



ДЕТЕКТОР СНД состояние и планы

(лаб. 3-1, 3-2, 3-12)

М.Н. Ачасов

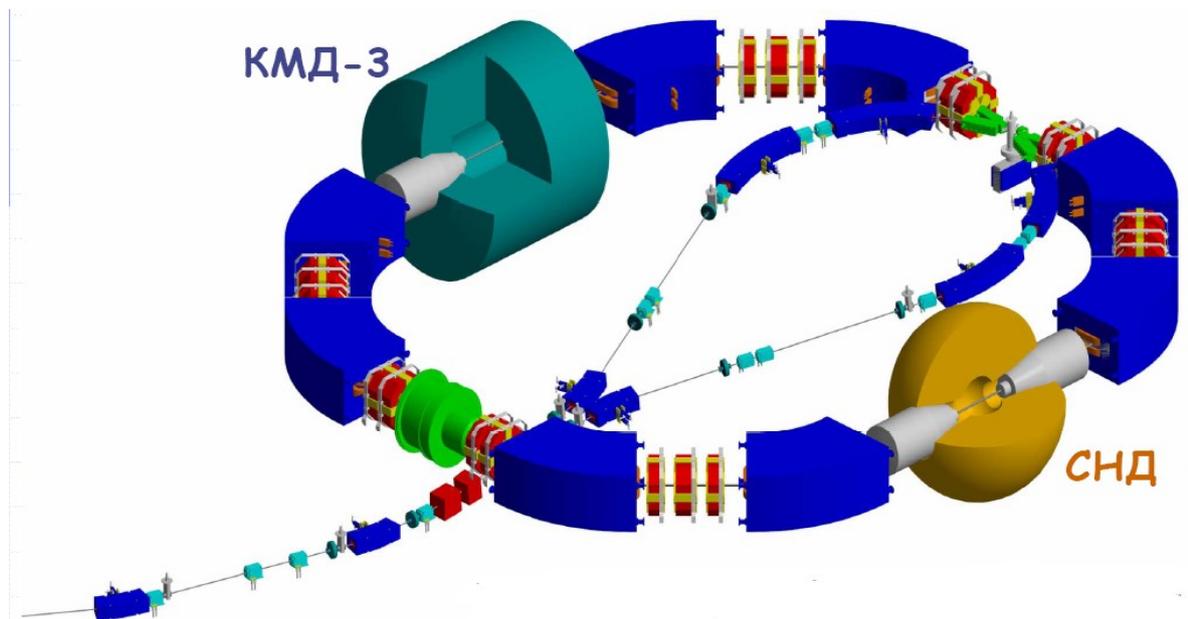
НАУЧНАЯ СЕССИЯ ИЯФ

2 марта 2023 г.



СНД в 2022 г.

2022 г: набор данных в области энергии выше 1 ТэВ (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.

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

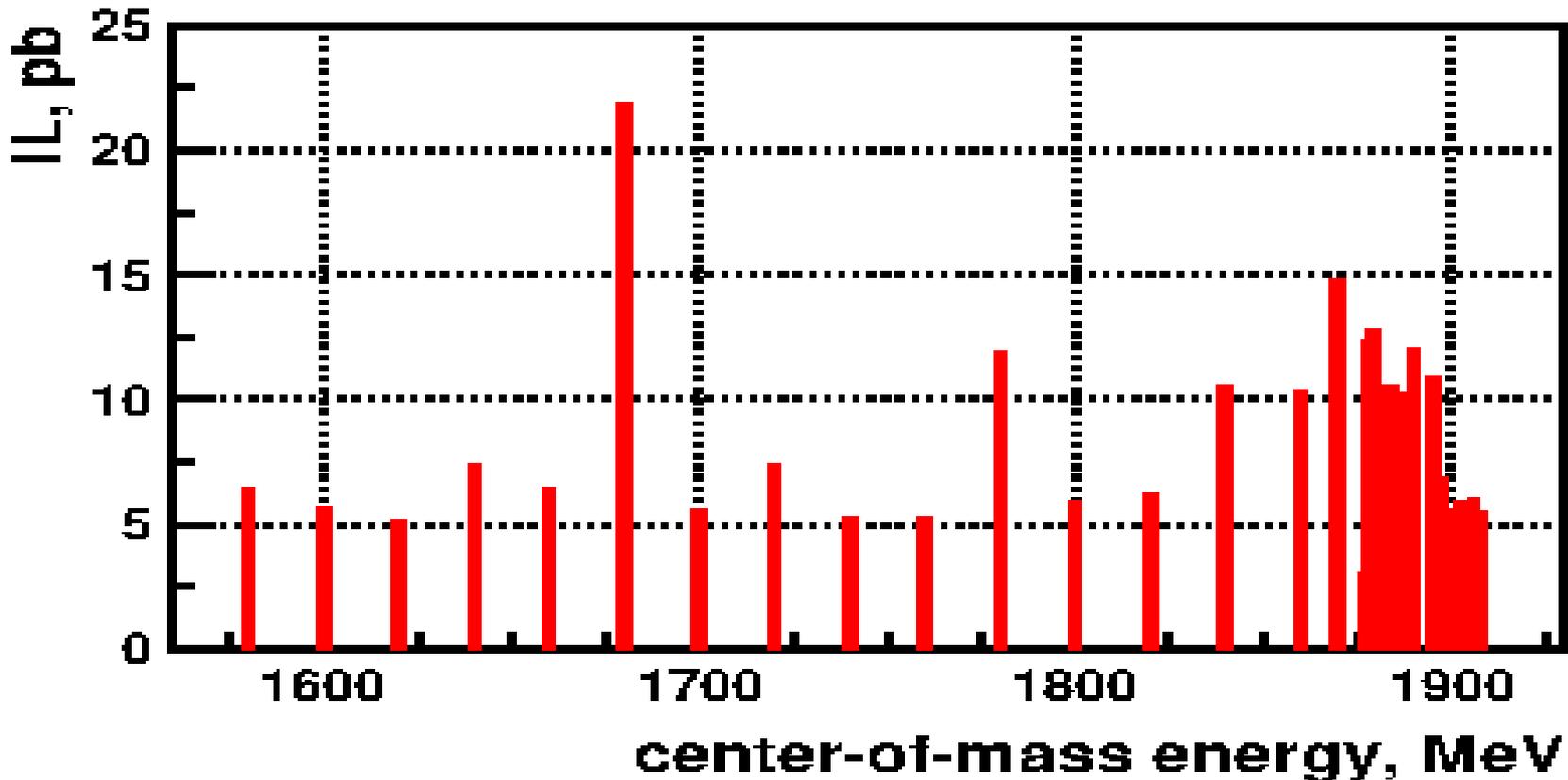
Развитие электроники и системы сбора данных СНД.

Анализ данных 2010 – 2021 гг: 355 пб⁻¹.



Эксперимент СНД в 2022 году.

В 2022 г. набран $IL=260 \text{ пб}^{-1}$



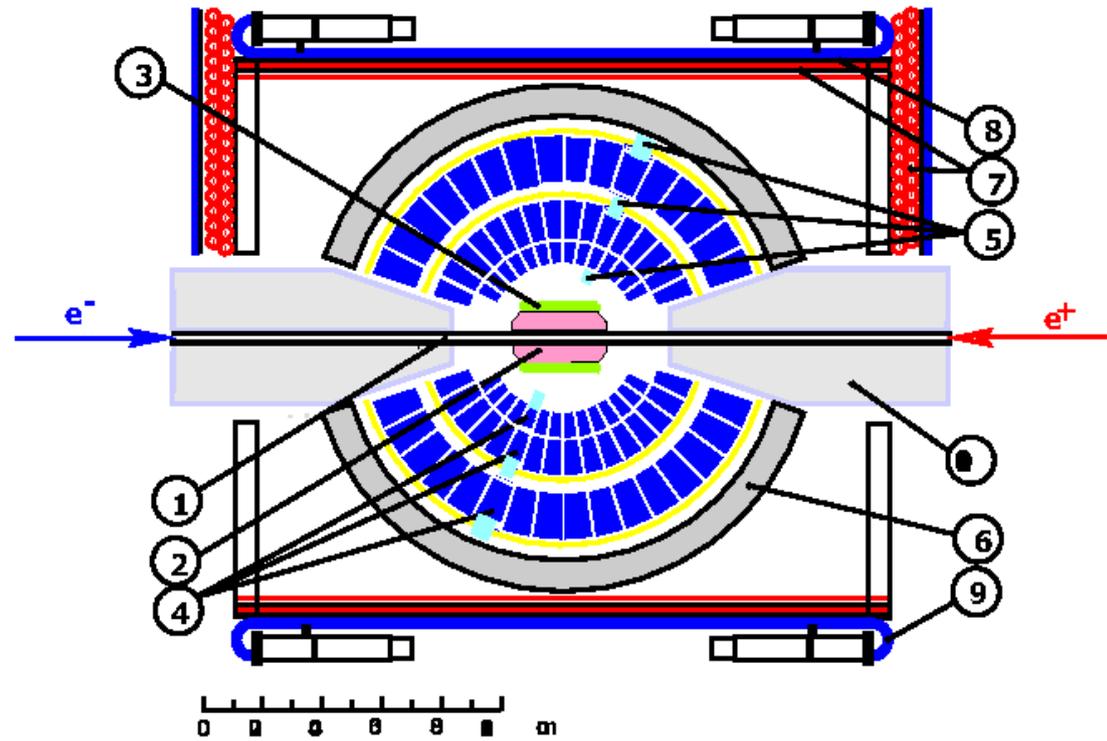
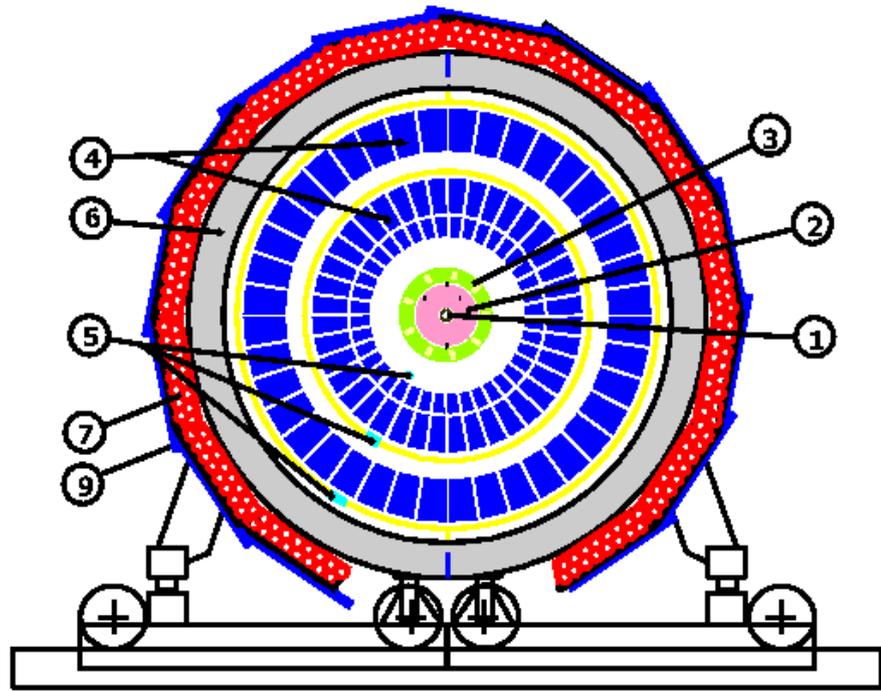
Распределение интегральной светимости по энергии в системе центра масс.

Физические задачи эксперимента 2022 г. :

- Измерение сечений $e^+e^- \rightarrow N\bar{N}$, адроны.



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.



Новая электроника.

В 2022 году были установлены и включены в ССД СНД платы **T200 (54 шт.)** для оцифровки сигналов с проволочек дрейфовой камеры (период оцифровки ≈ 5 нс) с ПЛИС, со встроенным процессором и передачей данных по сети.

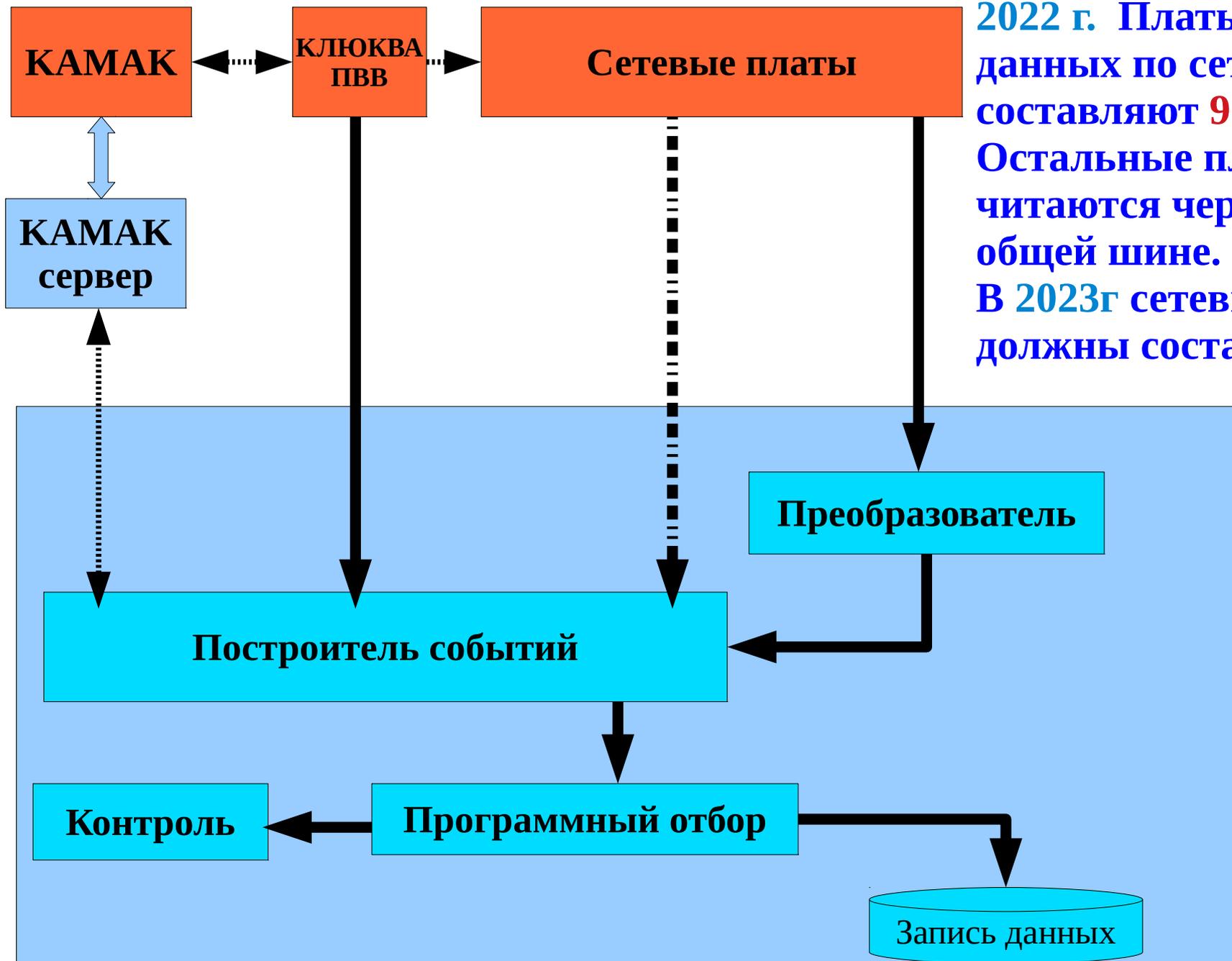
Произведены новые платы **ДА-НЕТ** для чтения битовых данных для регистрации срабатываний аргументов триггера и пропорциональных трубок мюонной системы. Разработано ПО для записи данных.

В 2023 году платы **ДА-НЕТ** должны быть включены в ССД.

Переход на новую электронику существенно увеличивает быстродействие ССД.



Система сбора данных СНД.



2022 г. Платы с передачей данных по сети составляют **91%**.
Остальные платы читаются через ПВВ по общей шине.
В 2023г сетевые платы должны составить **100%**.

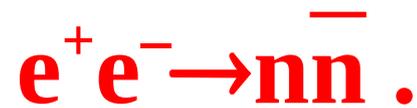
Вычислительная ферма



Анализ данных СНД.

Физическая программа эксперимента:

- 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.
- Двухфотонная физика $e^+e^- \rightarrow e^+e^- + \text{адроны}$.
- Рождение С-чётных резонансов: $e^+e^- \rightarrow S, P, A, T$.



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

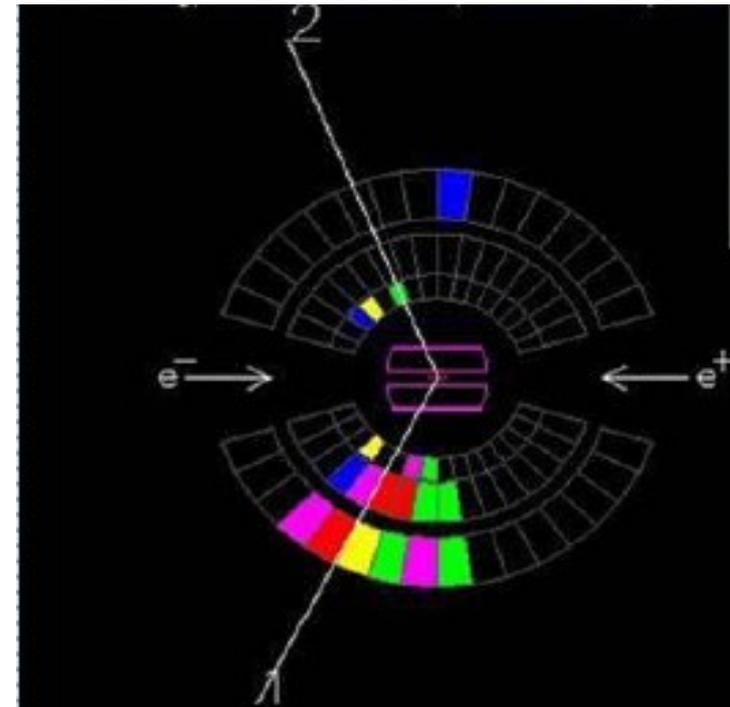
Эффективный формфактор можно определить по сечению $e^+ e^- \rightarrow n \bar{n}$.

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

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.





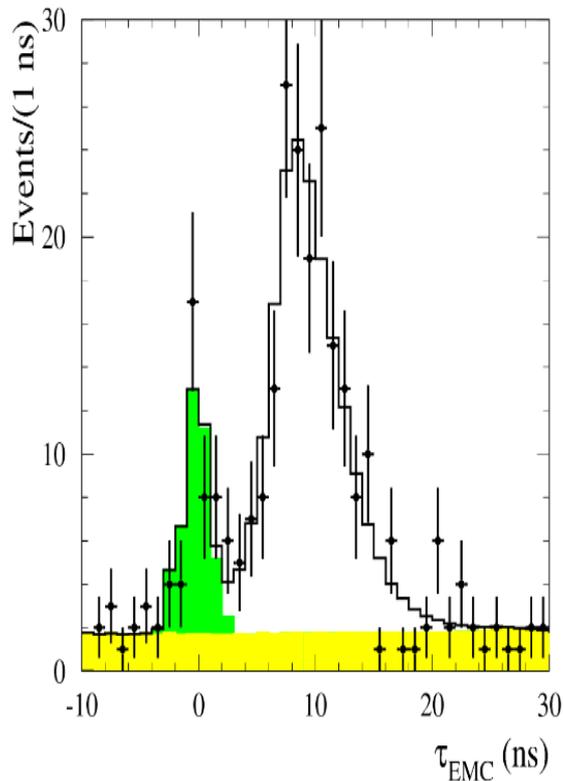
$e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$

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

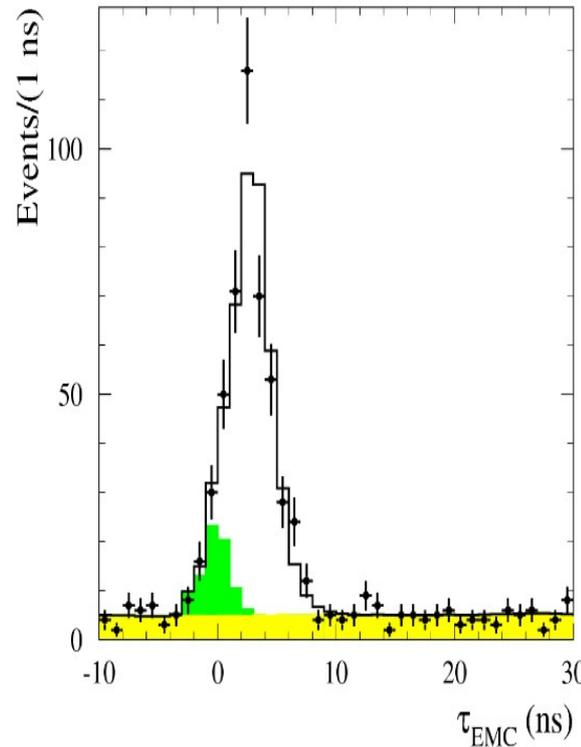
$$T = \frac{\sum t_i E_i}{\sum E_i}$$

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

$\sqrt{s}=1,89$ ГэВ



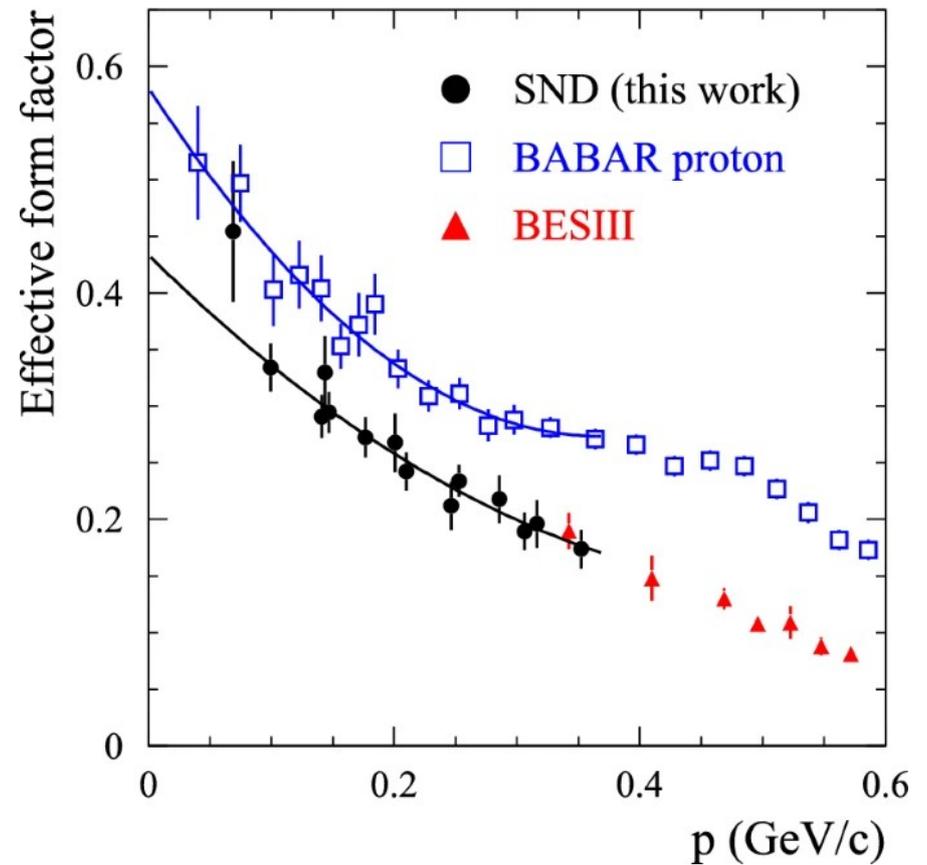
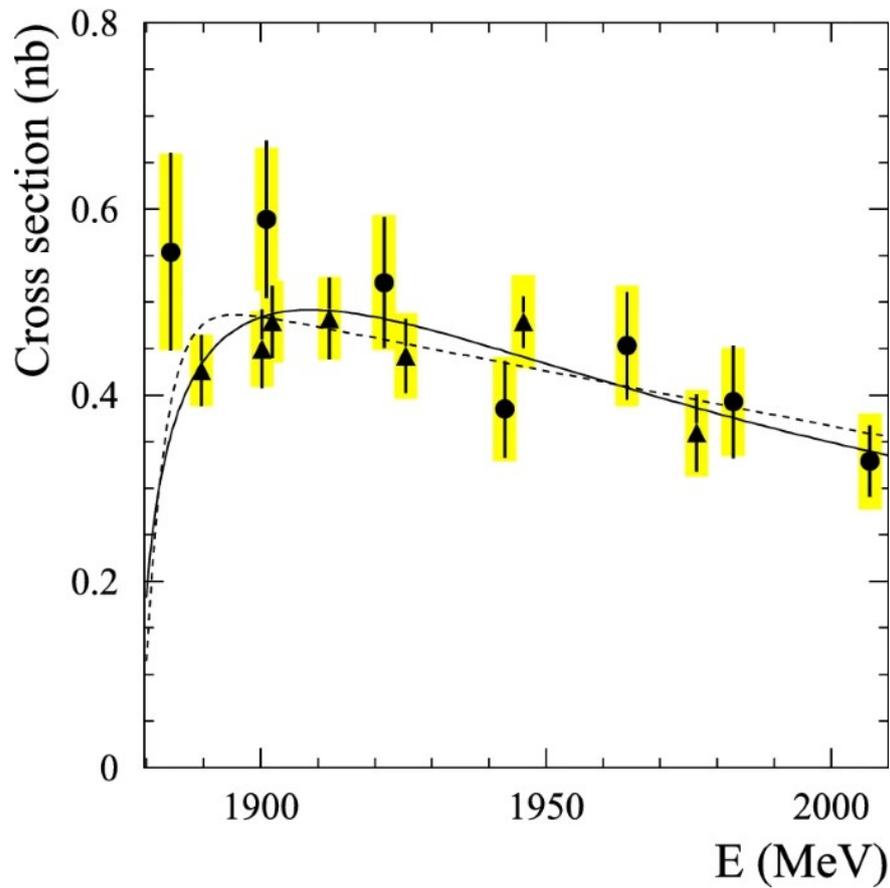
$\sqrt{s}=1,95$ ГэВ



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).



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



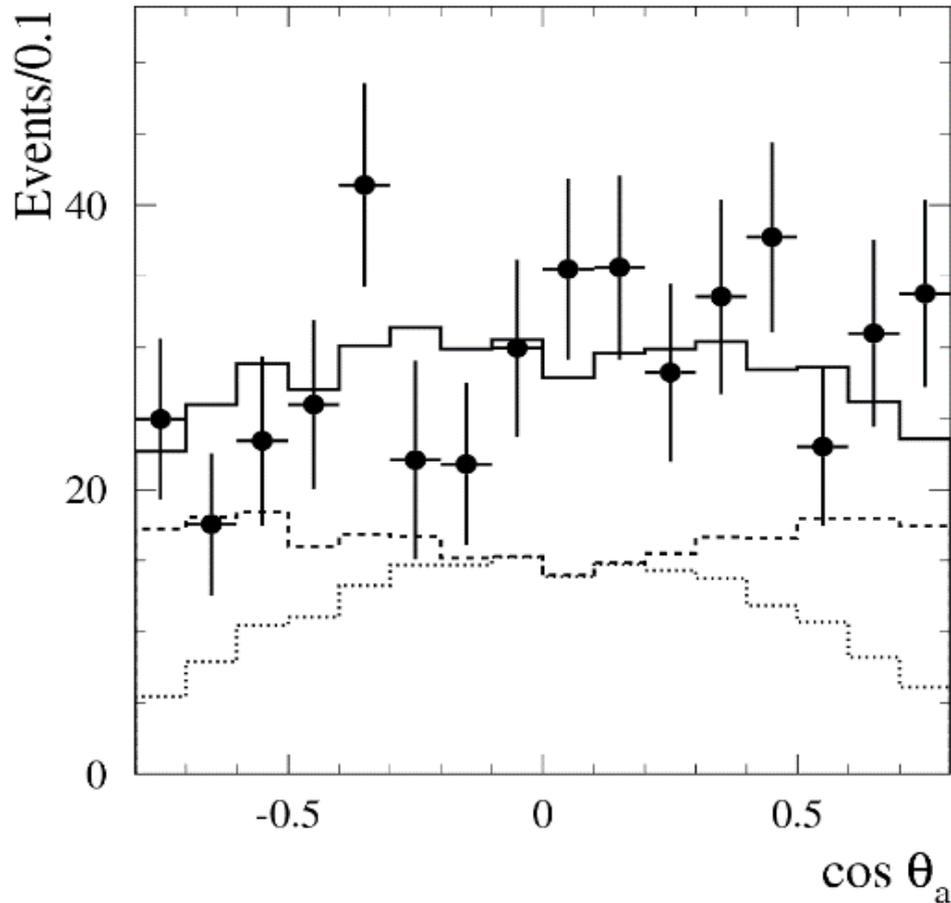
Сечение $e^+ e^- \rightarrow n \bar{n}$, измеренное СНД.
Статистические и систематические
ошибки показаны чёрточками и
жёлтыми полосами соответственно.

Эффективный электромагнитный
формфактор нейтрона (СНД и
BESIII) и протона (BaBar). Ошибки
измерений сопоставимы.



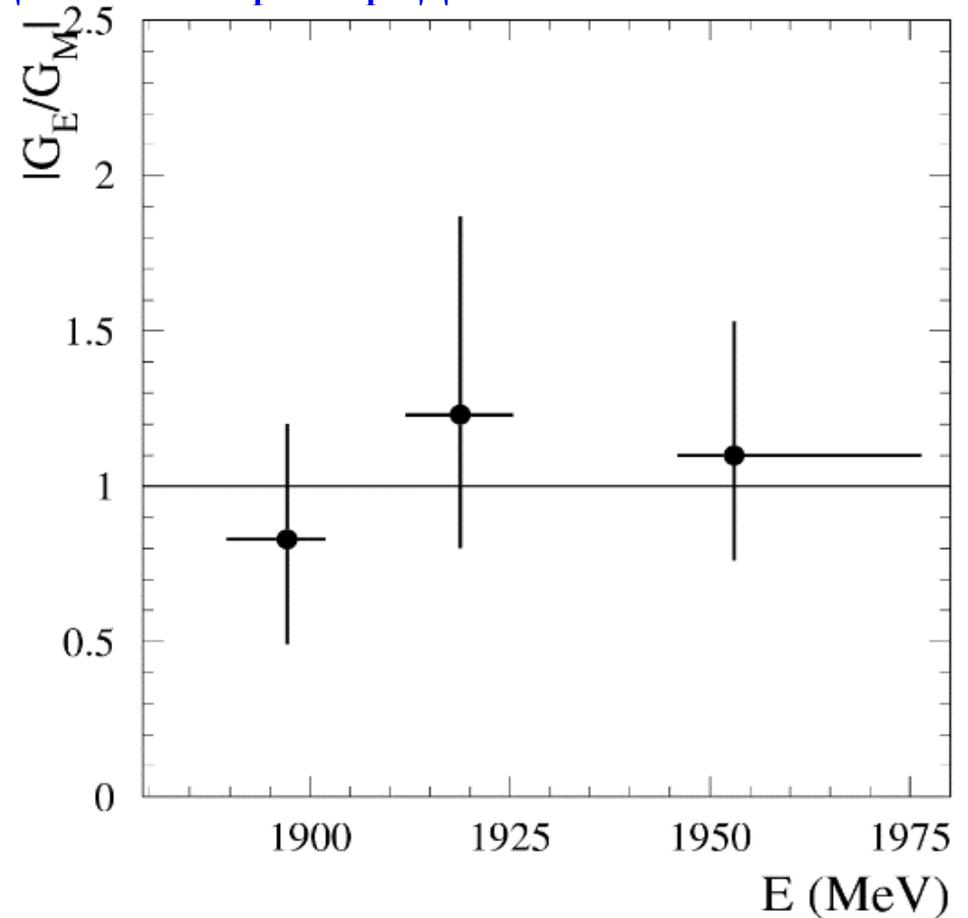
$$e^+e^- \rightarrow n\bar{n}.$$

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



Распределение по $\cos\theta$ антинейтрона в области энергии **1,95 ГэВ**.

Гистограмма – подгонка суммой распределений $\sin^2\theta$ для $|G_E|$ и $1+\cos^2\theta$ для $|G_M|$.



Отношение $|G_E / G_M|$ согласуется с **1**.

Опубликовано

Eur. Phys. J. C 82, 761 (2022)



Заключение.

- В 2022 г СНД набрал **260 пб⁻¹** в области энергии выше **1 ГэВ**.
- Продолжается поэтапная модернизация электроники и системы сбора данных.
- Продолжается обработка данных, набранных в 2010–2021 гг.
- Опубликована 1 статья, сделано 2 доклада на международных конференциях.
- Грантов РФФИ – 2.



Развитие ССД СНД.

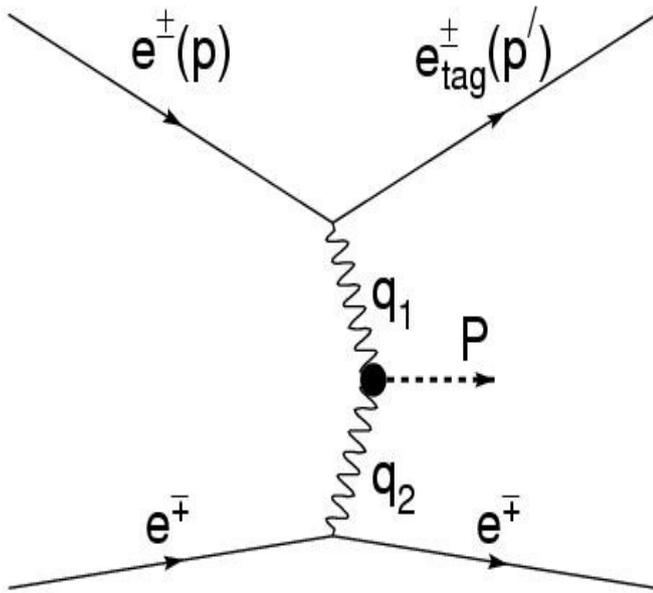
Полная замена электроники ССД СНД на платы с передачей данных по сети открывает возможность разработки **непрерывного (бестриггерного)** чтения данных.

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

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



Двухфотонные процессы.



$$e^+e^- \rightarrow e^+e^-P, \text{ где } P = \pi^0, \eta, \eta'.$$

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

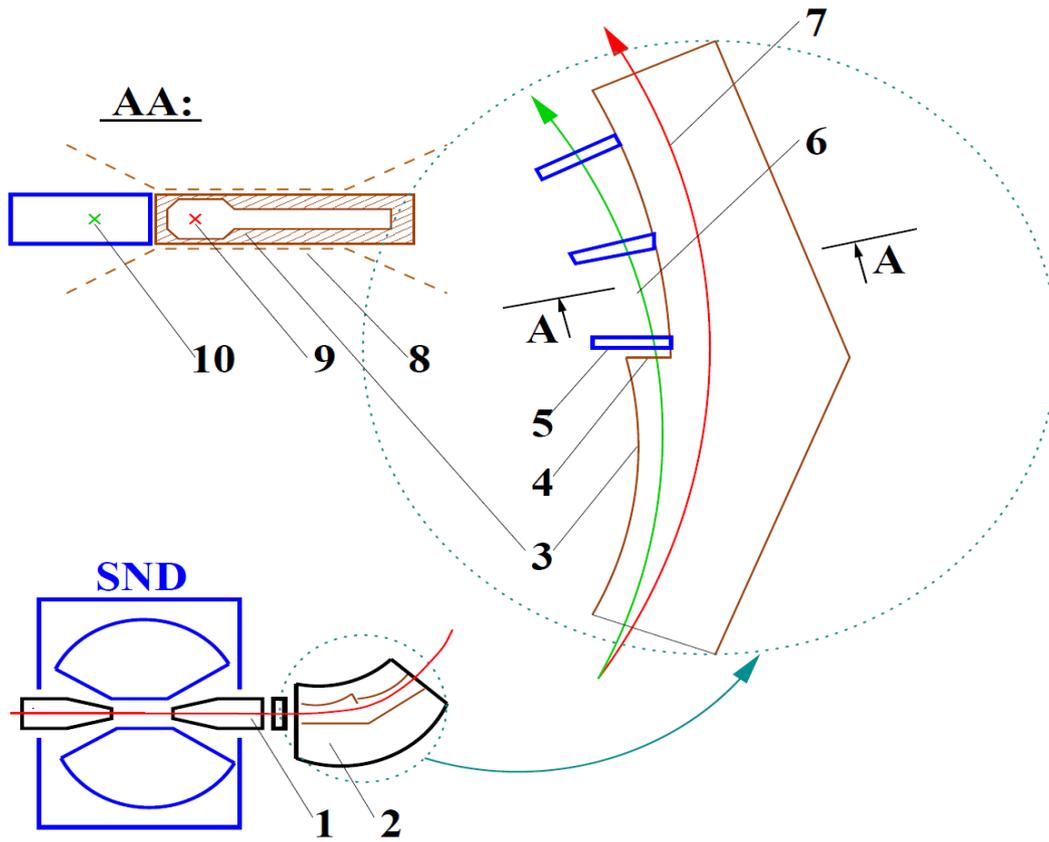
- Сечения двухфотонных процессов растут с энергией $\sigma_{\gamma\gamma} \sim \ln s$;
- Конечные e^\pm летят преимущественно вдоль направлений начальных e^\pm . При этом $q_1^2, q_2^2 \cong 0$ и $\sigma(e^+e^- \rightarrow e^+e^- X) \sim \sigma(\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-)$.

- $\sigma(\gamma\gamma \rightarrow e^+e^- P) \sim \Gamma(P \rightarrow \gamma\gamma)$ – измерение двухфотонных ширин π^0, η, η' .
- Регистрация одного или двух рассеянных электронов позволяет измерить мезон-фотонные формфакторы $F(q_1^2, q_2^2)$.
- При рассеянии на малый угол конечные e^+ и e^- можно зарегистрировать с помощью детекторов, расположенных в поворотных магнитах **ВЭПП-2000**, измерить энергии и углы рассеяния (система регистрации рассеянных электронов).



Система регистрации рассеянных электронов.

(А.А. Дроздецкий, дипломная работа, НГУ, 2001)

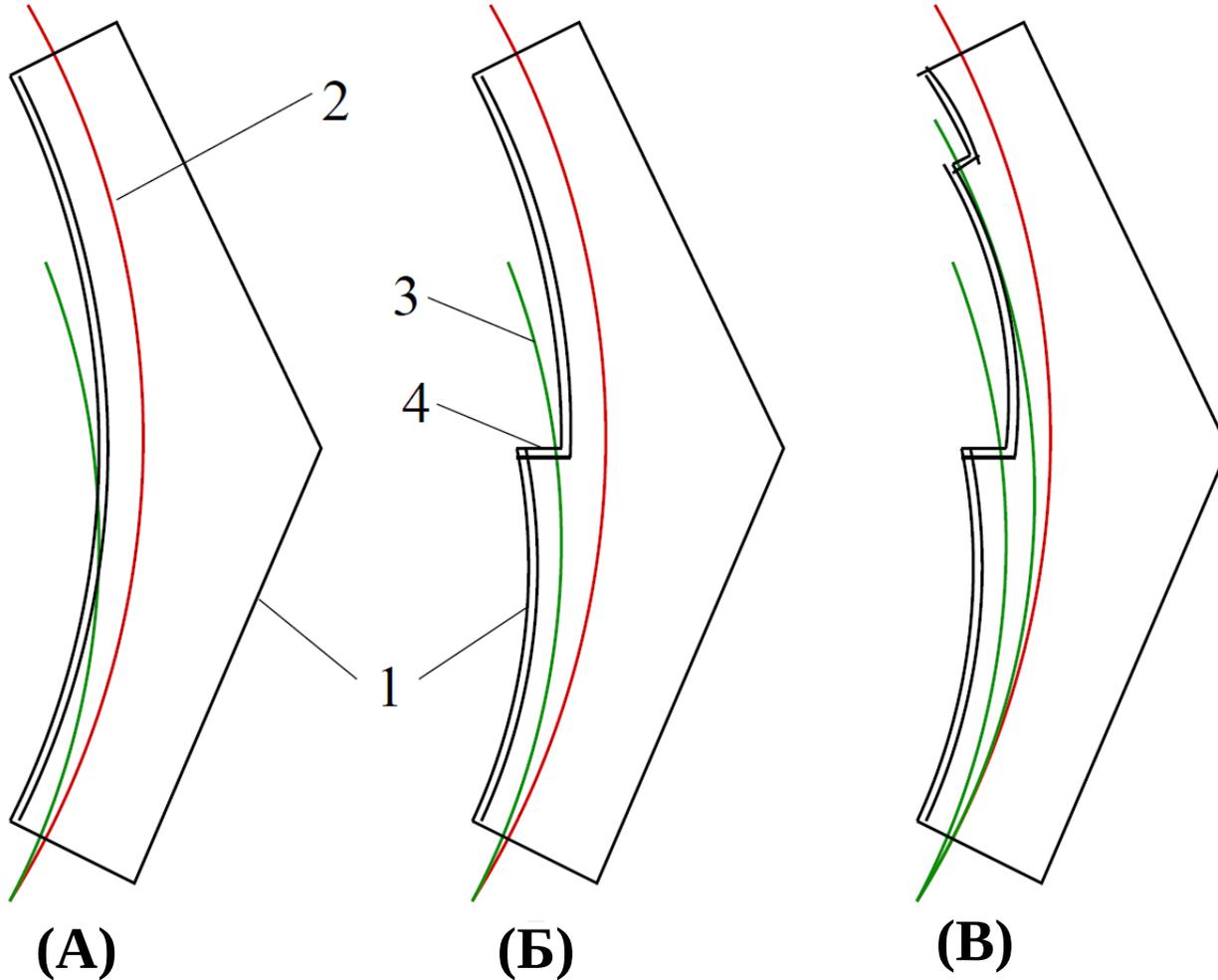


- 1 – соленоид, 2 – дипольный магнит,
- 3 – вакуумная камера,
- 4 – окно для вывода рассеянных e^\pm ,
- 5 – детекторы рассеянных e^\pm ,
- 6 – траектория рассеянного e^\pm ,
- 7 – равновесная орбита, 8 – полюс магнита,
- 9 – положение равновесной орбиты,
- 10 – положение орбиты рассеянного e^\pm .

- Переделка вакуумных камер в поворотных магнитах рядом с СНД;
- Бериллиевое окно для вывода рассеянных электронов;
- Угол рассеяния электрона, который пройдёт через вакуумную камеру внутри соленоида $\theta < 0,025$ рад соответствует $|q^2| < 6 \times 10^{-4} \text{ ГэВ}^2$;
- Траектория рассеянного электрона в соленоиде сложная. Требуется численный расчёт траектории и измерение координат трека в двух плоскостях;
- Двухкоординатные микроструктурные детекторы.



Вакуумная камера.



1 – вакуумная камера, 2 – равновесная орбита,
3 – траектория рассеянного e^\pm , 4 – окно для вывода
рассеянных e^\pm .

- У вакуумной камеры ВЭПП-2000 (А) толщина стенки **10 мм** стали. Большое количество вещества на пути рассеянных e^\pm из-за малого угла пересечения стенки .
- Вакуумная камера с бериллиевым окном (Б) толщиной **5 мм** позволит выводить рассеянные e^\pm от $\gamma\gamma$ процессов с инвариантной массой $W_{\gamma\gamma} \geq 200$ МэВ.
- Для регистрации e^\pm от процесса $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\pi^0$ необходимо дополнительное окно (В).



Двухфотонные процессы.

По набранным данным можно обработать процессы

- $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\pi^0 (\eta) \rightarrow e^+e^-\gamma\gamma$ с регистрацией рассеянного e^\pm в детекторе.
- $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\eta, \eta \rightarrow 3\pi^0$.
- $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\pi^0\pi^0$.

Система рассеянных электронов необходима для обработки процессов

- $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\pi^0 (\eta) \rightarrow e^+e^-\gamma\gamma$ без регистрации рассеянного e^\pm в детекторе.
- $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\pi^+\pi^-$.

**Для полноценного исследования двухфотонных процессов
необходимо разработать и изготовить
систему регистрации рассеянных электронов.**



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

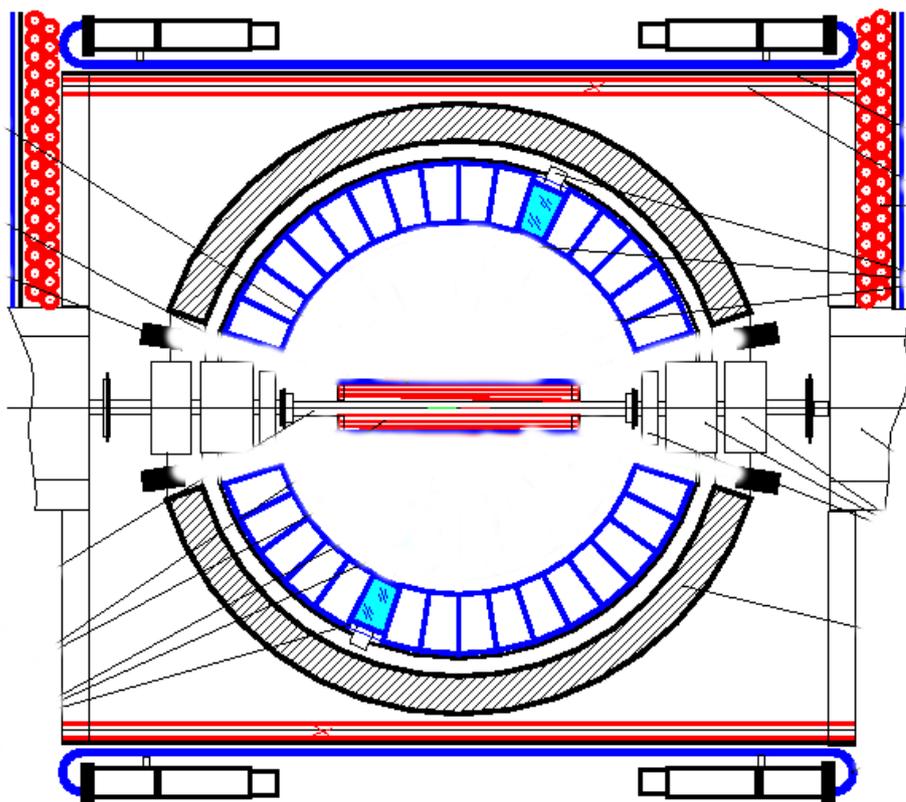
Обработаны данные соответствующие $\mathcal{L}=30$ пб⁻¹, доступно ещё 300 пб⁻¹.

Дальнейший набора данных с современным СНД может уже ничего не добавить к точности измерений сечения $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$ и отношения $|G_E / G_M|$.

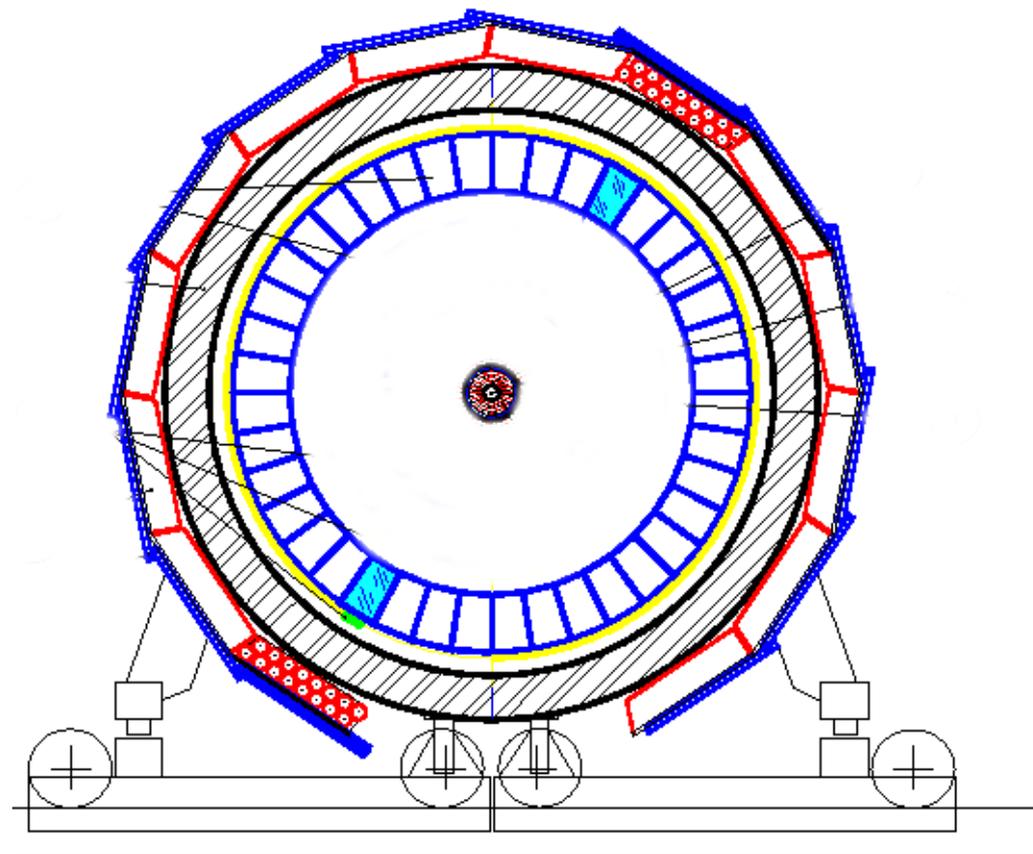
Необходимо улучшить подавление фона. В частности фона от пучка (пучковый фон и фон от физических процессов). Для этого необходимо увеличить время пролёта.



Детектор СЧД для нового эксперимента ИЯЭ.



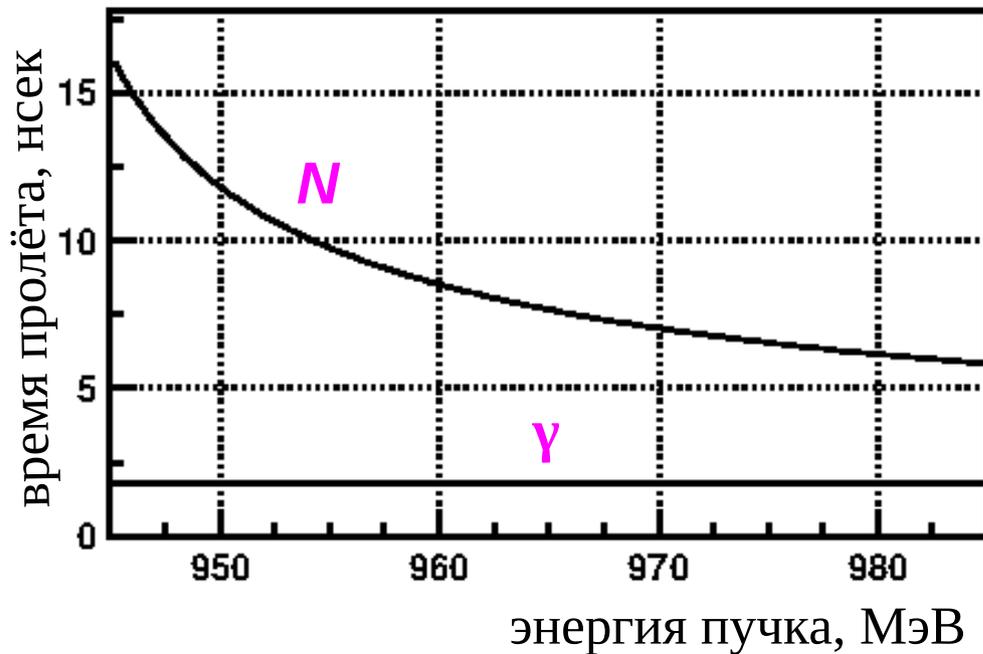
0 20 40 60 80 100 cm



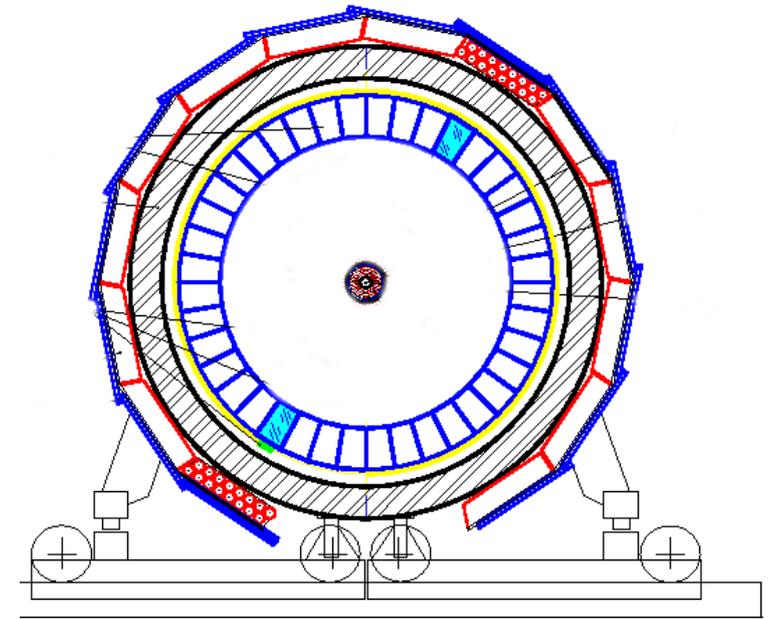
Если убрать **I** и **II** слои калориметра, то расстояние от места встречи до калориметра увеличится в **2** раза и составит **52 см**. При этом толщина калориметра сократится в **2** раза.



Детектор СНД для нового эксперимента $n\bar{n}$.



Зависимость времени пролёта нуклона от энергии пучка. Прямая линия – время пролёта γ -кванта. При временном разрешении калориметра 2 нсек сигнал n с энергией 945 МэВ отделяется от фона на 5σ .



Вероятность аннигиляции n с энергией 945 МэВ до середины калориметра составляет 80% (длина счётчика 15 см). Среднее энерговыделение около 1000 МэВ.

Неопределённость в эффективности регистрации.

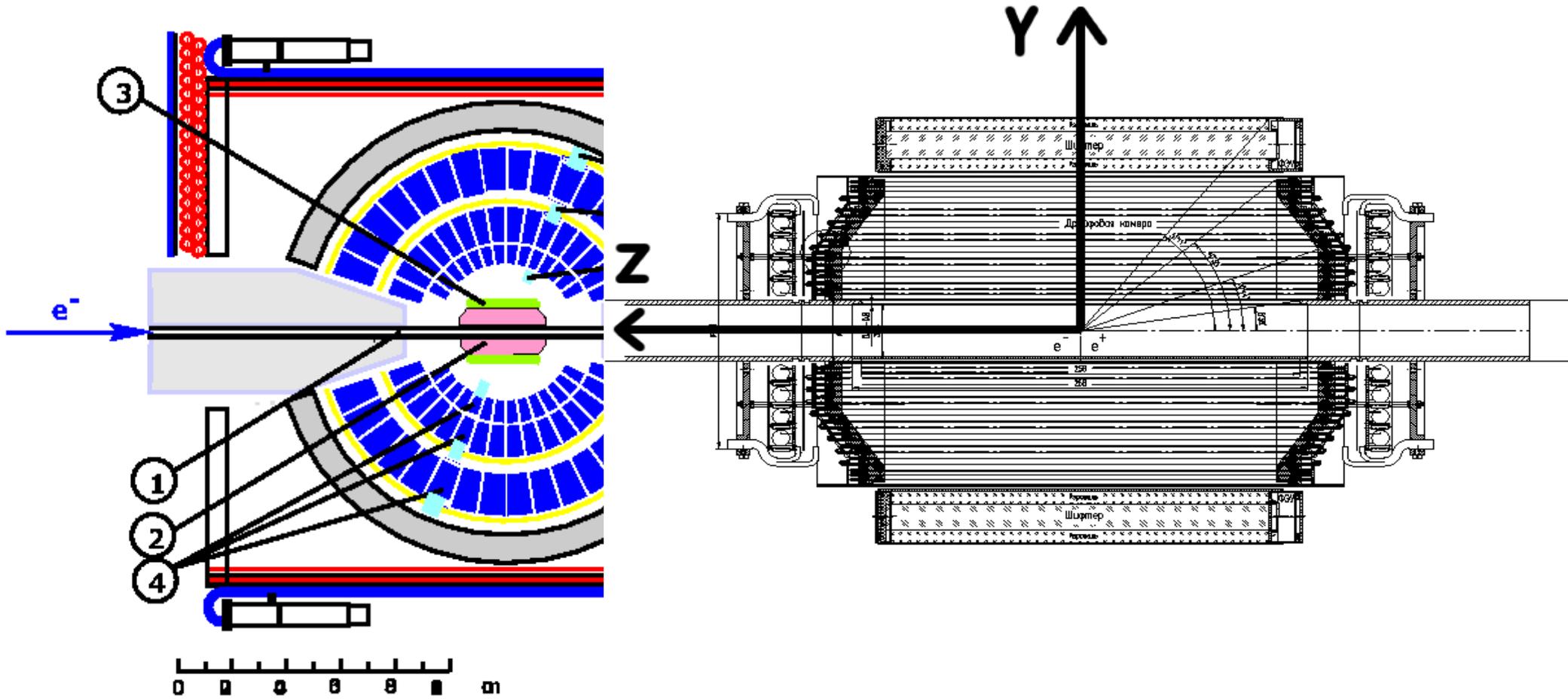
Измерение сечения $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$?

Детектор симметричен по углу.

Можно измерять отношение $|G_E / G_M|$!



Детектор СЧД для нового эксперимента пп. Трековая система.

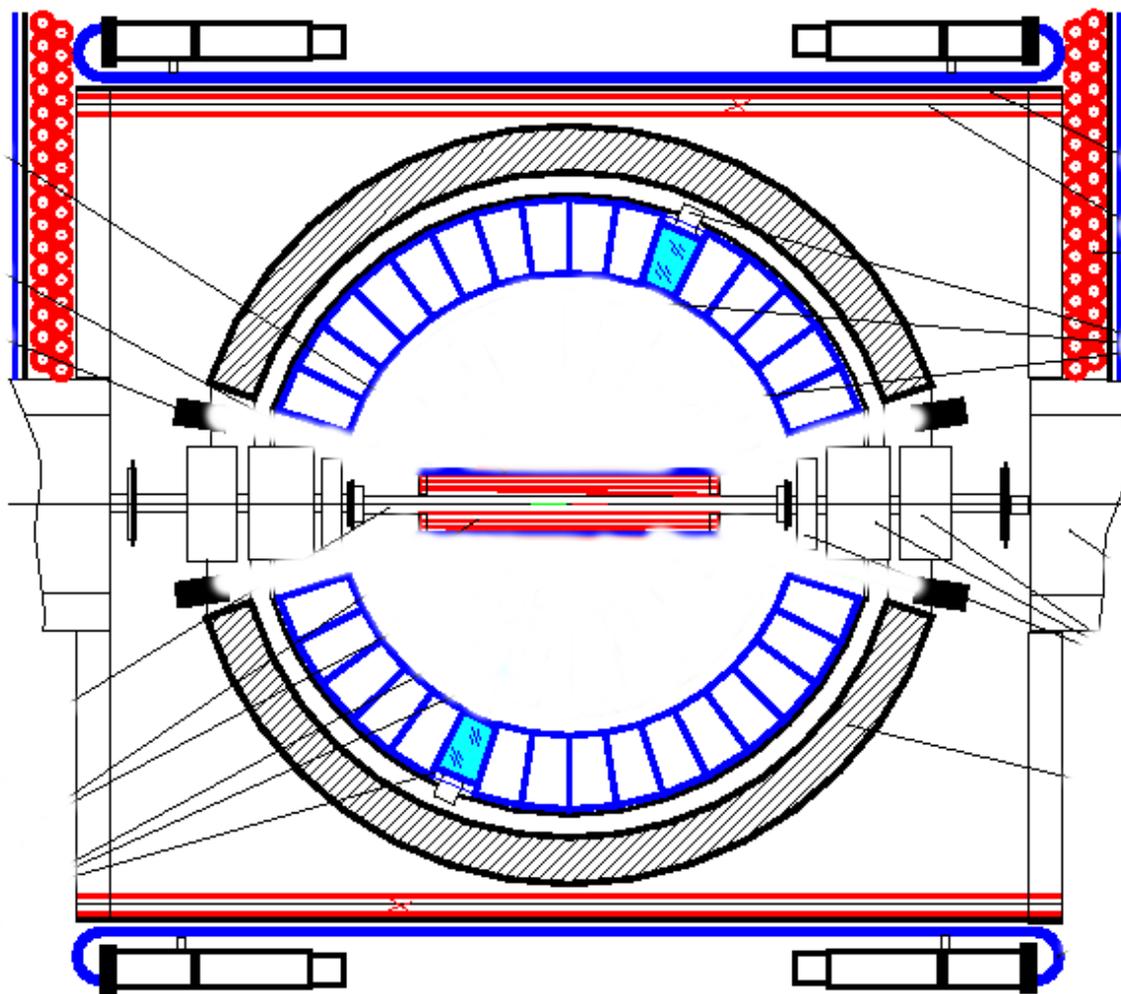


Дрейфовая камера короткая. Торцы перекрывают $2 \times 18^\circ$ углового размера по θ .

Для улучшения однородности необходима новая трековая система.



Детектор СЧД для нового эксперимента пп. Трековая система.

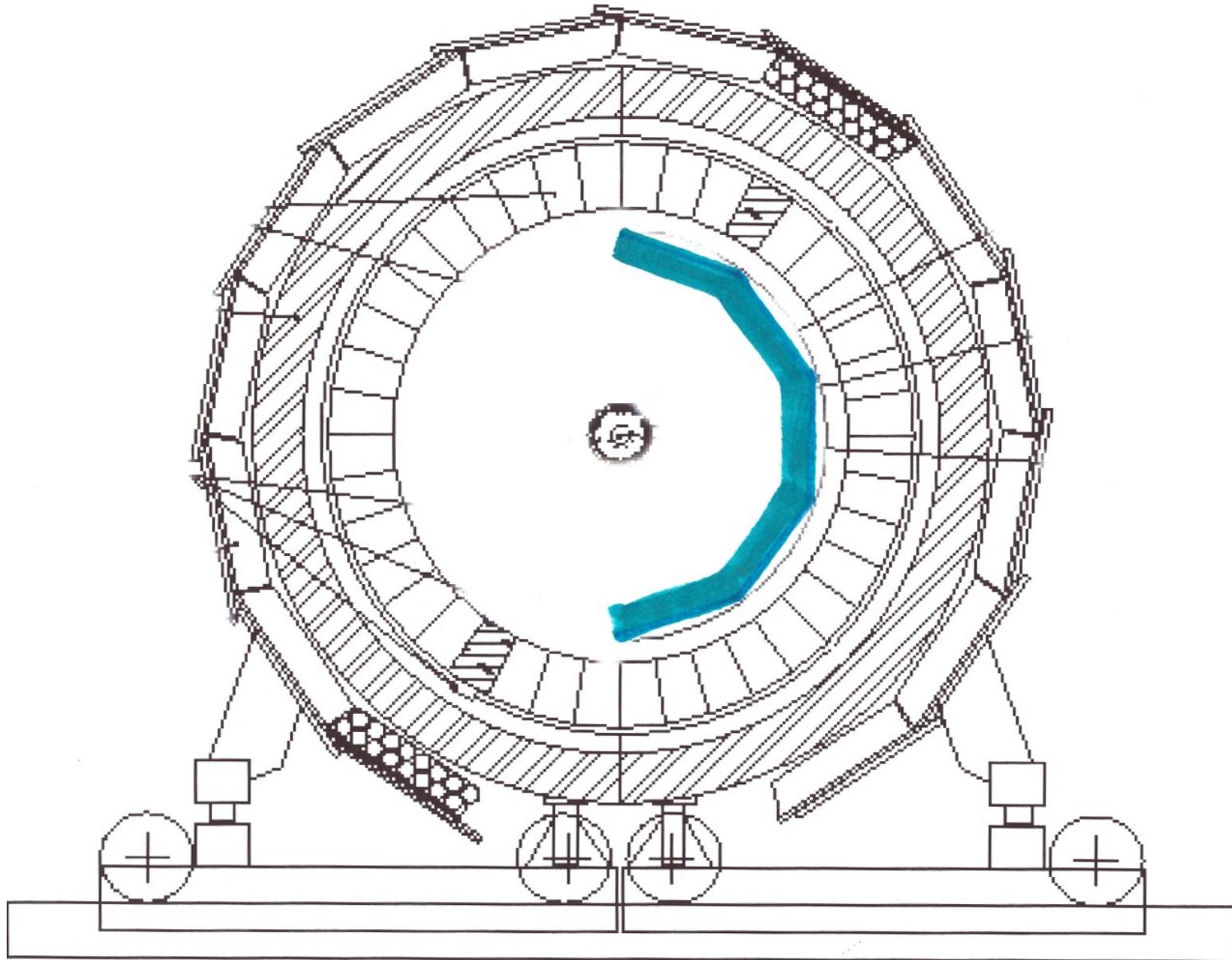


«Новая» трековая система:
запасная длинная
дрейфовая камера для
эксперимента СЧД на
ВЭПП-2М
(длина **40 см**, внутренний и
внешний диаметры
4 и 12 см соответственно).

0 20 40 60 80 100 cm



Детектор СЧД для нового эксперимента пп. Детектор нейтронов.





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

- Новый эксперимент СНД на коллайдере ВЭПП-2000 по измерению отношения $|G_E / G_M|$ в процессе $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$, основан на измерении времени пролёта нуклонов.
- Изменения в устройстве СНД:
 - 1) Убрать внутренние (I и II) слои калориметра;
 - 2) Заменить **трековую систему**;
 - 3) Создать **детектор нейтронов**.
- Этап обсуждения эксперимента.



ВЭПП-3000 ?

Расширение области энергии **ВЭПП-2000** до **1,5 ГэВ** в пучке.

Потребуется разработки новых (на основе сверхпроводников ?) дипольных магнитов.

Даёт возможность ИЯФу оставаться ведущим центром по изучению аннигиляции в адроны в области низкой энергии, состояний из лёгких **u**, **d**, **s** кварков.

Способствует созданию новых детекторов. Получит развитие экспериментальная школа ИЯФ по физике частиц.

Область низких энергий доступна для изучения методом **ISR** на **e⁺e⁻** фабриках (дополняющие исследования).

BES-III $IL=600$ пб⁻¹ в области энергии **2 – 3,08 ГэВ**.