



ДЕТЕКТОР СНД состояние и планы

(лаб. 3-1, 3-2, 3-12)

М.Н. Ачасов

НАУЧНАЯ СЕССИЯ ИЯФ
1 февраля 2024 г.



Введение.

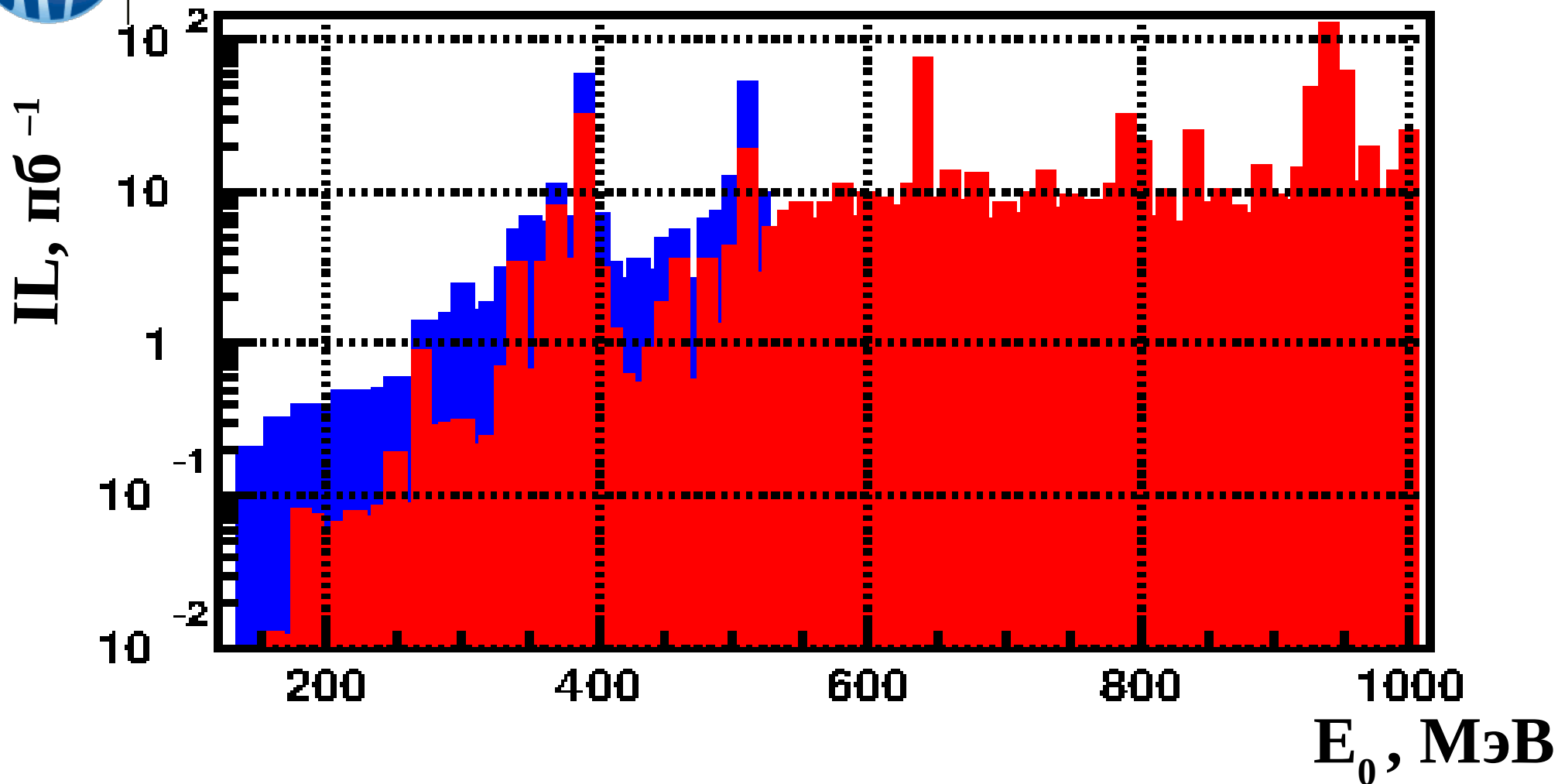
2024 – 2025 гг. набор данных в области энергии пучка $E_0 < 530$ МэВ.

2025 – 2027 гг. перерыв в работе ВЭПП-2000.

2027 г. возобновление экспериментов на ВЭПП-2000.



СНД на ВЭПП-2000.



Распределение интегральной светимости по энергии пучка.

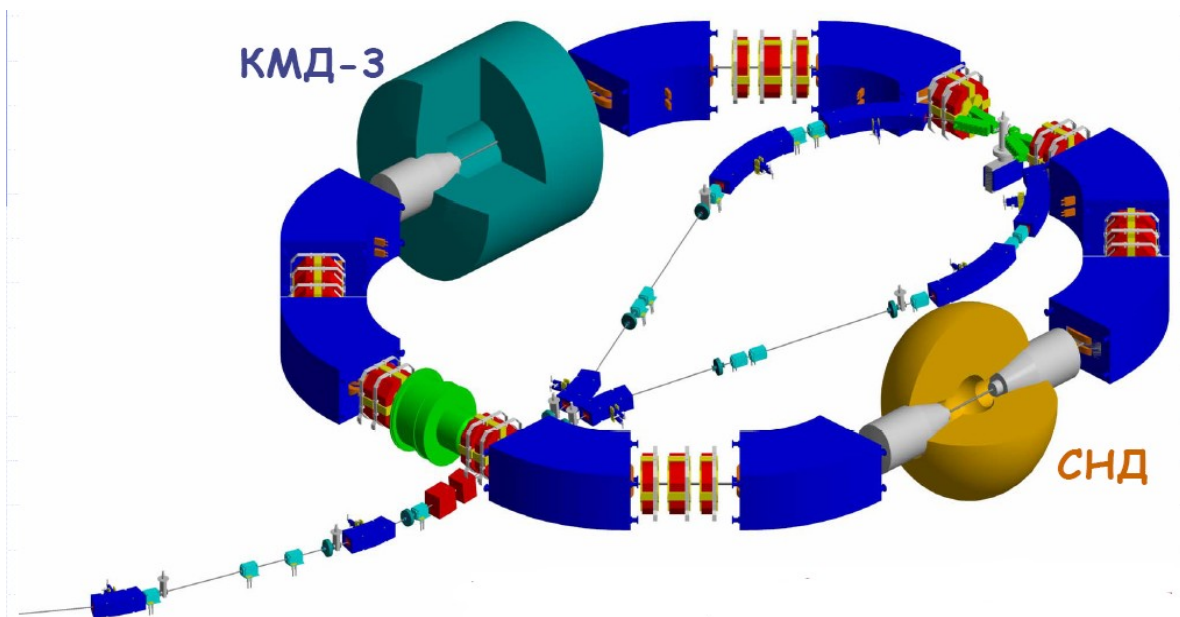
$\sum IL = 880 \text{ pb}^{-1}$ (набрано 2010 – 2023 гг.),

$\sum IL = 130 \text{ pb}^{-1}$ собираемся набрать в 2024 – 2025 гг.



СНД в 2023 г.

2023 г: набор данных в области энергии выше 1 ГэВ (с.ц.м.)



Скорость набора данных в 2017 – 2020 гг:	65 пб ⁻¹ /год.
Скорость набора данных в 2021 г:	95 пб ⁻¹ /год.
Скорость набора данных в 2022 г:	260 пб ⁻¹ /год.
Скорость набора данных в 2023 г:	270 пб ⁻¹ /год.

Предельная ожидаемая, возможная скорость: 1000 пб⁻¹/год.

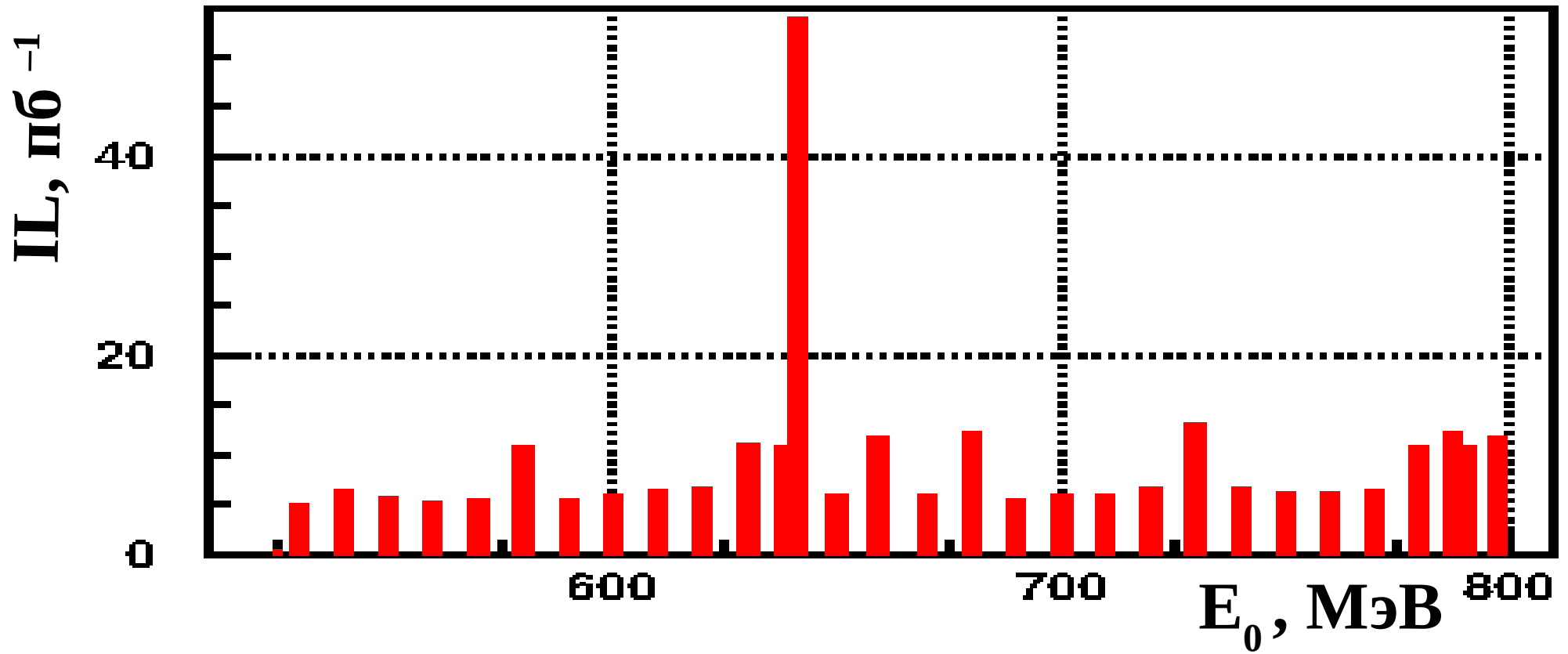
Развитие электроники и системы сбора данных СНД.

Анализ данных 2010 – 2023 гг: 790 пб⁻¹.



Эксперимент СНД в 2023 году.

В 2023 г. набран $IL=270 \text{ пб}^{-1}$



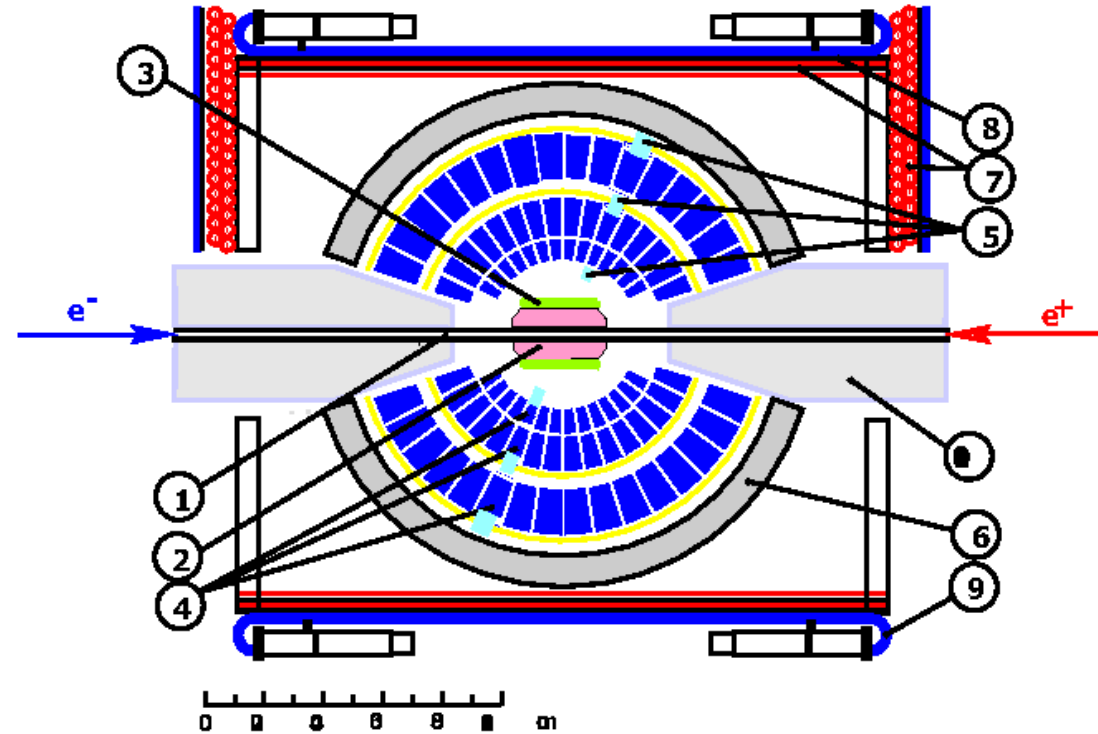
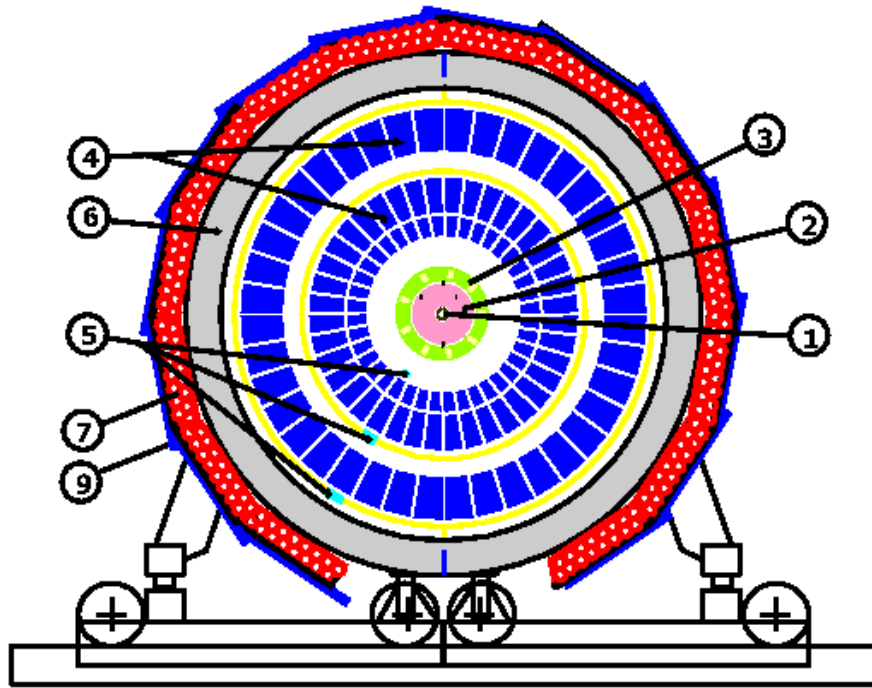
Распределение интегральной светимости по энергии в системе центра масс.

Физические задачи эксперимента 2023 г. :

- Измерение сечений $e^+e^- \rightarrow \text{адроны}$.
- Рождение C-чётных резонансов: $e^+e^- \rightarrow f_1(1270), f_1(1285), a_2(1320)$.



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.

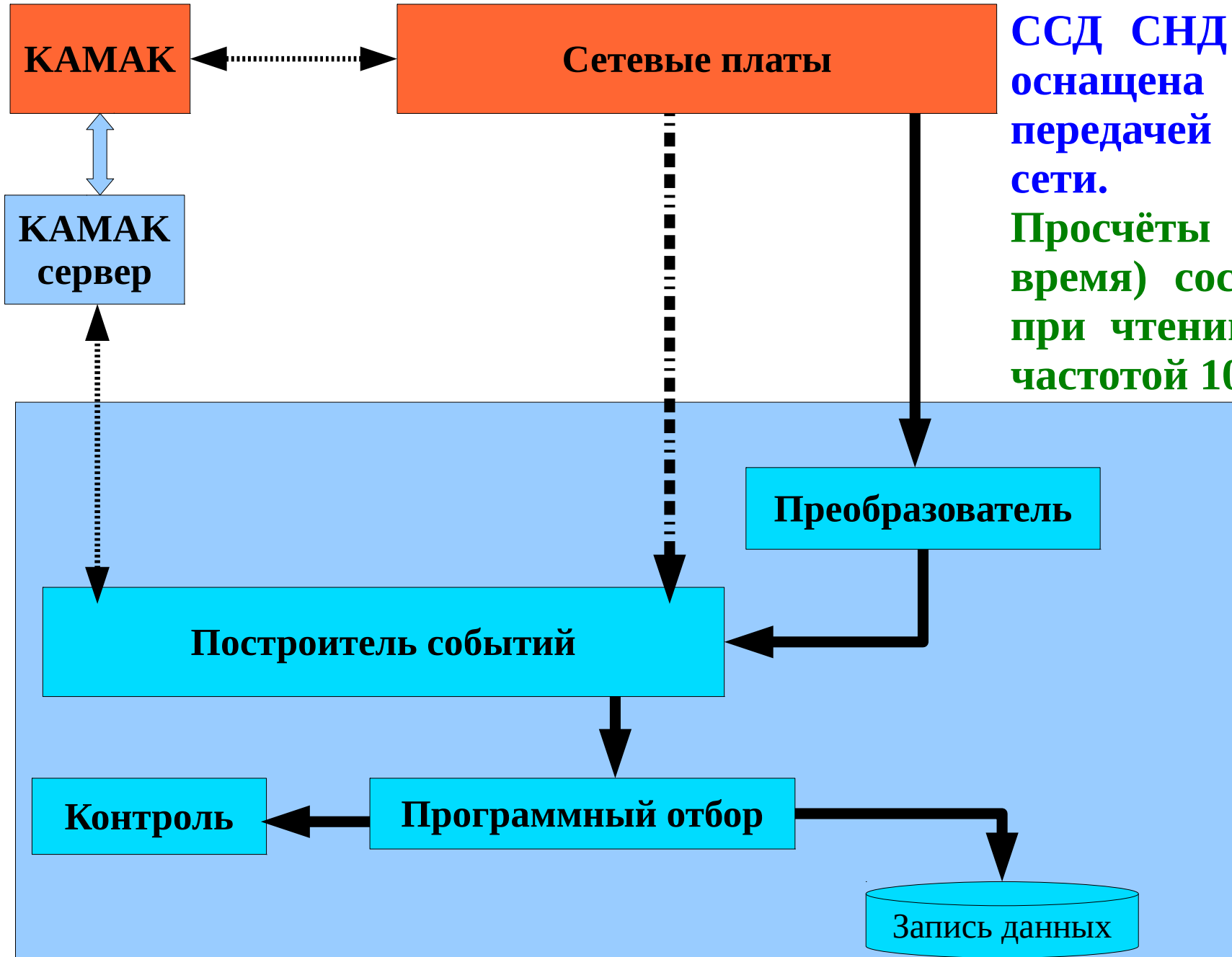


Система сбора данных СНД.

В 2023 году

ССД СНД полностью оснащена платами с передачей данных по сети.

Просчёты (мёртвое время) составили 2% при чтении данных с частотой 1000 Гц.



Вычислительная ферма



Электроника СНД.

Электроника СНД в стандарте КАМАК:

блоки генераторной калибровки трековой системы и калориметра, медленного контроля и пересчёток, калибровочного генератора, синхронизации оцифровки и чтения данных, решений первичного триггера, синхронизации сигналов систем СНД с фазой ВЭПП-2000 и др.

С 2023 года постепенный отказ от использования КАМАК.

В частности, блоки пересчёток и медленного контроля будут заменены на модули с ПЛИС, со встроенным процессором и передачей данных по сети.

Модули разработаны, идёт их освоение и производство.

Ввод в работу в 2024 году.



Развитие ССД СНД.

Полная замена электроники ССД СНД на платы с передачей данных по сети открывает возможность разработки **непрерывного (бестриггерного)** чтения данных.

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

Оценка общего потока данных (с подавлением нулей) составляет **10 – 15 Гбит/сек.**



Развитие ССД СНД.

Первый шаг в направлении **непрерывного** чтения данных – переход к **параллельному** чтению данных.

Разработка подсистем чтения и хранения.

Подсистема чтения обеспечит разделение сбора данных с разных плат по отдельным параллельным процессам (на основе библиотеки функций **MPICH** для поддержки работы параллельных процессов).

Создан прототип «распределённого сборщика».

Освоено динамическое управление процессами.

Подсистема хранения на основе **Apache Kafka** – распределённое (по ЭВМ) «хранилище событий», обеспечит параллельную запись и чтение данных.

Apache Kafka введена в ССД СНД, используется в эксперименте.

Осуществить параллельное чтение в 2024 г.



Черенковский счётчик СНД.

Пороговый черенковский счётчик

АШИФ: аэрогель — шифтер — фэу.

Фотоприёмник **ФЭУ-МКП.**

Два счётчика с показателями преломления аэрогеля:

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

Степень разделения до **5σ** .

На замену счётчика с **ФЭУ-МКП** разрабатывается счётчик **АШИФ** с кремниевым фотоприёмником **КФЭУ**. Экспериментальные оценки показывают, что степень разделения составит **7σ** .

(Совместно с лаб.3-2)



Черенковский счётчик СНД.

Проведены замена, сушка аэрогеля

АЧС n=1,05 и 1,13 с ФЭУ МКП.

Сделать пробный модуль

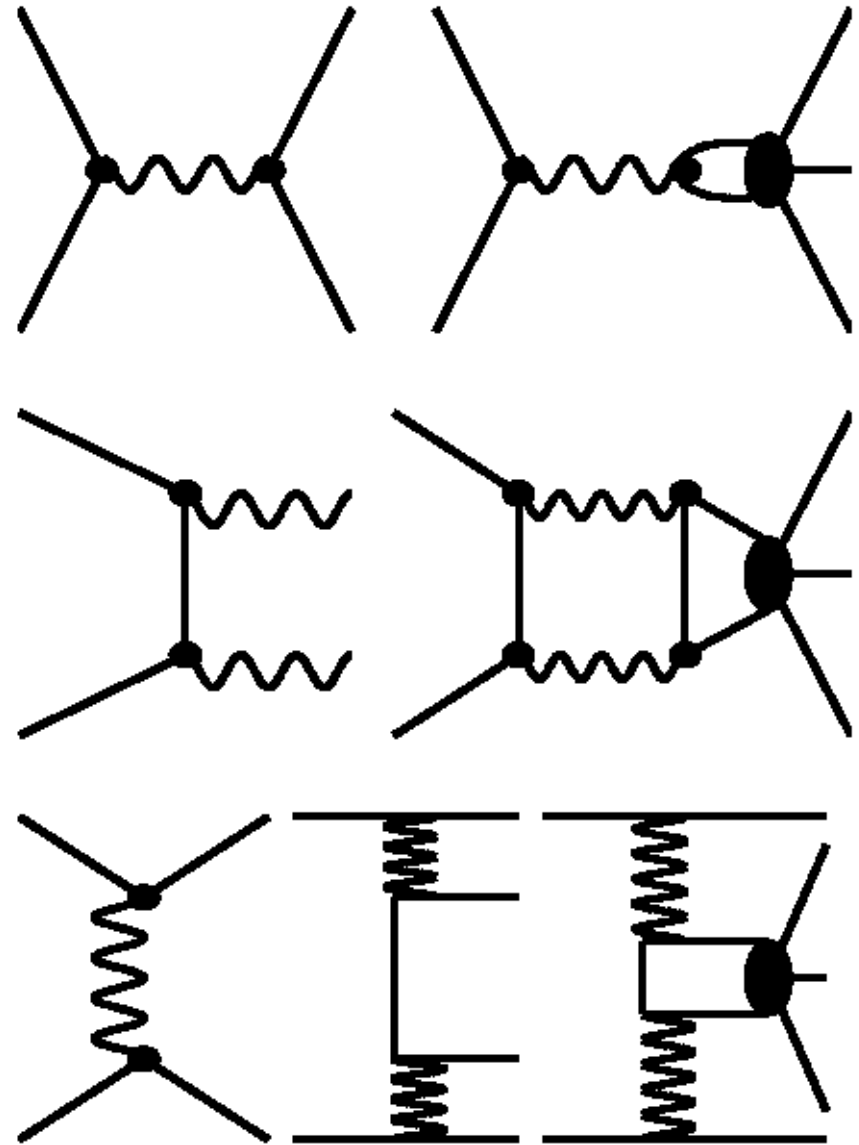
АЧС n=1,05 с КФЭУ

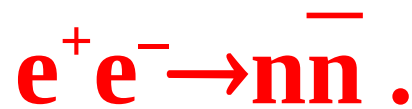
в 2024 г.



Анализ данных СНД.

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





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

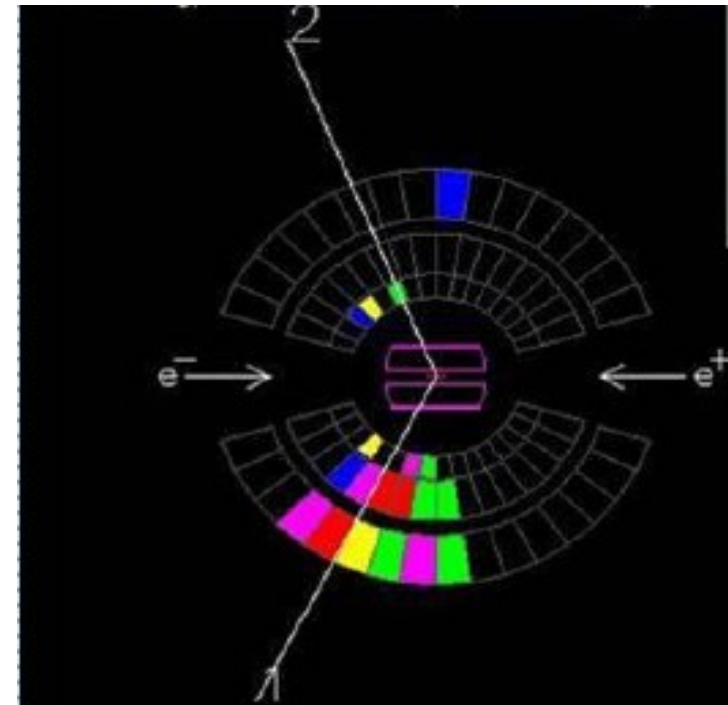
Эффективный формфактор можно определить по сечению $e^+ e^- \rightarrow n \bar{n}$.

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

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.



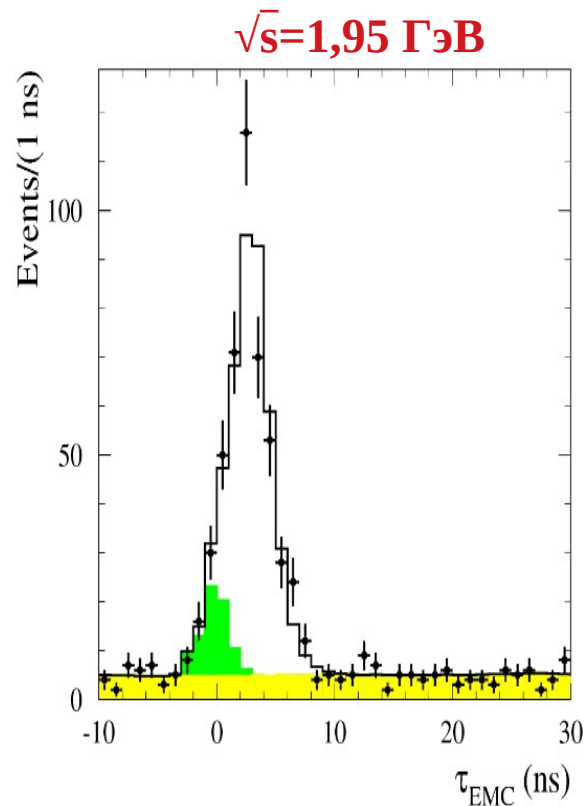
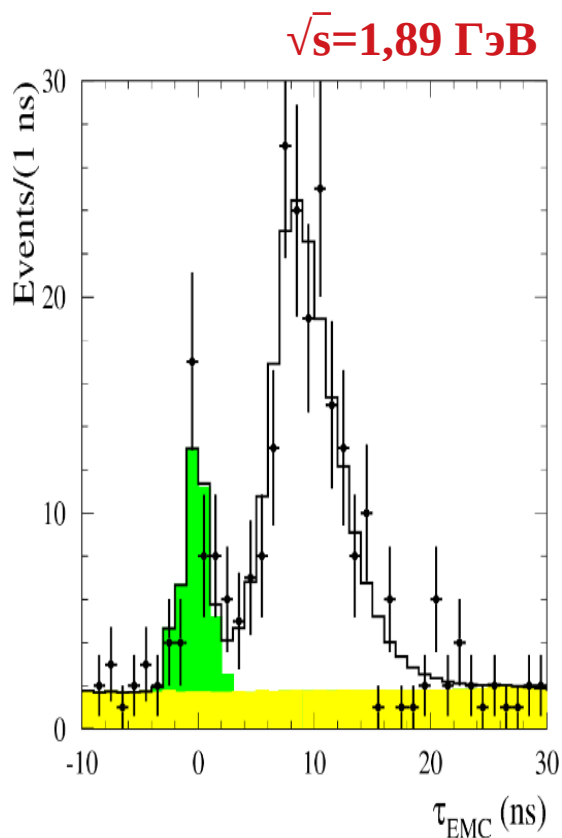


$e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$

Для анализа событий $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$ используется время срабатывания калориметра относительно момента столкновения пучков (среднее время события):

$$T = \frac{\sum t_i E_i}{\sum E_i}$$

t_i – время срабатывания кристалла,
 E_i – энерговыделение в кристалле.

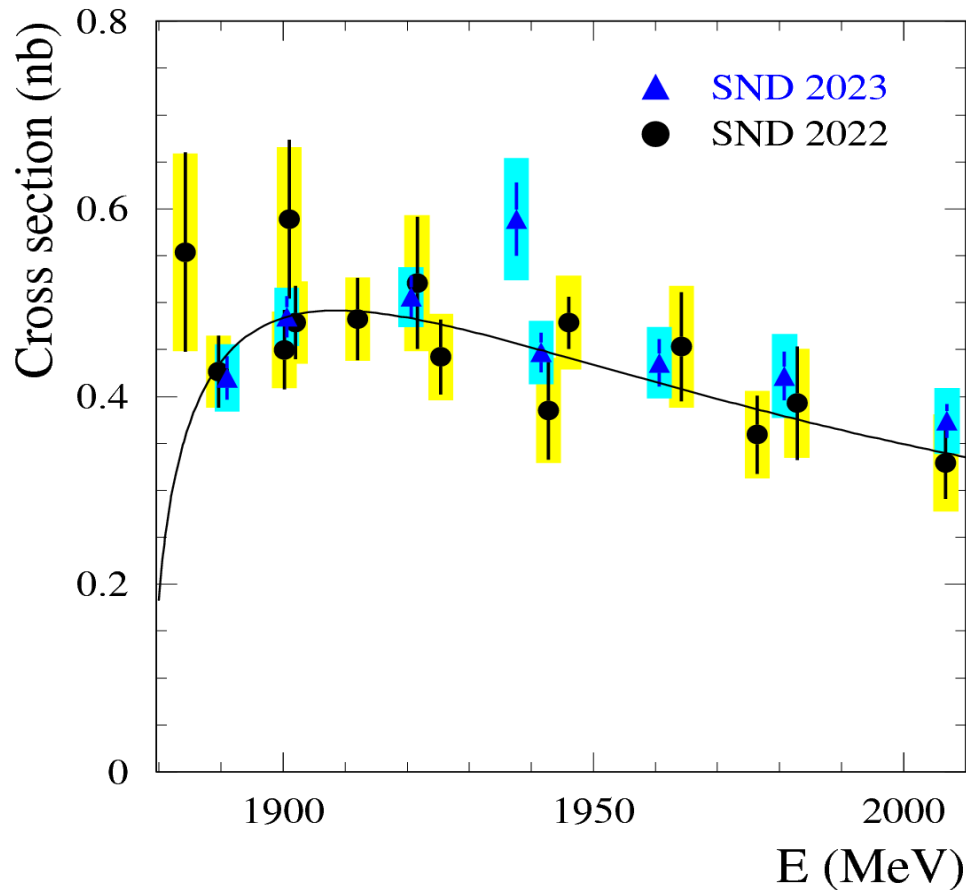


Распределение экспериментальных событий по времени. Гистограмма – подгонка суммой распределений событий $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$, космического фона (жёлтая гистограмма), физического и пучкового фона (зелёная гистограмма).

Опубликовано: *Nucl. Instrum. Meth. A 1056, 168664 (2023).*



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



SND 2022:

Eur. Phys. J. C 82, 761 (2022),
IL=30 1/пб.

SND 2023:

ЯФ 86, № 6, 672 (2023),
IL=80 1/пб,

Самое точное измерение
сечения в области энергии
ниже **2 ГэВ**.

Сечение $e^+ e^- \rightarrow n \bar{n}$, измеренное СНД.

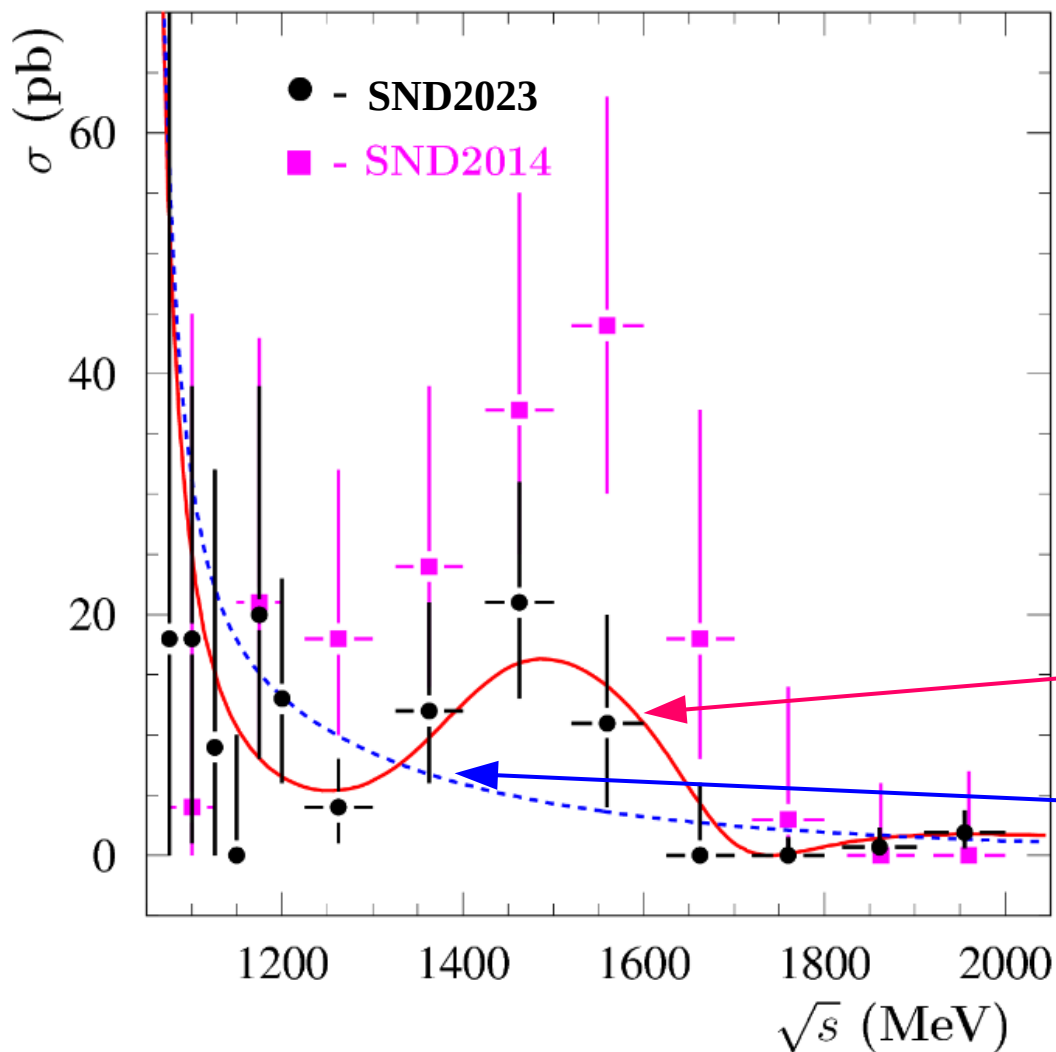
Статистические и систематические
ошибки показаны чёрточками и
полосами соответственно.

Опубликовано:

**Ядерная физика 86,
№ 6, 672 (2023).**



Процесс $e^+e^- \rightarrow \eta\gamma$ в области энергии $\sqrt{s} > 1,07$ ГэВ.



SND 2014: Phys. Rev. D 90, 032002 (2014),

$\mathcal{I}L=36$ пб⁻¹,

недооценён фон многофотонных событий.

SND 2023: ЯФ 86, № 6, 672 (2023),

$\mathcal{I}L=242$ пб⁻¹,

самое точное измерение сечения в области энергии **1,07 – 2 ГэВ.**

Сумма $\rho(770)$, $\omega(782)$, $\phi(1020)$ и $\rho(1450)$, $\phi(1680)$.

Сумма $\rho(770)$, $\omega(782)$ и $\phi(1020)$.

Модели не противоречат данным.

Сечения в максимумах резонансов:

$\sigma(e^+e^- \rightarrow \rho(1450) \rightarrow \eta\gamma) = 16 \pm 15 \pm 2$ пб и

$\sigma(e^+e^- \rightarrow \phi(1680) \rightarrow \eta\gamma) = 14 \pm 14 \pm 2$ пб.

Теоретические предсказания в рамках

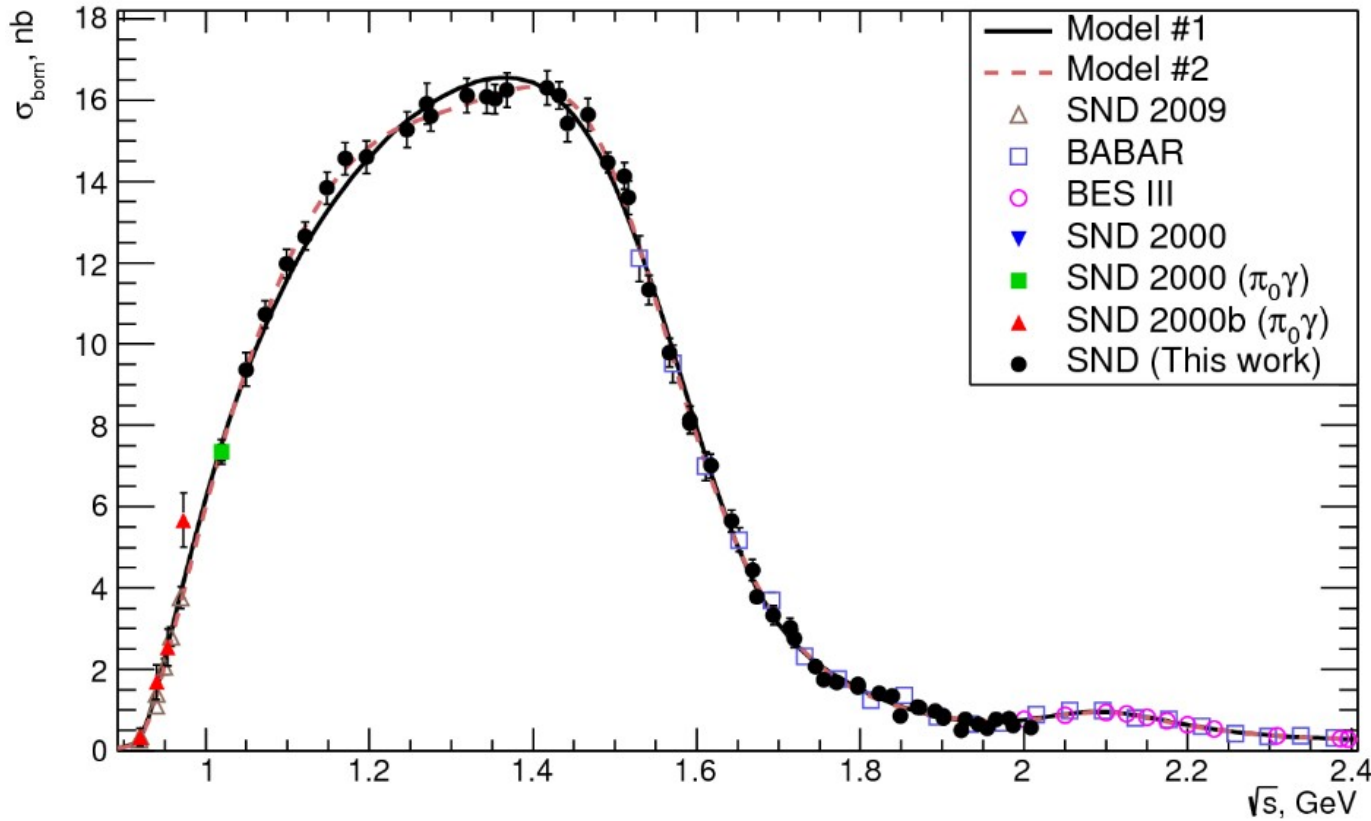
кварковой модели: **15 пб** для $\rho(1450)$ и

10 пб для $\phi(1680)$.

Опубликовано: Ядерная физика 86, № 6, 664 (2023).



Процесс $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0 \rightarrow \pi^0\pi^0\pi^+\pi^-$ в области энергии $\sqrt{s} > 1,05$ ГэВ.



Данные СНД
ВЭПП-2000,
СНД ВЭПП-2М,
BESIII, BaBar
МОЖНО ОПИСАТЬ
СУММОЙ
 $\rho(770)$, $\rho(1450)$,
 $\rho(1700)$ И $\rho(2150)$.

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

Опубликовано: *Phys. Rev. D* 108, 092012 (2023).



Анализ данных СНД.

Анализ данных выявит

- недочёты и промахи в проведённых экспериментах,
- противоречия в наблюдаемых и ожидаемых значениях сечений.

По итогам обработки необходимо провести новый набор данных для уточнения старых и получения новых результатов (после перерыва 2025 – 2027 гг).

Будущие эксперименты в области энергии выше 1 ГэВ в сцм:

- Поиск узких резонансов;
- Рождение С-чётных резонансов : $e^+e^- \rightarrow S, P, A, T$;
- Радиационные распады $\rho', \rho'', \omega', \omega'', \phi', \dots$;
- Набор данных около порога рождения пар частиц VS, VP, \dots ;
- ...

СНД готов к продолжению работы.



Заключение.

- В 2023 г СНД набрал **270 пб⁻¹** в области энергии выше **1 ГэВ**.
- Продолжается поэтапная модернизация электроники, системы сбора данных и системы идентификации.
- Продолжается обработка данных, набранных в 2010–2023 гг.
- Опубликовано 4 статьи, сделано 5 докладов на конференциях.
- Грантов РФФИ – 1.
- Эксперимент с СНД на ВЭПП-2000 можно продолжать не менее пяти лет (после перерыва 2025 – 2027 гг.);