The background features a stylized sun with yellow rays on the left and a white sphere on the right, set against a light blue and white gradient.

КМД-3  
Криогенный Магнитный Детектор

Фёдор Игнатов

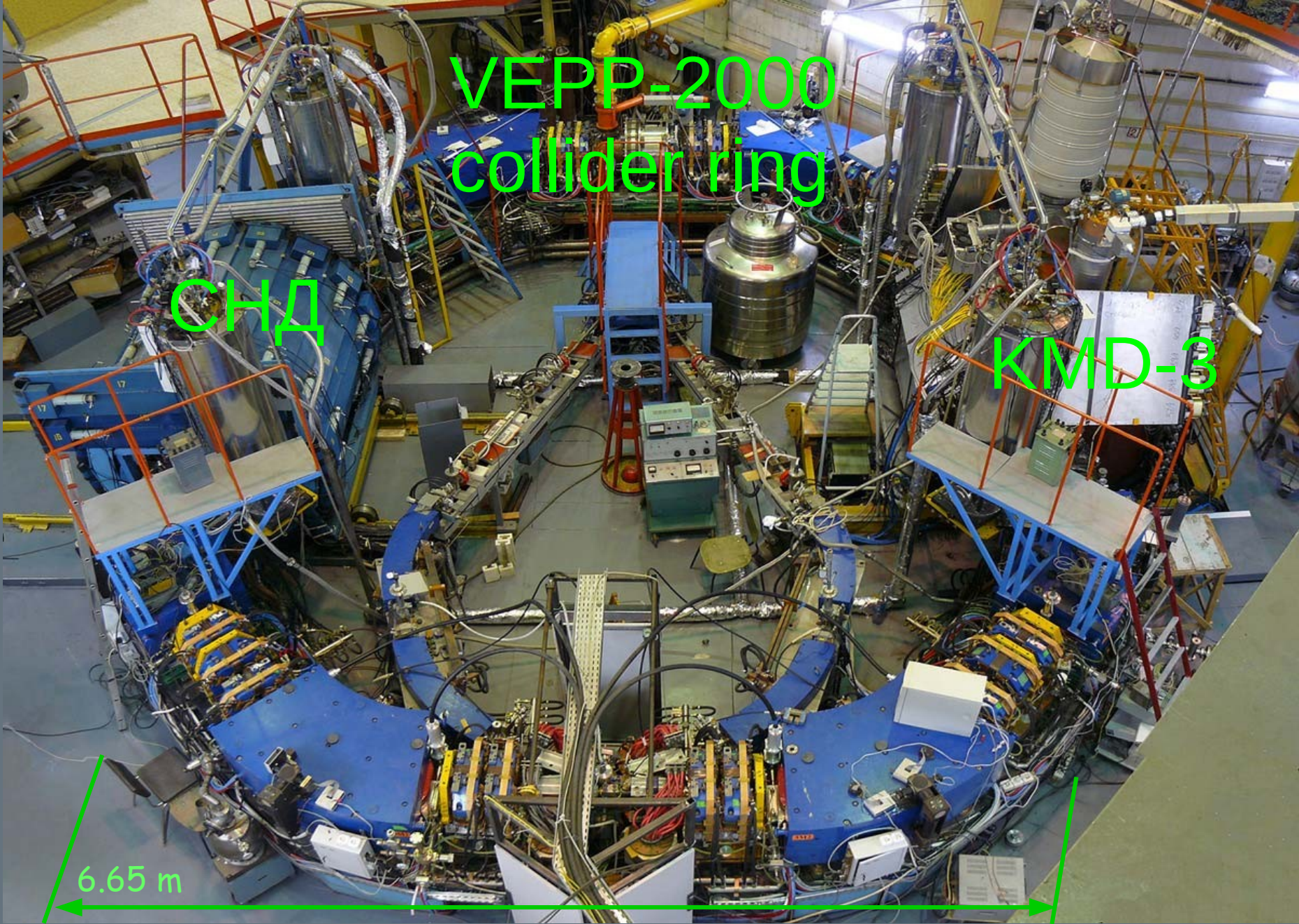
Научная Сессия ИЯФ  
4 февраля 2021

VEPP-2000  
collider ring

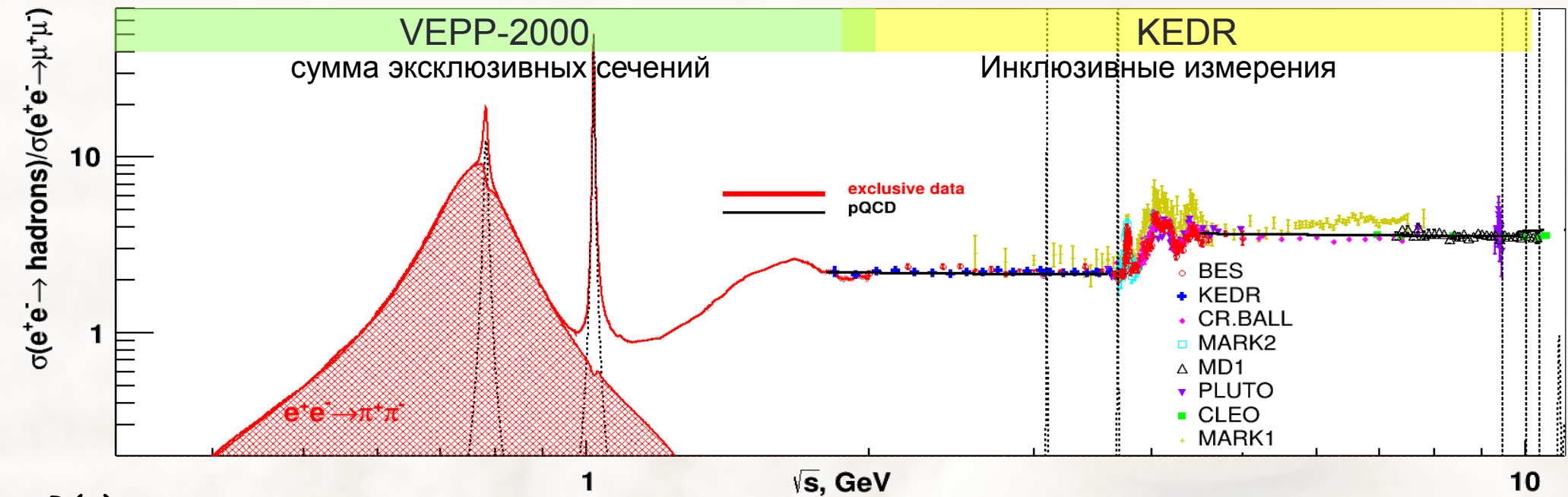
СНД

КМД-3

6.65 m



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

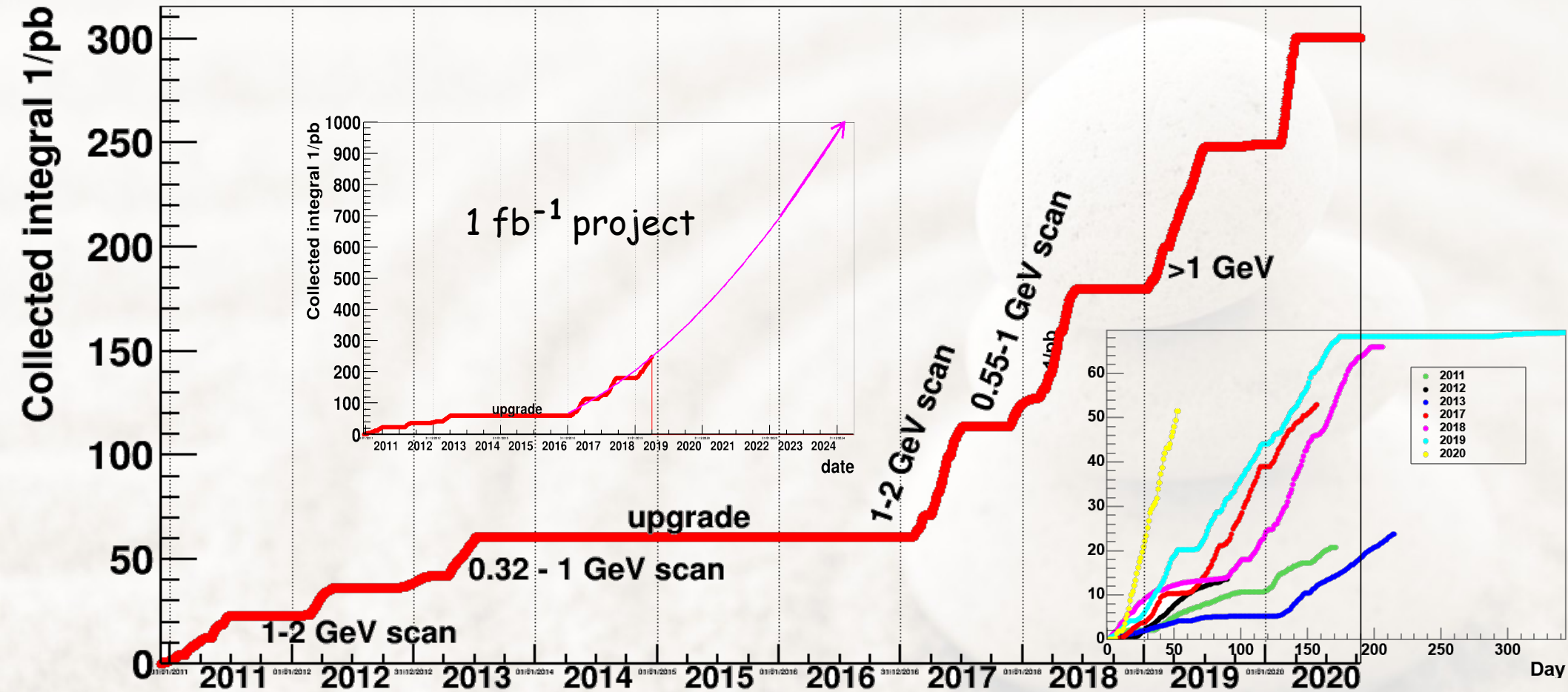
Изучение рождения адронов в аннигиляции  $e^+e^-$  :

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

3



# История набора данных с КМД-3

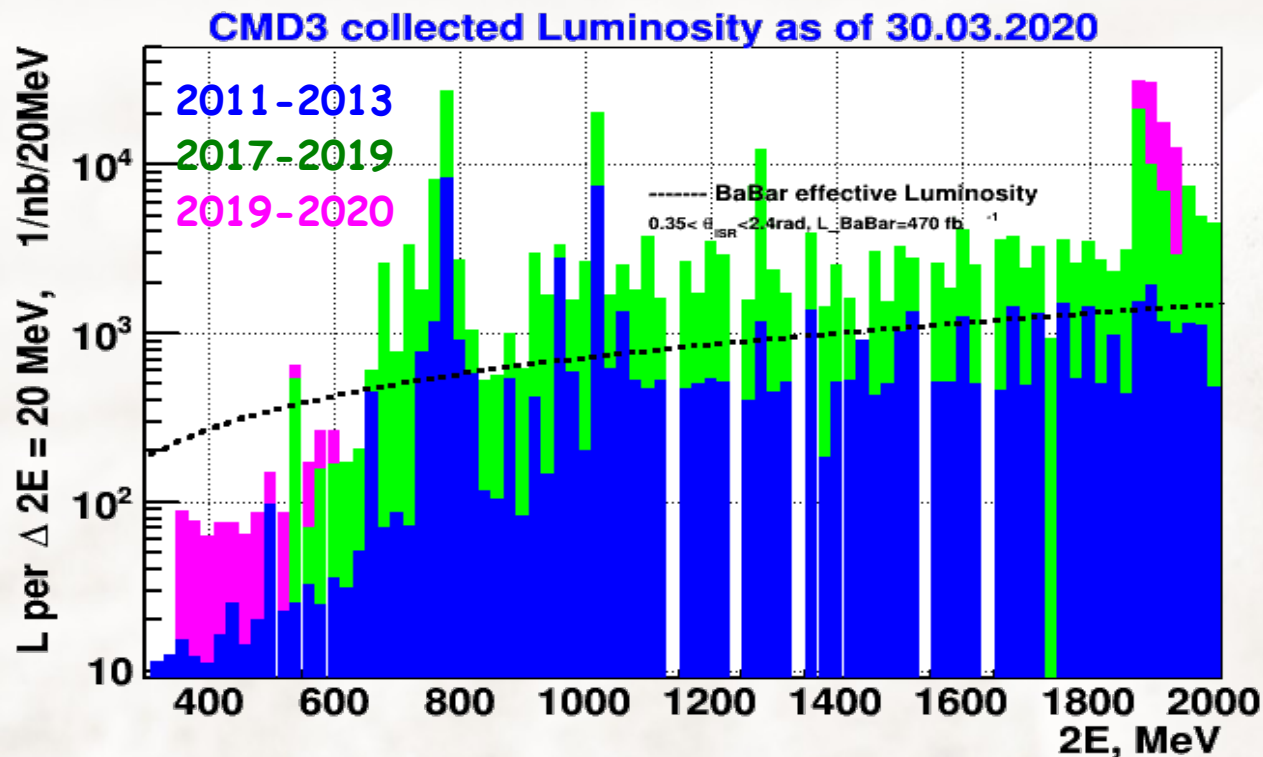


Начали набирать статистику на коллайдере в конце 2010 **date**

Проведено 7 сезонов набора данных

Ближайший ориентир интегральной светимости 1fb<sup>-1</sup>

# 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



Обновление вакуумно-криогенной системы:

В конце 2018 заменили старые формвакуумные насосы на безмасляные

В октября 2020 году заключен контракт на поставку двух новых турбомолекулярных насосов (более производительные и будет меньше наводки на детектор)

2 срыва сверхпроводящего соленоида за прошлый сезон:

мигание сети (отключение компрессора гелия на криогенной станции), непонятный рост температур соленоида

Для надежности системы планируется отвязаться от внешних скачков давления в системе газосброса гелия на внешнем контуре, Либо было бы лучше сделать регуляцию потока гелия через температурный экран соленоида



# 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

Запланировано улучшение инфраструктуры электропитания (требуется участие служб института), земель и др. работы по улучшению ситуации с наводками

**(ситуация с наводками очень плохая)**

# Работы по обновлению электроники

## BGO

Планируется разработать новые ЗЧУ, надо сделать более компактными:  
2021 — сделать прототип для тестов,  
к лету 2023 - изготовить все ЗЧУ, блоки, доп. платы, кабели и подвеска

## LXe координатная система:

Уже испытан новый полосковый ЗЧУ (старые уже физически устарели):  
меньше шумы, меньше энергопотребление, более удобный конструктив блока плат для оперативного ремонта

Перед изготовлением провести дополнительные тесты с разным временем формирования

## LXe калориметрическая часть:

Есть желание добавить измерение времени,  
ведутся работы по разработке новых ЗЧУ, оцифровщика формы сигнала

## Мюонная система:

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

## Система сбора данных, увеличение пропускной способности:

Планируется интеграция в ССД детектора новой БТППД (концентратор информации с подсистем),  
+плата мезонин с микропроцессором (на базе RaspberryPi) для первичной обработки, сжатия потока.

Триггер: Блок финального решения Триггера, доделывается прототип, идет тестирование

## Обновление медленного контроля

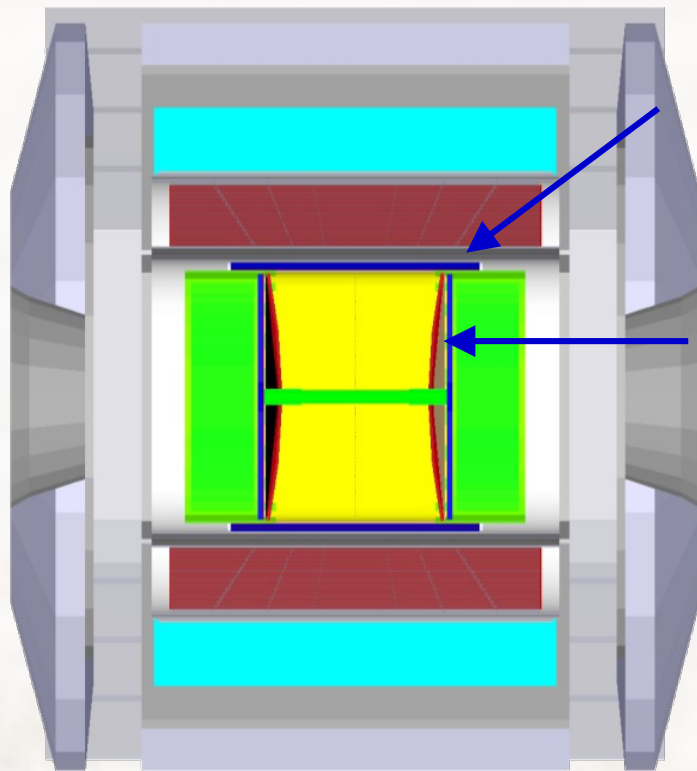
Новые платы, переход от старых блоков в Камаке на конструктив евромеханики

Ресурсы близки к исчерпанию: кондиционер, «большой» UPS, чиллер BGO





# Новая Z-камера



Цилиндрическая Z-камера

Торцевые координатные диски

Z-камера вышла из строя летом 2017

проработала 25 лет

Ведется разработка новой торцевой и Z координатной системы на основе micro-RWELL технологии (Л.И.Шехтман, Г.В.Федотович)

## Новая Z камера:

Изготовлена цилиндрическая оправка для центрального катода

Решения по старту полноценных работ пока не принято

Что нам это даст:

- x Точность и контроль телесного угла
- x Развитие детекторных технологий в Институте

ZC : шаг стрипов 6.5 мм,  $\sigma_Z \sim 0.7$  мм

LXe: шаг полосок 10-15 мм,  $\sigma_{ZR} \sim 2$  мм

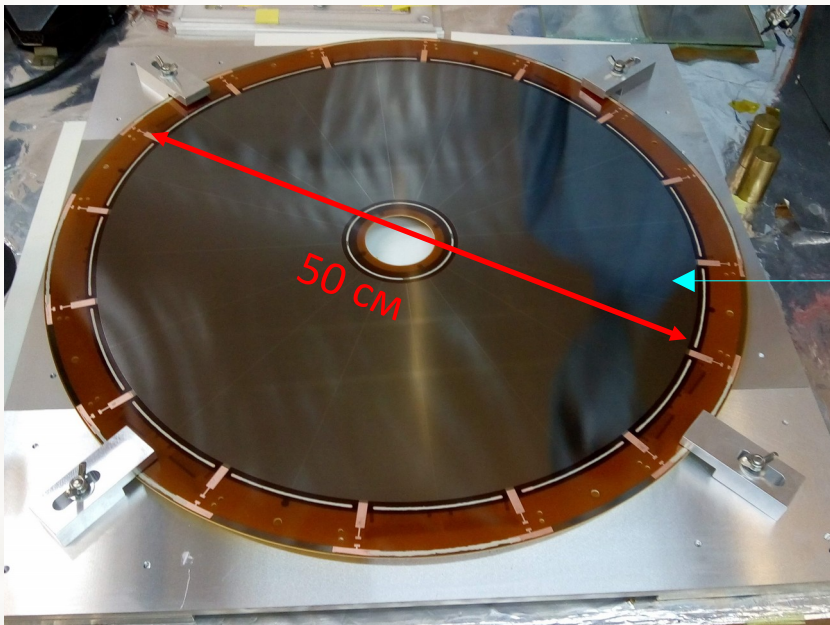
new-ZC: шаг 1.5 мм,  $\sigma_Z \sim 0.4$  мм



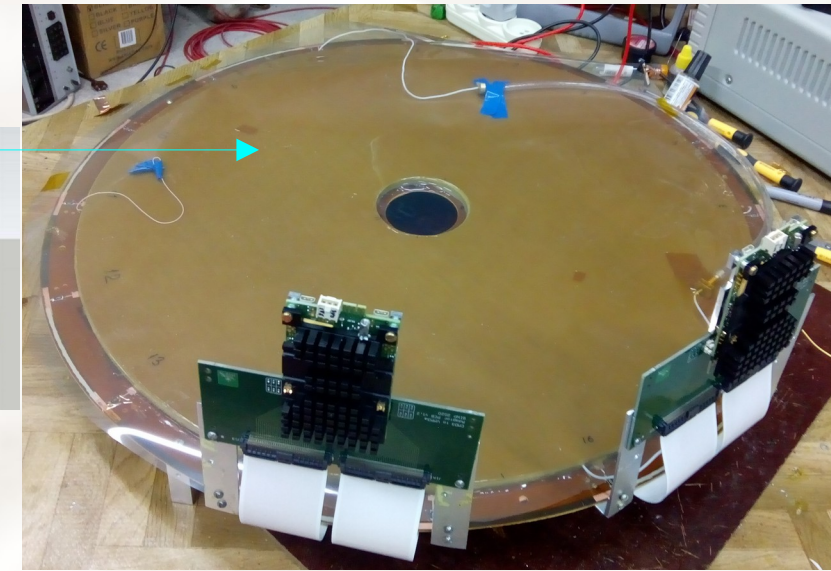
# Торцевой диск КМД-3



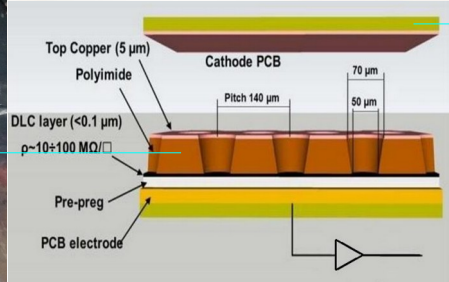
Первый диск во время сборки



Монтаж электроники на первом диске



Структура mRWELL

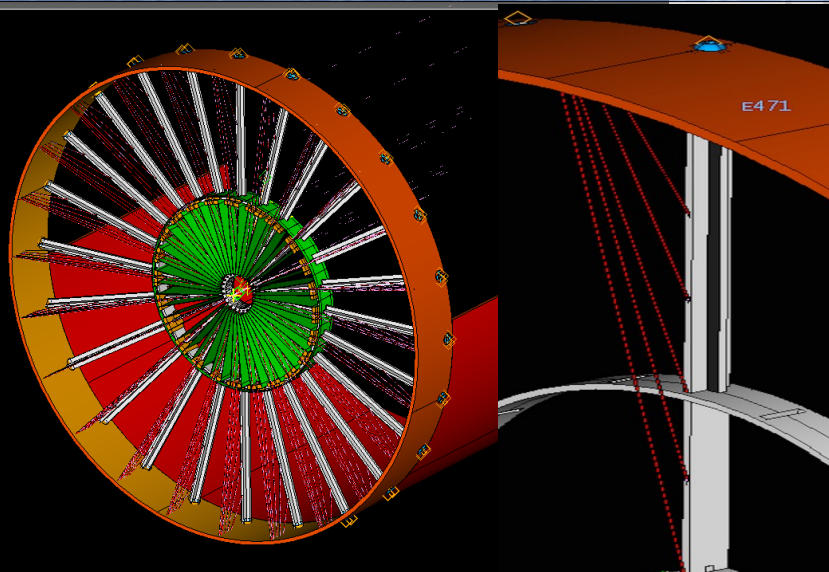


Двух-слойная считывающая структура с R-phi сегментацией:  
 400 четверть-колец, шаг стрипов 2мм,  $\sigma_R \sim 0.6 \text{ мм}$   
 432 сектора по phi(x2 по r),  $\langle \sigma_{R\phi} \rangle \sim 1.2 \text{ мм}$

- x Смонтирован первый диск
- x Проверена целостность структуры
- x Измерен коэффициент усиления в токовом режиме по всей площади диска
- x Идет монтаж финальной электроники и подготовка к ее включению

Оценка готовности установки в детектор ~ лето 2022-лето 2023 года

# 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 расплаиваются 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,

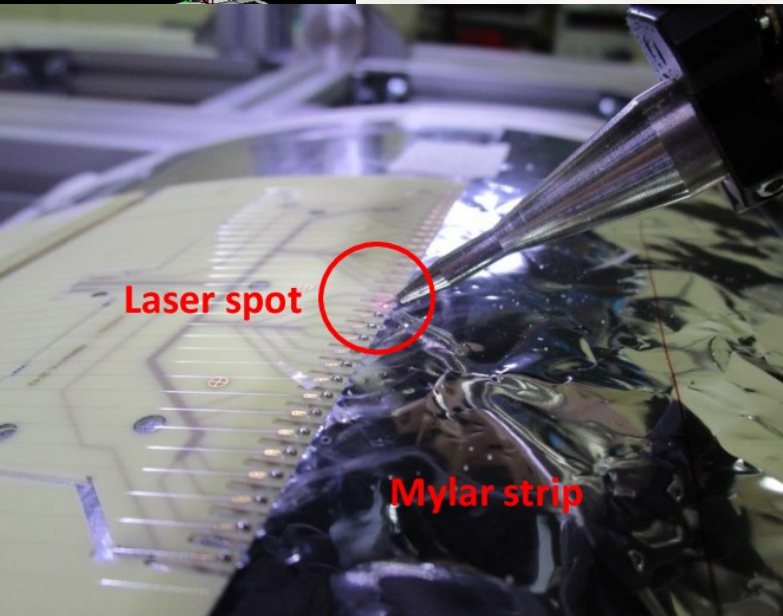
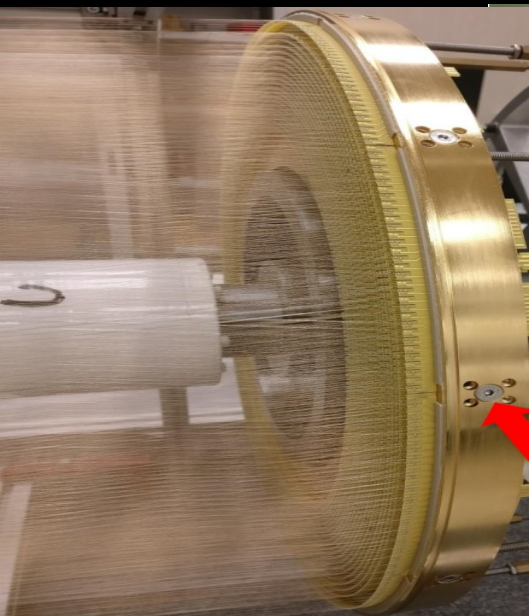
А.Попов и др. — развитие технологии напыления на проволочки и тестирование их разных типов

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

Возможное начало создания прототипа ДК в 2022-2023

11

Научная сессия ИЯФ



A stack of three smooth, white, rounded stones is positioned on the right side of the image. The stones are stacked vertically, with the largest at the bottom and the smallest at the top. The background is a soft-focus, light-colored sandy surface.

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

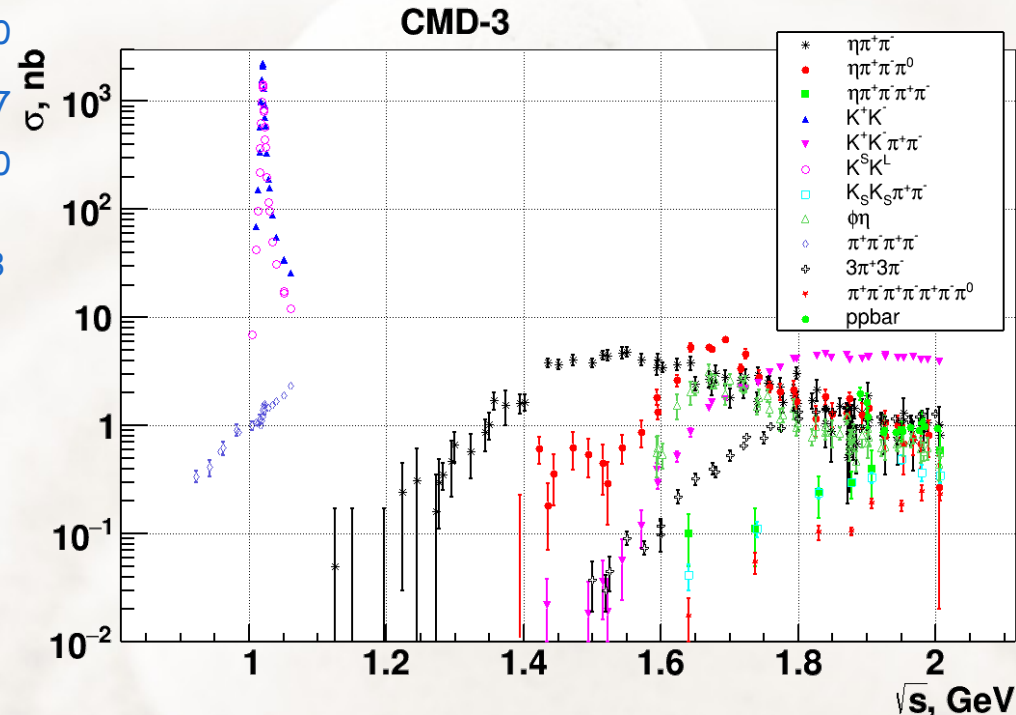
Phys.Lett. B760 (2016) 314-319

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:

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

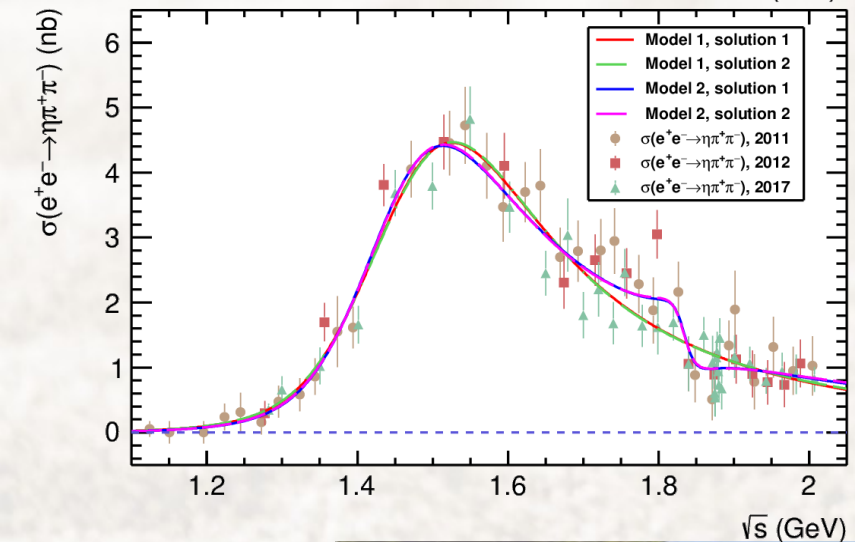
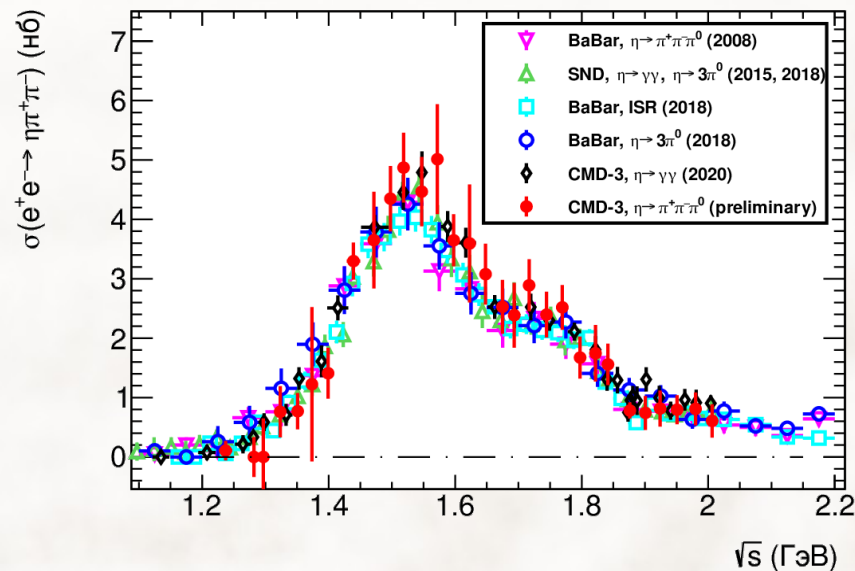
$$\eta\gamma, \pi^0\gamma, \pi^+\pi^-\pi^0, \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0, 2(\pi^+\pi^-), 2(\pi^+\pi^-\pi^0), 2(\pi^+\pi^-\pi^0)$$

$$K^+K^-, K_S K_L - \text{at higher energies}, K^+K^-\pi^0, K_S K_L \pi^0, K_S K_L \eta^0, K_S K 3\pi,$$

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

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

Sergey Griбанov и др., JHEP 01, 112 (2020)



Использовалась статистика сезонов 2011, 2012 и 2017 годов ( $1.1 \text{ ГэВ} \leq \sqrt{s} \leq 2.0 \text{ ГэВ}$ ). (1/2.5 всей статистики)  
 Отобрано  $13426 \pm 206$  событий процесса  $e^+ e^- \rightarrow \eta \pi^+ \pi^-$  в двухфотонной моде распада  $\eta$ -мезона.

Систематическая ошибка измерения сечения — 6%.  
 (BaBar 4.5-6.5%, SND 6-8%)

Аппроксимация сечения (ВДМ).

Model 1 — учтены промежуточные состояния

$$\rho \rightarrow \rho \eta \text{ и } \rho' \rightarrow \rho \eta. \quad (\chi^2/\text{ndf}=98.9/79)$$

$$\text{Model 2: } \rho \rightarrow \rho \eta, \quad \rho' \rightarrow \rho \eta \text{ и } \rho'' \rightarrow \rho \eta. \quad (\chi^2/\text{ndf}=72/75)$$

В обоих моделях наблюдается множественность решений. Значимость  $\rho''$   $2.5\sigma$

Расчет вероятности распада  $\tau^- \rightarrow \eta \pi^- \pi^0 \nu_\tau$  в рамках CVC:

$$B(\tau^- \rightarrow \eta \pi^- \pi^0 \nu_\tau) = 0.168 \pm 0.006 \text{ (stat.)} \pm 0.011 \text{ (syst.)} \%$$

Прямые измерения PDG:

$$B(\tau^- \rightarrow \eta \pi^- \pi^0 \nu_\tau) = 0.139 \pm 0.007 \%$$

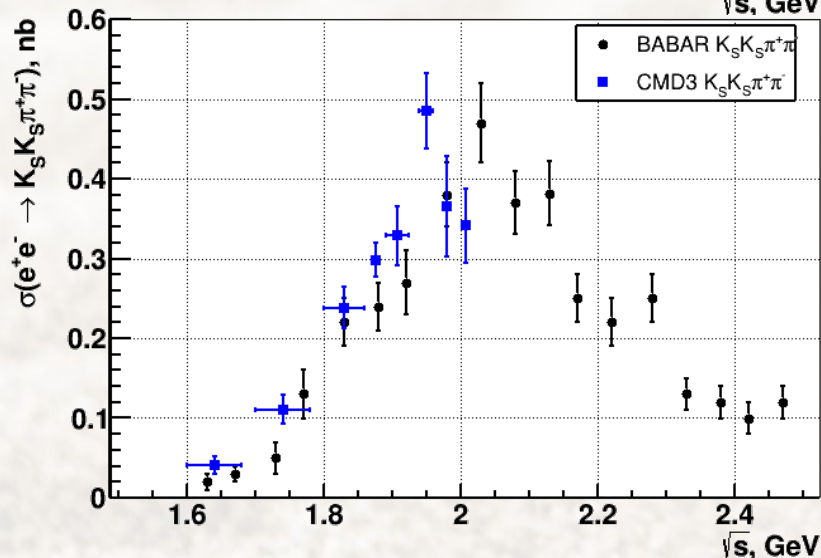
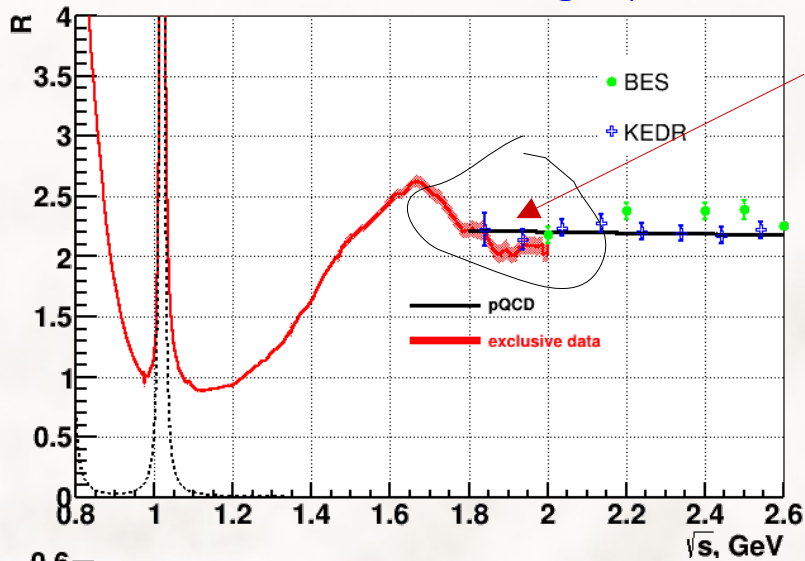
согласие  $2\sigma$ .



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



Evgeny Solodov et al, Phys.Lett.B 804 (2020) 135380



× Сумма эксклюзивных сечений на ~10% меньше предсказания pQCD при  $2E=1.85-2$  ГэВ

× Вклад  $2K2\pi$  в  $(g-2)_\mu$ :

Раньше было по изоспин соотношениям

$$3.31 \pm 0.58 \times 10^{-10}$$

после прямого измерения BaBar всех мод

$$2.41 \pm 0.11 \times 10^{-10} \quad (\text{для } \sqrt{s} < 2.0 \text{ ГэВ})$$

Необходимо измерить все возможные каналы

$e^+e^- \rightarrow \text{hadrons}$

По мотивом анализа  $e^+e^- \rightarrow 6\pi, 7\pi$  достаточно быстро сделан анализ  $e^+e^- \rightarrow K_S K_S \pi^+ \pi^-$  на КМД-3

Согласуется с BaBar,

Доминирует  $K^*(892)K^*(892)$

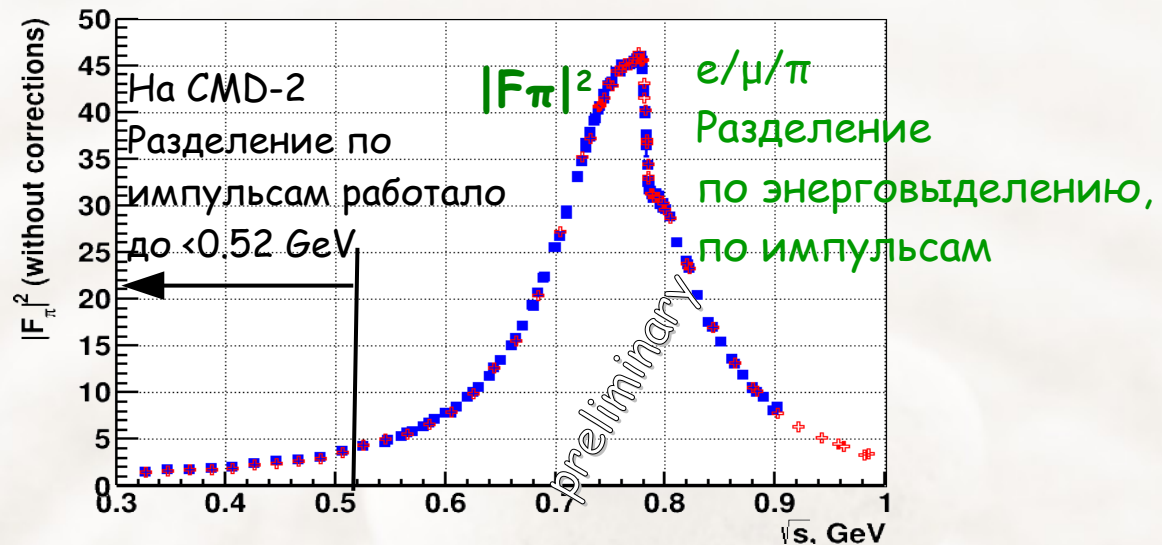
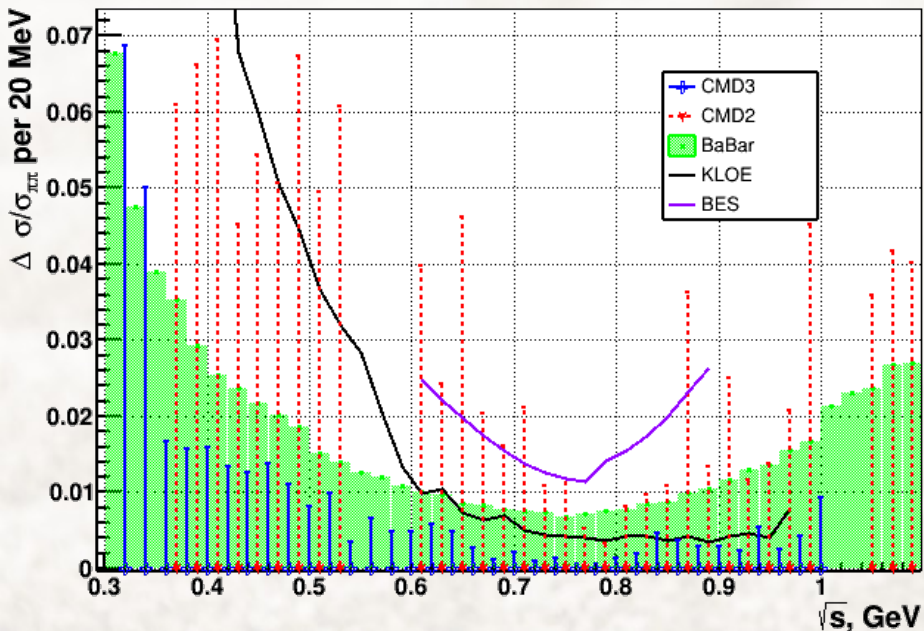
При большой статистике можно будет поизучать динамику

# $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ на CMD-3



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

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



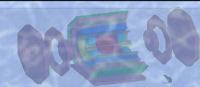
На энергиях  $> 1$  ГэВ разрабатывается  
разделение с помощью нейронной сети  
Учитывающее профиль ливня в калориметре



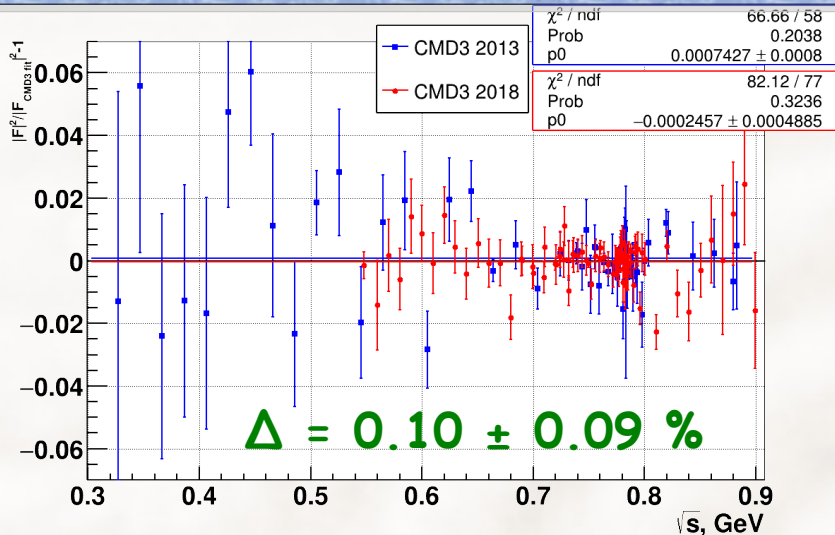




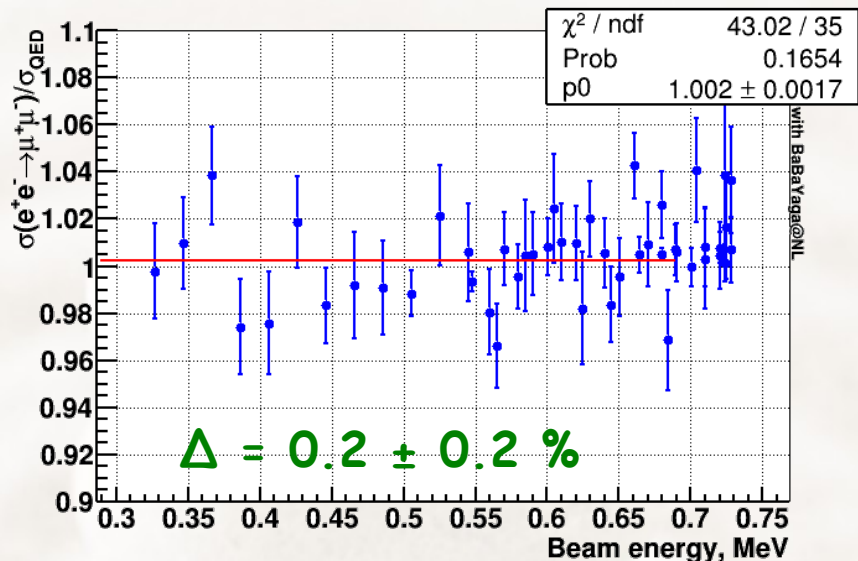
# $|F_\pi|^2$ (RHO2013/2018)



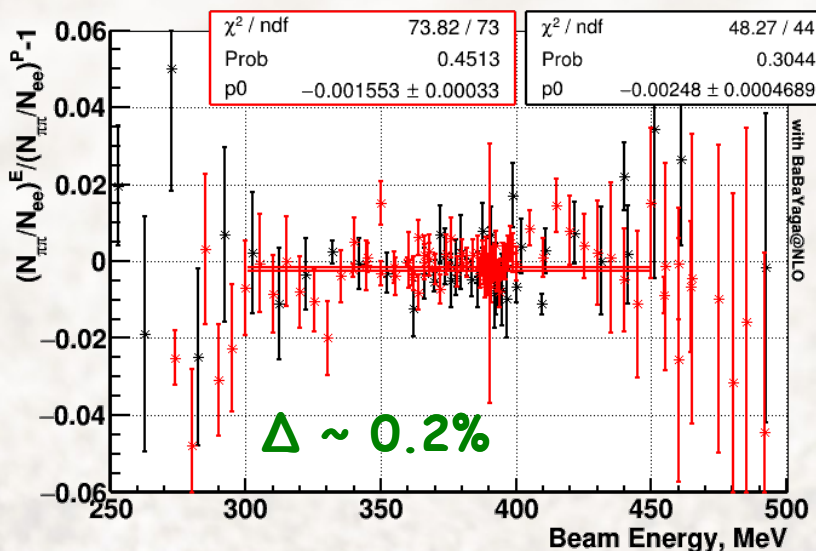
Сравнение RHO2013/2018 (PID по импульсам)



Количество мюонов/QED



Два метода разделения энергодельта/импульсы



Анализ почти на финишной прямой  
Идет детальный анализ систематик  
Есть вопросы к телесному углу/  
генератору  $\pi+\pi^-$  (экспериментальной асимметрии)  
Хочется получить систематику  $\sim 0.5\%$

Сейчас идет переобработка после перекалибровки ДК, улучшения в анализе где часть проблемных эффектов будет подавлена



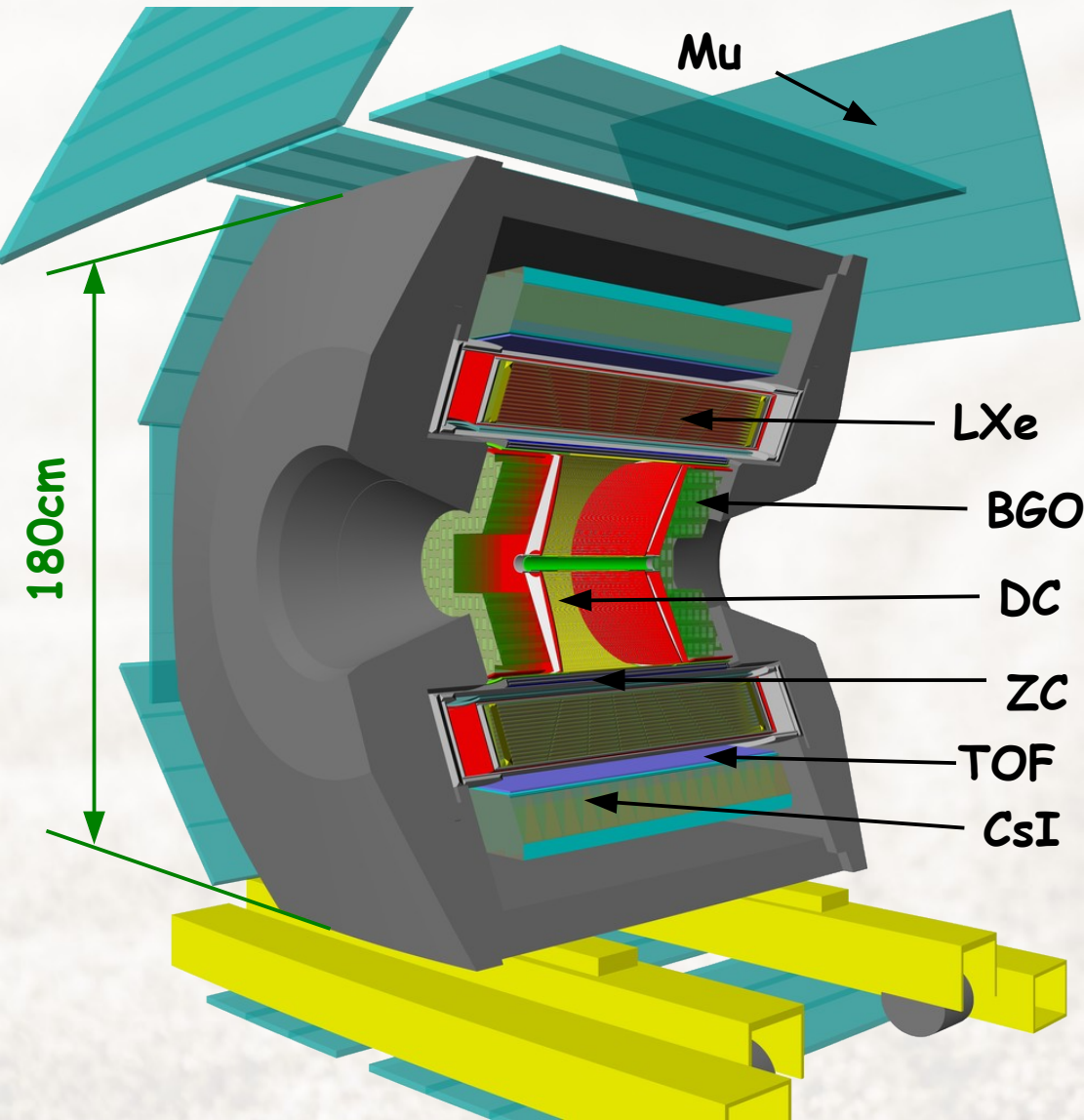
- × В 2020 году был самый большой темп набора светимости
- × В данный момент включаемся для начала сезона 2021
  
- × Продолжается анализ ранее набранных данных
  
- × Продолжаем развивать детектор
  - Идет активная работа по созданию торцевой координатной системы, её планируется установить в период лето 2022-лето 2023 года
- × Планы обновления детектора сильно зависят от долгосрочности работы комплекса (5 или 10 лет), в случае 10-и лет надо уже сейчас начинать планировать и реализовать более кардинальные обновления детектора

Ближайший ориентир набрать -  $1 \text{ фб}^{-1}$  , набрали  $\sim 300 \text{ пб}^{-1}$

A stack of three smooth, light-colored stones is positioned on the right side of the image. The stones are stacked vertically, with the largest at the bottom and the smallest at the top. The background is a soft-focus, light-colored sandy surface.

backups

# CMD-3 detector



## Tracking:

x Drift Chamber in 1.3 T magnetic field

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

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

## 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:

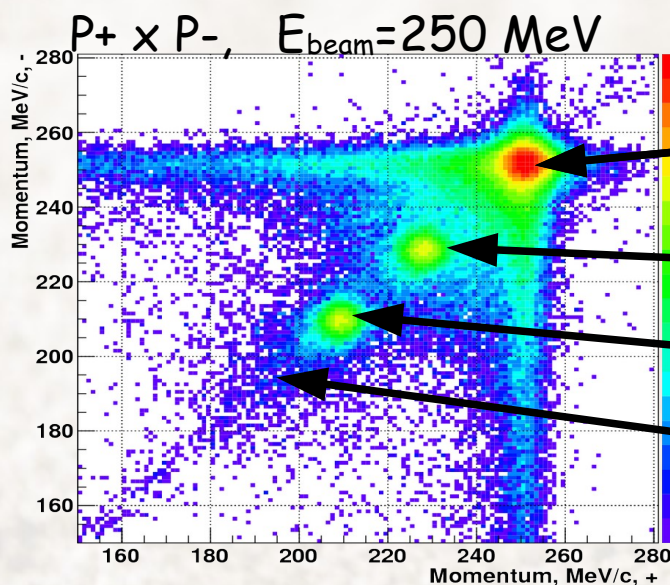
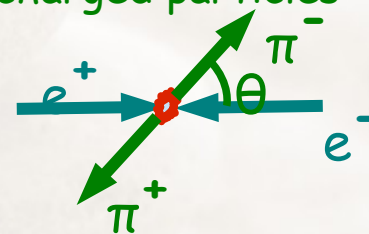
- $\times$   $e/\mu/\pi$  separation
- $\times$  precise fiducial volume
- $\times$  radiative corrections

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



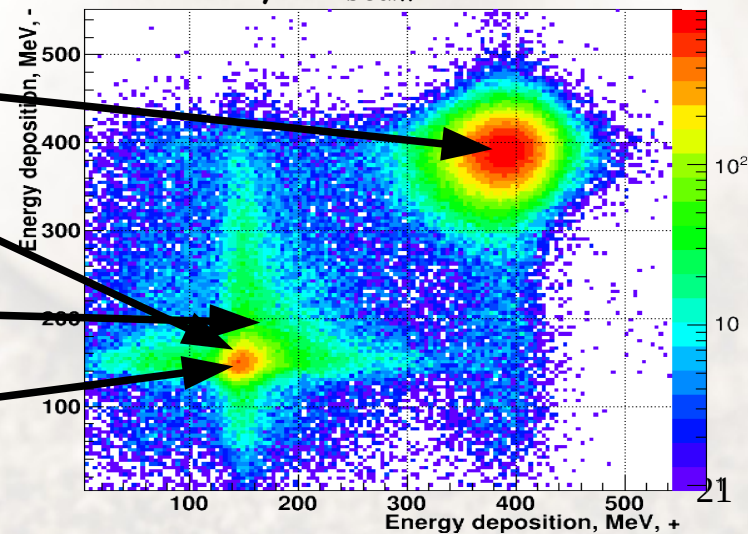
$e^+e^-$

$\mu^+\mu^-$

$\pi^+\pi^-$

cosmic

$E^+ \times E^-$ ,  $E_{\text{beam}} = 460$  MeV





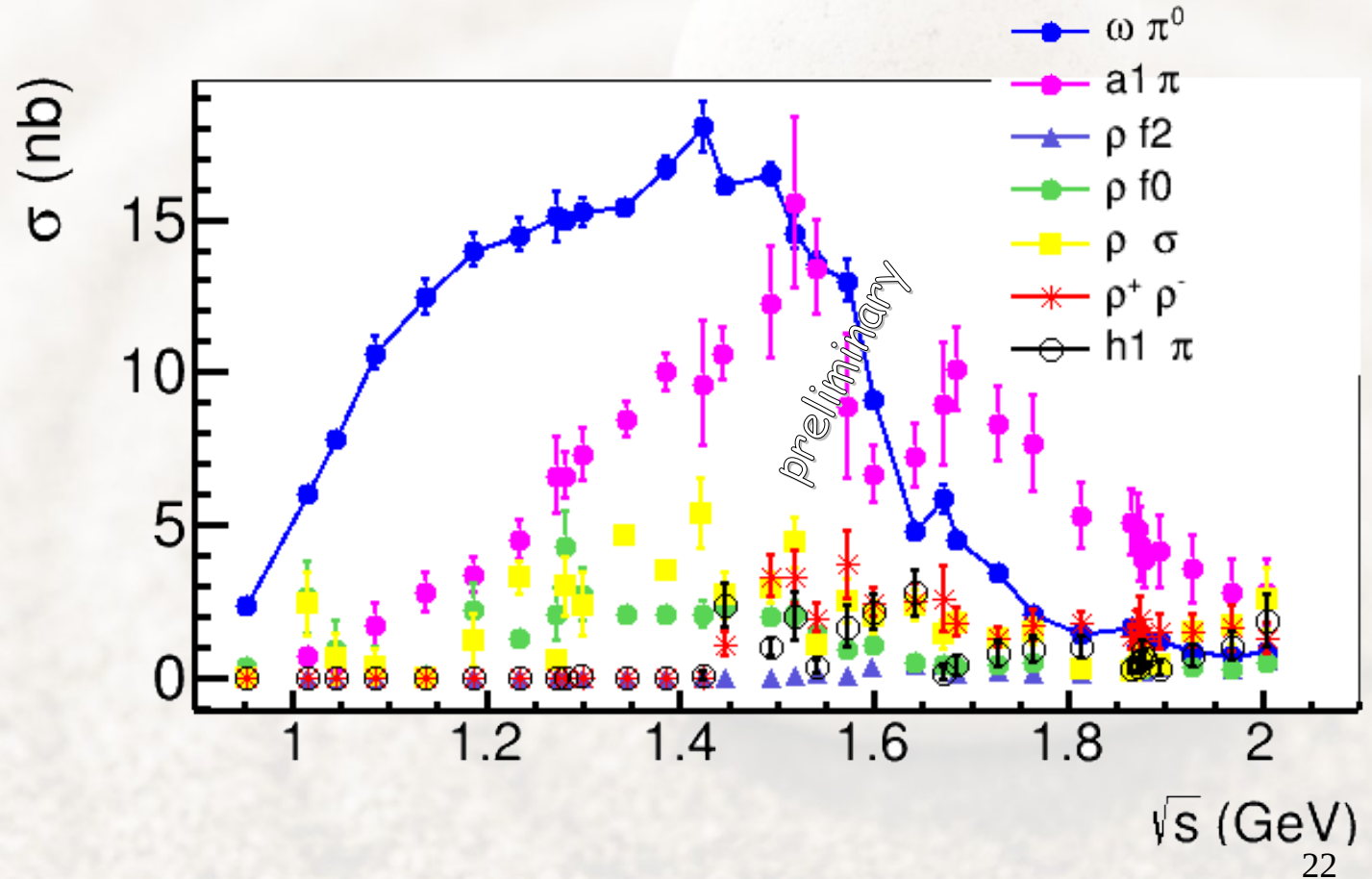
# Dynamics in $4\pi$



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





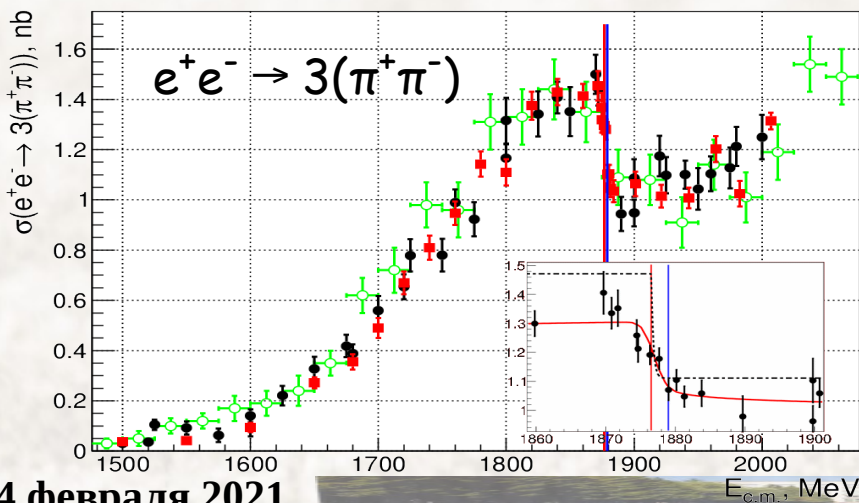
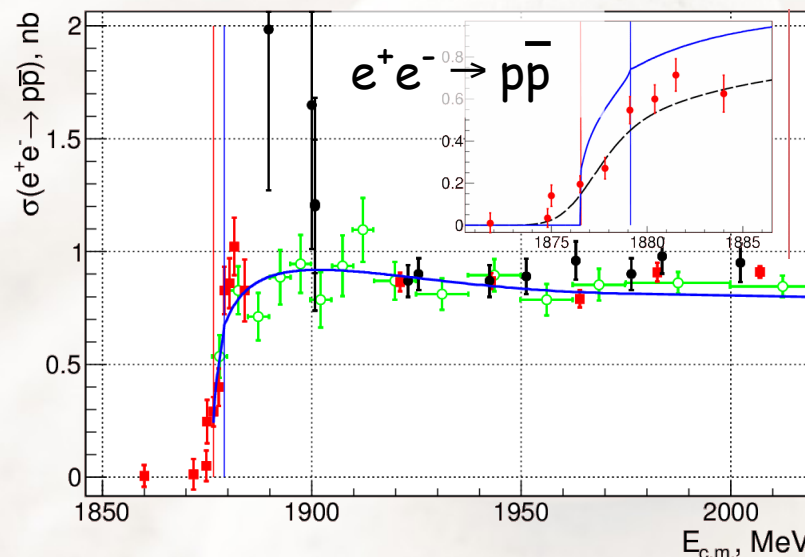
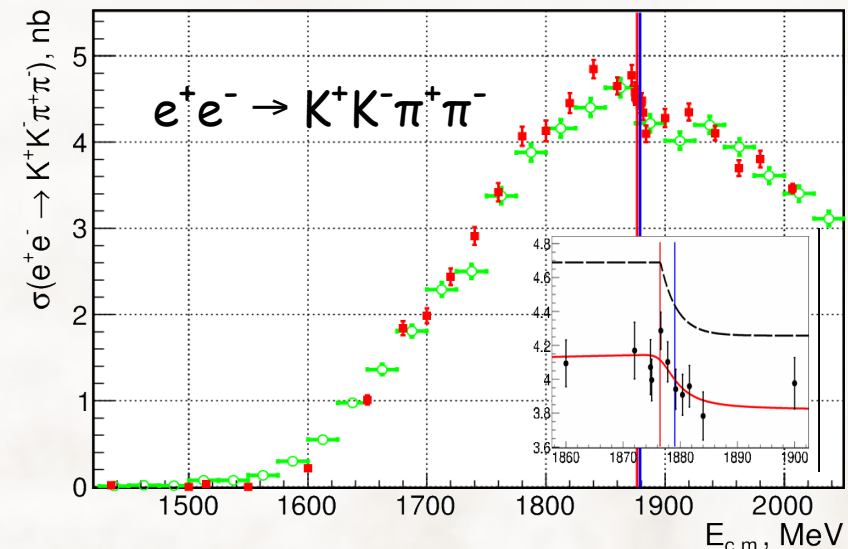
# Multihadrons production at NN



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

Seen many dip structures in multihadron production

arXiv:1808.00145

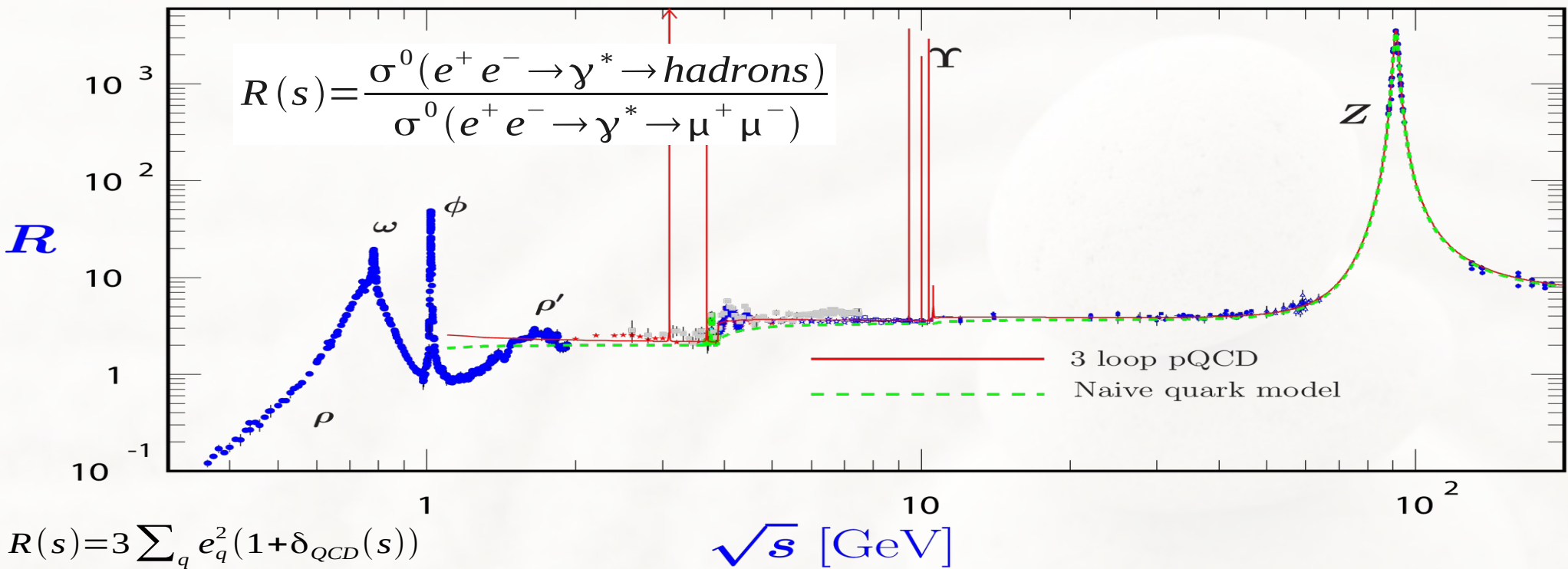


Can be described via optical nucleon-antinucleon potentials (most advanced "Milstein-Salnikov" parametrization)

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



# R(s)



R(s) is one of the fundamental quantities in high energy physics:

its reflects number of quarks and colors → pQCD tests;

QCD sum rules → quark masses, quark and gluon condensates,  $\Lambda_{QCD}$

Dispersion relations →  $\alpha_{QED}(M_Z)$ , hyperfine muonium splitting, **muon (g-2)**