

Изучение e^+e^- аннигиляции в адроны на коллайдерах ИЯФ

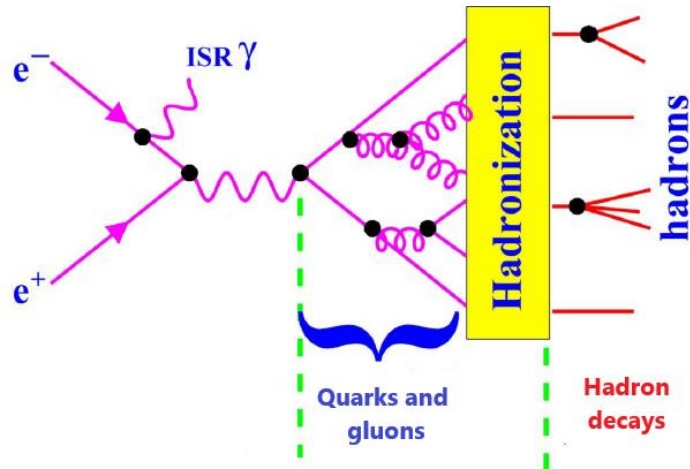
Владимир Дружинин

ИЯФ СО РАН, Новосибирск

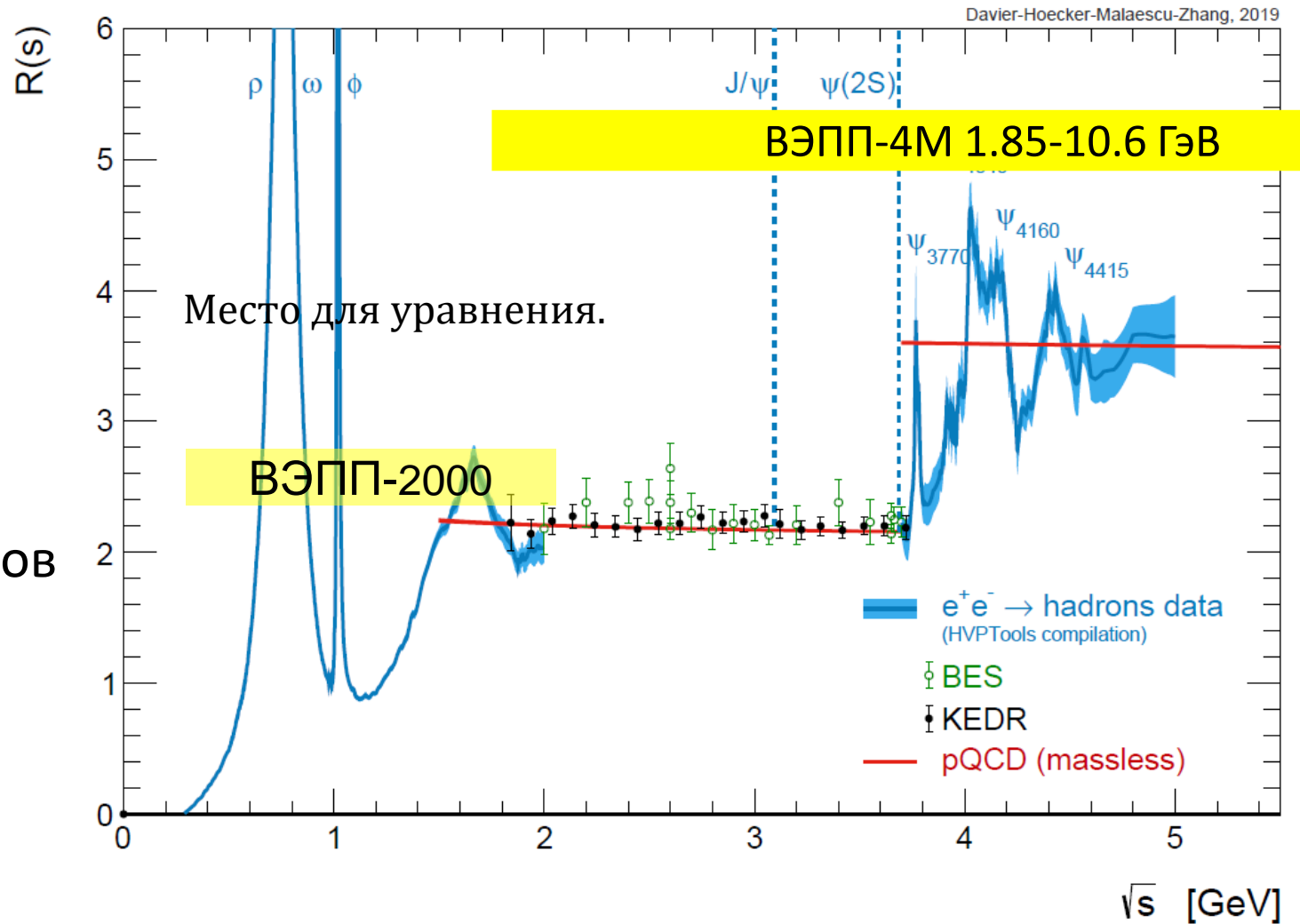
Сессия-конференция секция ядерной физики ОФН РАН
«Физика фундаментальных взаимодействий»,
посвященная 70-летию В. А. Рубакова.

19 февраля 2025

e^+e^- аннигиляции в адроны



- Измерение полного адронного сечения
- Спектроскопия векторных мезонов
- Прецизионное измерение масс
- Изучение динамики рождения адронов
- Двухфотонные процессы
- ...

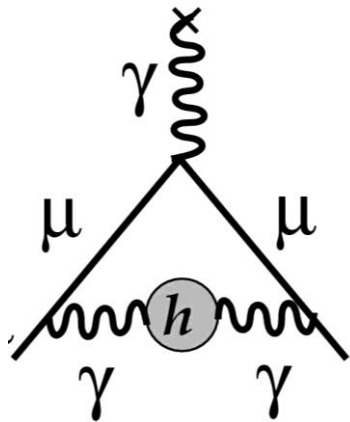


Полное адронное сечение

- ✓ В областях рождения резонансов (ниже 2 ГэВ, ψ, Υ) полное адронное сечение не может быть вычислено в рамках КХД
- ✓ Это сечение необходимо для вычисления в рамках Стандартной модели таких параметров как бегущая константа электромагнитных взаимодействий и аномальный магнитный момент мюона (вклад адронов в поляризацию вакуума)

$$\alpha(E) = \frac{\alpha(0)}{1 - \Delta\alpha(E)}, \quad \Delta\alpha = \sum_f \text{loop}(f)$$

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

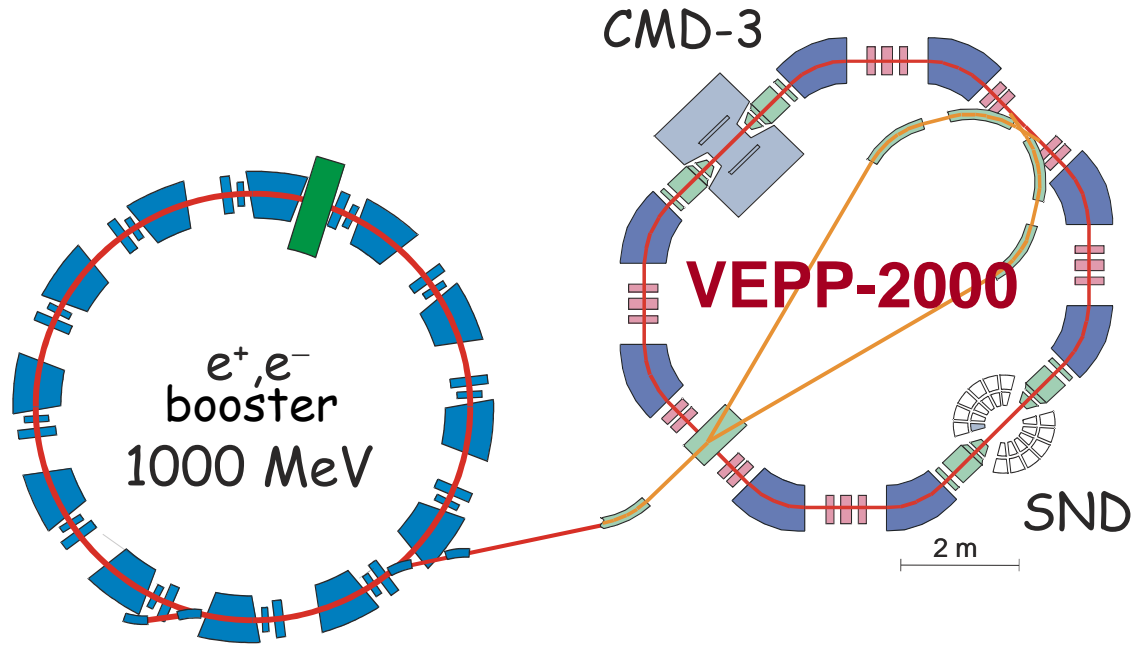
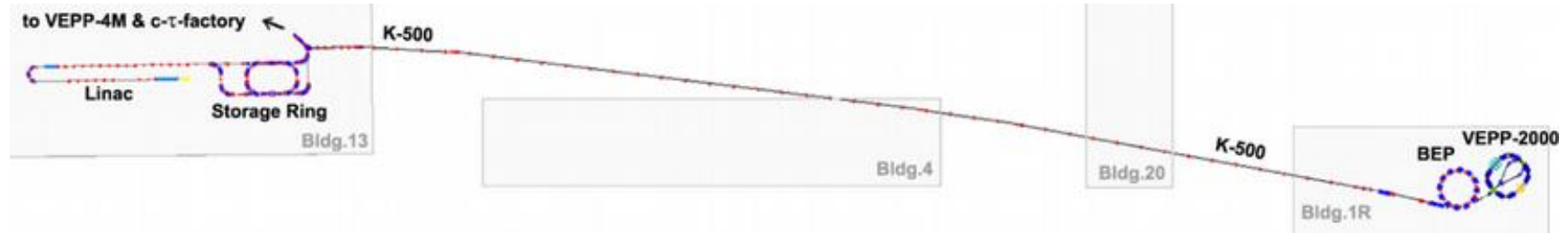


$$a_\mu^{had(LO)} = \left(\frac{\alpha m_\mu}{3\pi}\right)^2 \int_{4m_\pi^2}^{\infty} ds \frac{R(s)\hat{K}(s)}{s^2}$$

- ✓ Аномальный магнитный момент мюона измерен с точностью 1.9×10^{-7} .
 $a_\mu(\text{exp}) = 116\,592\,059(22) \times 10^{-11}$. Ожидается -1.4×10^{-7} .

ВЭПП-2000

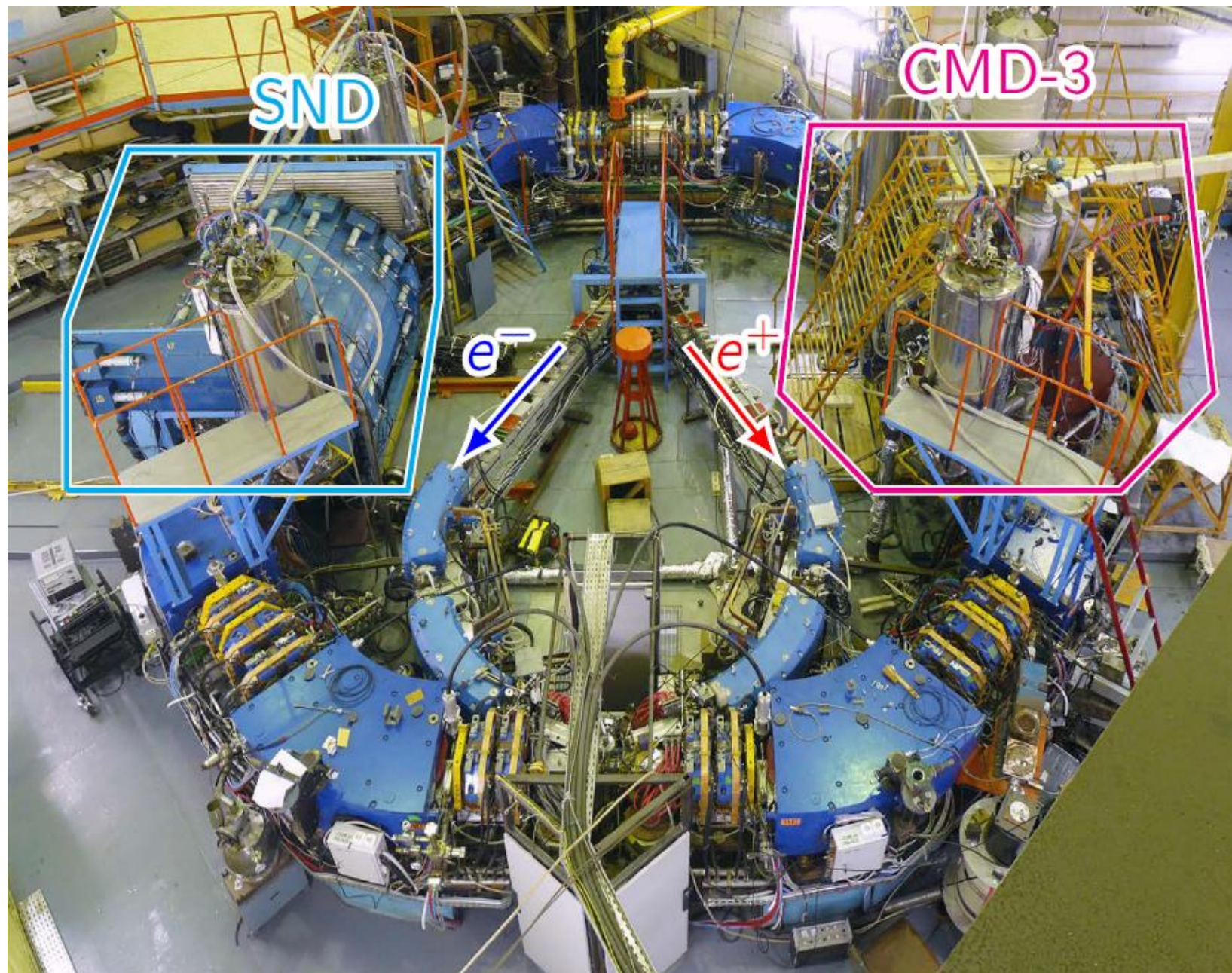
Design parameters @ 1 GeV	
Circumference	24.388 m
Beam energy	150 ÷ 1000 MeV
N of bunches	1×1
N of particles	1×10 ¹¹
Betatron tunes	4.14 / 2.14
Beta*	8.5 cm
BB parameter	0.1
Luminosity	1×10 ³² cm ⁻² s ⁻¹



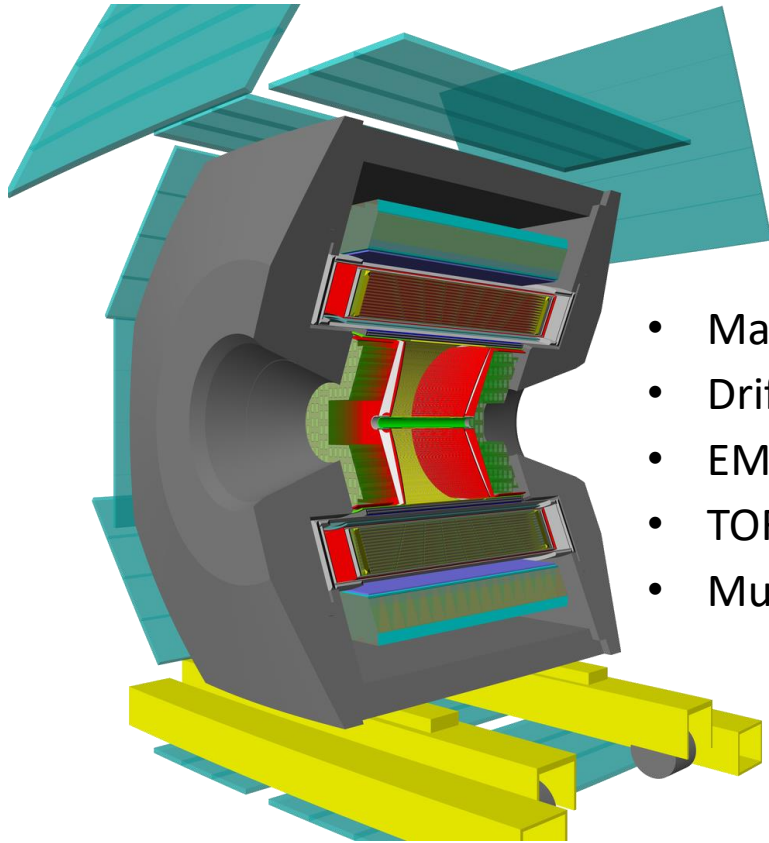
“Round beam” optics

Energy monitoring by Compton backscattering $\Delta E_b/E_b = 6 \times 10^{-5}$

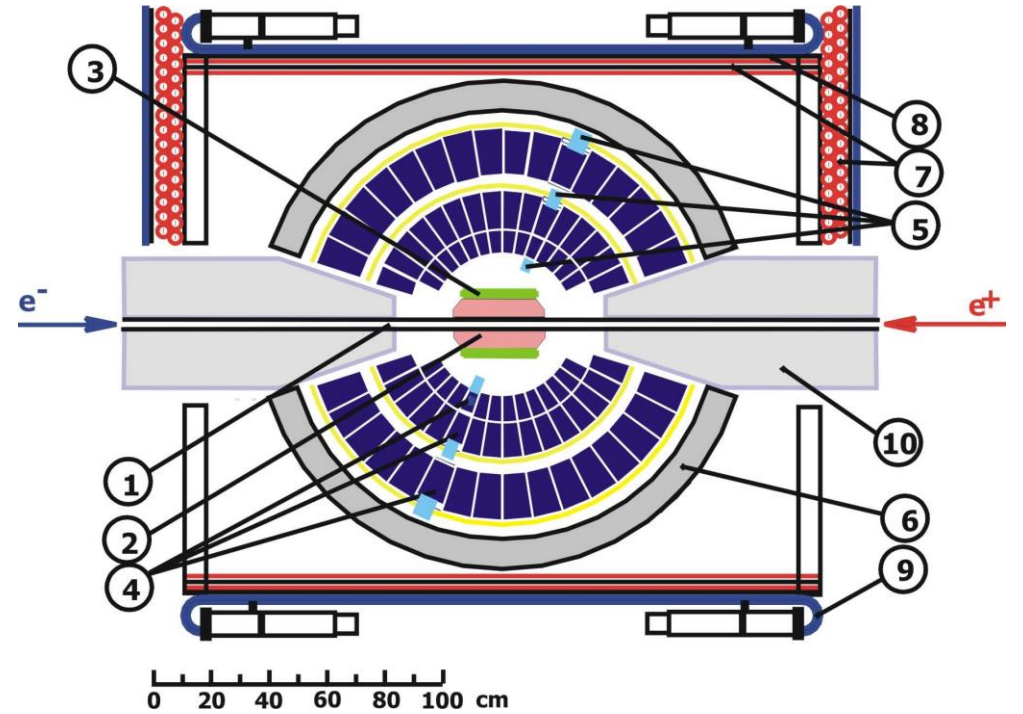
ВЭПП- 2000



Детекторы КМД-3 и СНД

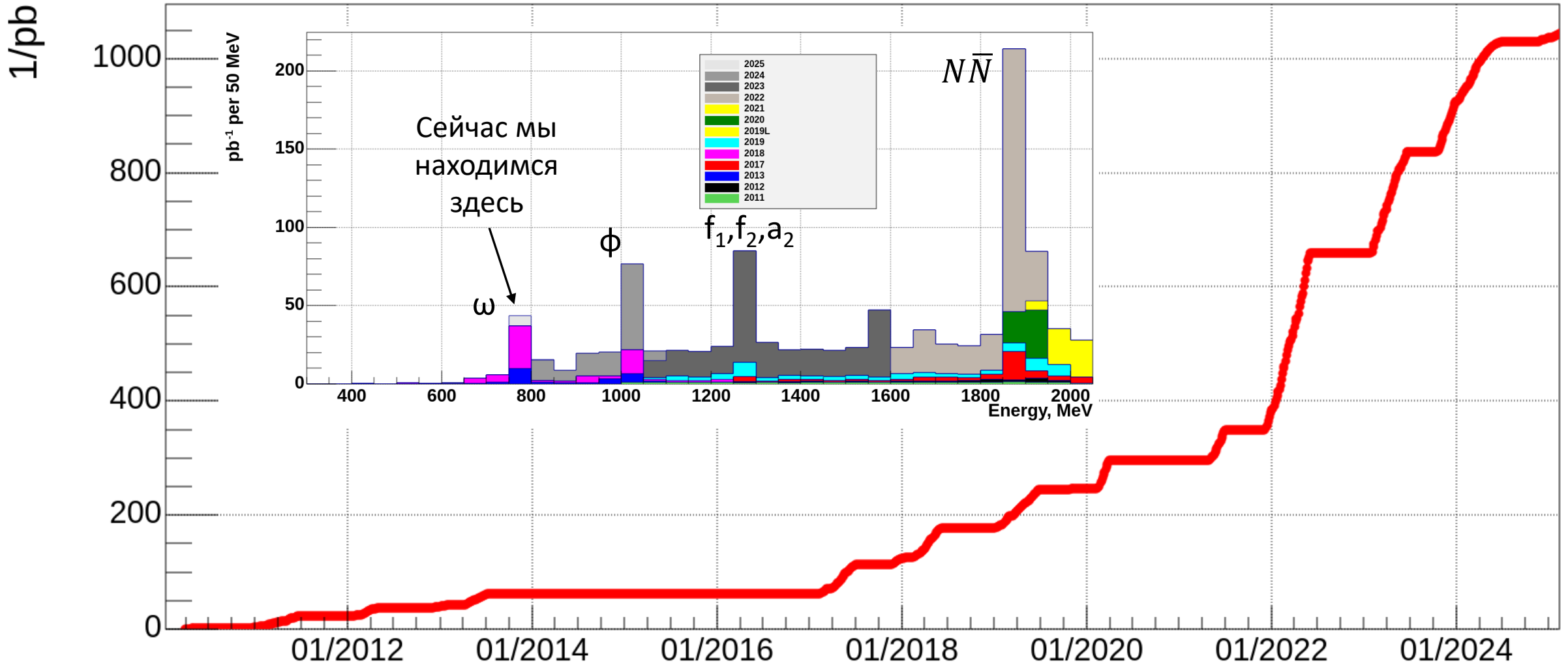


- Magnetic field 1.0-1.3 T
- Drift chamber
- EM calorimeter (LXE, CsI, BGO)
- TOF
- Muon counters



- 2 – tracking system
- 3 – aerogel Cherenkov counter
- 4 – NaI(Tl) crystals
- 7–9 – muon detector

Накопленная статистика/детектор



В течение 2026-2027 годов предполагается завершить набор данных

Секционные доклады с ВЭПП-2000

С.Середняков. Измерение электромагнитного времениподобного формфактора нейтрона на e^+e^- коллайдере ВЭПП-2000 с детектором СНД

Л.Кардапольцев. Изучение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$ в области энергии $\sqrt{s}=1.05-2.0$ ГэВ с детектором СНД

Д.Штоль. Измерение инклюзивного сечения электрон-позитронной аннигиляции в заряженные многочастичные адронные состояния в диапазоне энергий 1.8-2.0 ГэВ в системе центра масс детектором СНД на коллайдере ВЭПП-2000

И.Овтин. Статус модернизации счетчиков АШИФ для детектора СНД

С.Толмачев. Изучение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ с детектором КМД-3 на ВЭПП-2000

С.Грибанов. Изучение процесса $e^+e^- \rightarrow \eta\pi^+\pi^-$ с детектором КМД-3

Г.Федотович. Измерение сечения процесса $e^+e^- \rightarrow K_S K\pi$ с детектором КМД-3 на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-2000

В.Казанин. Поиск событий конверсионных распадов ω - и ρ -мезонов в ηe^+e^- на детекторе КМД-3

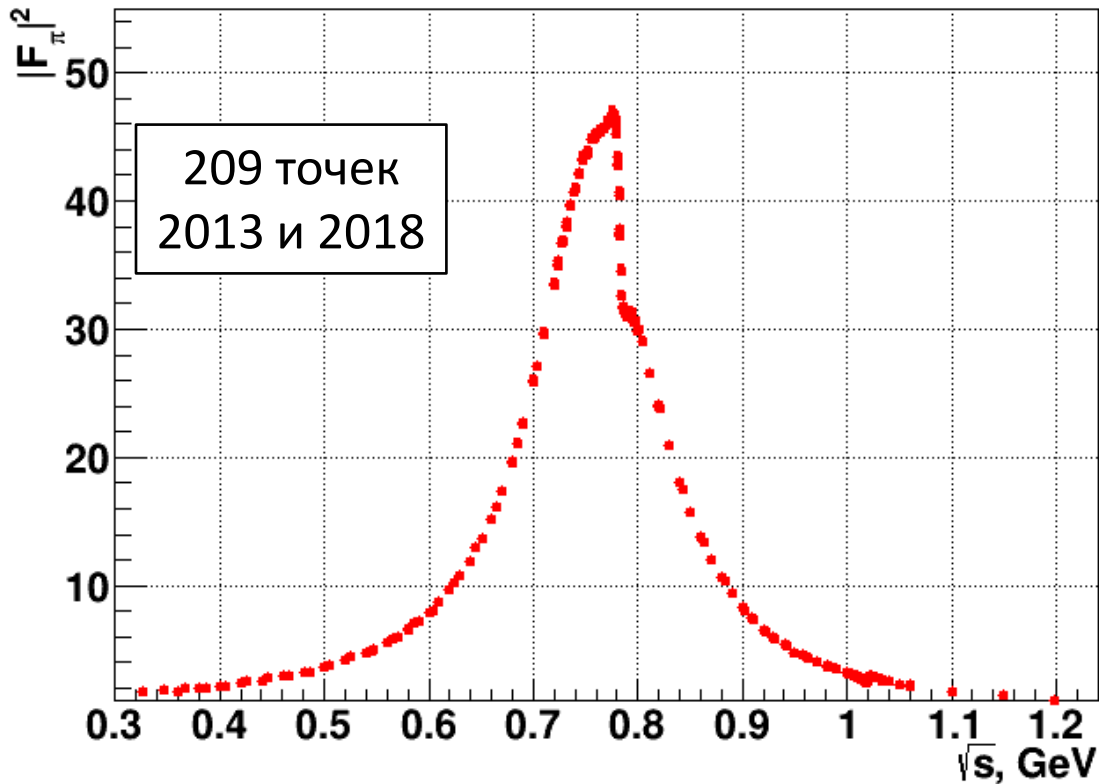
Т.Кузнецов. Реконструкция фотонов в комбинированном LXe/CsI калориметре детектора КМД-3

$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ на КМД-3

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

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

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



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

$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ на КМД-3

Систематические погрешности

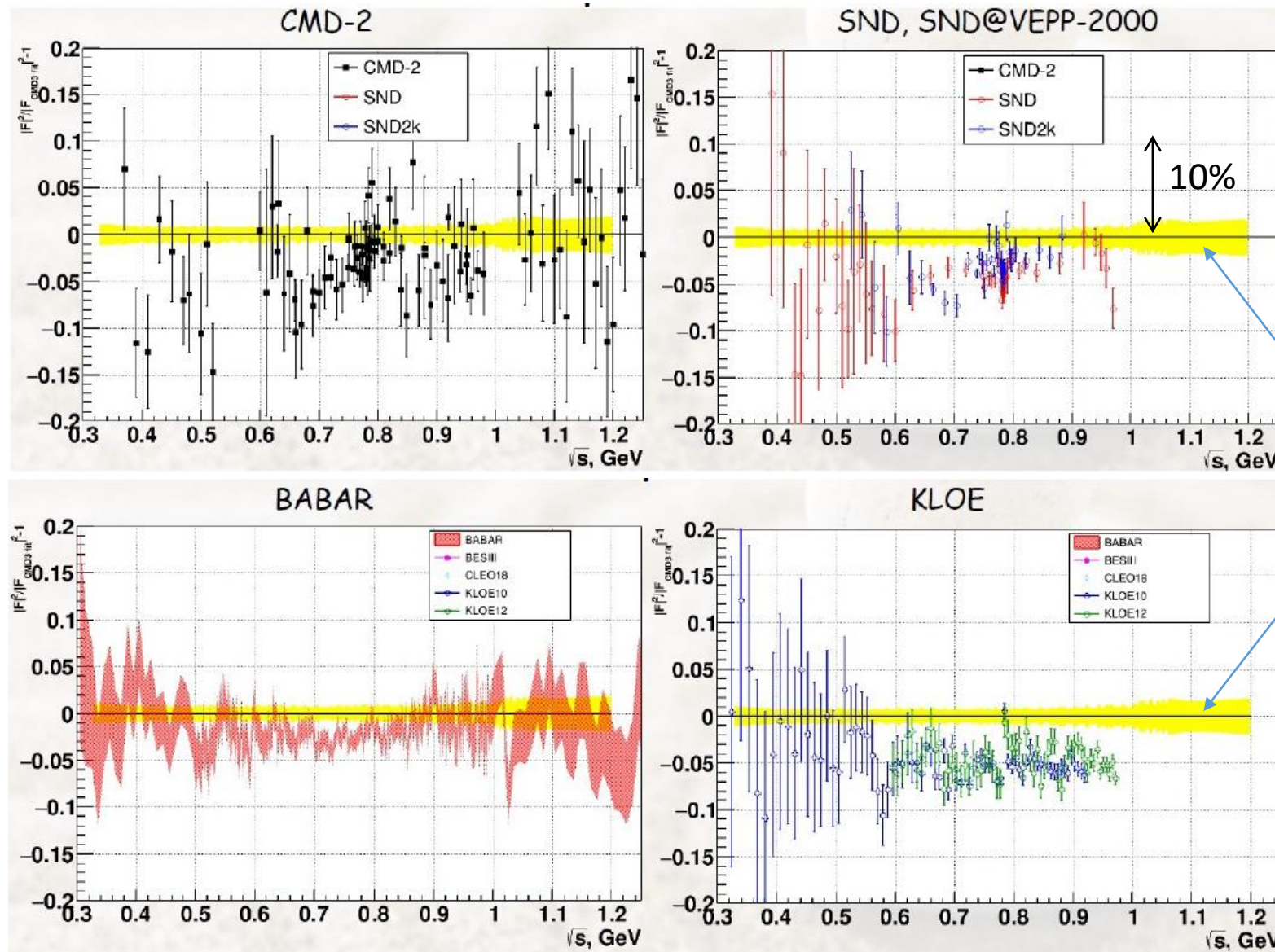
x Radiative corrections	0.2% (2π) \oplus 0.2% ($F\pi$) \oplus 0.1% (e^+e^-)
x $e/\mu/\pi$ separation	0.5 (low) - 0.2 (ρ) - 0.6 (φ) %
x Fiducial volume	0.5% / 0.8% (RHO2013)
x Correlated inefficiency	0.1 (ρ) - 0.15% (>1 ГэВ)
x Trigger	0.05 (ρ) - 0.3% (>1 ГэВ)
x Beam Energy (by Compton $\sigma_E < 50$ keV)	0.1% (out of resonances), 0.5% (at ω , φ -peaks)
x Bremsstrahlung loss	0.05 %
x Pion specific loss	0.2% nuclear interaction 0.2%(low) - 0.1% (ρ) pion decay

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

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

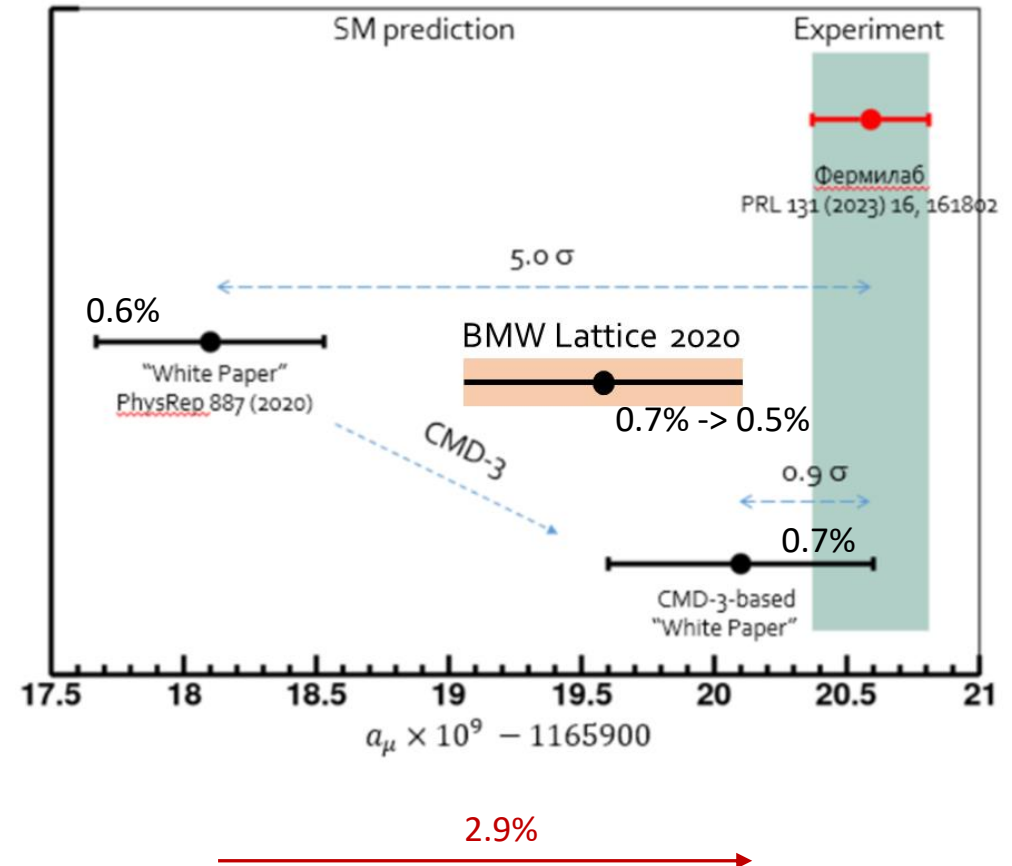
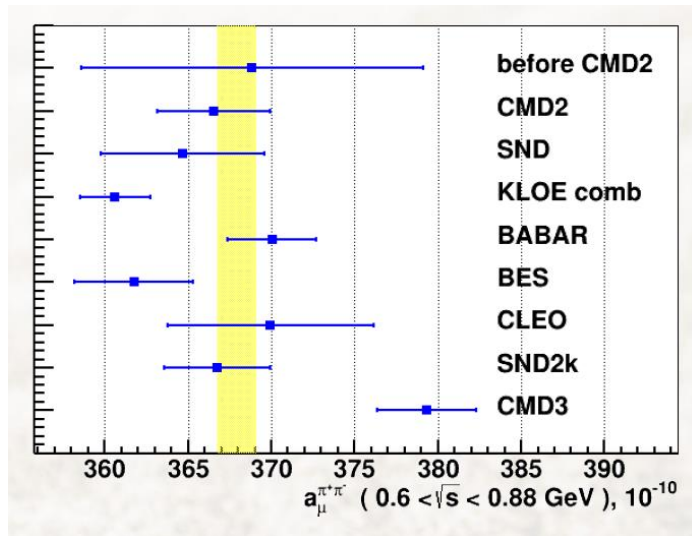
CMD-3 is systematically above previous measurements by ~2-5%

Сравнение
КМД-3 с
предыдущими
измерениями

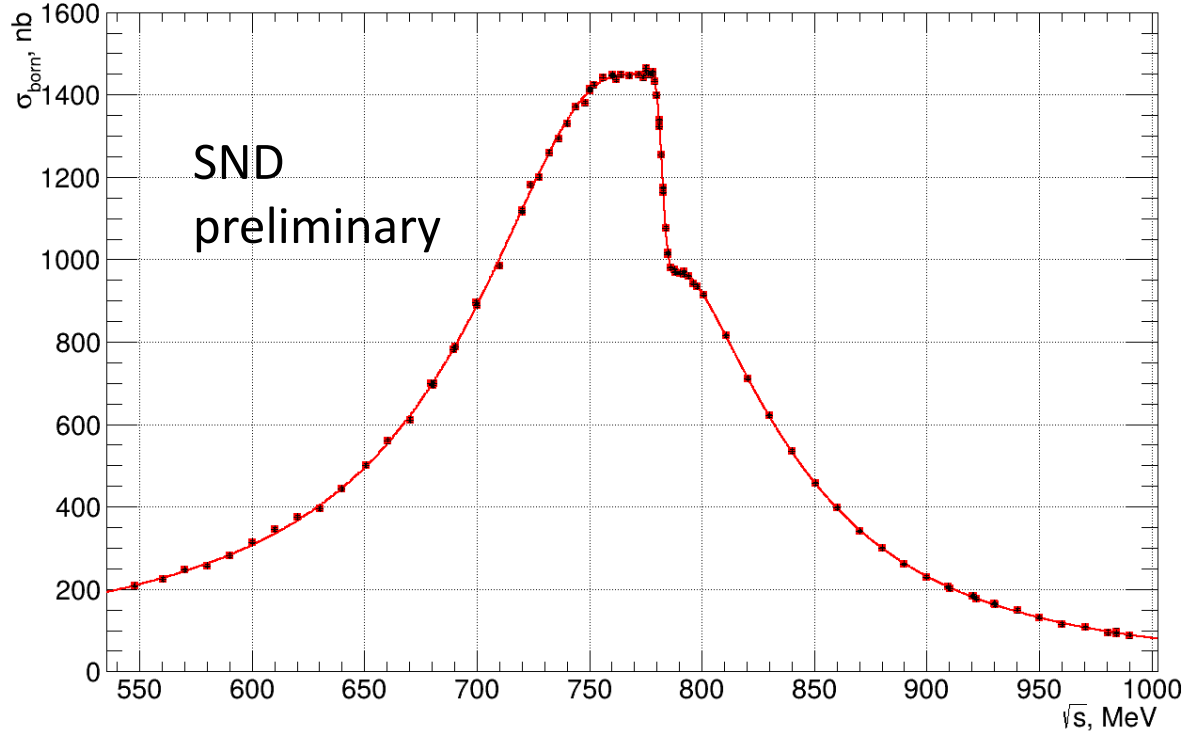


Вклад в расчет аномального момента мюона

Сравнение результатов разных экспериментов

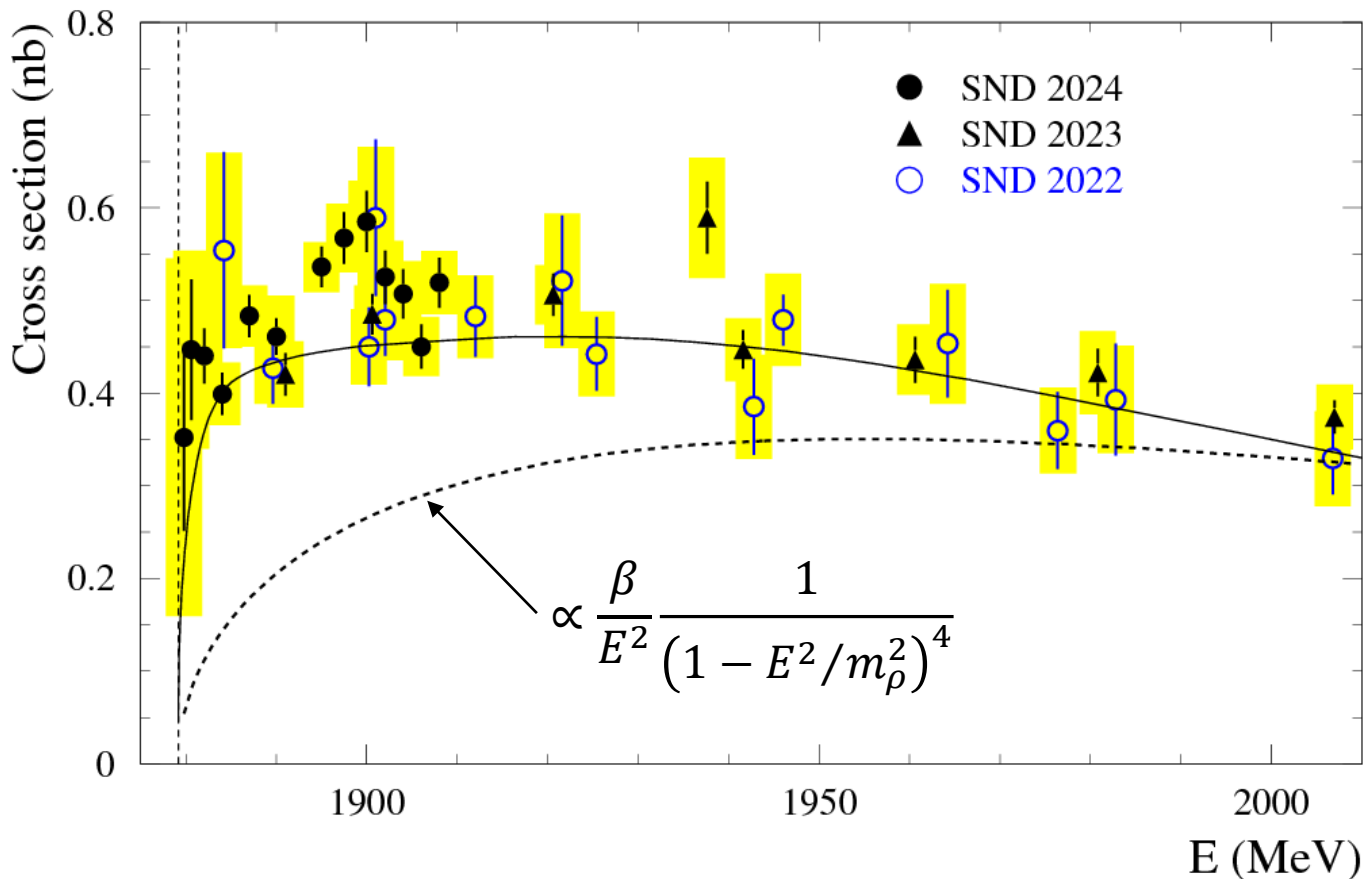


$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ на СНД



- Результат по данным 2013 года (4.6 пб^{-1}) опубликован.
- Новый анализ основан на данных 2018 года с в ~ 10 раз большей статистикой.
- Существенно улучшен алгоритм реконструкции треков.
- Проведена тонкая настройка моделирования дрейфовой камеры.
- Слепой анализ.
- Ожидаемая систематика 0.7%.

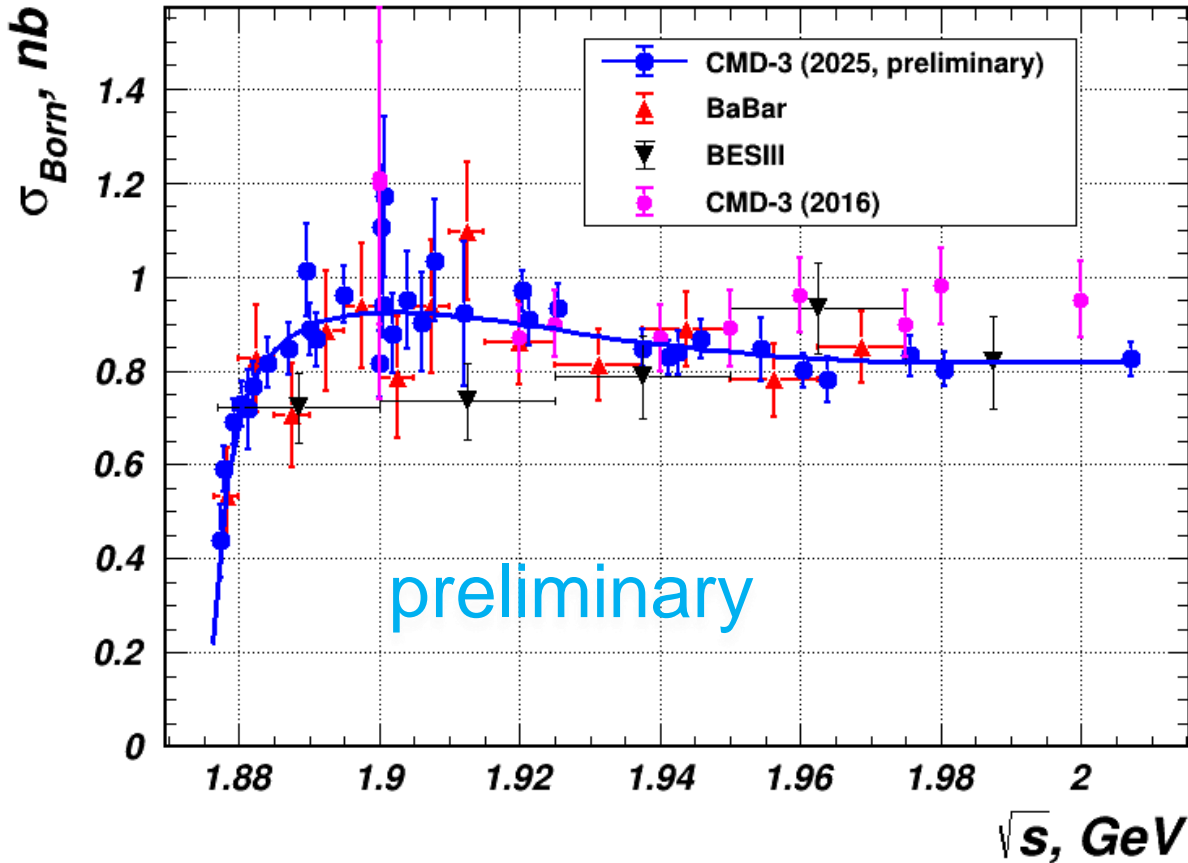
$e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$ на СВД



M.N. Achasov *et al*, Eur. Phys. J. C **22**, 761 (2022) (2017 and 2019 datasets)
 Phys. Atom. Nucl. **86**, 1165 (2023) (2020 and 2021 datasets)
 Phys. Atom. Nucl. **87**, 604 (2024) (2022 dataset)

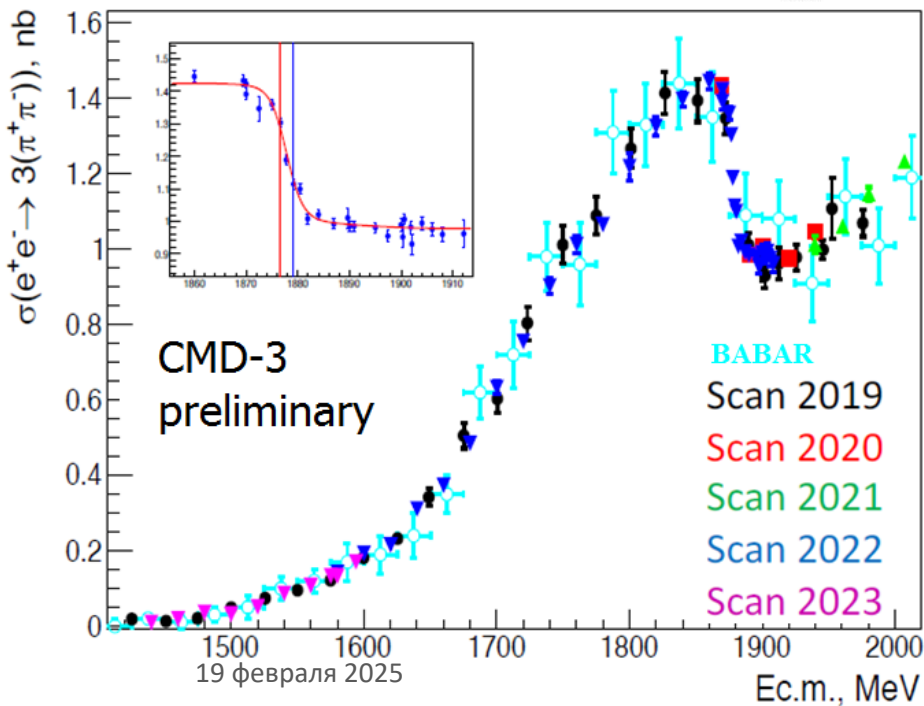
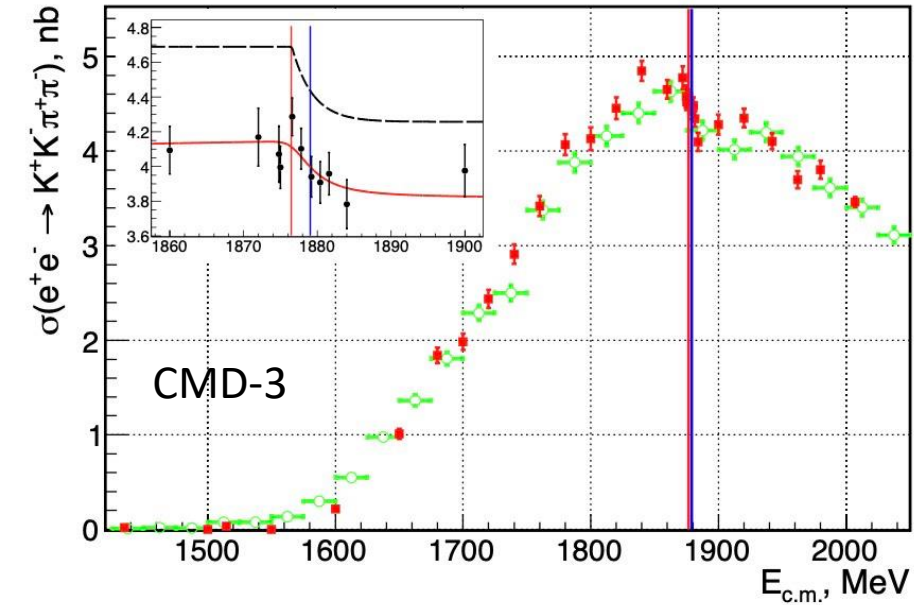
- ✓ The $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$ cross section in the below 2 GeV has been measured with about 5% statistical and 10-15% systematic uncertainty.
- ✓ The cross section is flat and very different from the energy dependence of the S-wave phase space ($\propto \beta$).
- ✓ The difference is explained by the $n\bar{n}$ final state interaction (A.I.Milstein and S.G.Salnikov, Phys. Rev. D **106**, 074012 (2022)), which leads to a large effect.

$e^+e^- \rightarrow p\bar{p}$ на КМД-3



- ✓ 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)).

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

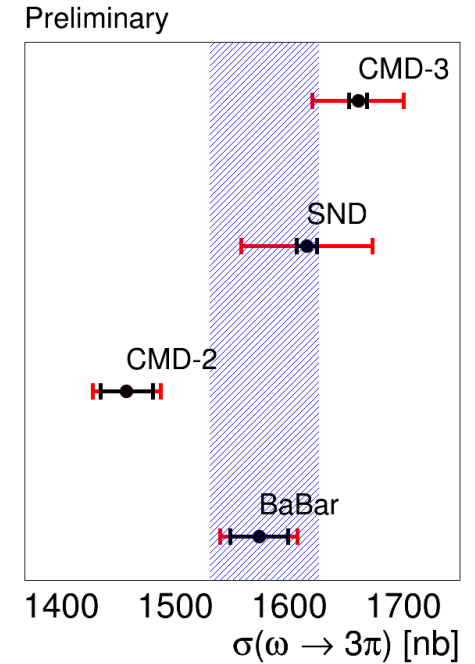
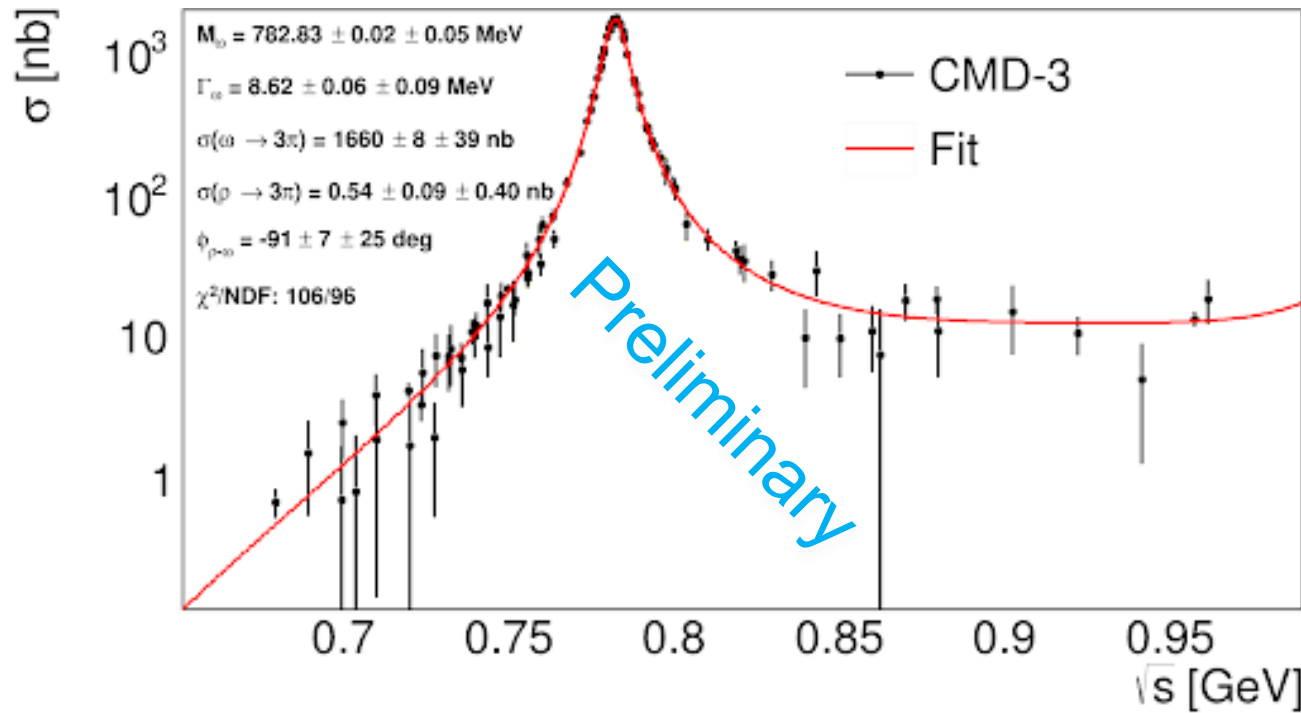


- Открытие реакций $e^+e^- \rightarrow N\bar{N}$ проявляется как ступенька в сечениях реакций $e^+e^- \rightarrow 6\pi$ и $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^+\pi^-$.
- Ширина ступеньки ~ 2 МэВ
- В сечениях $e^+e^- \rightarrow 3\pi, 4\pi$ и др. такого поведения не видно.
- Модель с взаимодействием в конечном 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 $e^+e^- \rightarrow 3(\pi^+\pi^-)$

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

Вклад в $a_\mu^{\text{had,LO-VP}} \times 10^{-10}$

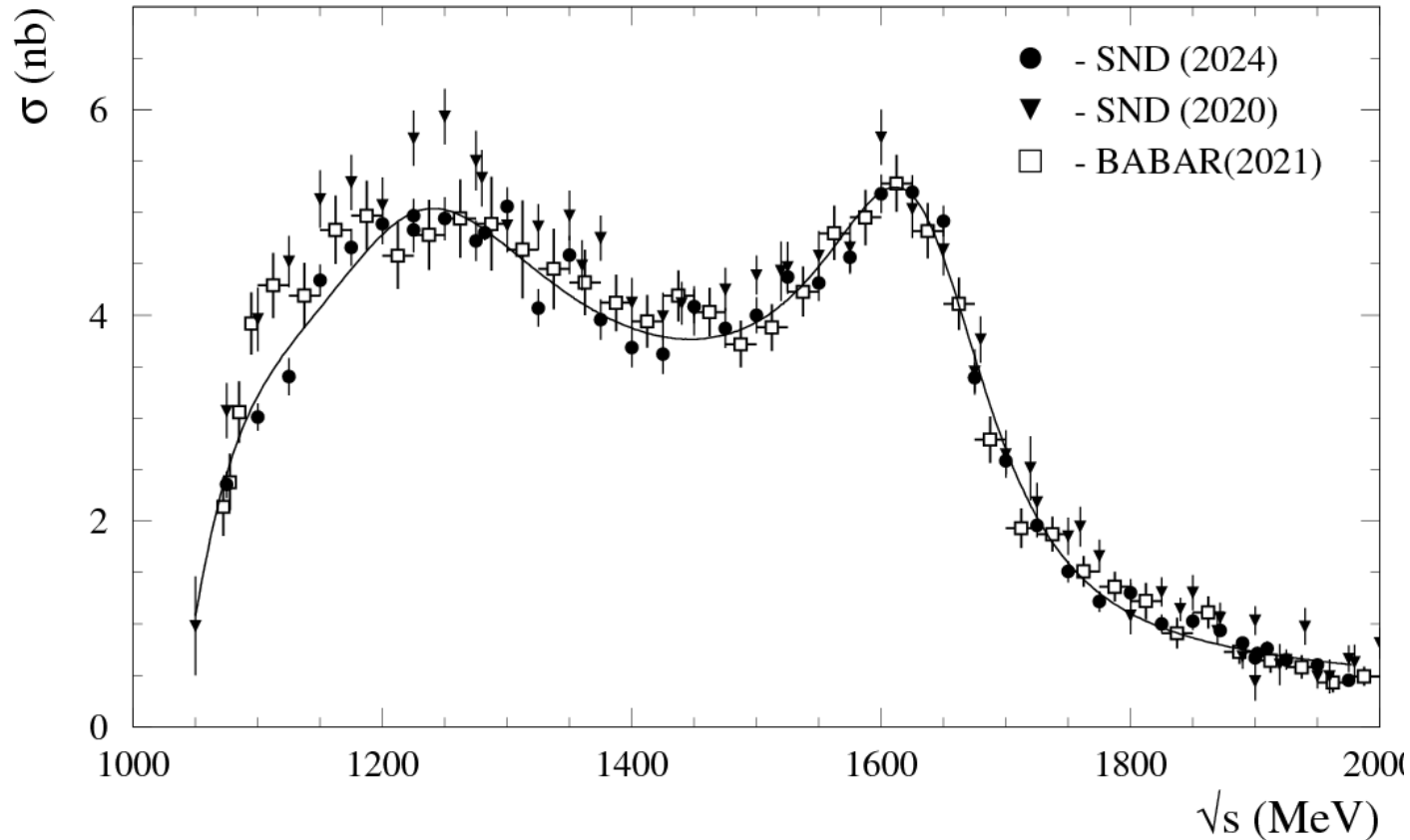
DHMZ 19	46.2 ± 1.5
BABAR 21	45.9 ± 0.6
Belle II 24	48.9 ± 1.1



- В процессе $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ в 2024 появилась интрига: **разница между измерениями Belle и BABAR составила $(6.5 \pm 2.7)\%$**
- Предварительный результат КМД-3 по сечению вблизи ω имеет систематическую неопределенность 2.3%.
- **Разница в сечениях в пике ω между КМД-3 и BABAR составила $(5.5 \pm 3.3)\%$**

$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ above 1.05 GeV

Eur. Phys. J. C 80, 993 (2020)
Phys.Atom.Nucl. 87, 747 (2024)

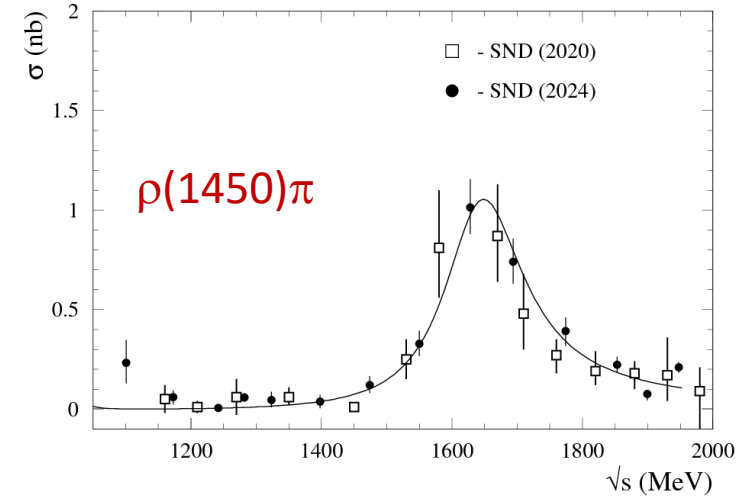
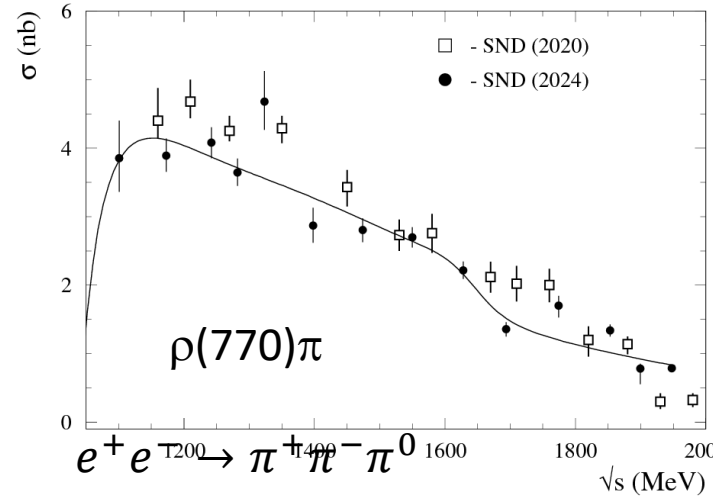


- ☐ Выше 1.05 ГэВ в сечении $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ наблюдаются два пика, которые связаны с возбужденными состояниями $\omega(1420)$ и $\omega(1650)$.
- ☐ Параметры этих резонансов обычно получали из подгонки энергетической зависимости сечения в предположении промежуточный механизм $\rho(770)\pi$.
- Был проведен анализ распределения Далица и выделены промежуточные состояния $\rho(770)\pi$, $\rho(1450)\pi$, and $\omega\pi^0$

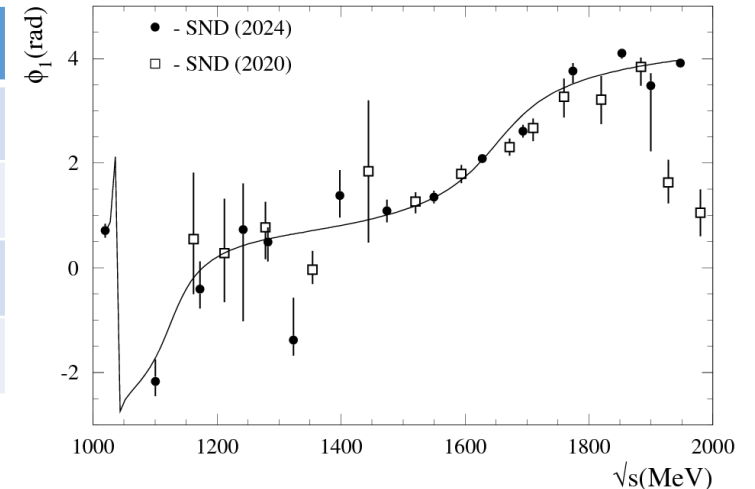
Сделано новое измерение сечения $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ выше 1.05 ГэВ по данным 2019 года. Тщательный анализ источников фона привел к уменьшению сечения по сравнению с предыдущим измерением SND(2020).

$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ above 1.05 GeV

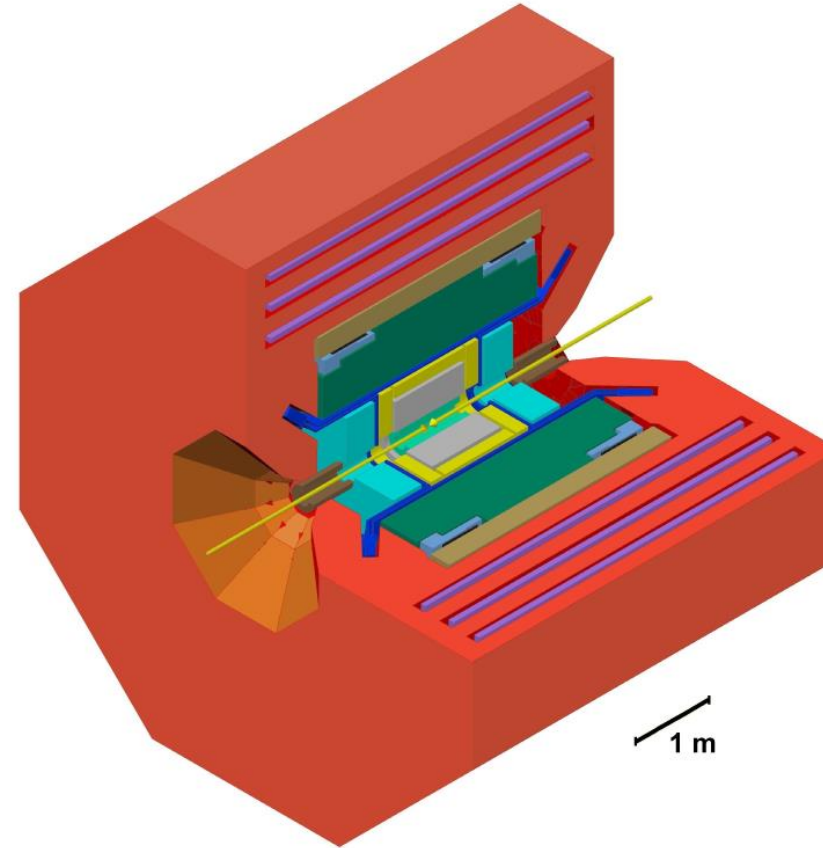
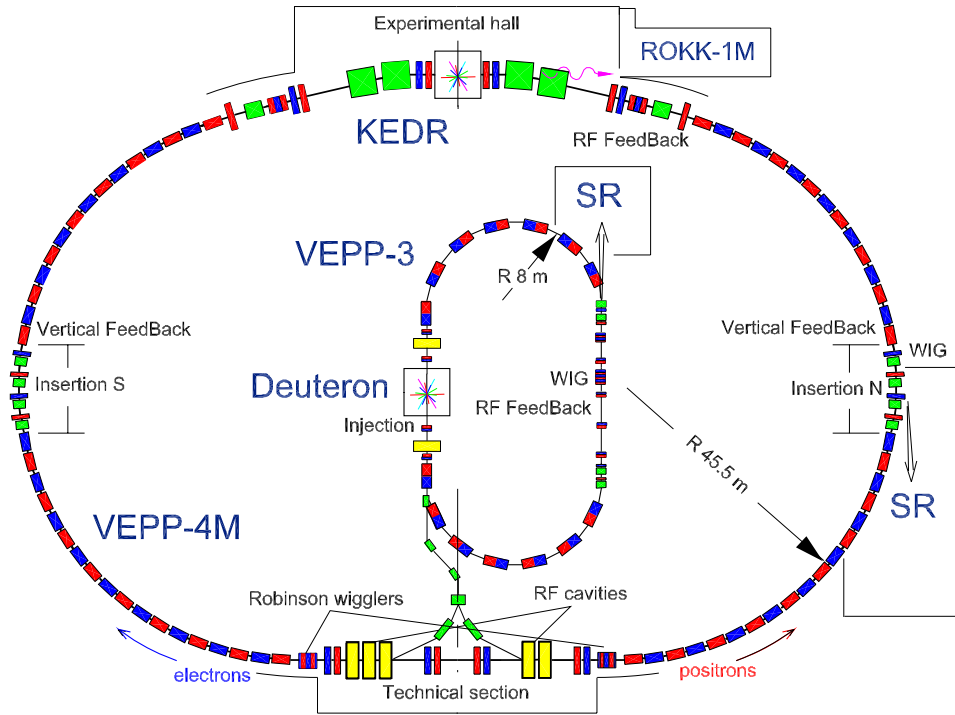
- Параметры резонансов $\omega(1420)$ и $\omega(1650)$ получены из одновременной подгонки данных по сечениям $e^+e^- \rightarrow \rho(770)\pi$ и $\rho(1450)\pi$ и относительной фазе между амплитудами этих промежуточных состояний.
- Резонанс $\omega(1650)$ рождается в основном через механизм $\rho(1450)\pi$, а $\omega(1420)$ – через $\rho(770)\pi$.
- Ширина $\omega(1650)$ в канале $\pi^+\pi^-\pi^0$ стала 150 МэВ и теперь согласуется с другими каналами его распада: $\omega\eta$ и $\omega\pi\pi$.



Parameter	This work	PDG
$m_{\omega(1420)}$, MeV	1350 ± 43	1410 ± 60
$\Gamma_{\omega(1420)}$, MeV	590 ± 90	290 ± 190
$m_{\omega(1650)}$, MeV	1643 ± 6	1670 ± 30
$\Gamma_{\omega(1650)}$, MeV	148 ± 13	315 ± 35



ВЭПП-4М и детектор КЕДР



- Vertex detector
- Drift chamber
- Aerogel threshold counters
- ToF counters
- Lkr calorimeter
- Superconducting coil
- Yoke
- Muon chambers
- CsI calorimeter
- Compensating solenoid

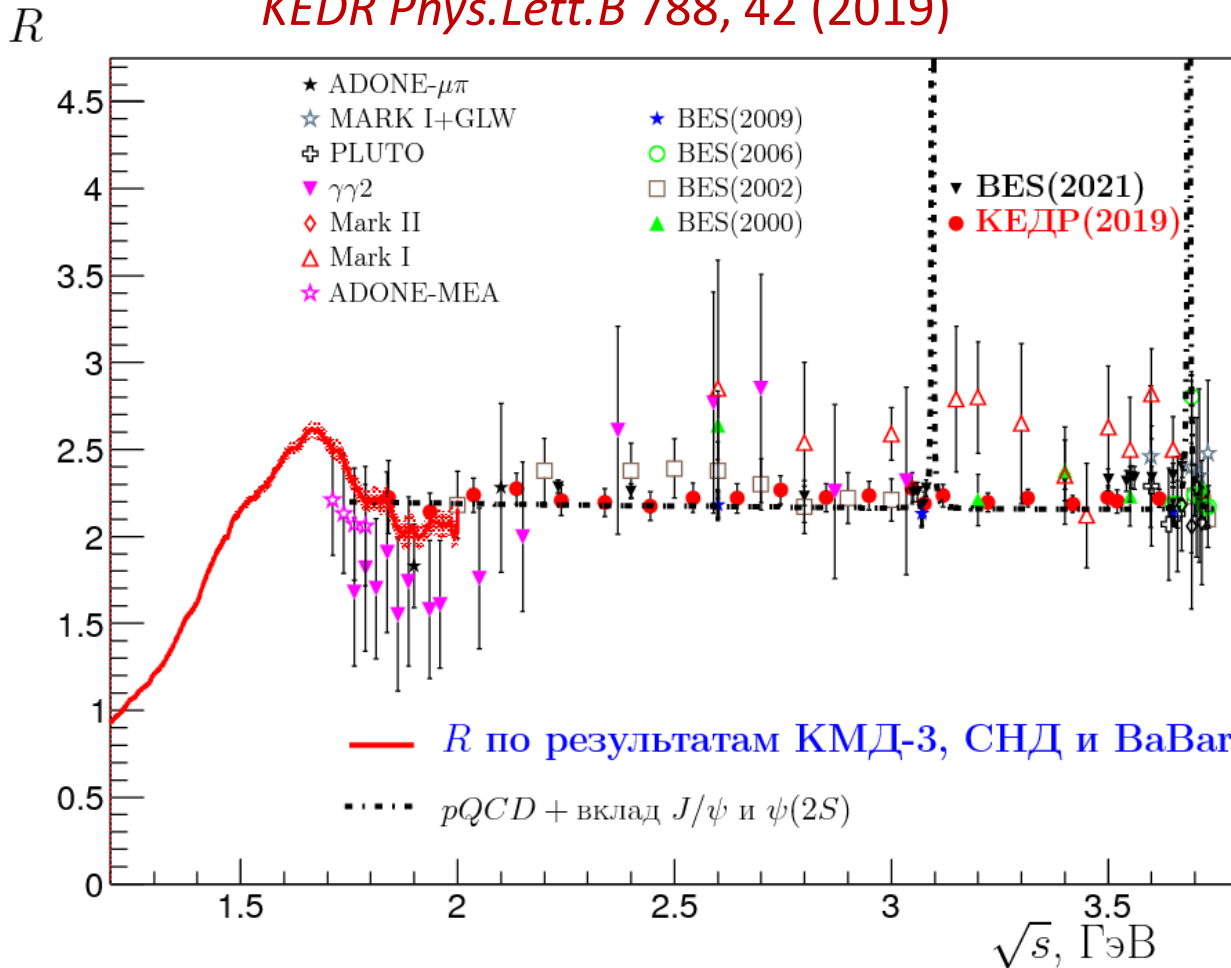
Beam energy range 0.925-5.3 GeV

Luminosity $\sim 4 \cdot 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

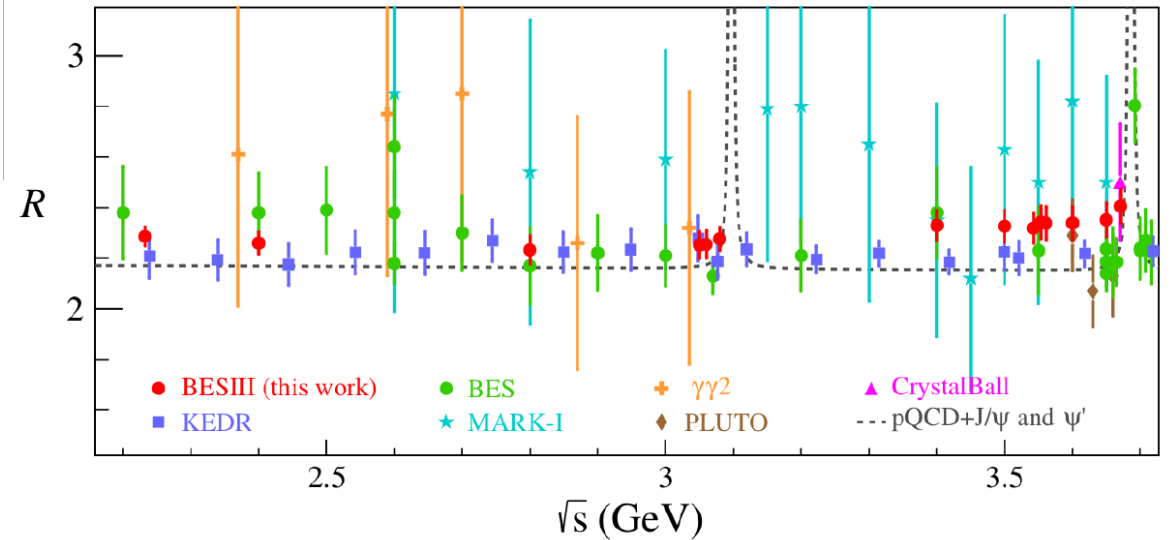
Beam energy is determined to 20-30 keV
(using resonance depolarization)

Инклюзивное измерение полного адронного сечения

KEDR Phys.Lett.B 788, 42 (2019)

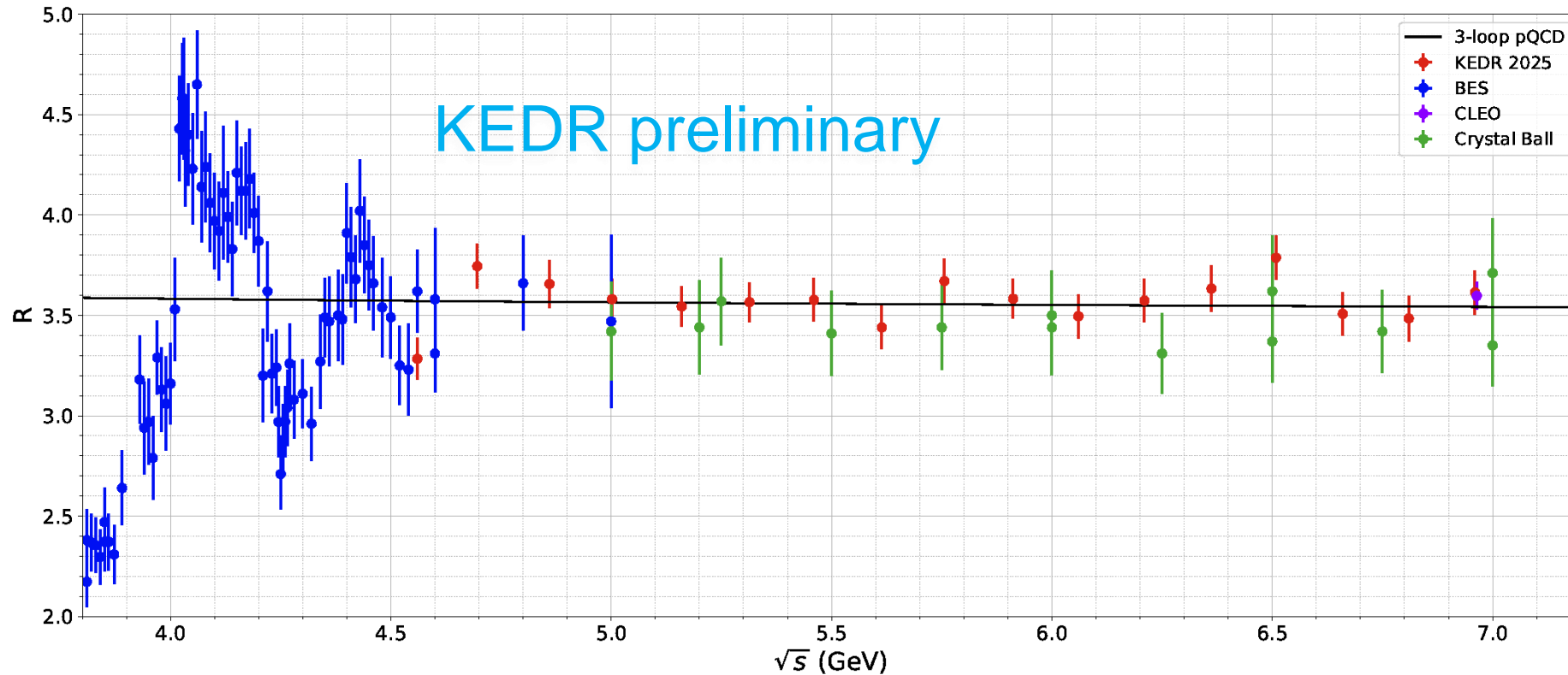


BESIII. Phys. Rev. Lett. 128, 062004 (2022)



- Сканирование нерезонансных ниже порога рождения D-мезонов областей (1.84 - 3.72) ГэВ
- 22 точки. Статистическая ошибка – 2-3%. Систематическая ошибка – 2-3%
- Внутри ошибок согласуется с расчетом КХД
- Систематическое расхождение с измерением BESIII

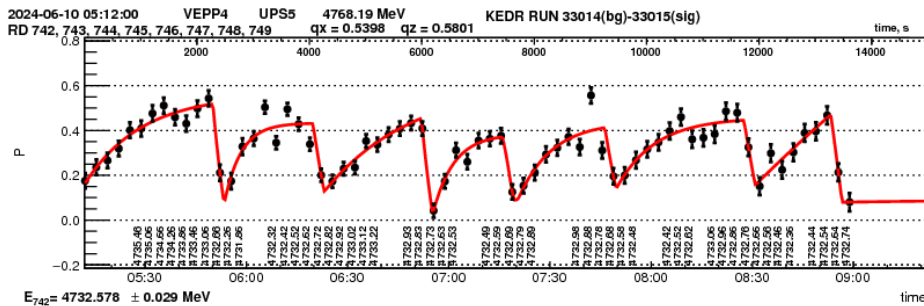
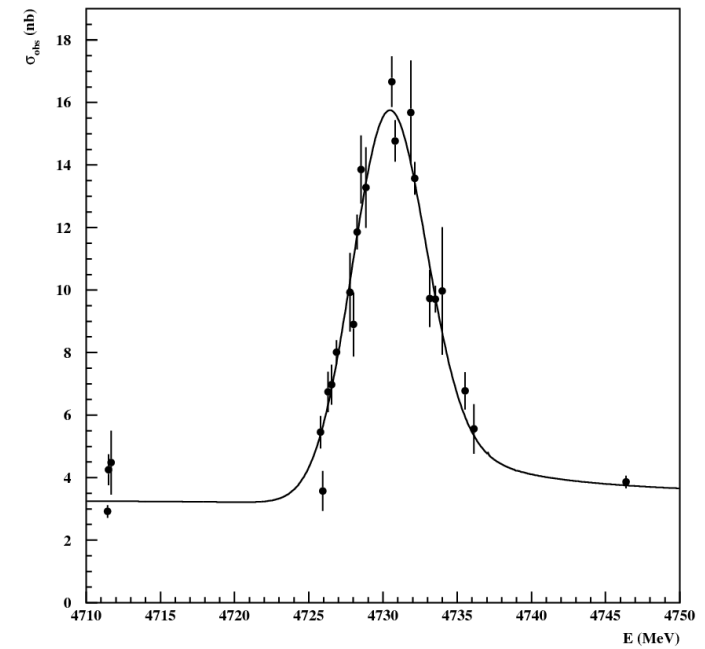
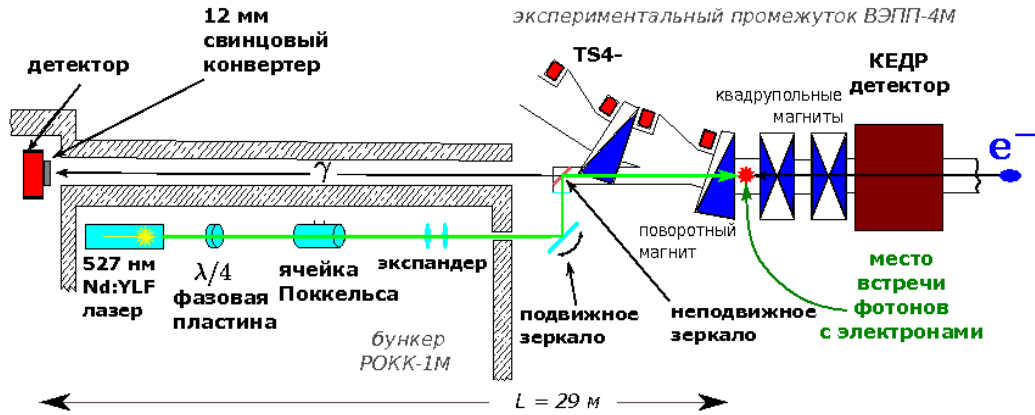
Инклюзивное измерение полного адронного сечения



2 сканирования, 17 точек по энергии, $\int L dt = 13.7 \text{ пб}^{-1}$.

Стат. ошибка $\sim 2\%$, систематическая неопределённость $\sim 2.4\%$.

Сканирование $\Upsilon(1S)$



- На КЕДР сделаны самые точные измерения масс J/ψ и $\psi(2S)$
- Текущая точность измерения массы $\Upsilon(1S)$ – 100 КэВ
- Точность измерения энергии составляет 30 кэВ
- В 2024 г. было проведено первое сканирование энергетической области вблизи $\Upsilon(1S)$ с $\int L dt \sim 1.1 \text{ пб}^{-1}$
- Предварительный результат: $\delta M = -30 \pm 150 \pm 50 \text{ кэВ}$
- Для достижение стат. точности 50 кэВ требуется 9-10 пб⁻¹
- Набор данных начнется 2025 г

Секционные доклады КЕДР

- ✓ Дмитрий Кыштымков. Исследование процессов $J/\psi \rightarrow \rho\eta$ и $J/\psi \rightarrow \varphi\eta$ в эксперименте с детектором КЕДР.
Feb 19, 2025, 1:30 PM
- ✓ Татьяна Харламова. Измерение R в эксперименте КЕДР.
Feb 19, 2025, 2:00 PM
- ✓ Виктор Жилич. Калориметр высокого разрешения на основе большого кристалла BGO для калибровки системы мечения на детекторе КЕДР. Feb 18, 2025

ВЭПП-2000 планы

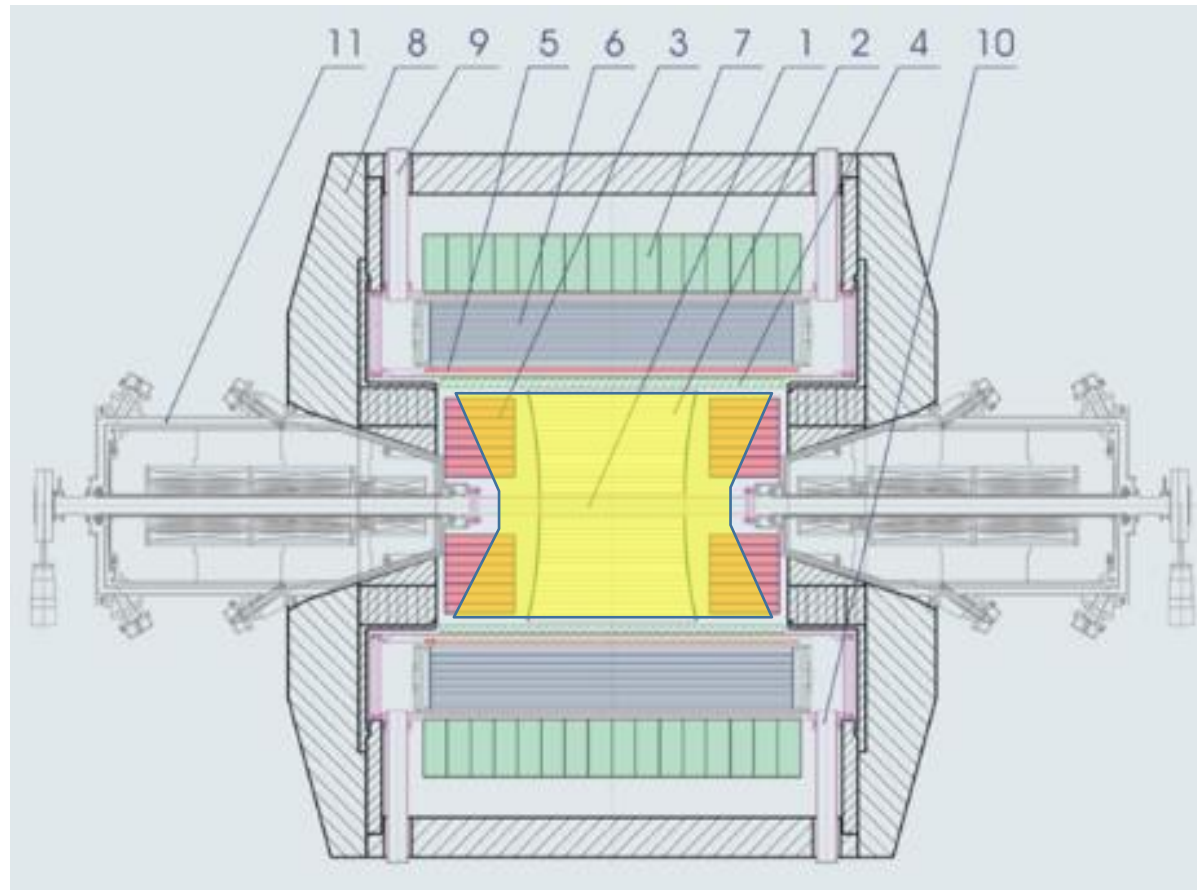
- Для достижения точности расчета a_μ сравнимой с измерением FNAL нужно знать адронное сечение с точностью 0.2%
- Измерение $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ с такой точностью можно сделать только на ВЭПП-2000
- В существующем измерении КМД-3 для нормировки используется процесс $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$, имеющий очень резкую зависимость от полярного угла. Это накладывает высокие требования на точность его измерения.
- Эти требования существенно ослабляются если нормироваться на процесс $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$.
- Модернизация КМД-3: улучшение импульсного разрешения в 2 раза
- СНД: модернизация трековой системы, системы сбора данных, специальная конфигурация детектора для измерения $|G_E/G_M|$ нейтрона
- Начало набора данных в 2030 г

Вариант модернизации (КМД-3М)

Новый магнит:
магнитное поле
1.3 Тл -> 2.5 Тл

ZK на внешнем
радиусе ДК

Новая длинная ДК
(стерео?) с Z
полосками на
внутренней
обечайке



ВЭПП-6 (ИЯФ СО РАН) – принципы проектирования

- 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

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

$\approx 20 \cdot \text{BEPСII}$

Физические задачи ВЭПП-6

Прецизионное исследование свойств легких адронов

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

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

Физические задачи ВЭПП-6

- ✓ Измерение полного сечения рождения адронов с $\sim 1\%$ систематической погрешностью. «Тонкая» структура сечения.
- ✓ Изучение динамики рождения мезонов и барионов, определение роли различных механизмов.
- ✓ Спектроскопия легких кваркониев.
- ✓ изучение припороговых резонансов и других явлений вблизи порогов рождения пар $B\bar{B}$.
- ✓ Двухфотонные процессы и измерение переходных формфакторов.
- ✓ Измерение сечений методом радиационного возврата.

Заключение

- ✓ Коллайдеры ИЯФ ВЭПП-2000 и ВЭПП-4М успешно работают. Идет набор данных с детекторами СНД, КМД-3 и КЕДР.
- ✓ В этих экспериментах получено много новых интересных физических результатов. Анализ данных продолжается.
- ✓ Ведется подготовка прецизионных экспериментов на ВЭПП-2000 после 2029 г. ($e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ с точностью 0.2%).
- ✓ Разрабатывается проект e^+e^- коллайдера ВЭПП-6, который позволит провести детальное исследование свойств легких адронов.