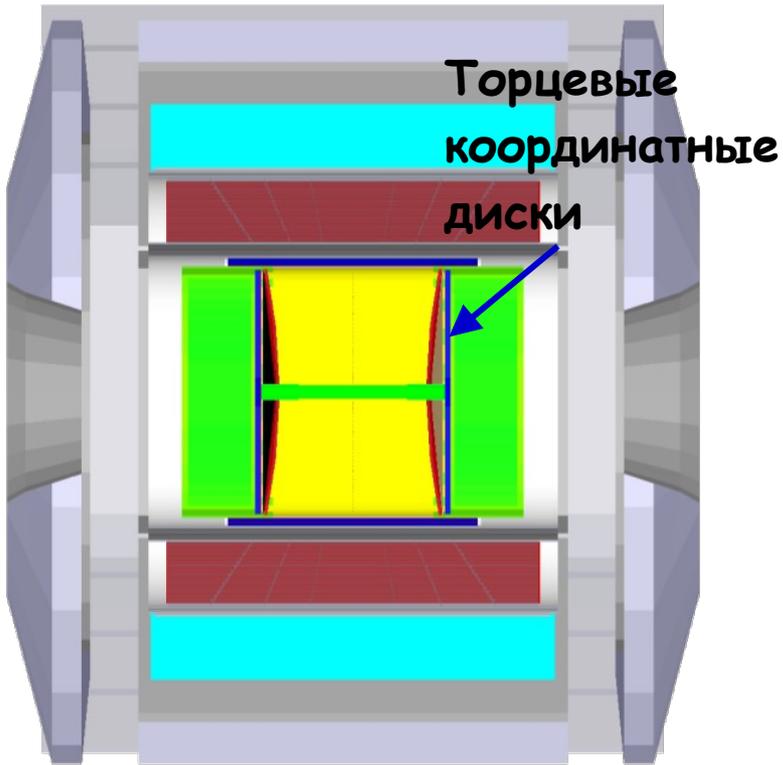
Планируется интеграция в ССД детектора новой БППД (блок приема-передачи данных),  
+плата мезонин с микропроцессором (на базе RaspberryPi) для первичной обработки, сжатия потока.

Триггер: Блок финального решения триггера выполнен, идет тестирование и настройка. В конце текущего сезона планируется тест в условиях эксперимента.

Отремонтировали компрессор кондиционера.

Замена обоих ТМН - помогла в борьбе с наводками

# Новая торцевая система

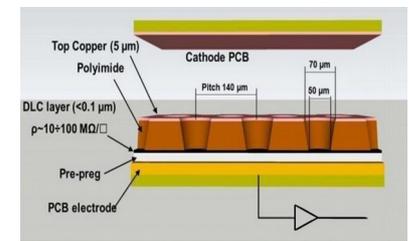


Что нам это даст:

- × Расширение телесного угла многоадронный событий
- × Развитие детекторных технологий в Институте

Двух-слойная считывающая структура с R-phi сегментацией.

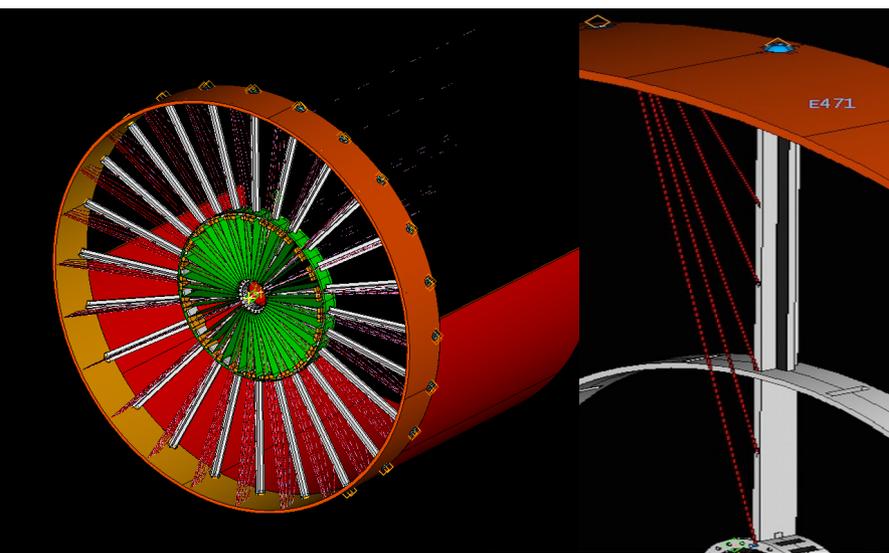
- × Смонтированы два диска
- × Проверена целостность структуры
- × Измерены коэффициент усиления в токовом режиме по всей площади диска
- × Идет монтаж электроники на второй диск
- × Достигнут коэффициент усиления  $2 \cdot 10^4$
- × Измерение на выведенном пучке (осень 2022)
- × Оценка готовности установки в детектор ~ лето 2023 года



muRWELL at the jig for gluing



# Новая дрейфовая камера



В рамках Cremlin+ разрабатывается прототип ДК для SCTau в размере ДК для КМД-3

- 1) Независимые структуры для удержания проволочек и для изоляции газового объёма ДК, это позволяет уменьшить количество вещества
- 2) проволочки распаиваются роботом на печатной плате

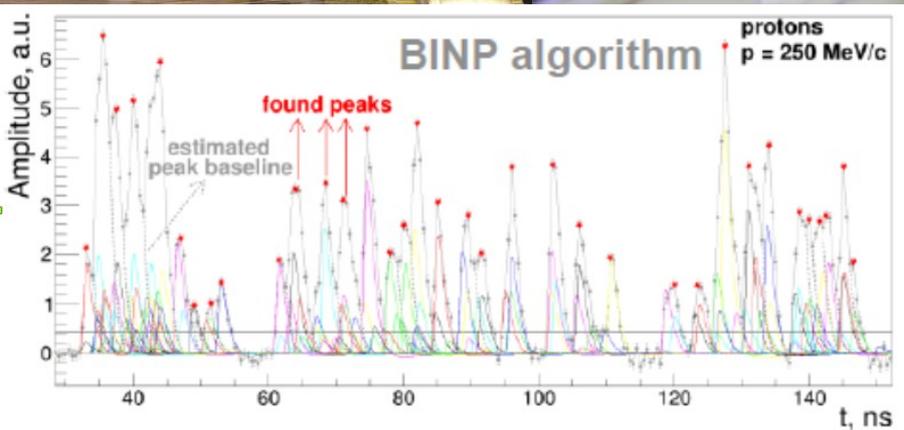
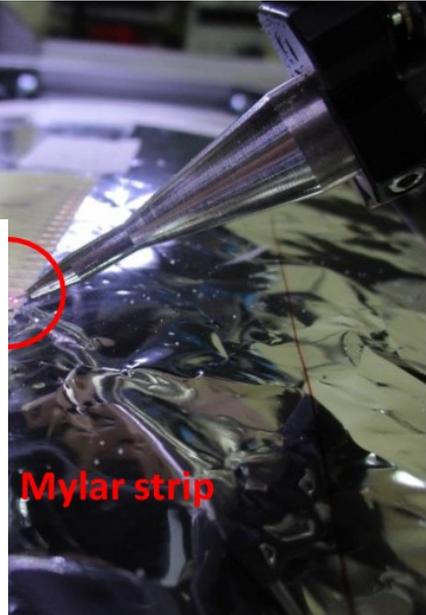
INFN — делают механический дизайн ДК КМД-3, опыт по созданию камеры MEG

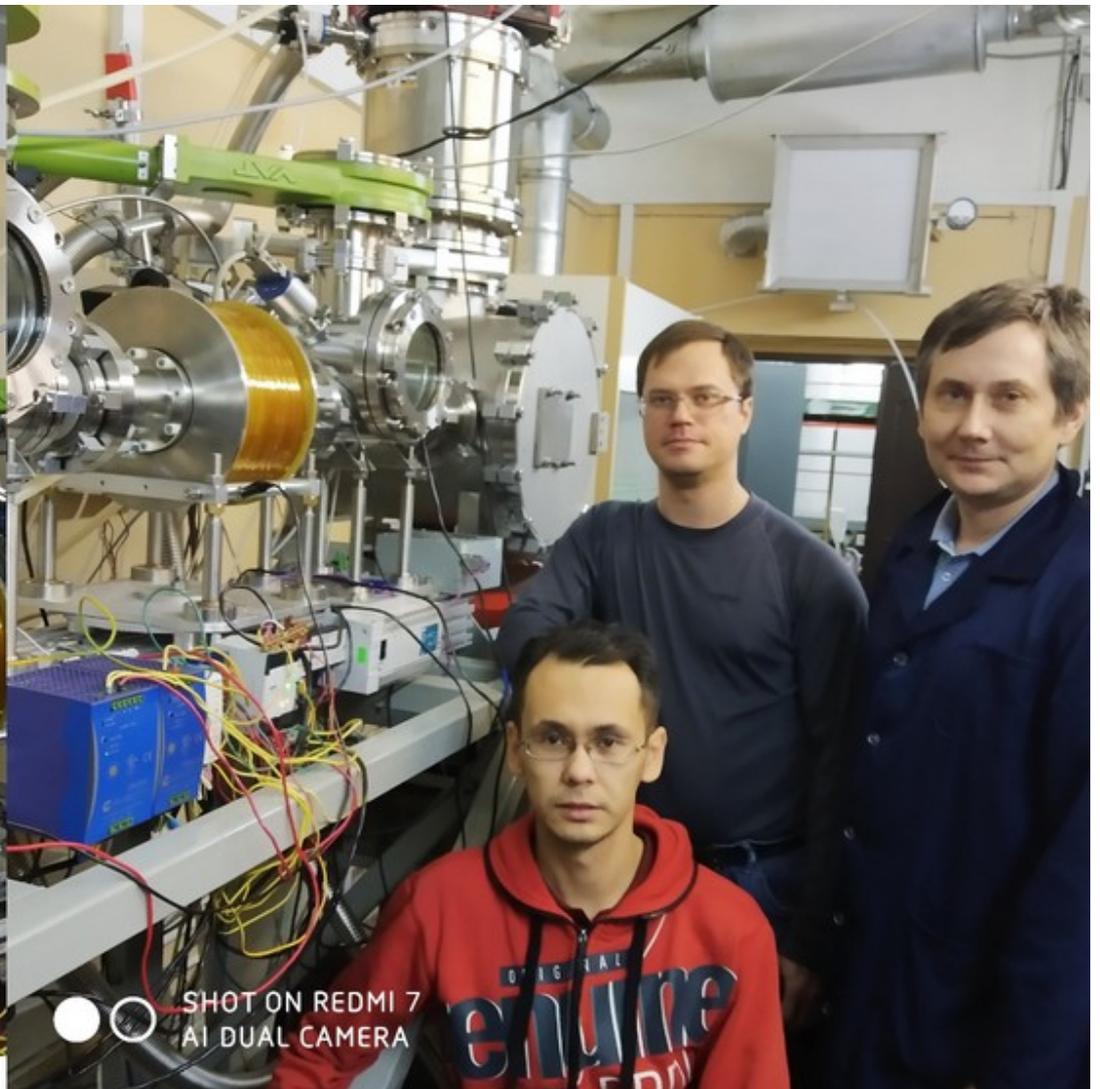
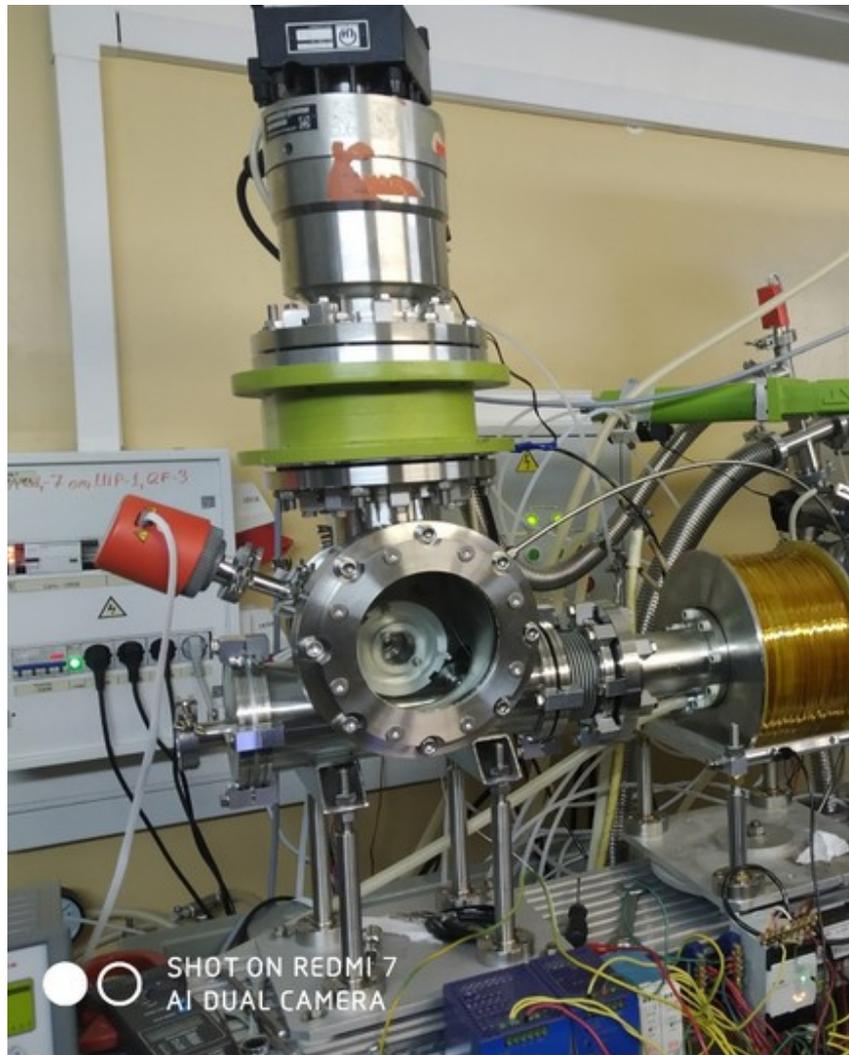
ИЯФ: В.М. Аульченко с коллегами - разработка ASIC ПУ для cluster counting метода,

А.Попов и др. — развитие технологии напыления на проволочки и тестирование их разных типов

Нужно начать строить робот в ИЯФ для лазерной пайки проволочек  
Планируется задействовать чистую комнату по ИТЕР

Возможное начало создания прототипа ДК в 2023-2024





- **Стабильный процесс в широком диапазоне скорости покрытия для мин 40 мкм проволок до 2 м/мин для 10 нм для никеля или золота**

- **Достаточно хороший припой и механические свойства**

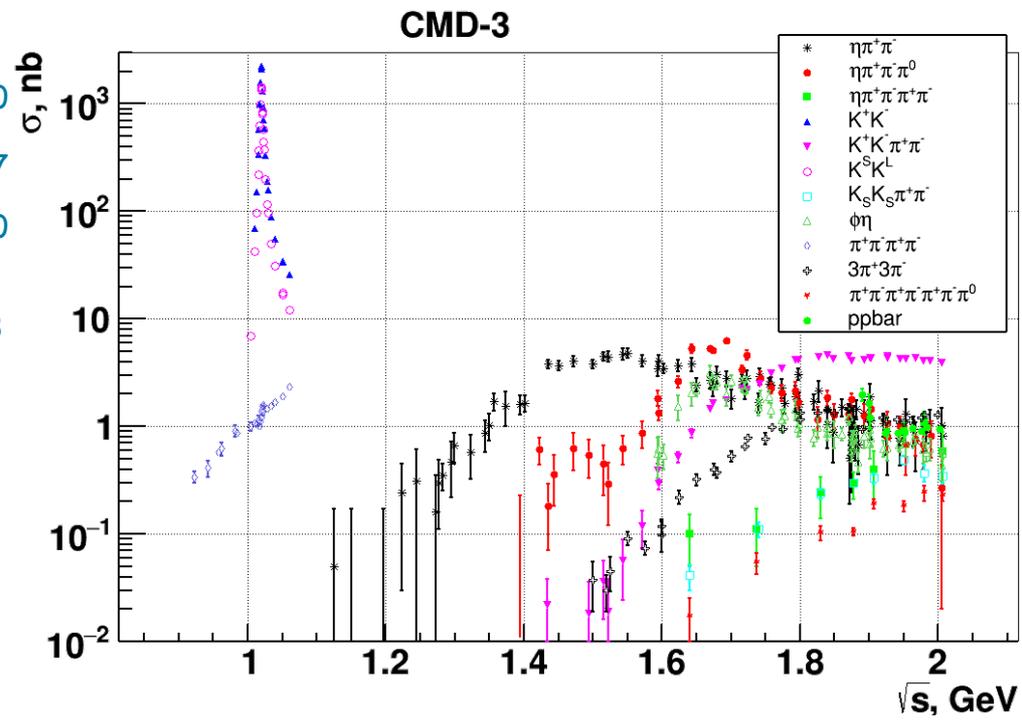
# Анализ набранных данных

# Результаты КМД-3

✓ Опубликовано:

- $e^+e^- \rightarrow p\bar{p}$ ,
- $e^+e^- \rightarrow \eta'$
- $2(\pi^+\pi^-), 3(\pi^+\pi^-),$
- $3(\pi^+\pi^-)\pi^0,$
- $\eta\pi^+\pi^-\pi^0/\omega\eta, \eta\pi^+\pi^-$
- $K^+K^-, K_S K_L,$
- $K^+K^-\pi^+\pi^-$
- $K^+K^-\eta$
- $K_S K_S \pi^+\pi^-$

Phys.Lett. B759 (2016) 634-640  
 Phys.Lett. B740 (2015) 273-277  
 Phys.Lett. B768 (2017) 345-350  
 Phys.Lett. B723 (2013) 82-89  
 Phys.Lett. B792 (2019) 419-423  
 Phys.Lett. B773 (2017) 150-158  
 JHEP 01 (2020) 112  
 Phys.Lett. B760 (2016) 314-319  
 Phys.Lett. B779 (2018) 64-71  
 Phys.Lett. B756 (2016) 153-160  
 Phys.Lett.B 798 (2019) 134946  
 Phys.Lett.B 804 (2020) 135380



Практически готовы:

- $e^+e^- \rightarrow D_0^*$
- $K^+K^-\omega, \omega\pi^+\pi^-, K_S K\pi$

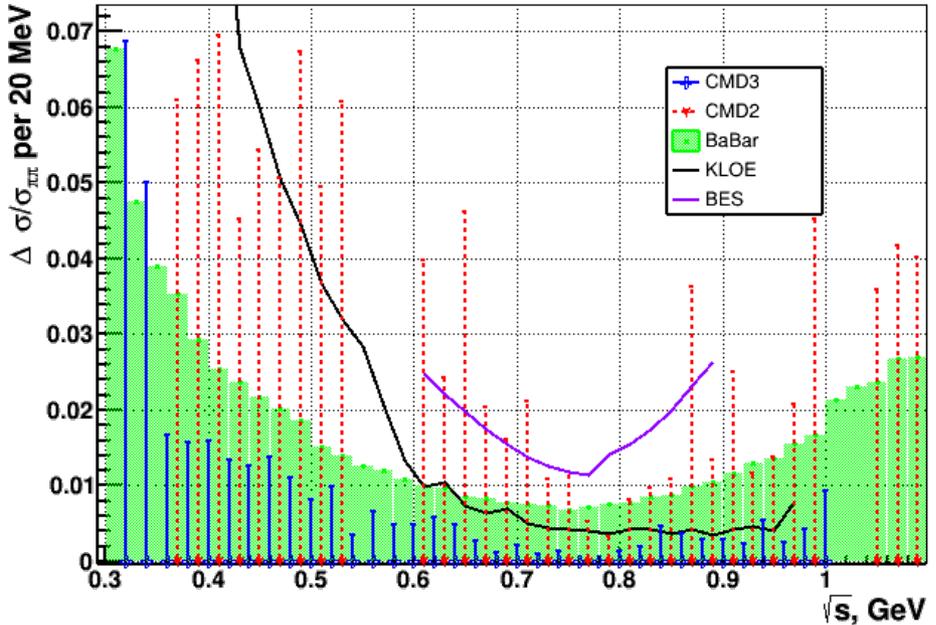
В активной стадии анализа:

- $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-, e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma,$
- $\eta\gamma, \pi^0\gamma, \pi^+\pi^-\pi^0, \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0, 2(\pi^+\pi^-), 2(\pi^+\pi^-\pi^0), 2(\pi^+\pi^-\pi^0)$
- $K^+K^-, K_S K_L$  - at higher energies,  $K^+K^-\pi^0, K_S K_L \pi^0, K_S K_L \eta^0, K_S K 3\pi,$
- $n\bar{n}, \pi^0 e^+e^-, \eta e^+e^-$

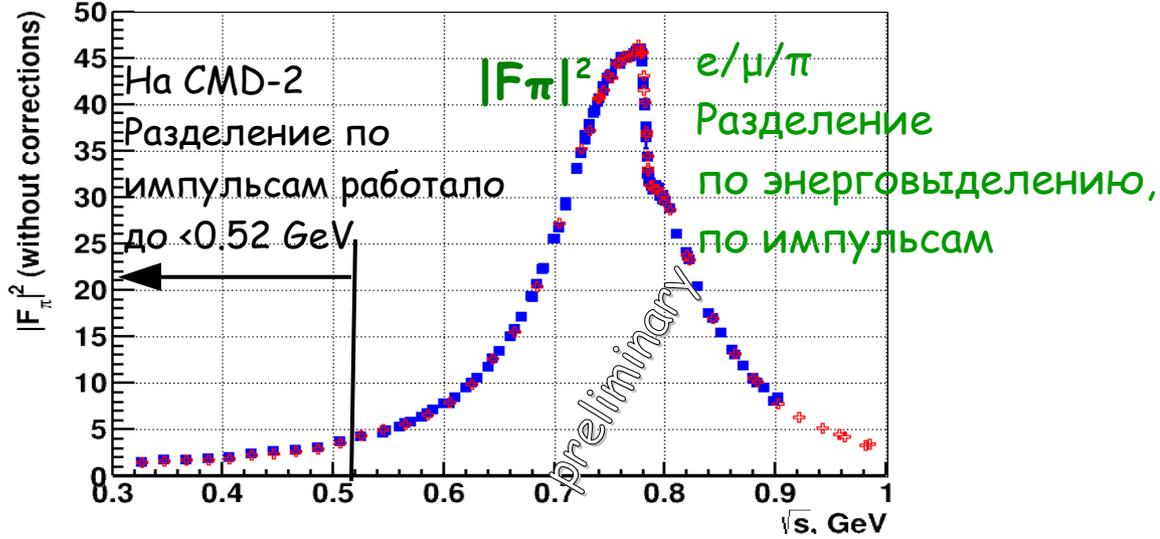
# $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$

На низких энергиях < 1 ГэВ  
данные набирали в 3 сезонах  
2013, 2018, 2020

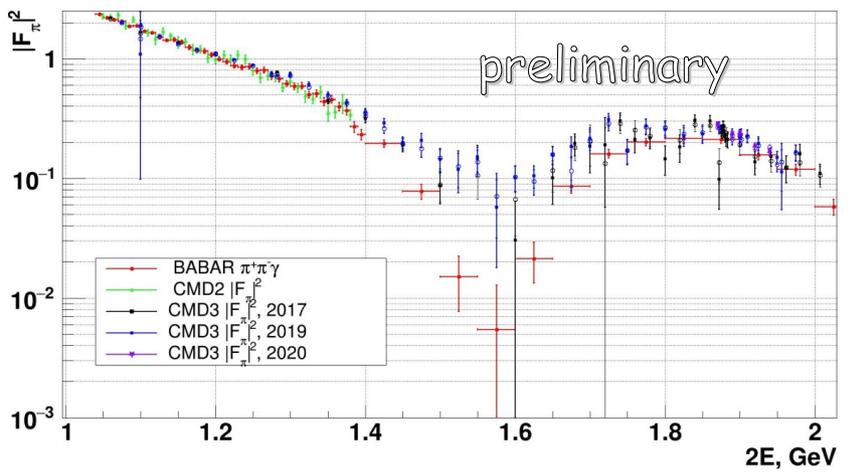
Стат. точность в несколько раз  
лучше чем во всех остальных  
экспериментах



Разделение  
Рад поправка  
Телесный угол

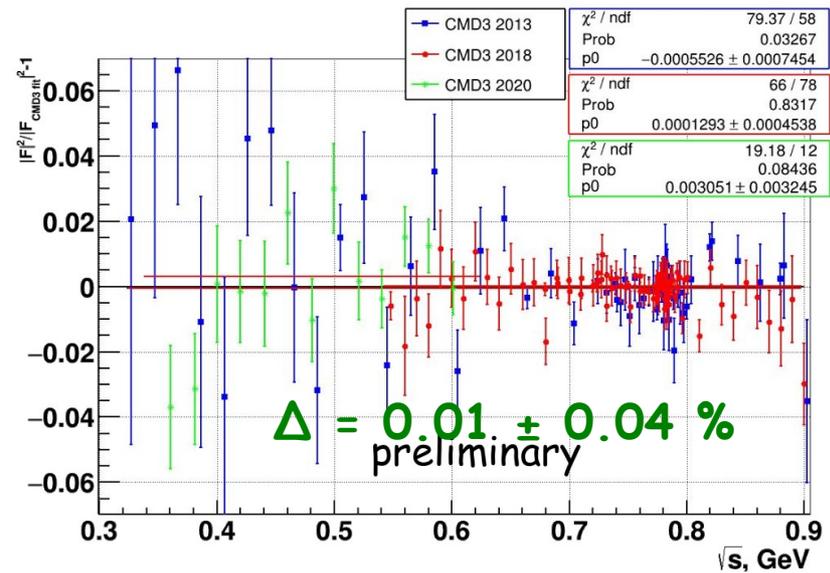


На энергиях > 1 ГэВ разработано разделение с  
помощью нейронной сети, учитывающее  
профиль ливня в калориметре

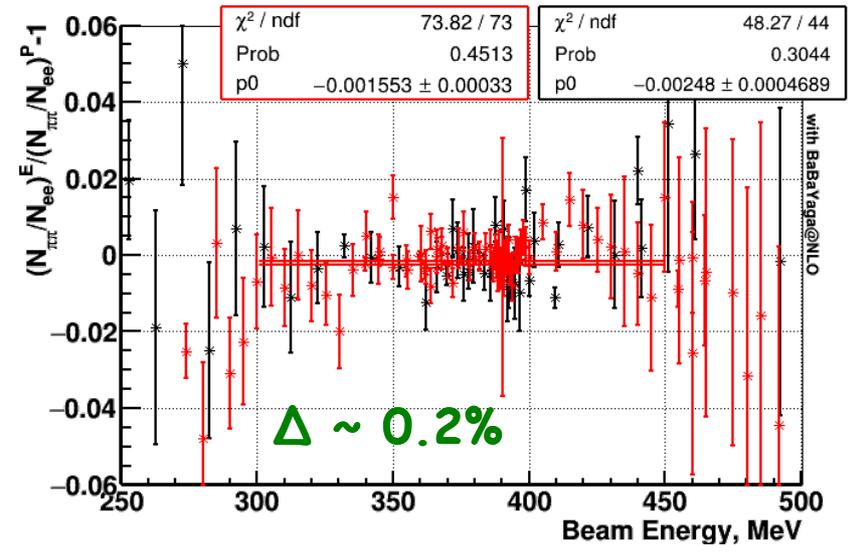


# $|F_{\pi}|^2$ (RHO2013/2018)

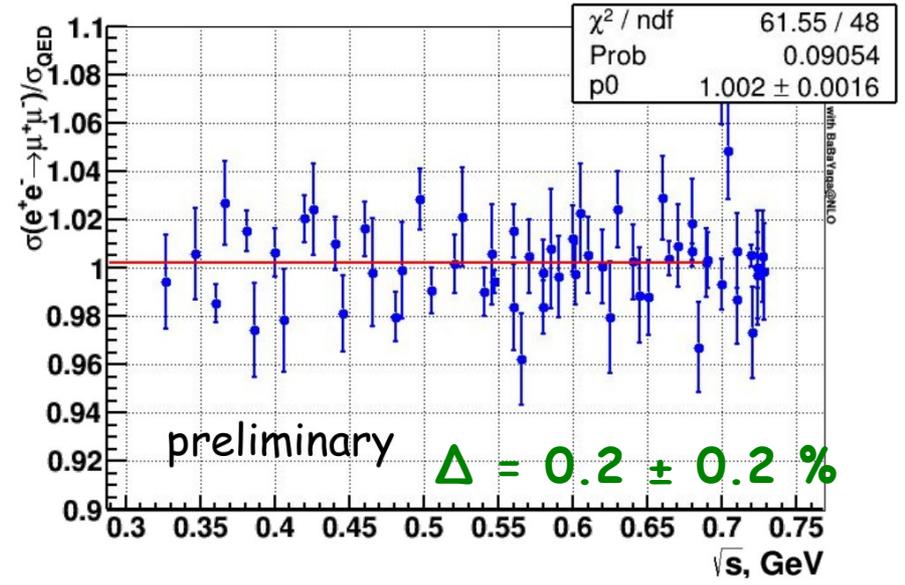
Сравнение RHO2013/2018 (PID по импульсам)



Два метода разделения энергодельта/импульсы



Количество мюонов/QED

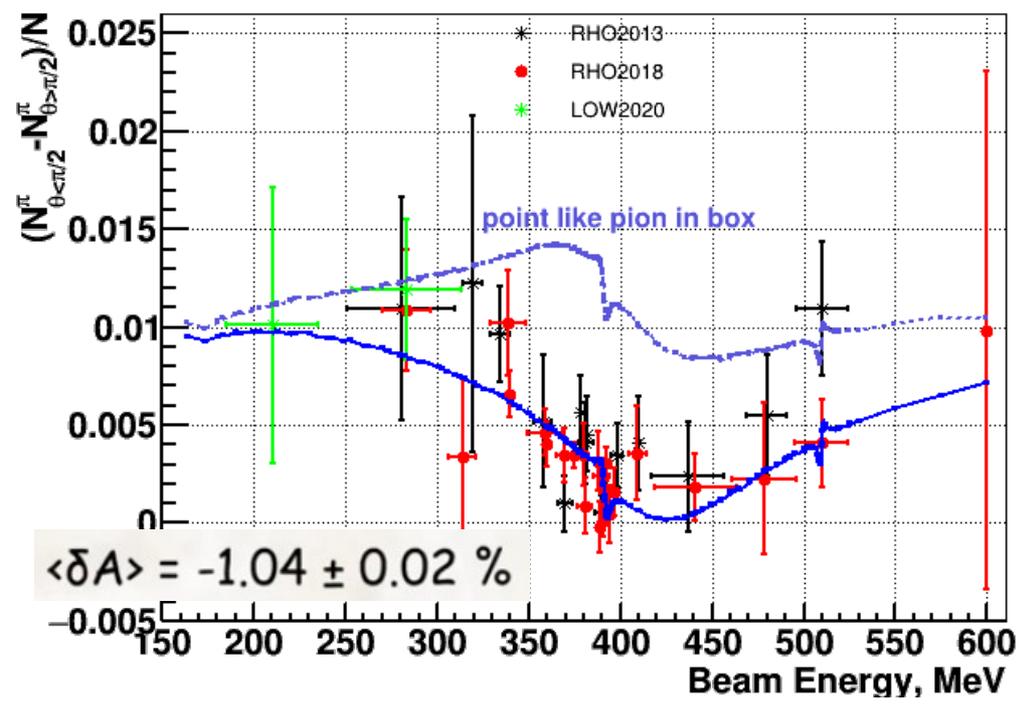
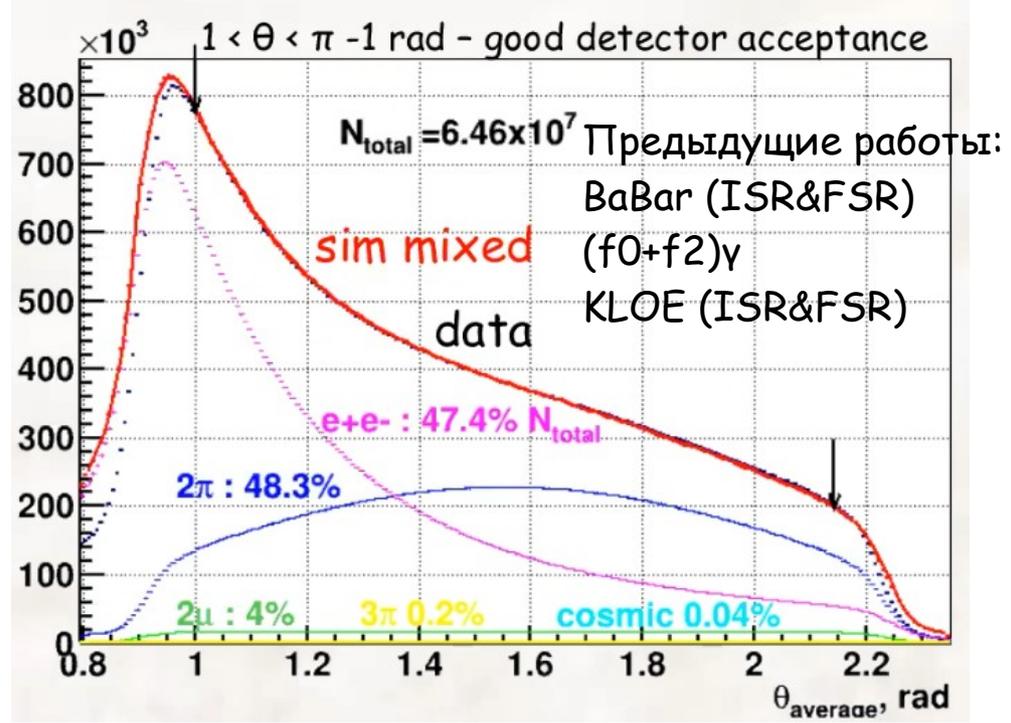


Анализ почти на финишной прямой  
Идет детальный анализ систематик  
Хочется получить систематику ~ 0.5%

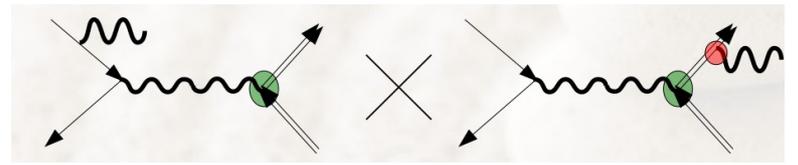
# Ассимметрия $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$

Asymmetry definition:

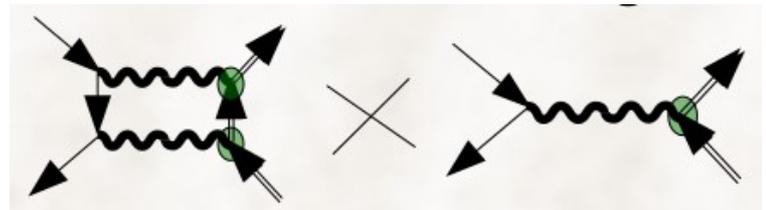
$$A = (N_{\theta < \pi/2} - N_{\theta > \pi/2})/N$$



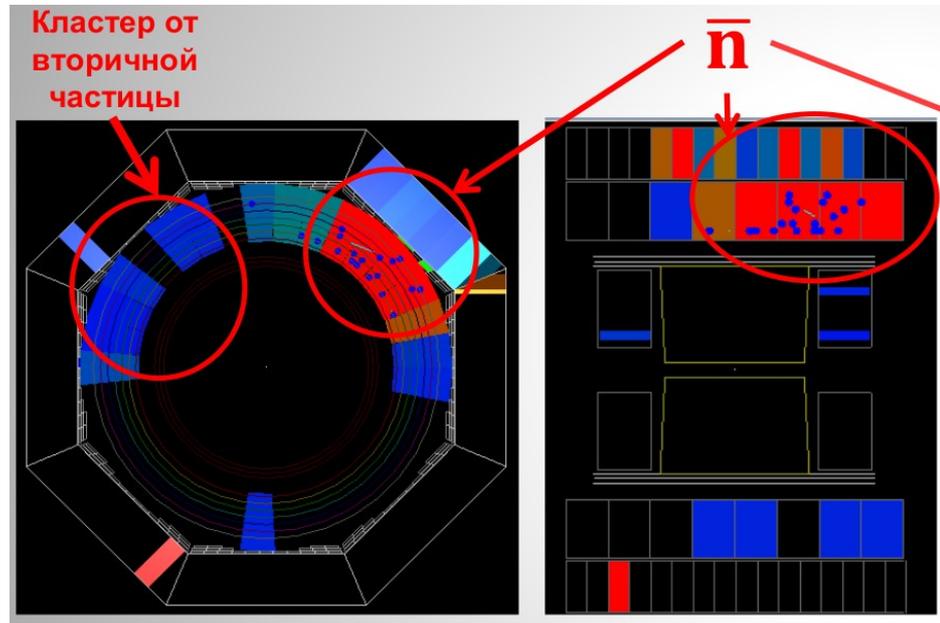
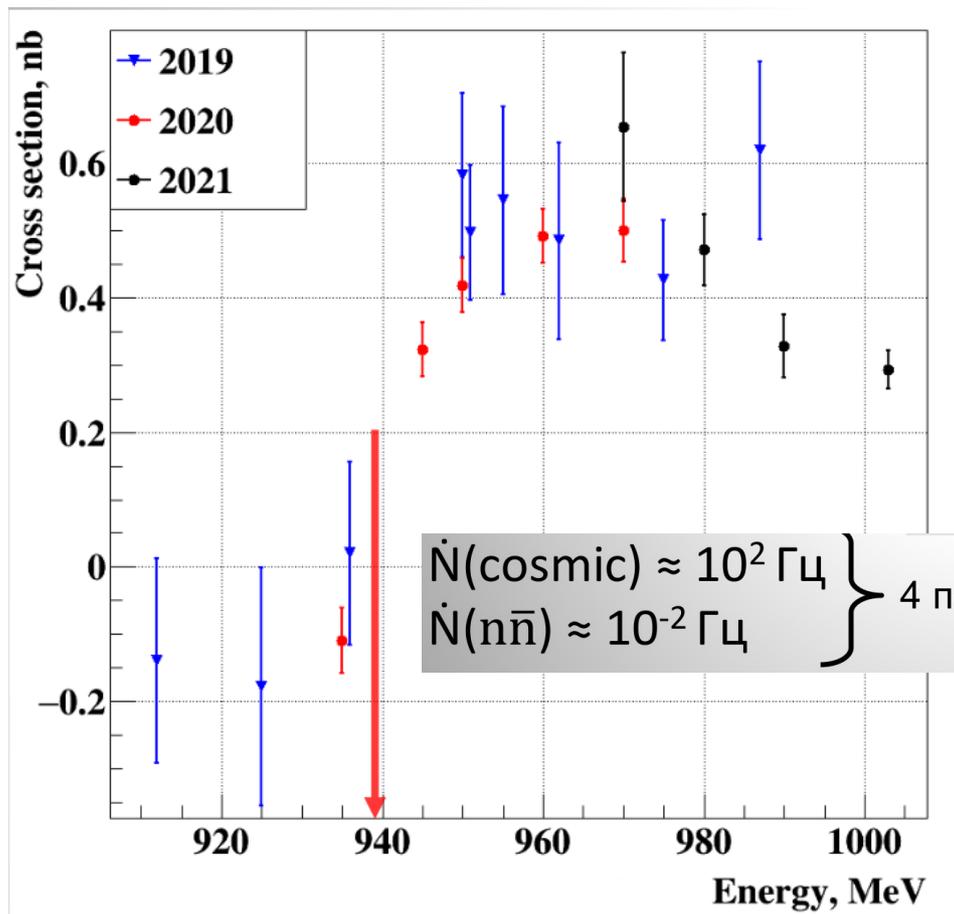
Зарядовая асимметрия в  $2\pi$  в низшем порядке появляется из интерференции ISR & FSR:



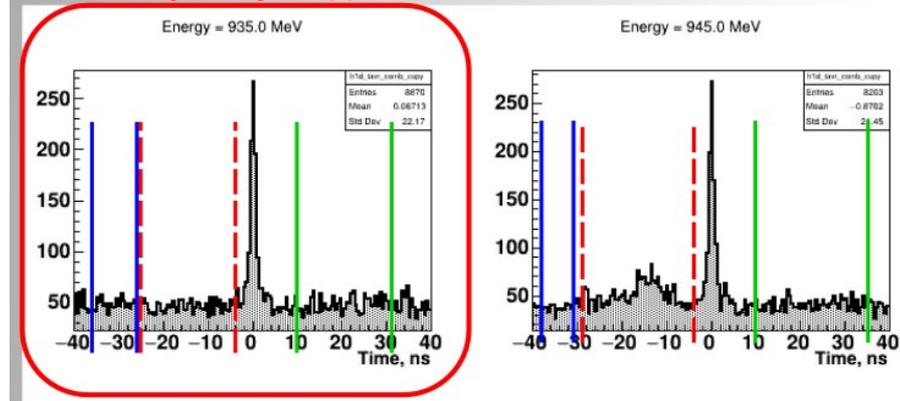
Учёт двойного  $\Phi\Phi$  в box-диаграмме хорошо описывает наблюдаемый эффект  $2\pi$  асимметрии в данных КМД-3.



# $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$ (2019, 2020, 2021)



## Ниже порога рождения $n\bar{n}$

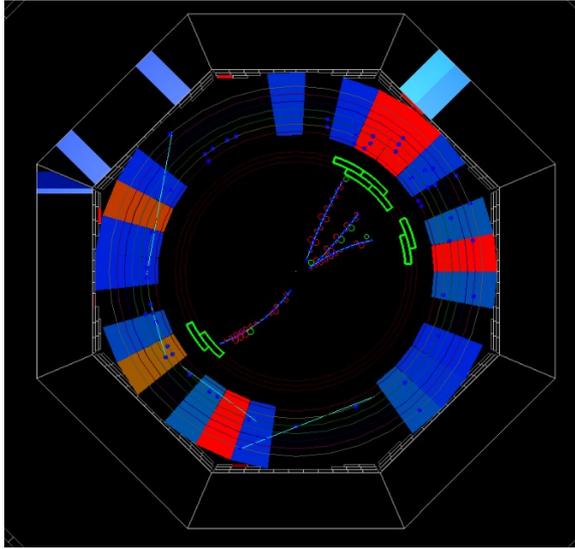


Моделирование TOF:

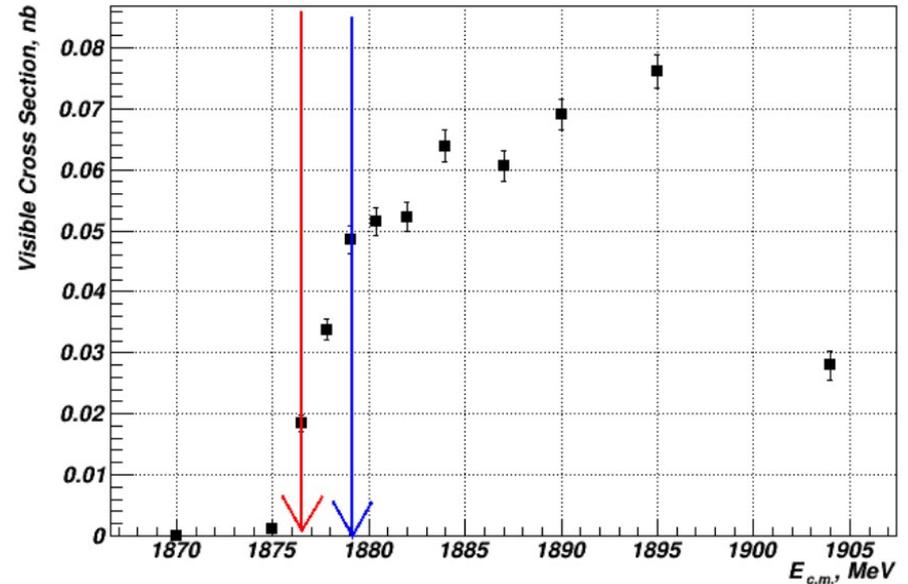
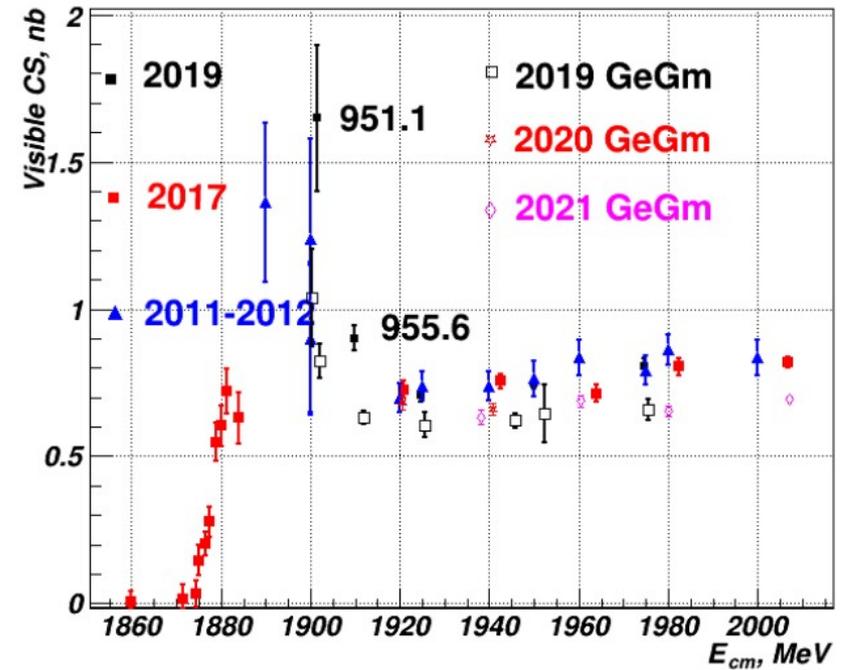
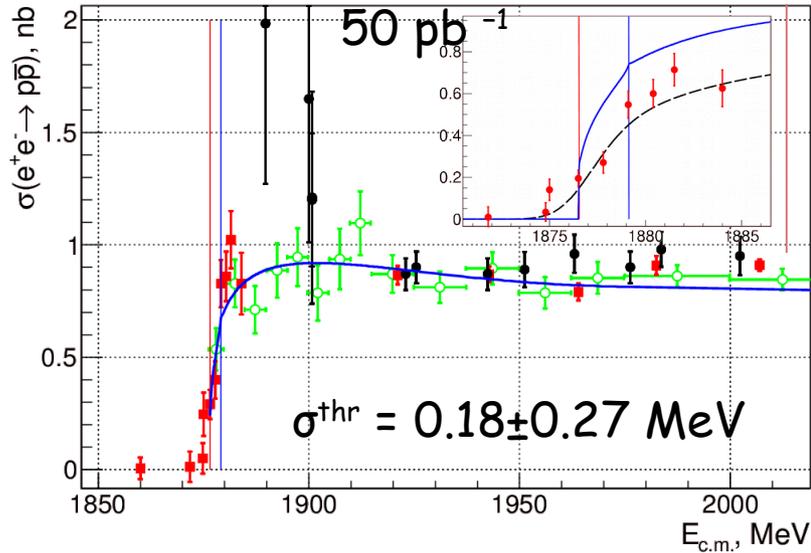
Добавлена новая геометрия

Добавлено моделирование времени/амплитуды

$e^+e^- \rightarrow p\bar{p}$

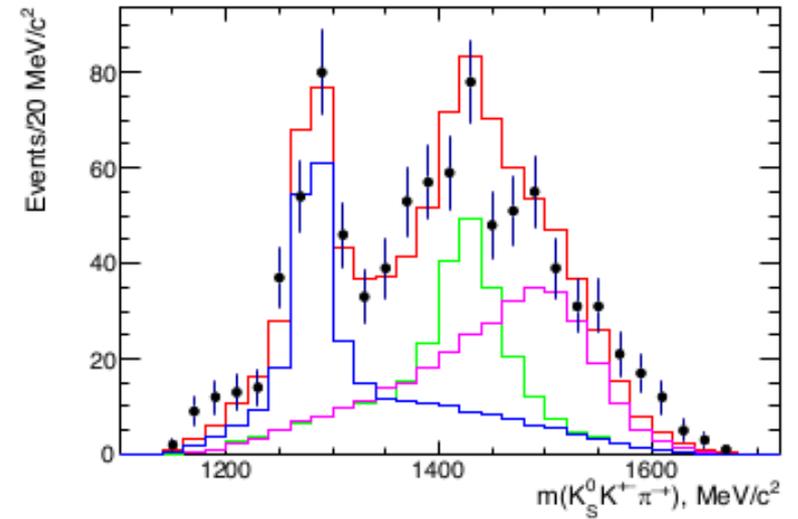
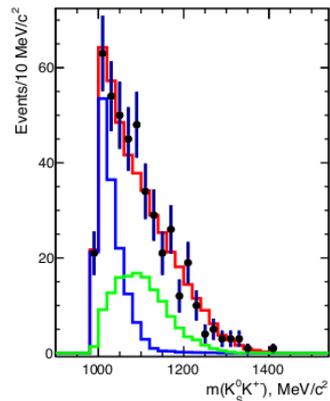
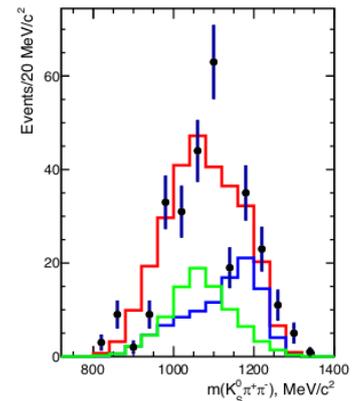
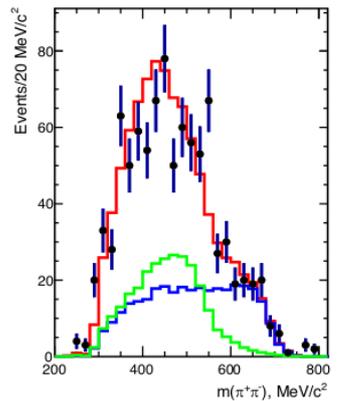
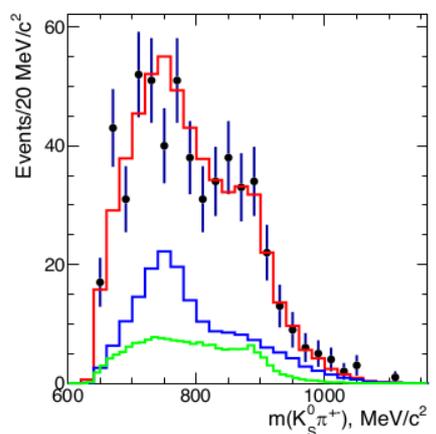
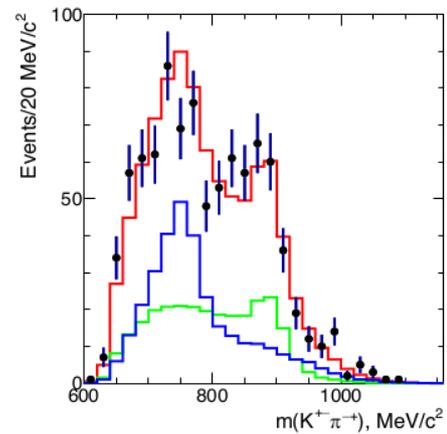


Пример  
аннигиляции  
антипротона на  
трубе

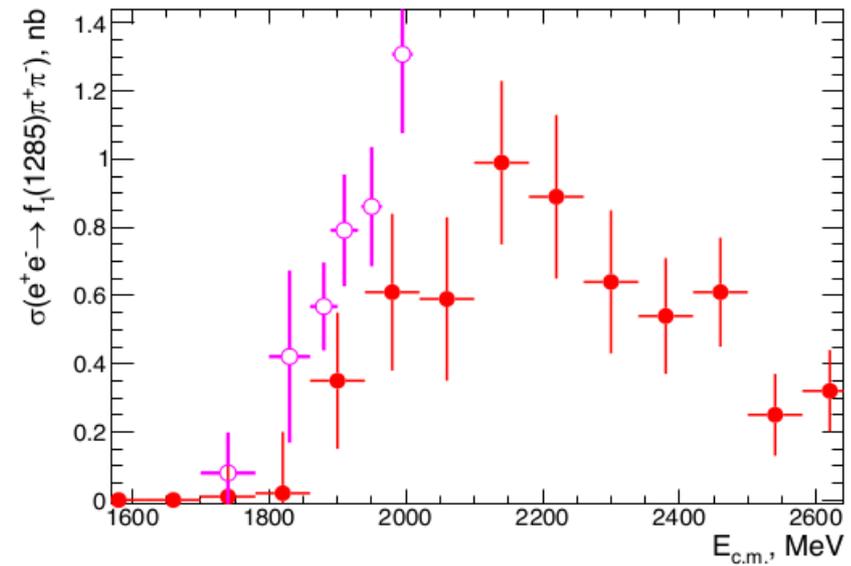


# $e^+e^- \rightarrow K_S K^+ \pi^- \pi^+ \pi^-$

Измерение важно в том числе для объяснения расхождения инклюзивного и эксклюзивного подходов в области 2 ГэВ



## Сечение $e^+e^- \rightarrow f_1(1285)\pi^+\pi^-$



## Заключение

- Около 10 выступлений на международных конференциях (Hadron2021, Tau2021, LeptonPhoton 2021, ACAT 2021, Strong workshop, G-2 Theory Initiative Meeting)

1. A new method for obtaining a Born cross section using visible cross section data from  $e + e -$  colliders, Griбанov, S.S., Popov, A.S., Journal of High Energy Physics, 2021, 2021(11), 203

2. Charged particle identification with the liquid xenon calorimeter of the CMD-3 detector Ivanov, V.L., Fedotov, G.V., Akhmetshin, R.R., ...Vorobiov, A.I., Yudin, Y.V. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2021, 1015, 165761.

3. ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА  $e+e \rightarrow KSK_{\pm}\pi^{\mp}C$  ДЕТЕКТОРОМ КМД-3, Усков А.А., Федотович Г.В., и др., Ядерная физика. 2021. Т. 84. № 1. С. 30-36.

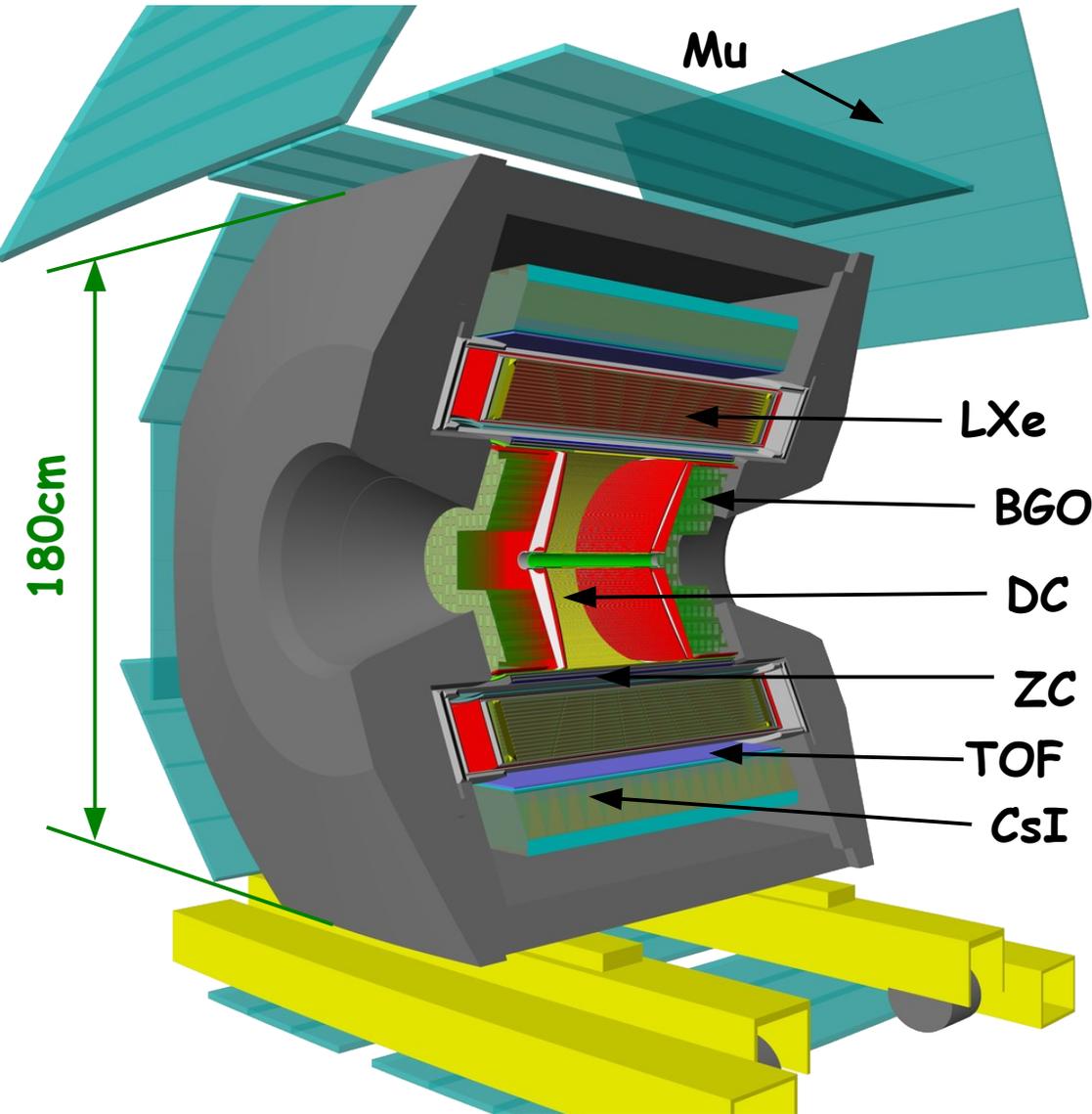
# Заключение

- × В сезоне осень 2021 — весна 2022 набран(ируется) рекордный объем данных (150 1/pb) в области порога нуклон-антинуклон.
- × Продолжается анализ набранных данных.
  
- × Для субпроцентных измерений предпринимаются гигантские усилия для измерения систематических неопределенностей (разрешения по углам, по вершине, триггер)
  
- × Продолжаем развивать детектор  
Идет активная работа по созданию торцевой координатной системы, её планируется установить ~~в период лето 2022-лето 2023 года~~ в 2023-2025 гг
  
- × Планы обновления детектора сильно зависят от долгосрочности работы комплекса (5 или 15 лет), надо уже сейчас начинать планировать и реализовать более кардинальные обновления детектора

Ближайший ориентир набрать - 1 фб<sup>-1</sup> , набрали ~506 пб<sup>-1</sup>

backups

# CMD-3 detector



## Tracking:

x Drift Chamber in 1.3 T magnetic field

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

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

## Calorimetry:

x Combined EM calorimeter (LXe, CsI, BGO)  
13.4  $X_0$  in barrel part

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

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

x LXe calorimeter with 7 ionization layers  
with strip readout

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

## PID:

x TOF system ( $\sigma_T \sim 0.4 \text{ nsec}$ )

particle id mainly for p, n

x Muon system

# $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ by CMD3

Very simple, but the most challenging channel due to high precision requirement.

Plans to reduce systematic error from 0.6-0.8% (by CMD2)  $\rightarrow$   $\sim$ 0.4-0.5% (CMD3)

Crucial pieces of analysis:

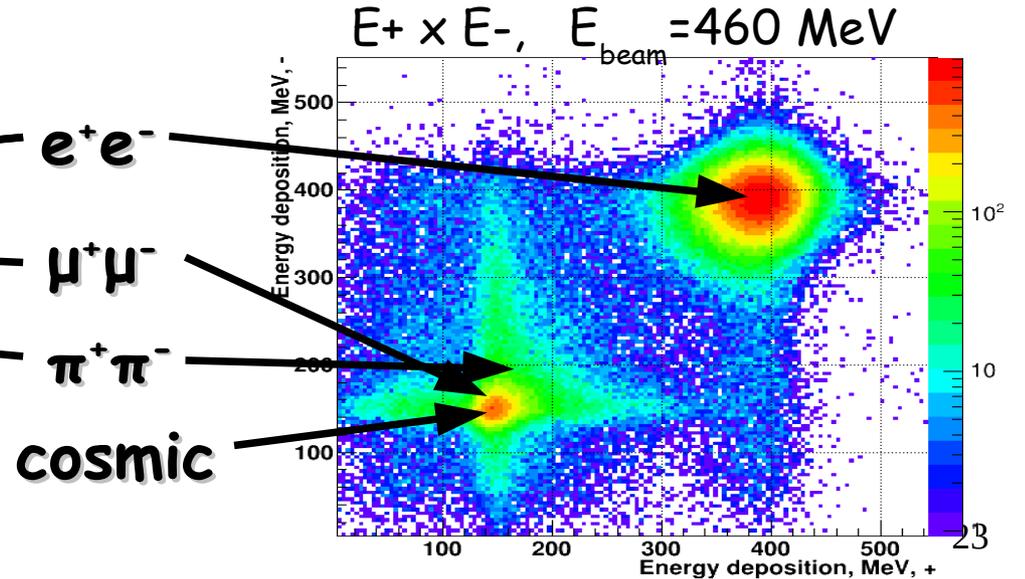
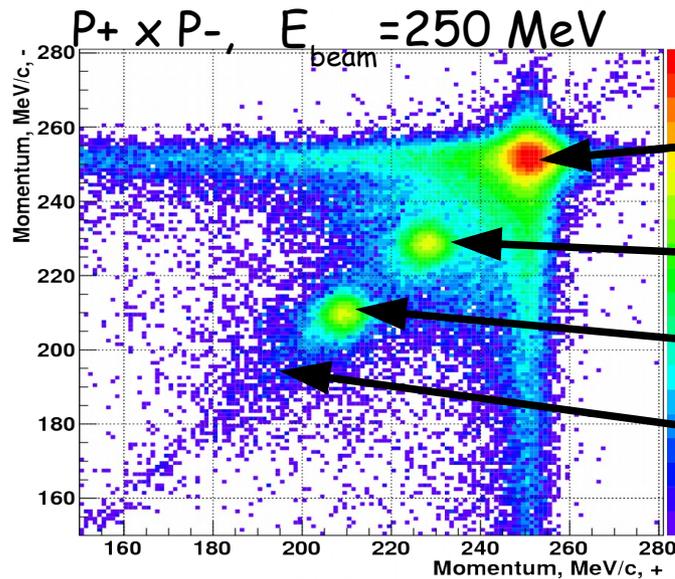
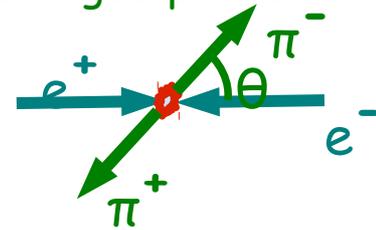
- $\times$   $e/\mu/\pi$  separation
- $\times$  precise fiducial volume
- $\times$  radiative corrections

Many systematic studies rely on high statistics

events separation either by momentum or by energy deposition

Momentums works better at low energy  $< 0.8$  GeV  
Energy deposition  $> 0.6$  GeV

Simple event signature with 2 back-to-back charged particles

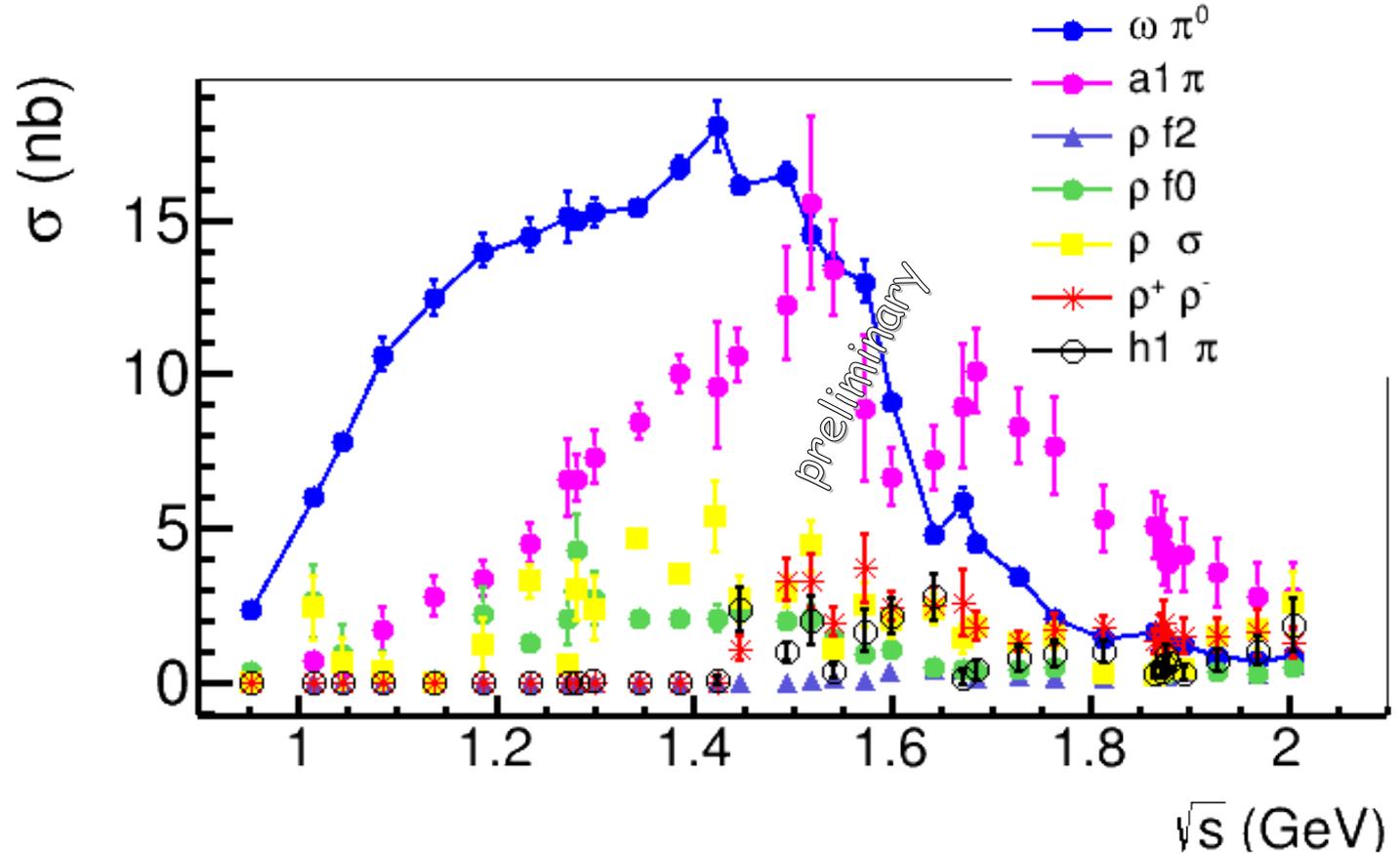


# Dynamics in $4\pi$

Production of  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-2\pi^0, 2(\pi^+\pi^-)$   
 can be via many intermediate states:

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

Detail amplitude analysis was performed

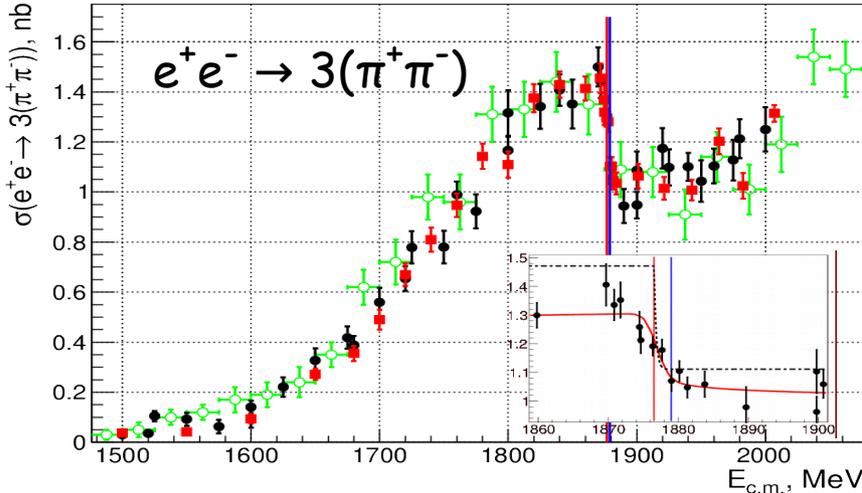
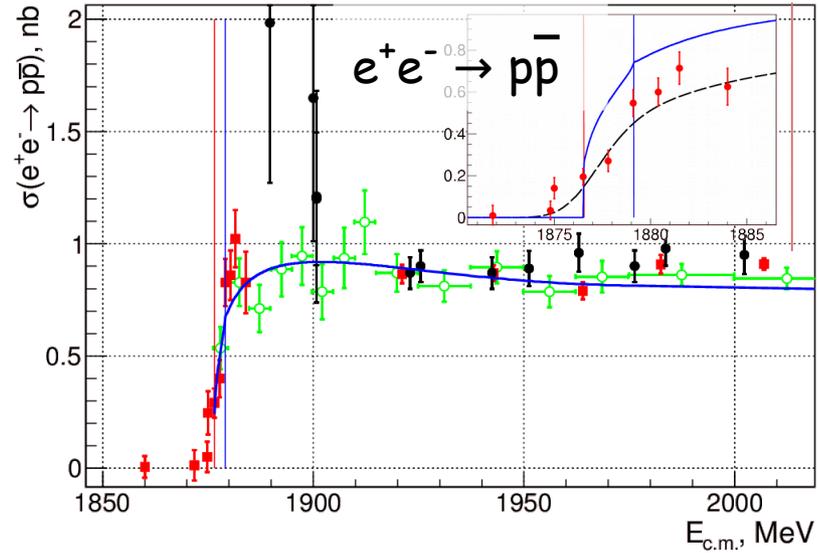
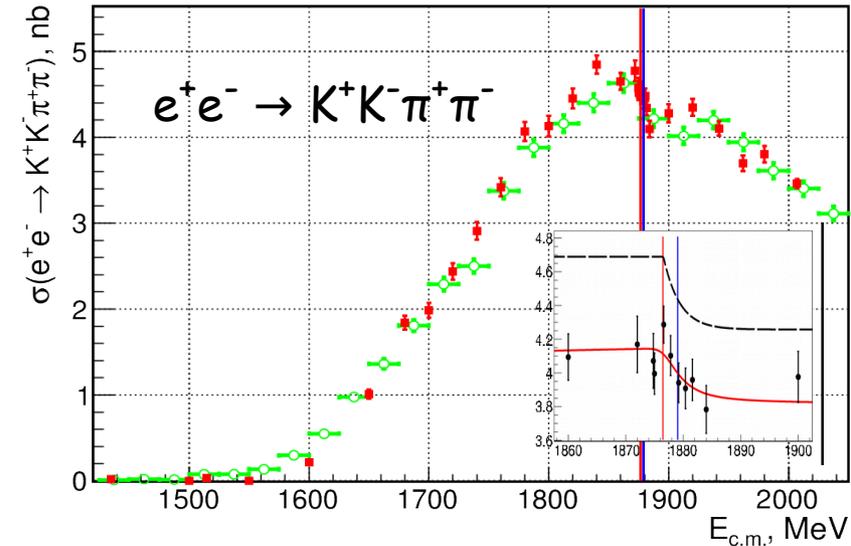


# Multihadrons production at NN

We did detail scan of  $N\bar{N}$  threshold region

Seen many dip structures in multihadron production

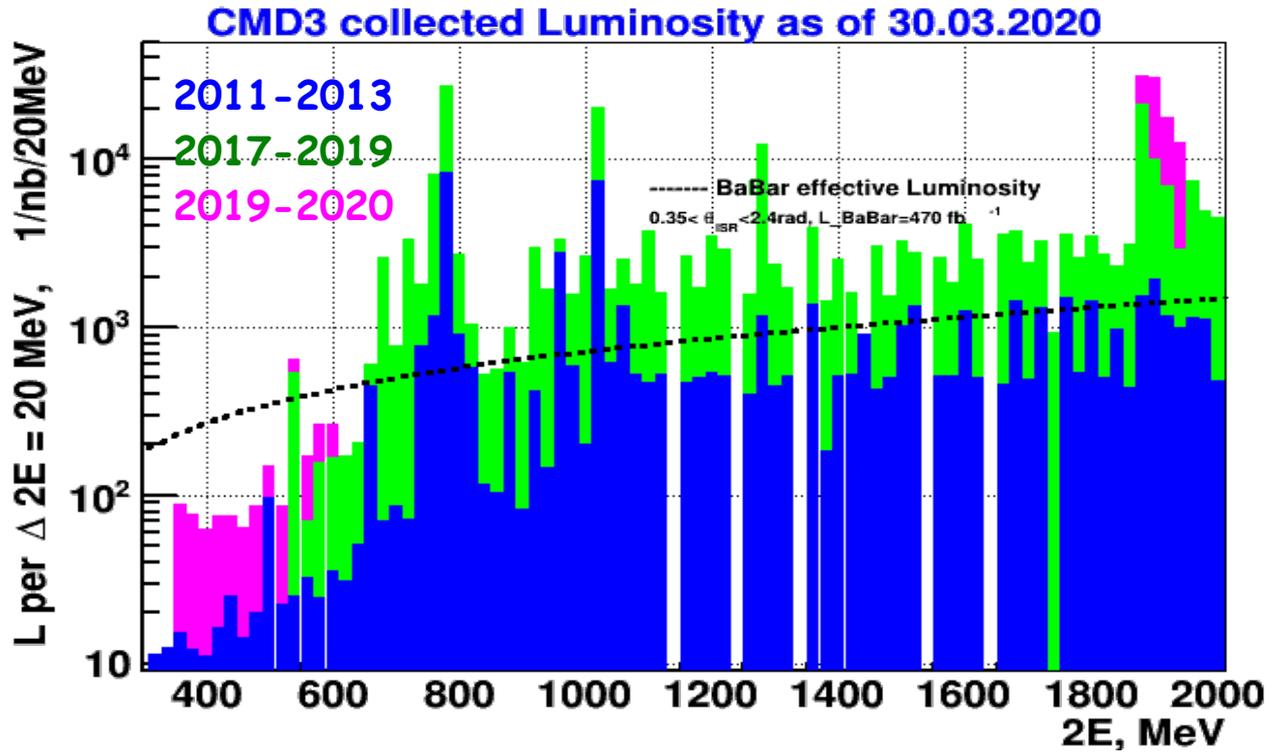
arXiv:1808.00145



Can be described via optical nucleon-antinucleon potentials (most advanced "Milstein-Salnikov" parametrization)

Some questions still opened, for example:  
Why no structure in  $e^+e^- \rightarrow 2(\pi^+\pi^-)$ ,  
KK2 $\pi$  effect is stronger than expected  
as seen in  $p\bar{p}$  annihilation

# Набранная светимость



Набрано с 12.2010

$L \sim 300 \text{ pb}^{-1}$  на детектор

2011-2013 seasons:

$17.8 \text{ pb}^{-1} < 1 \text{ GeV}$

$42.8 \text{ pb}^{-1} > 1. \text{ GeV}$

2017-2019 seasons:

$45.4 \text{ pb}^{-1} < 1 \text{ GeV}$

$141.8 \text{ pb}^{-1} > 1. \text{ GeV}$

2019-2020 season

$1 \text{ pb}^{-1} < 0.3 \text{ GeV}$

$51.4 \text{ pb}^{-1}$  at 1.87-1.94 GeV

Особо выделенные места:  $\eta$ ,  $\rho/\omega$ ,  $\phi$ ,  $f_1(1285)$ ,  $p\bar{p}/n\bar{n}$  порог

В последнем сезоне успели перед локдауном поработать:

55 дней в конце 2019:  $1 \text{ pb}^{-1}$  на 0.36 - 0.6 ГэВ

52 дня февраль-март 2020:  $51 \text{ pb}^{-1}$  на 1.87 - 1.94 ГэВ

Резонансы с шириной  $< 150 \text{ MeV}$ :

$\rho(770)$

$\omega(782)$

$f_0(980)$

$a_0(980)$

$\phi(1020)$

$f_1(1285)$

$\eta(1295)$

$\eta(1405)$

$K^*(892)$

$K_1(1270)$