



# Детектор СНД: набор данных, обработка, перспективы

(лаб. 3-1, 3-2, 3-12)

М.Н. Ачасов

НАУЧНАЯ СЕССИЯ ИЯФ  
26 февраля 2026 г.



# Введение.

2026 гг. набор данных в области энергии пучка  $E_0 < 365$  МэВ.

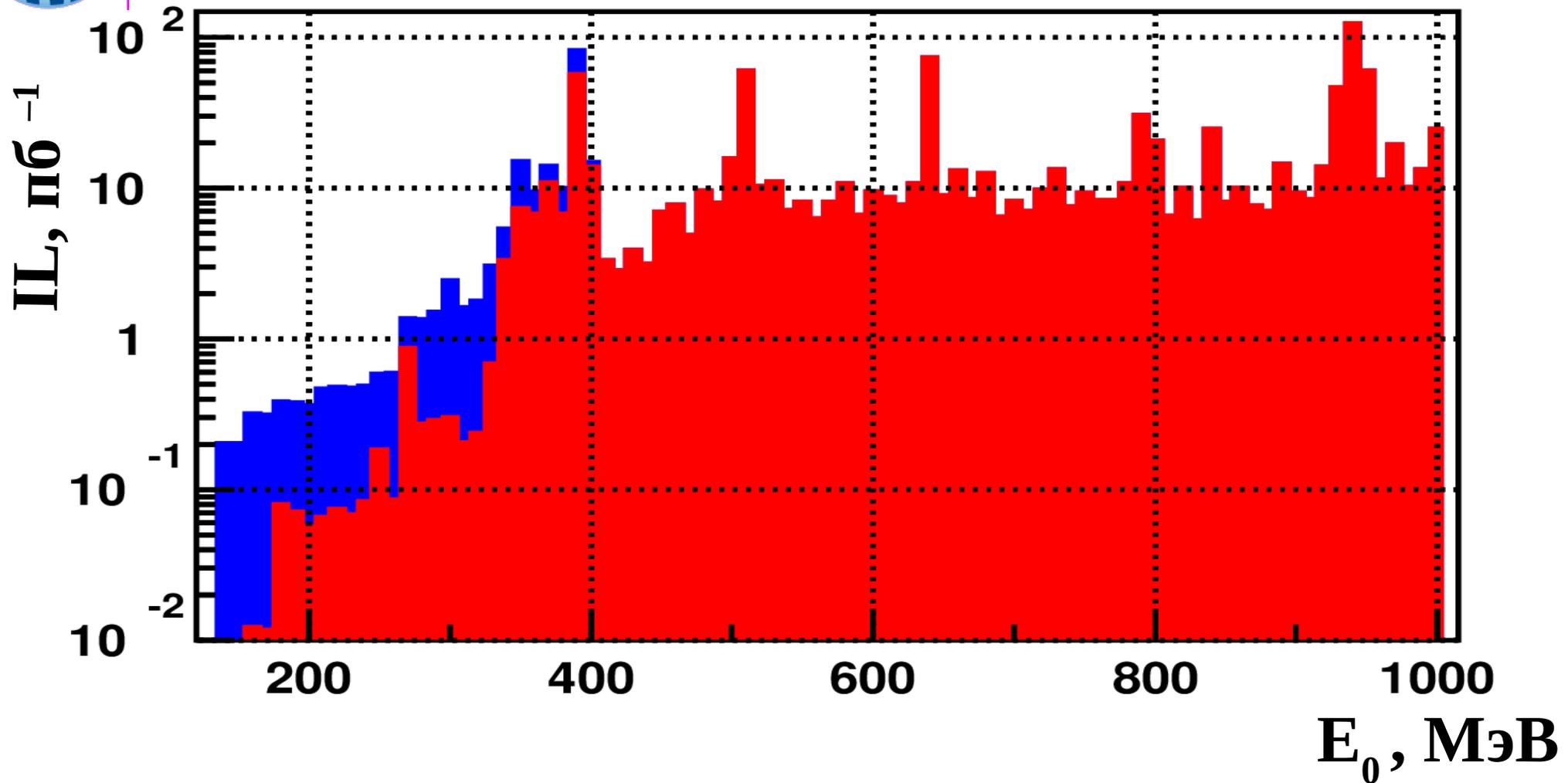
2027 – 2028 гг. завершение набора данных перед остановкой ВЭПП-2000.

2028 – 2030 гг. перерыв в работе ВЭПП-2000.

2030 г. возобновление экспериментов на ВЭПП-2000 на срок не менее 5 лет.



# СНД на ВЭПП-2000.



Распределение интегральной светимости по энергии пучка.

$\Sigma IL = 1000 \text{ pb}^{-1}$  (набрано 2010 – 2025 гг.),

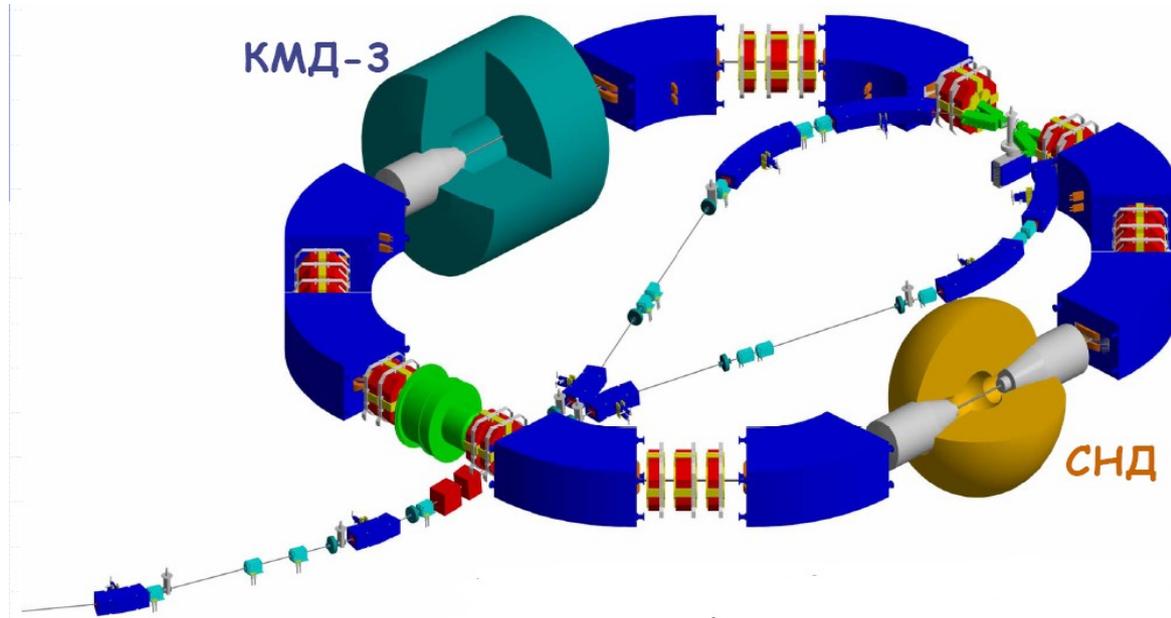
$\Sigma IL = 20 \text{ pb}^{-1}$   $E_0 < 355$  МэВ 2026 – 2027 гг.,

$\Sigma IL = 60 \text{ pb}^{-1}$   $E_0 = 955 – 960$  МэВ 2027 – 2028 гг.



# СНД в 2024 г.

2025 г: набор данных в области энергии ниже 400 МэВ (с.ц.м.)



Скорость набора данных в 2021 г:	95 пб <sup>-1</sup> /год.
Скорость набора данных в 2022 – 2023 гг:	265 пб <sup>-1</sup> /год.
Скорость набора данных в 2024 г:	100 пб <sup>-1</sup> /год.
Скорость набора данных в 2025 г:	40 пб <sup>-1</sup> /год.

**Предельная ожидаемая, возможная скорость: 1000 пб<sup>-1</sup>/год.**

Развитие электроники и системы сбора данных СНД.

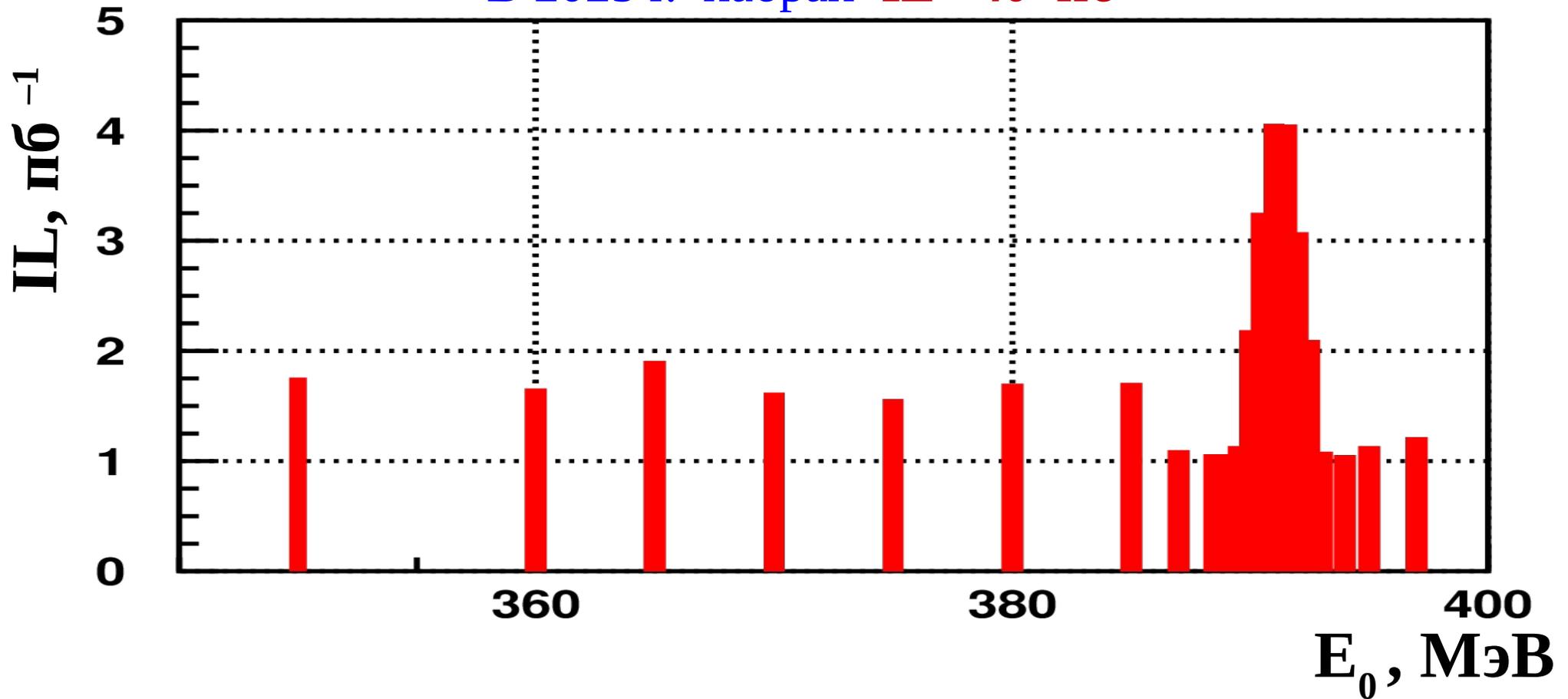
Подготовка к экспериментам 2030 – ... гг.

Анализ данных 2010 – 2025 гг: 1 фб<sup>-1</sup>.



# Эксперимент СНД в 2025 году.

В 2025 г. набран  $IL = 40 \text{ пб}^{-1}$



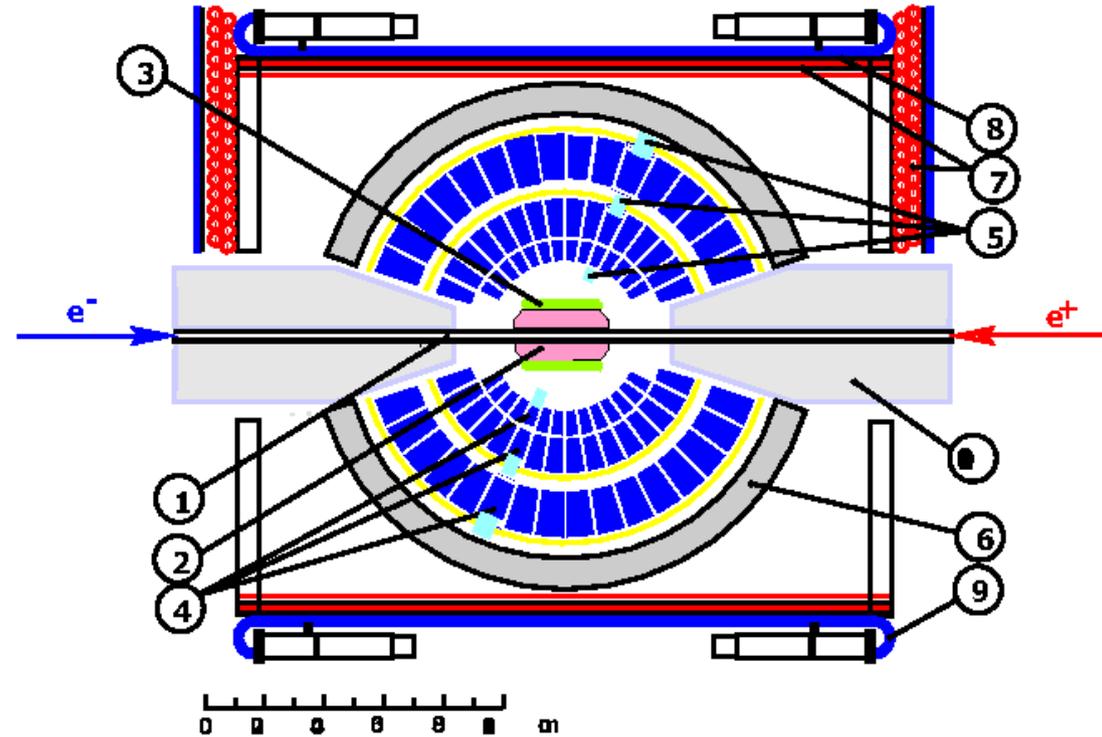
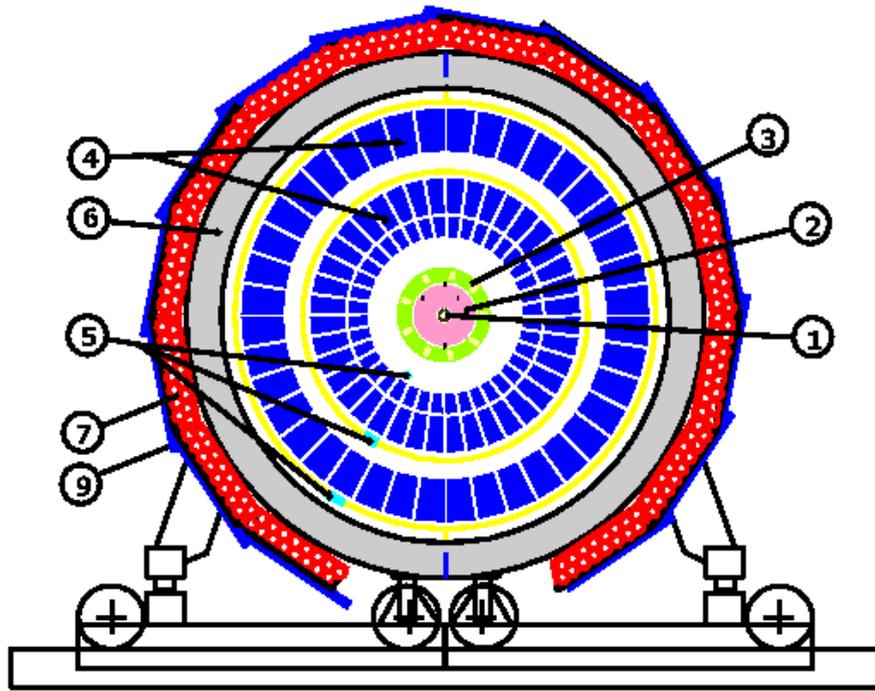
Распределение интегральной светимости по энергии в системе центра масс.

Физические задачи эксперимента 2025 г. :

- Измерение сечений  $e^+e^- \rightarrow \text{адроны}$ .
- Исследование  $\omega(782)$  и  $\rho(770)$  резонансов.



# Сферический нейтральный детектор (СНД).



1-вакуумная камера, 2-трековая система, 3-черенковские счётчики, 4-кристаллы NaI(Tl), 5-вакуумные фототриоды, 6-железный поглотитель, 7-пропорциональные трубки, 9-сцинтилляционные счётчики, 10-соленоиды ВЭПП-2000.



# Электроника СНД.

**Постепенная замена КАМАК на ЕвроМеханика.**

**В 2025** половина блоков ПТ заменена новыми.

**2026** г. – разработка и ввод в работу **новых** блоков ПТ и генераторной калибровки систем СНД.

**2027** г. – завершение перехода на ЕвроМеханика.



# Развитие ССД СНД.

ССД СНД полностью оснащена платами с передачей данных по сети. Это открыло возможность разработки **непрерывного, потокового (бестриггерного)** чтения данных (**ПЧД**).

Запуск передачи данных будет производиться по сигналу **«фаза»** ВЭПП-2000.

Оценка общего потока данных (с подавлением нулей) составляет **15 – 20 Гбит/сек.**



# Развитие ССД СНД. Переход к ПЧД.

**2024 г.** ССД осуществляет параллельное чтение данных:  
**12 потоков на 3х ЭВМ.** Всего в ССД задействовано **10 ЭВМ.**

**2025 г.** осуществлена запись предельного потока данных с частотой запусков  $\nu \approx 7$  кГц при просчётах (мёртвое время)  $T_m=5\%$ : запуск ПТ от срабатывания башни калориметра в области углов  $36^\circ < \theta < 144^\circ$  с порогом на энерговыделение  $E \approx 20$  МэВ.

**2026 г.** план перехода на ПЧД и начало работ.

**2027 г.** завершение работ.



# Развитие ССД СНД.

## Потоковое чтение данных.

- **Электроника.** Все данные с плат стробируются сигналом «фаза». Метку времени в событии (номер «фазы») вырабатывает каждая плата.

Подавление объёма данных в платах:

подавление пустых пакетов, сжатие, пороги, средства подавления сигналов не соответствующих по длительности, форме, ...

Постоянная проверка возможной потери данных.

- **Сбор данных.** Разравнивание и распараллеливание потока данных.
- **L3.** Сборка событий, реконструкция, программный отбор.



## Развитие ССД и обработки данных СНД.

В экспериментах **2030 – ... г.г.** переход к **ПЧТ** позволит исключить погрешности связанные с отбором **ПТ**, улучшить качество данных и эксперимента.

В экспериментах **2030 – ... г.г.** необходима новая система обработки данных, основанная на применении «нового средства производства» – **машинном обучении**:

- реконструкция событий,
- чистка событий от фоновых сигналов,
- отбор физических событий.

Обработка должна сократить время между набором и готовности данных к анализу до нескольких дней.



# Измерение энергии ВЭПП-2000.

Система измерения энергии пучка **ВЭПП-2000** методом обратного комптоновского рассеяния лазерного излучения применяется в экспериментах с **2012 г.**

В **2025 г.** создана и применена в опытах с поляризацией система измерения энергии **ВЭПП-2000** методом **Резонансной деполяризации** на основе **Тушековских счётчиков** и **цифрового двухканального анализатора.**

По итогам опытов до **1 мая 2026 г.** будут изготовлены устройства для перемещения счётчиков с помощью шаговых двигателей.

**Май 2026 г.** повторение опытов с поляризацией.



# Черенковский счётчик (АЧС) СЖД.



Пороговый черенковский счётчик

**АШИФ: аэрогель — шифтер — фэу.**

Фотоприёмник **ФЭУ-МКП.**

Два счётчика с показателями преломления аэрогеля:

- **$n=1,13$**  ( $\pi/K$  разделение  $\sqrt{s} > 1$  ГэВ)
- **$n=1,05$**  ( $e/\pi$  разделение  $\sqrt{s} < 1$  ГэВ).

На замену **АЧС** с **ФЭУ-МКП** совместно с лаб.3-2 разрабатывается **АЧС АШИФ** с кремниевым фотоприёмником **КФЭУ**.



# Черенковский счётчик СНД.

Для получения нового качества разделения необходимо работать при наименьшей возможной температуре (Температура корпуса АЧС в СНД около 32 °C.)

**2025/26 г:** подготовлен и проведён опыт с макетом АЧС–КФЭУ.

Макет включал КФЭУ, электронику и элемент Пельтье для охлаждения КФЭУ, возможность засветки КФЭУ от светодиода.

Макет был временно установлен в СНД.

Оценки качества разделения АЧС–КФЭУ и АЧС–ФЭУМКП на основе экспериментальных данных:

Итоги и выводы.

- работа КФЭУ в АЧС при  $T=15^{\circ}\text{C}$  в условиях эксперимента будет обеспечена,
- В 2026 г. изготовить АЧС–КФЭУ с  $n=1,05$ .

	АЧС–КФЭУ	АЧС–ФЭУМКП
Т, °C	15°	
n	1,05	
Nфэ	9,6	3,5
Разделение, $\sigma$	5	3,3
n	1,13	
Nфэ	15,3	6,1
Разделение, $\sigma$	6	4,1



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

Дифференциальное сечение:  $\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{\alpha^2 \beta C}{4s} \left[ |G_M(s)|^2 (1 + \cos^2 \theta) + \frac{1}{\tau} |G_E(s)|^2 \sin^2 \theta \right]$ ,  $\beta = \sqrt{1 - 4m_N^2/s}$ ,  $\tau = \frac{s}{4} m_N^2$ .

$G_E$  и  $G_M$  – электрический и магнитный формфакторы,  $|G_E| = |G_M|$  на пороге реакции,  $C$  – кулоновский формфактор.

Полное сечение:  $\sigma_0(s) = \frac{4\pi \alpha^2 \beta C}{3s} \left[ |G_M(s)|^2 + \frac{1}{\tau} |G_E(s)|^2 \right]$ .

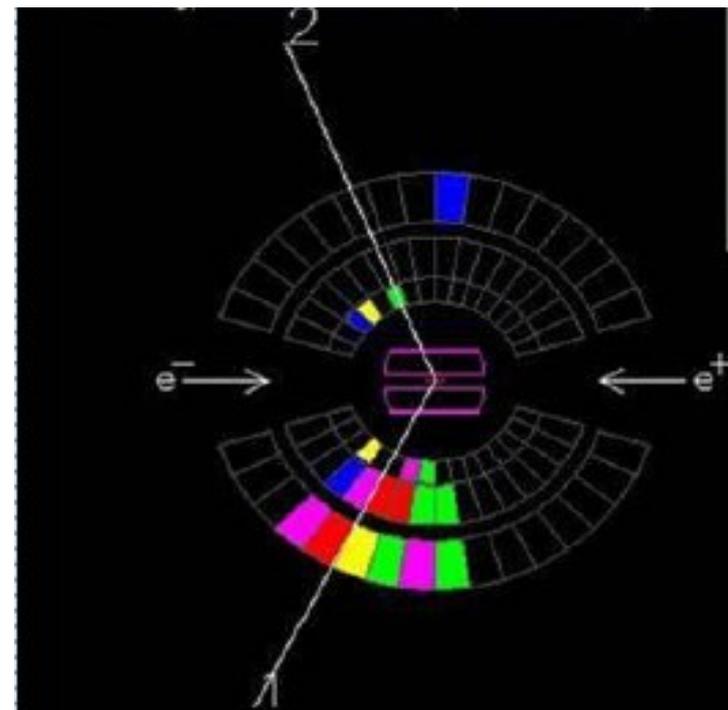
Эффективный формфактор можно определить по сечению  $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$ .

$$F(s)^2 = \frac{2\tau |G_M(s)|^2 + |G_E(s)|^2}{2\tau + 1}$$

Отношение  $|G_E / G_M|$  можно определить по распределению  $\cos\theta$ .

## События $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$ в СНД.

- $\bar{n}$  аннигилирует в калориметре с большим энерговыделением.
- Энерговыделение  $n$  мало, нейтрон практически не реконструируется.
- $n$  медленный, что приводит к большому времени пролёта в детекторе.





# Эксперимент $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$ .

Цель эксперимента: измерение отношения  $|G_E / G_M|$  с точностью **10%**.

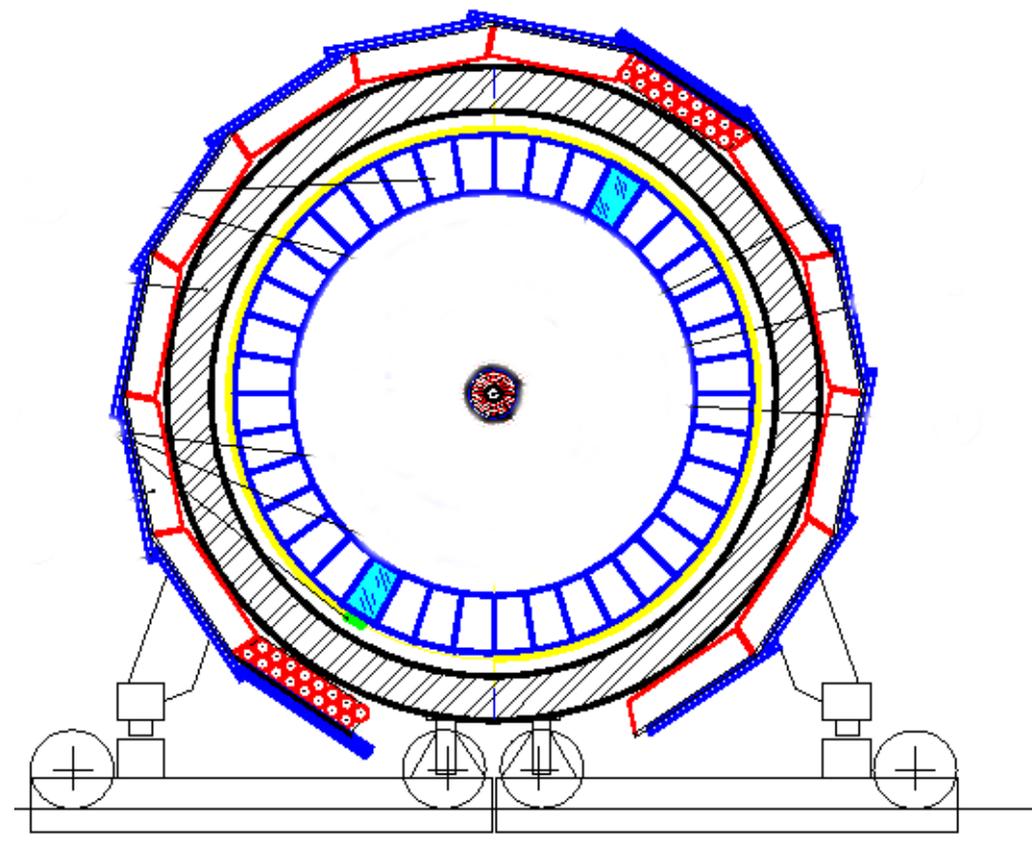
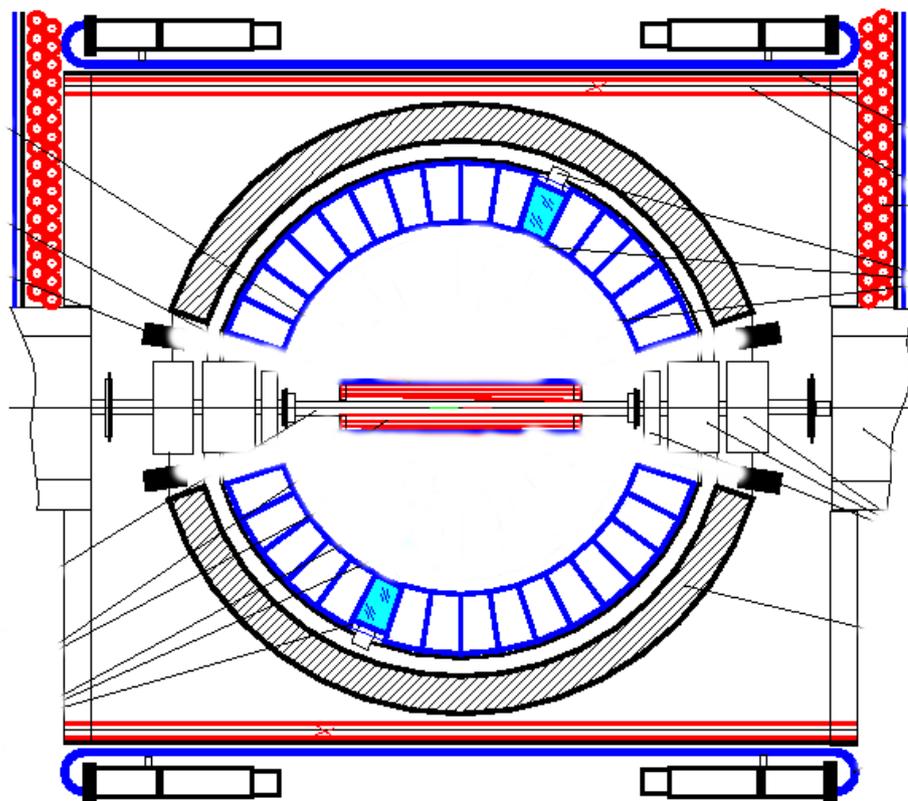
Для этого необходимо улучшить подавление фона.

В частности фона от пучка (пучковый фон и фон от физических процессов).

Для этого предлагается увеличить время пролёта  $\bar{n}$ .



# Детектор СНД для эксперимента $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$ .



0 20 40 60 80 100 cm

Неопределённость в эффективности регистрации.

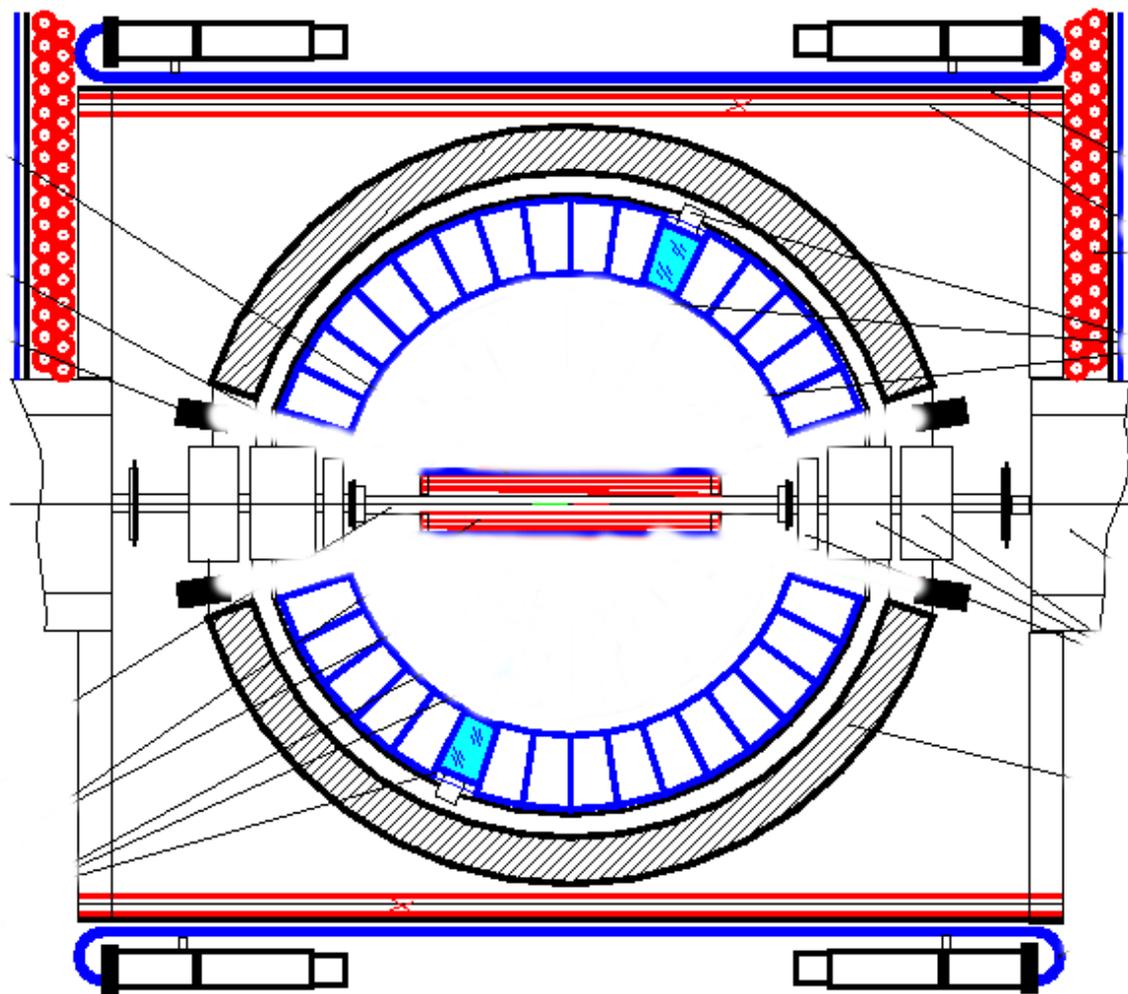
**Измерение сечения  $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$  ?**

Детектор симметричен по углу.

**Можно измерять отношение  $|G_E / G_M|$  !**



# Детектор СНД для эксперимента $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$ . Трековая система.



0 20 40 60 80 100 cm

Для улучшения однородности необходима новая трековая система.

«Новая» трековая система:

**ДДК** для эксперимента СНД на ВЭПП-2М (длина **40 см**, внутренний и внешний диаметры **4 и 12 см** соответственно).



# Эксперимент $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$ .

Приспособления для извлечения I и II слоёв калориметра готовы.

Проверка **ДДК** на изотопе и космических  $\mu$ : сделана частичная обвязка для подключения к ВВИ и сигнальных проволочек двух секторов, подготовлено оборудование для запуска от сцинтилляционного счётчика.



Работа с **ДДК 2025–2026 гг.**:

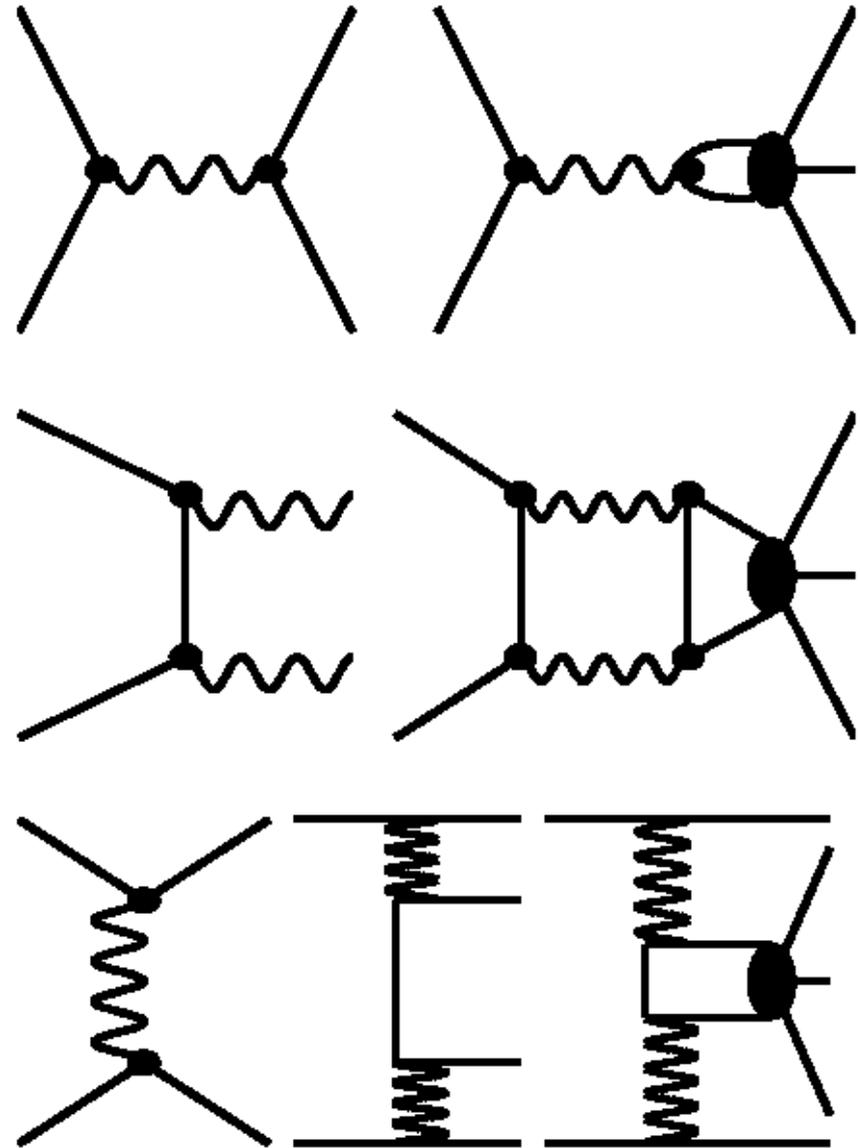
- 1) Наблюдение сигналов с проволочек **ДДК (выполнено)**;
- 2) Подключение к электронике СНД и набор данных;
- 3) Полная обвязка.

Моделирование СНД: изучение реконструкции и фонов. Изучение фона от космических частиц по экспериментальным событиям.



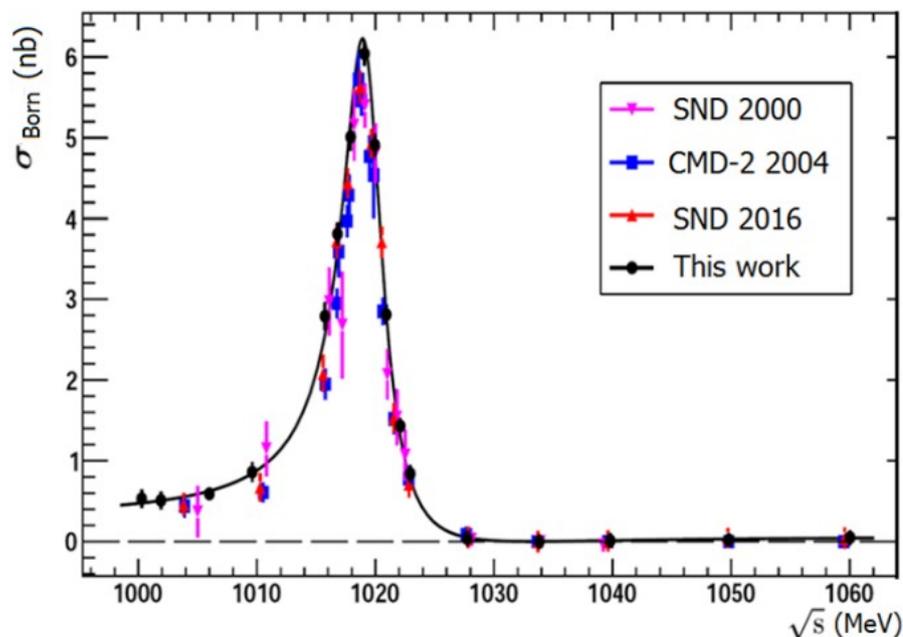
# Анализ данных СНД.

- Измерение сечений процессов  $e^+e^- \rightarrow \text{адроны}$ . Измерение сечений и электромагнитных формфакторов, исследование динамики многоадронных процессов.
- Изучение векторных мезонов  $\rho$ ,  $\omega$ ,  $\phi$  и их возбуждённых состояний  $\rho'$ ,  $\rho''$ ,  $\omega'$ ,  $\omega''$ ,  $\phi'$ , ...  
Параметры мезонов определяются путём подгонки измеренных сечений теоретическими моделями.
- Рождение С-чётных резонансов:  $e^+e^- \rightarrow S, P, A, T$ .
- Двухфотонная физика  $e^+e^- \rightarrow e^+e^- + \text{адроны}$ .





# $e^+e^- \rightarrow \pi^0\gamma$ в области рождения $\phi(1020)$ .



Сечение  $e^+e^- \rightarrow \pi^0\gamma$ .

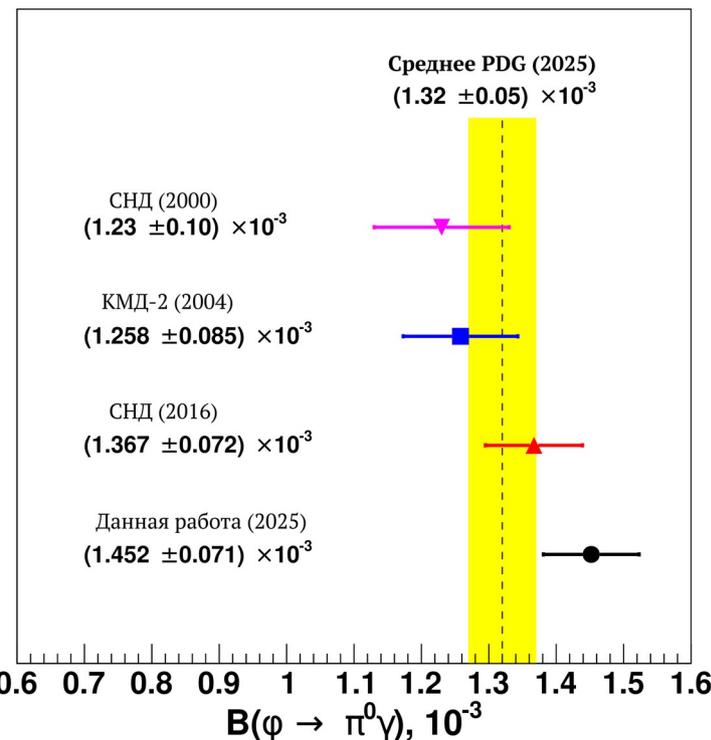
Данные 2018 г,  $IL=19$  1/пб,  
систематическая ошибка 1,3%.

SND2000, SND2016, CMD-2:

Измерения по данным с ВЭПП-2М.

## Сравнение с предыдущими измерениями.

	SND2000	SND2016	CMD-2
Отклонение $\Delta\sigma/\sigma(m_\phi)$ , %	$-7,6 \pm 1,5 \pm 1,4$	$-9,9 \pm 2,8 \pm 3,2$	$-14,9 \pm 1,4 \pm 6,0$
Стандартные отклонения, $\sigma$	3,1	2,3	2,4



Опубликовано:

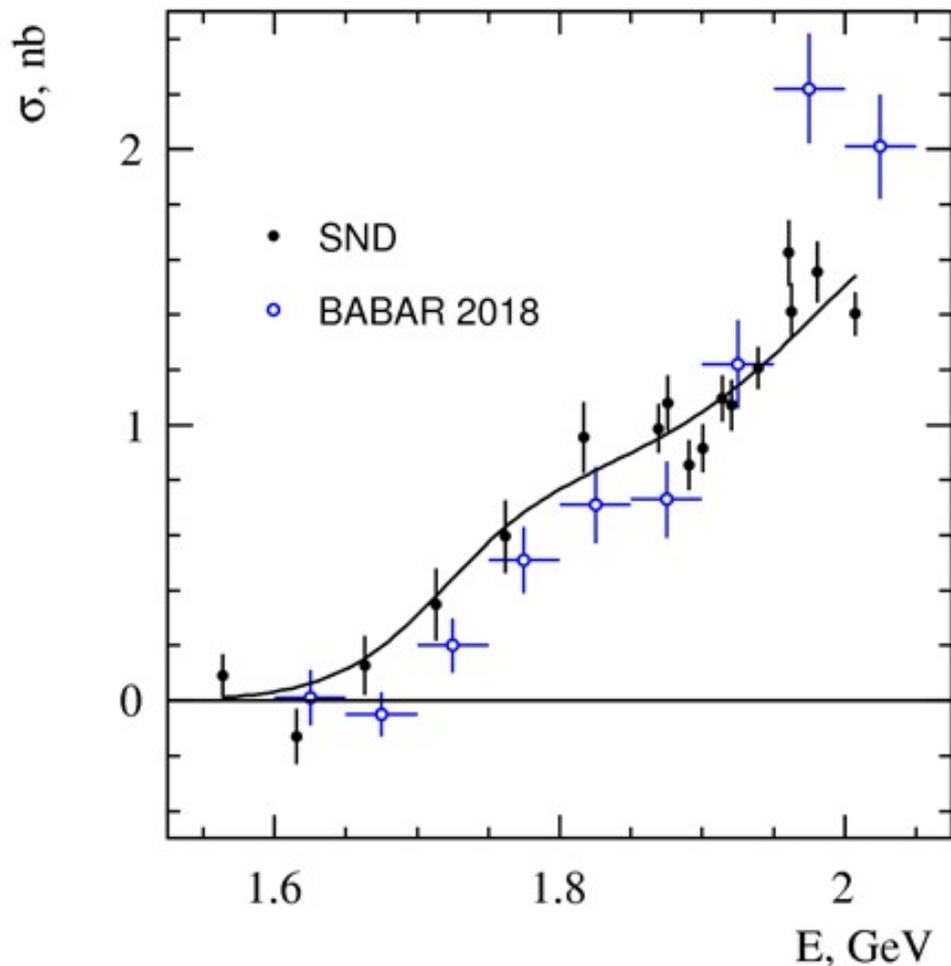
Ядерная физика 88, № 3, 274 (2025).

Относительная вероятность

распада  $\phi(1020) \rightarrow \pi^0\gamma$ .



# $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0\eta$ в области энергии $\sqrt{s} < 2$ ГэВ.



Сечение процесса

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

$\sqrt{s} = 1,05 - 2$  ГэВ.

**SND:**

данные 2011, 2012, 2019-2021 гг.,

$\mathcal{I}L = 150$  пб<sup>-1</sup>,

систематическая ошибка 6,5 - 8 %.

**BaBar:**

систематическая ошибка 13 %.

Измерения SND и BaBar систематически отличаются.

Сечение  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0\eta$  может быть описано суммой вкладов

$\rho(1700)$  и  $\rho(2150)$  резонансов.

**Опубликовано:** Ядерная физика 88, № 1, 54 (2025).



# Заключение.

- В 2025 г СНД набрал **40 пб<sup>-1</sup>** в области энергии выше **0,8 ГэВ**.
- Продолжается поэтапная модернизация электроники, системы сбора данных (потокосное чтение) и системы идентификации.
- Продолжается обработка данных, набранных в 2010–2025 гг.
- Создание системы измерения энергии пучков ВЭПП-2000 методом резонансной деполяризации.
- Подготовка будущего эксперимента  **$e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$**  с изменённым СНД на ВЭПП-2000.
- Опубликовано 4 статьи, сделано 7 докладов на конференциях.
- Грантов РФФИ – 1.