

КМД-3 (Криогенный Магнитный Детектор)



Попов А.С.

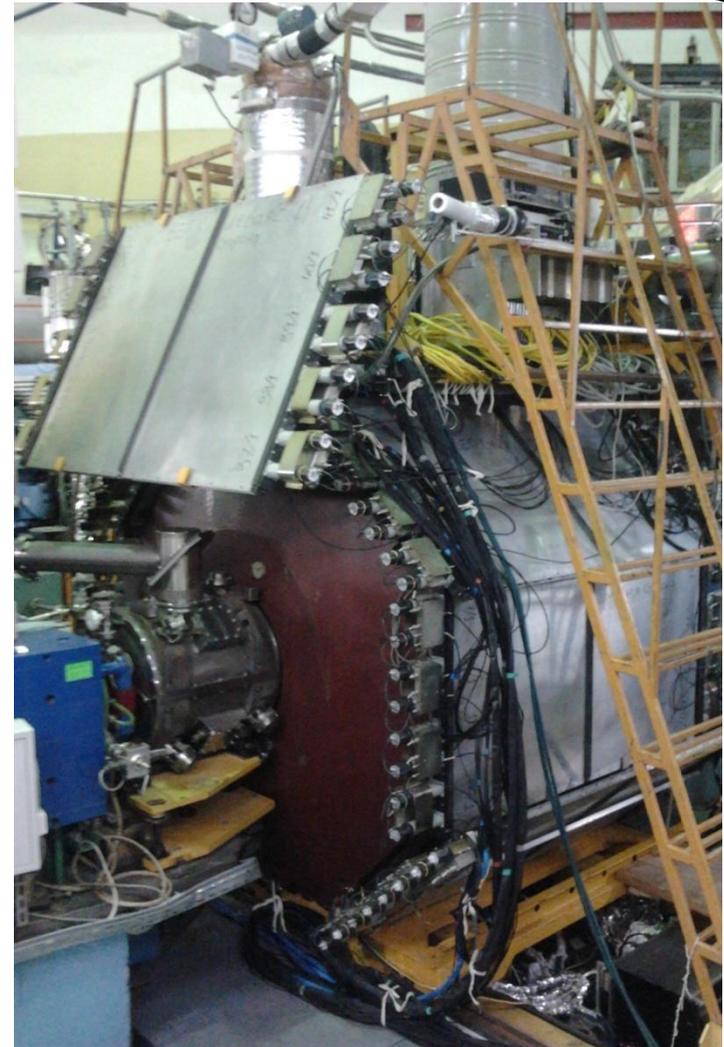
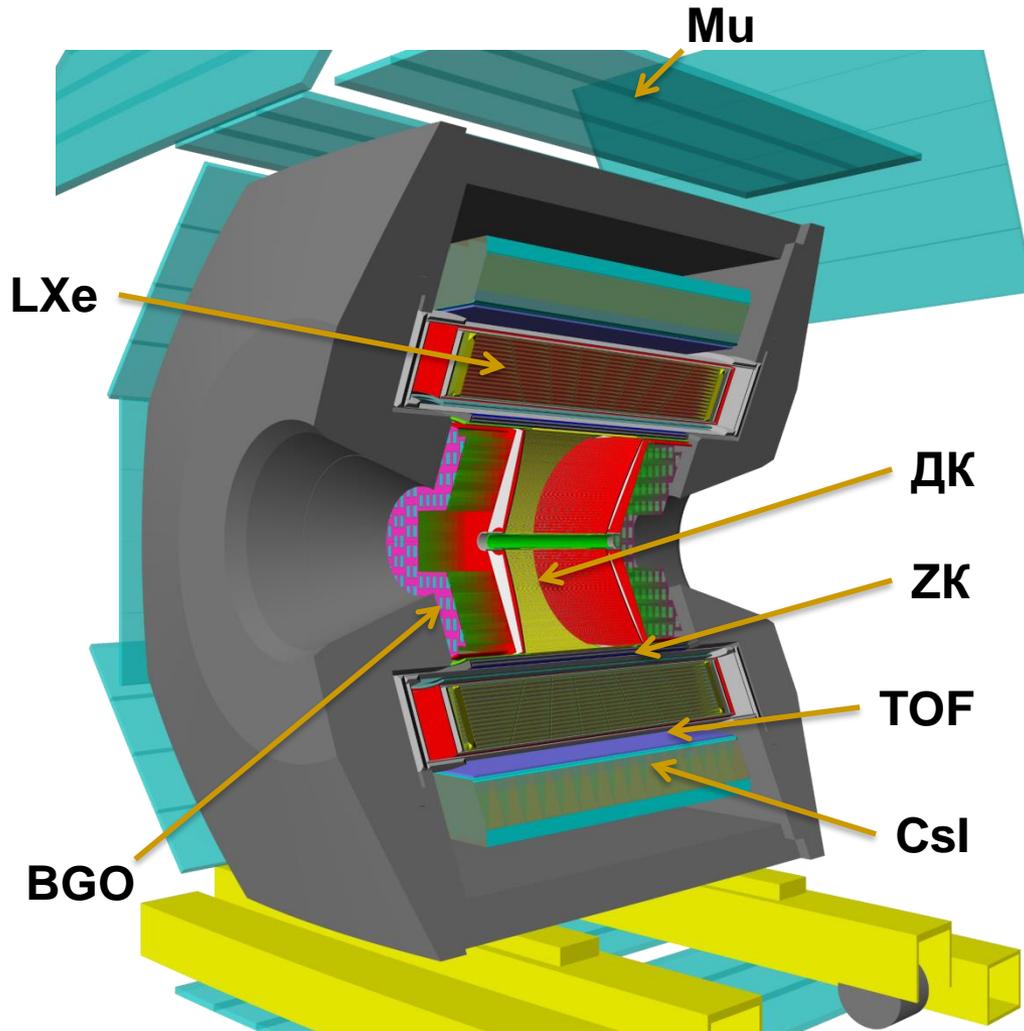
Научная сессия ИЯФ, 26 февраля 2026

F.V. Ignatov^{a,b,1}, R.R. Akhmetshin^{a,b}, A.N. Amirkhanov^{a,b}, A.V. Anisenkov^{a,b},
V.M. Aulchenko^{a,b}, N.S. Bashtovoy^a, D.E. Berkaev^{a,b}, A.E. Bondar^{a,b}, A.V. Bragin^a,
S.I. Eidelman^{a,b}, D.A. Epifanov^{a,b}, L.B. Epshteyn^{a,b,c}, A.L. Erofeev^{a,b}, G.V. Fedotov^{a,b},
A.O. Gorkovenko^{a,c}, F.J. Grancagnolo^e, A.A. Grebenuk^{a,b}, S.S. Gribanov^{a,b},
D.N. Grigoriev^{a,b,c}, V.L. Ivanov^{a,b}, S.V. Karpov^a, A.S. Kasaev^a, V.F. Kazanin^{a,b},
B.I. Khazin^a, A.N. Kirpotin^a, I.A. Koop^{a,b}, A.A. Korobov^{a,b}, A.N. Kozyrev^{a,c},
E.A. Kozyrev^{a,b}, P.P. Krokovny^{a,b}, A.E. Kuzmenko^a, A.S. Kuzmin^{a,b}, I.B. Logashenko^{a,b},
P.A. Lukin^{a,b}, A.P. Lysenko^a, K.Yu. Mikhailov^{a,b}, I.V. Obraztsov^{a,b}, V.S. Okhapkin^a,
A.V. Otboev^a, E.A. Perevedentsev^{a,b}, Yu.N. Pestov^a, A.S. Popov^{a,b}, G.P. Razuvaev^{a,b},
Yu.A. Rogovsky^{a,b}, A.A. Ruban^a, N.M. Ryskulov^a, A.E. Ryzhenenkov^{a,b},
A.V. Semenov^{a,b}, A.I. Senchenko^a, P.Yu. Shatunov^a, Yu.M. Shatunov^a, V.E. Shebalin^{a,b},
D.N. Shemyakin^{a,b}, B.A. Shwartz^{a,b}, D.B. Shwartz^{a,b}, A.L. Sibidanov^{a,d}, E.P. Solodov^{a,b},
A.A. Talyshev^{a,b}, V.A. Timoshenko^a, V.M. Titov^a, S.S. Tolmachev^{a,b}, A.I. Vorobiov^a,
I.M. Zemlyansky^a, D.S. Zhadan^a, Yu.M. Zharinov^a, A.S. Zubakin^a, Yu.V. Yudin^{a,b}

Коллектив ~50 человек

Лаборатории 2, 3-3, 3-13,...

Детектор КМД-3



Магнино-Криогенная система

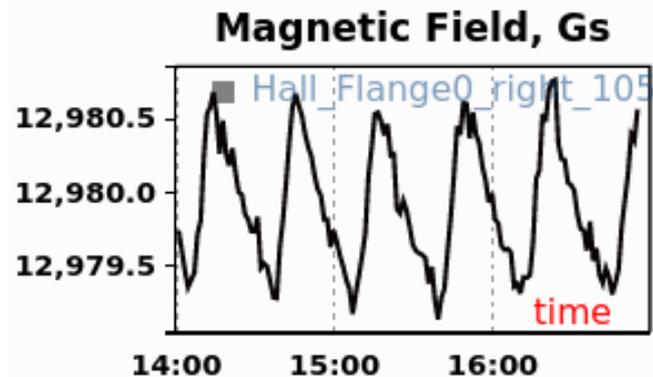


Переделка подачи азота, расход 260->190->140 кг/сутки
Экономия :

- На испарении – 110 кг/сут, 3.3 т/месяц
- На уменьшении частоты заливок – около 2 т/месяц



Системы заливки гелия, поддержания поля работают стабильно

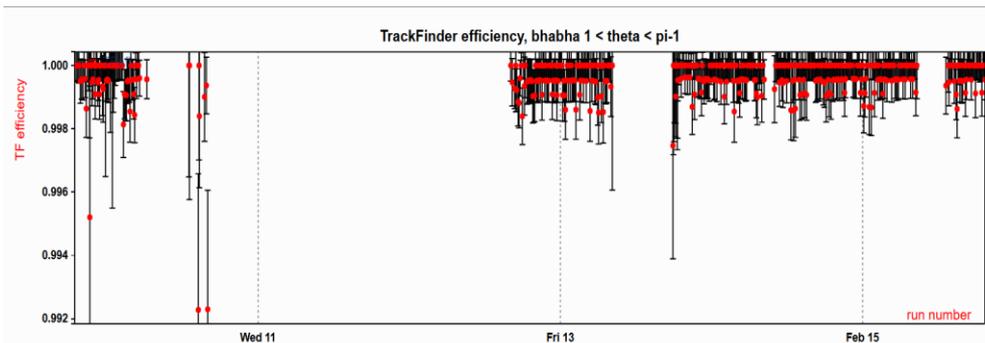
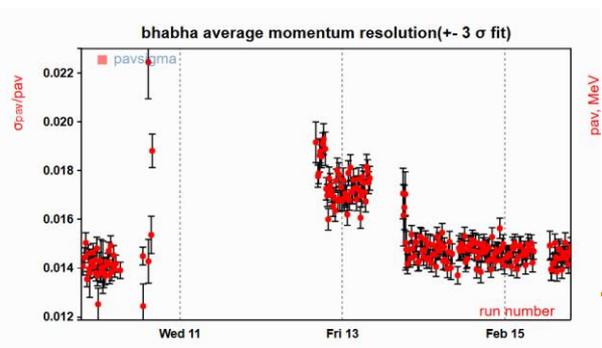
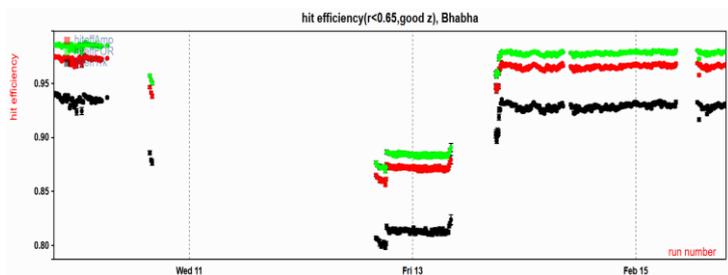
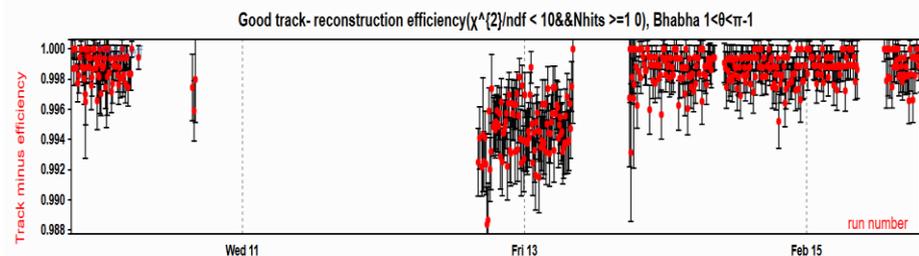
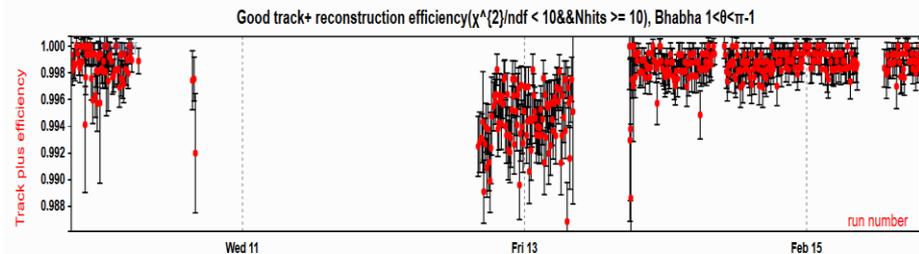
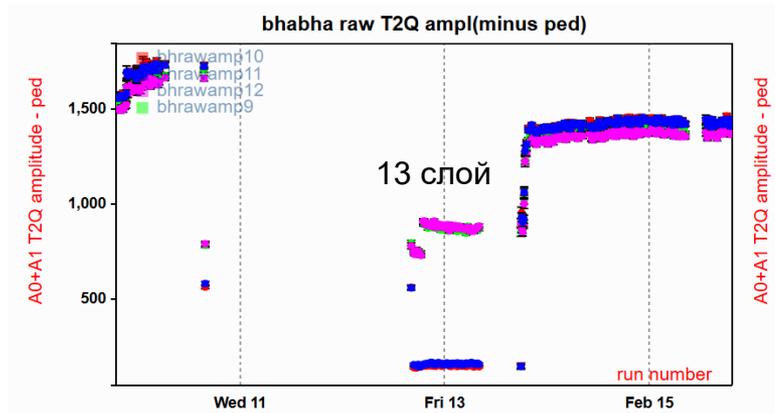


Магнино-Криогенная система

Авария электропитания 19.01.2026

- Отключение питания с 9:55 до 11:08 в ИЯФ и Нижней зоне.
- Впервые открывали прямой сброс гелия с экранов в атмосферу (с 10:30 до 11:30), поскольку криогенная станция не принимала гелий.
- Срыва не было.
- Вакуум в соленоиде с закрытыми шиберами (без откачки) у соленоида был $3 \cdot 10^{-5}$ Па, у СП трансформатора в 10 раз лучше. Потенциально это означает, что возможна работа без непрерывной откачки вакуума.
- По итогам аварии переработана инструкция для дежурных.
- LHe система так же доработана для повышения автономности до нескольких часов
- Дорабатывается система аварийного слива в хранище

Дрейфовая Камера



Работоспособность восстановили, но...
Пока слой вылечился, причина во влажности

ЛХе, Работоспособность на 25.02.2026:

Башни: Одна башня не работает с рождения детектора.
Две башни зашунтированы внутри детектора –
сигнал делится между башнями. (апрель 2023)
Одна башня со сниженной амплитудой (декабрь 2025)

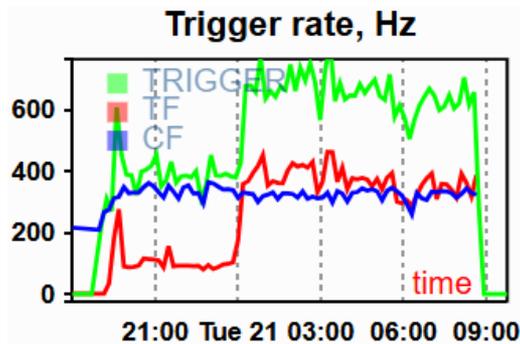
ИТОГО 4 проблемные башни из 264 (1.5 %)

Полоски: 2 обрыв внутри
2 шунт внутри (?)
6-7 контакты во внешних разъемах DB-62

ИТОГО 11 проблемные полосок из 2112 (1.5 %)

Полностью подавлена звуковая наводка (из-за потока азота)

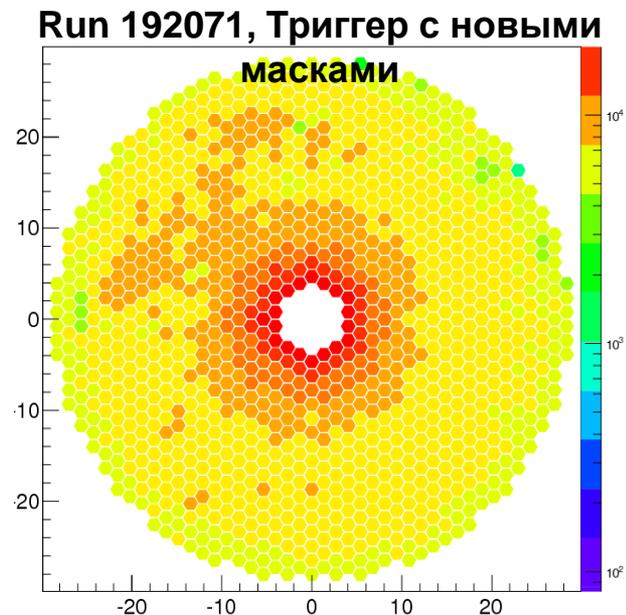
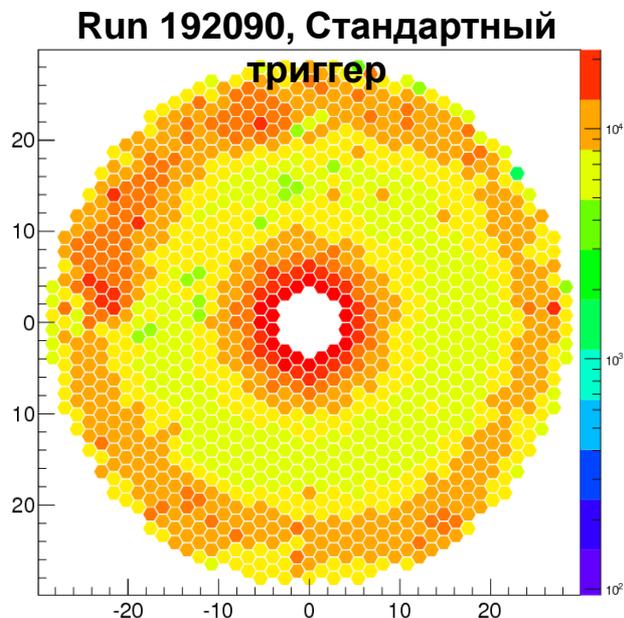
Триггерная Система-Новый Блок



Идея: 4-х кратные совпадения по внешним слоям

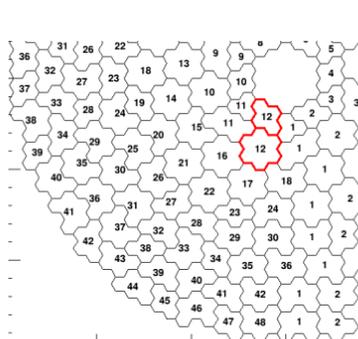
Предварительный результат:

- Сокращение фона на 40%
- Загрузка «Заряженного» триггера сократилась в ~5 раз
- Мертвое время сократилось ~1-2% (очень грубо)

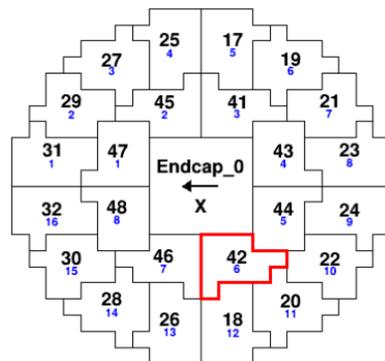


Триггерная Система-Новый Блок

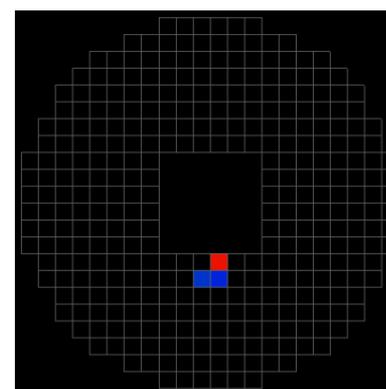
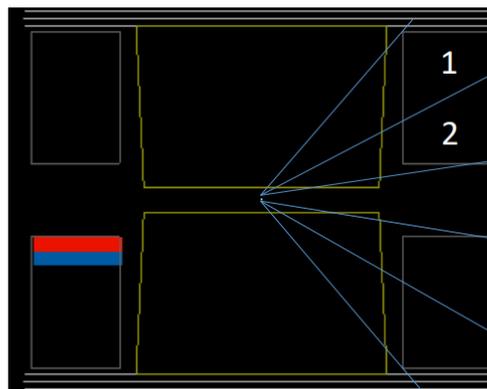
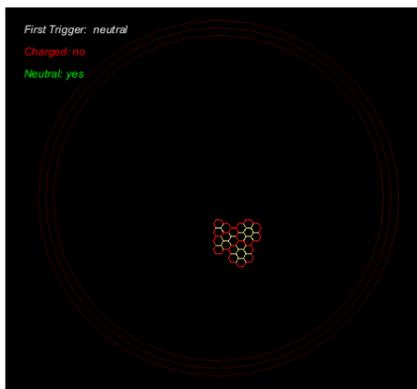
Отбор треков под малыми углами



+



Описание	Кол-во масок	Загрузка
2 слоя ДК и VGO	400 шт	~ 400 Гц
3 слоя ДК и VGO	700 шт	~ 80 Гц
4 слоя ДК и VGO	800 шт	~ 5 Гц



Электроника

Блок Приема и Передачи Данных(БППД 3.0)

Многофункциональный узел ССД КМД-3. Выполняет роль концентратора/разветвителя. Это мост между C-Link-ом и Ethernet-ом.



- 30 каналов C-Link типа Down-Link
- 1 канал C-Link типа Up-Link
- Одноплатный микрокомпьютер
- USB2.0 (480Мбит/с)
- Ethernet 100Мбит/с



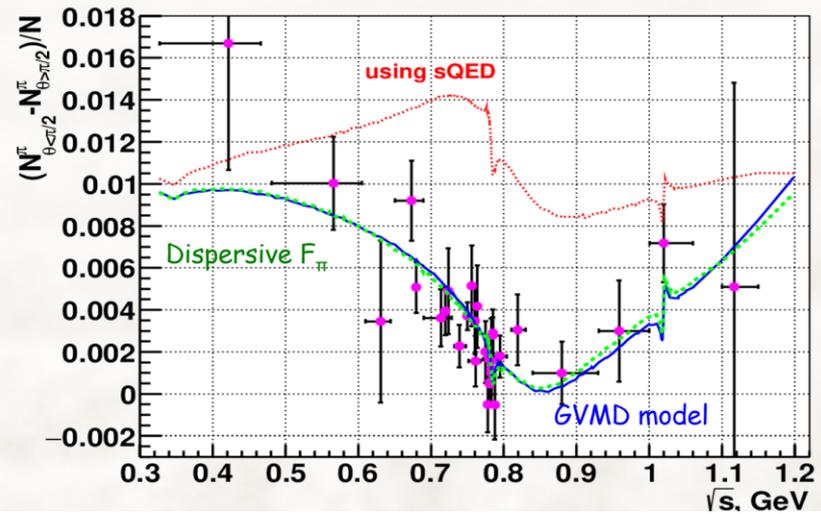
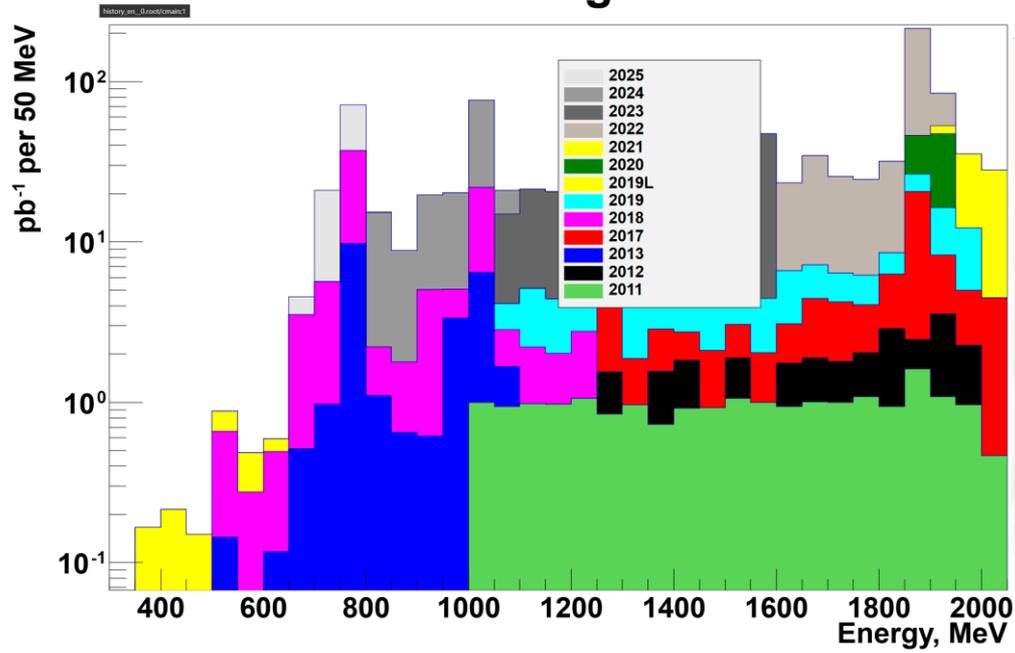
До 3 кГц

Позволяет высвободить старые блоки, в запас

История набора статистики



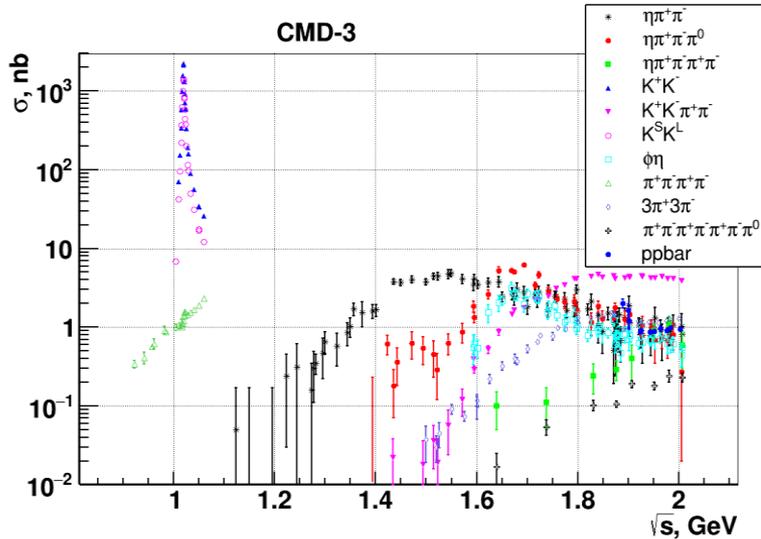
CMD-3 integral



Цель:

- Проверить зарядовую асимметрию
- Формфактор пиона
- Редкие процессы на \mathbf{r} и \mathbf{w}

Анализ данных

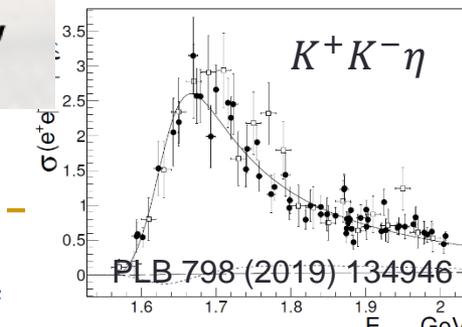
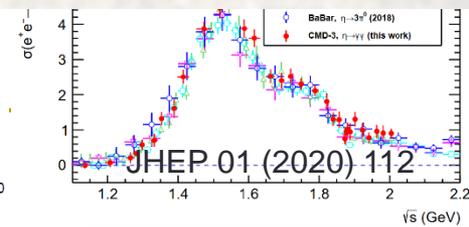
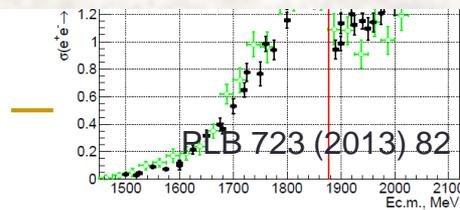
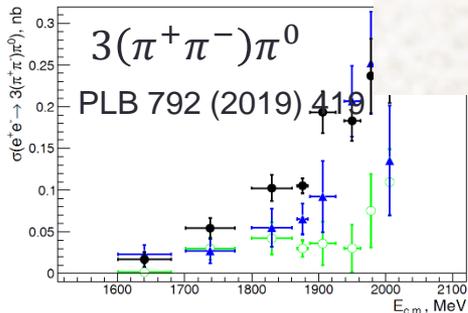
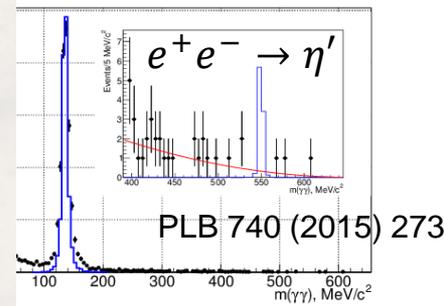
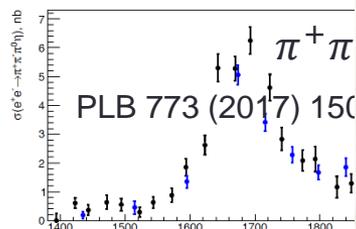
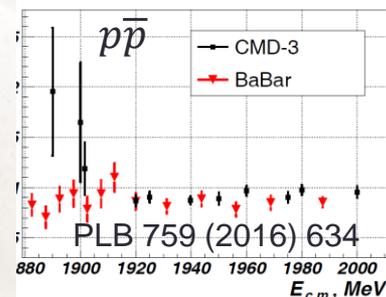
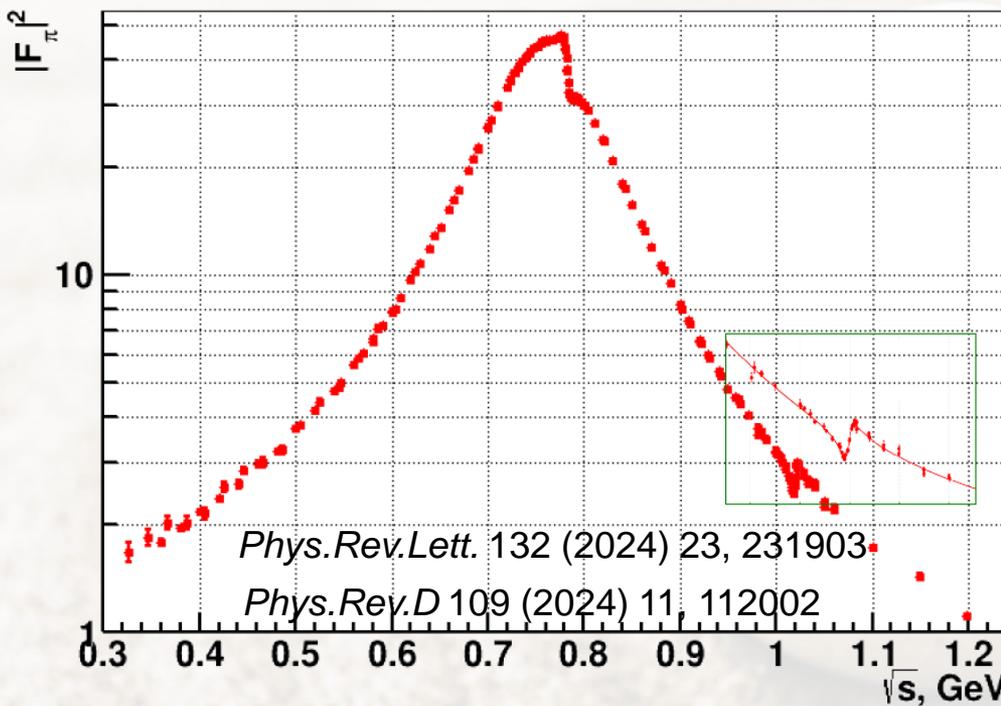
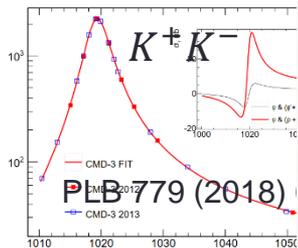
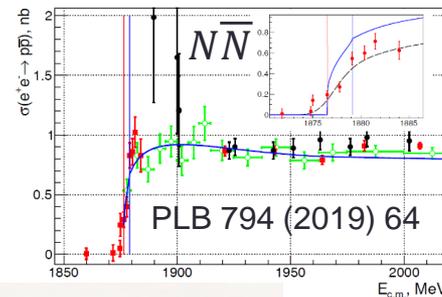
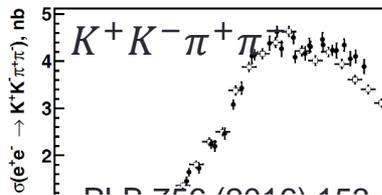
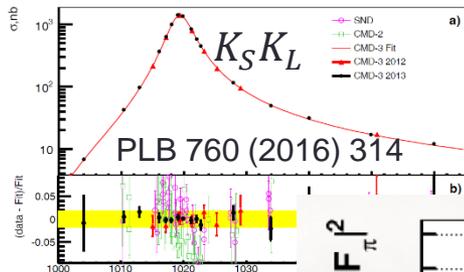


Ведется независимый анализ данных для каждого конечного состояния (десятки)

Скорость получения результатов определяется количеством людей, занимающихся анализом

Signature	Final states (preliminary, published)
2 charged	$\pi^+\pi^-, K^+K^-, K_S K_L, p\bar{p}$
2 charged + γ 's	$\pi^+\pi^-\gamma, \pi^+\pi^-\pi^0, \pi^+\pi^-2\pi^0, \pi^+\pi^-3\pi^0, \pi^+\pi^-4\pi^0, \pi^+\pi^-\eta, \pi^+\pi^-\pi^0\eta, \pi^+\pi^-2\pi^0\eta, K^+K^-\pi^0, K^+K^-2\pi^0, K^+K^-\eta, K_S K_L\pi^0, K_S K_L\eta$
4 charged	$2(\pi^+\pi^-), K^+K^-\pi^+\pi^-, K_S K^\pm\pi^\mp$
4 charged + γ 's	$2(\pi^+\pi^-)\pi^0, 2\pi^+2\pi^-2\pi^0, \pi^+\pi^-\eta, \pi^+\pi^-\omega, 2\pi^+2\pi^-\eta, K^+K^-\omega, K_S K^\pm\pi^\mp\pi^0$
6 charged	$3(\pi^+\pi^-), K_S K_S\pi^+\pi^-$
6 charged + γ 's	$3(\pi^+\pi^-)\pi^0$
Neutral	$\pi^0\gamma, 2\pi^0\gamma, 3\pi^0\gamma, \eta\gamma, \pi^0\eta\gamma, 2\pi^0\eta\gamma$
Other	$n\pi, \pi^0e^+e^-, \eta e^+e^-$
Rare decays	$\eta', D^*(2007)^0$

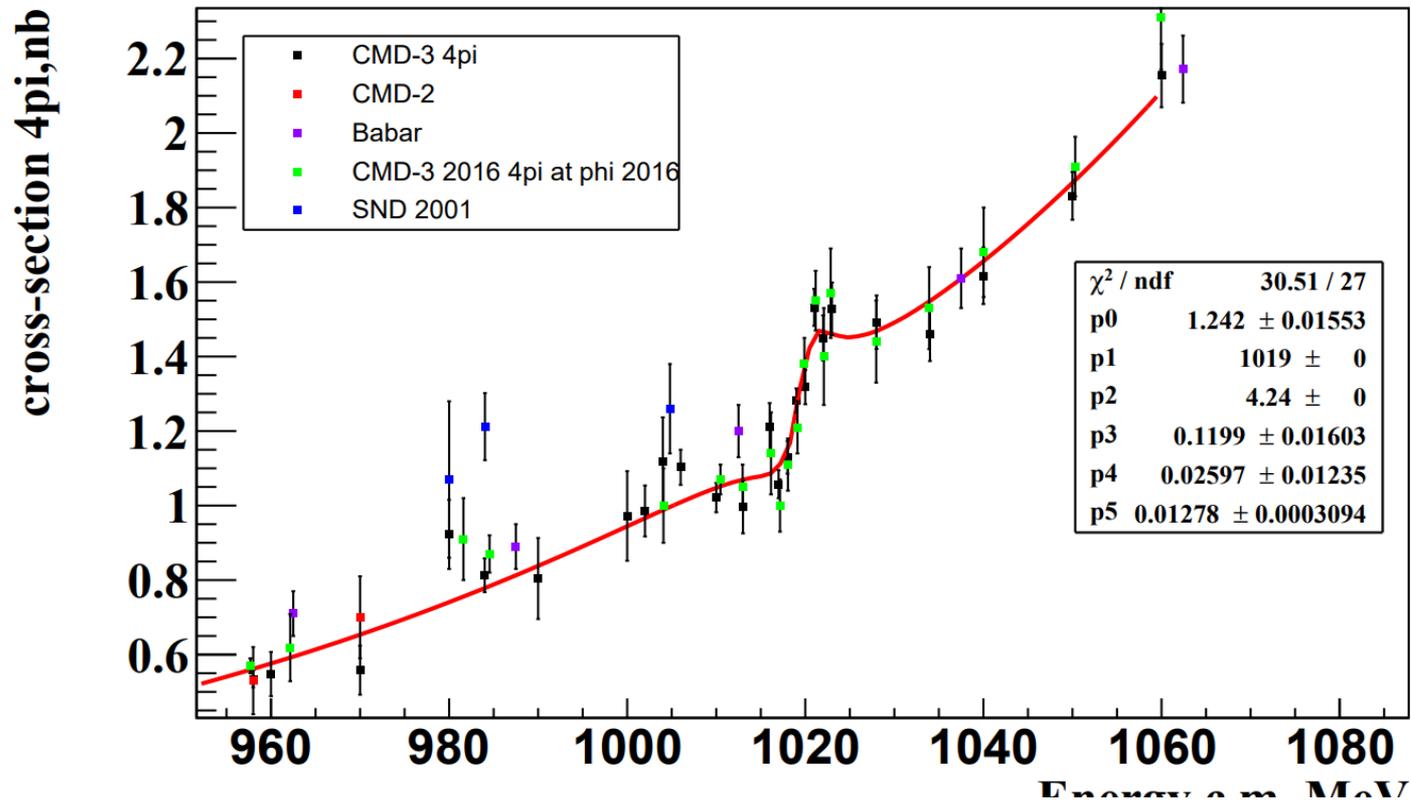
CMD-3 published results



Сечение $e + e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+ \pi^-$: ϕ мезон

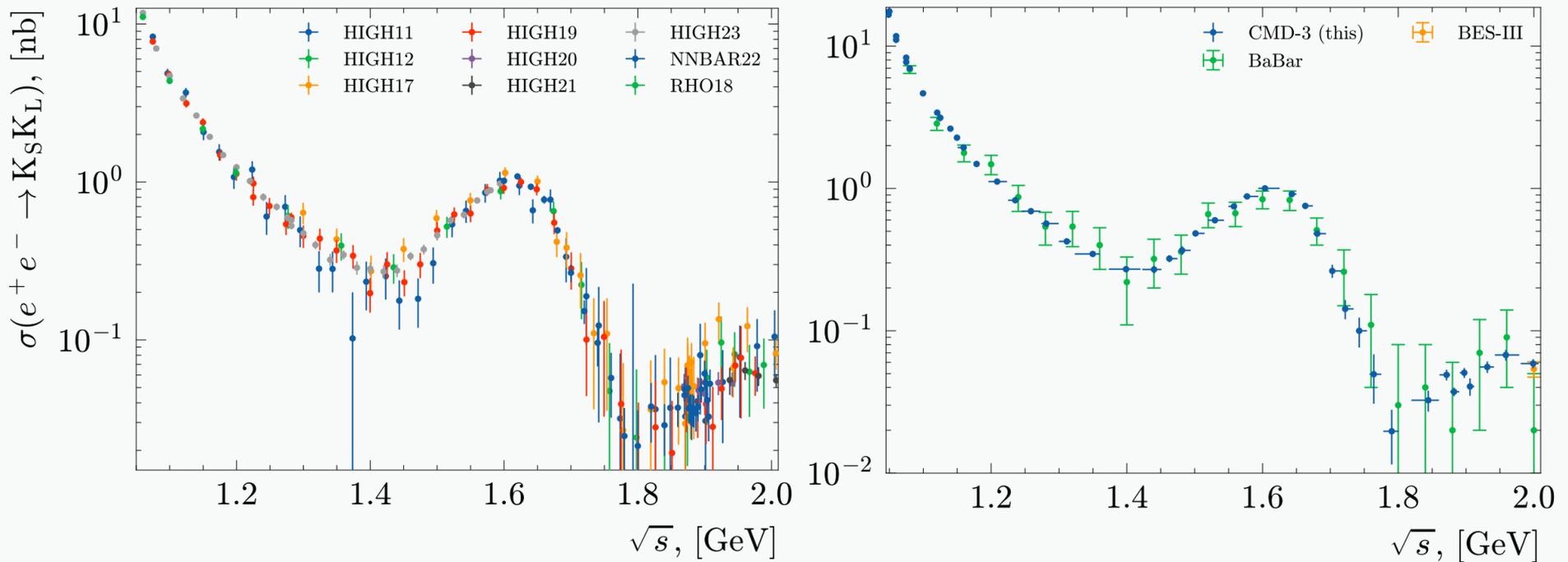
Предварительно:

Energy dependence of cross-section $2\pi+2\pi$



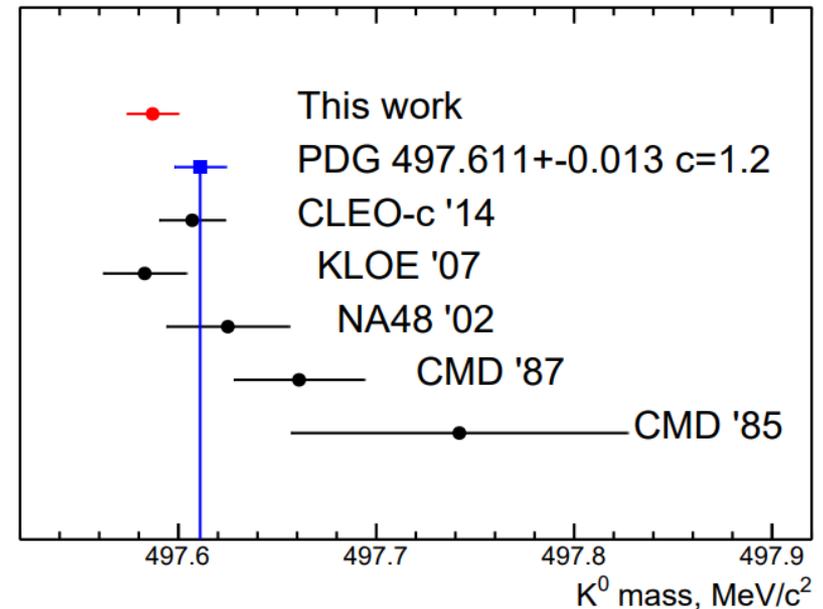
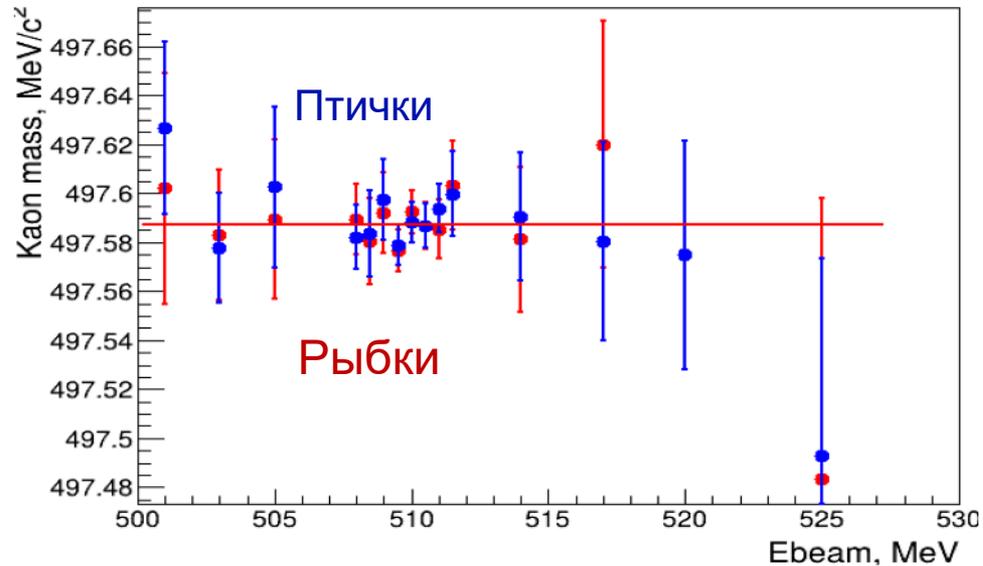
- Анализ закончен, ожидаем драфт статьи

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



Статья на стадии внутреннего реферирования.

Измерение массы K_s по предельному углу



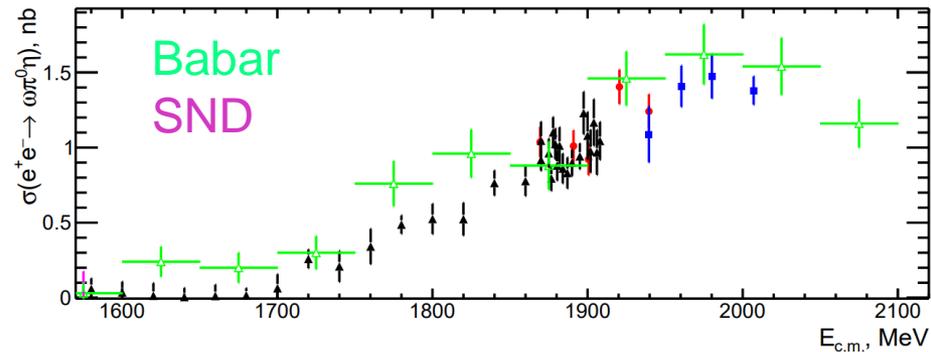
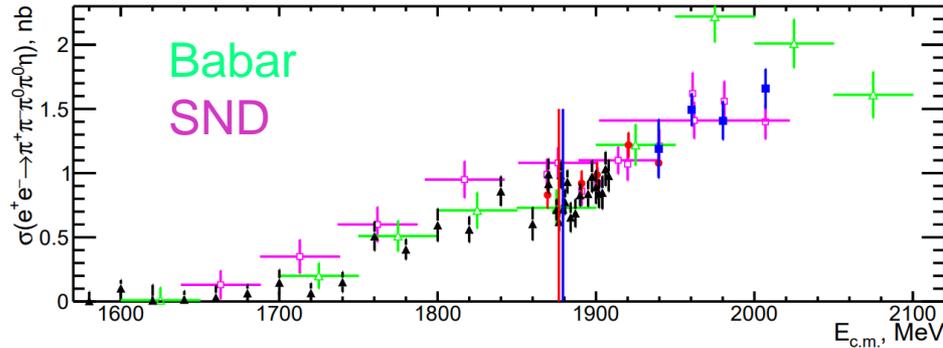
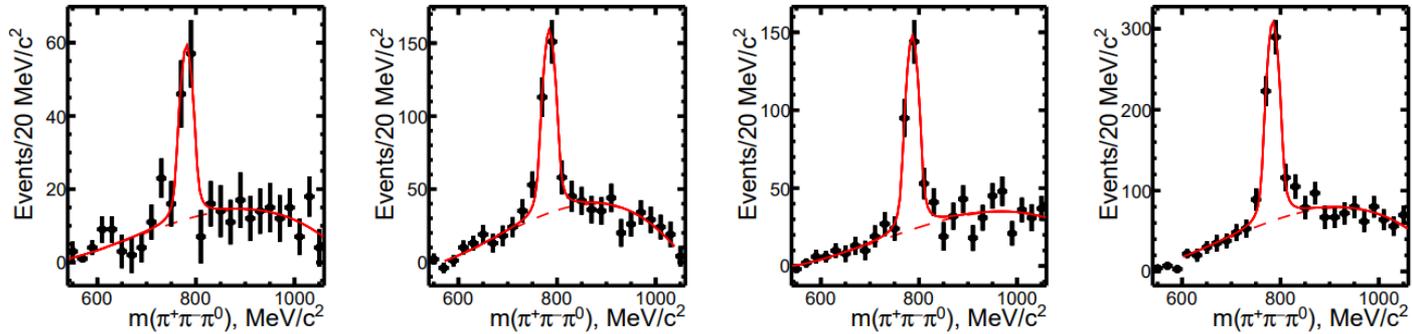
Эффекты:

- Поправки на углы
- Ионизационные потери пионов
- Излучение

$$M(K_s) = [497.587 \pm 0.004(\text{stat}) \pm 0.012(\text{syst})] \text{ MeV}/c^2$$

Статья на стадии реферирования

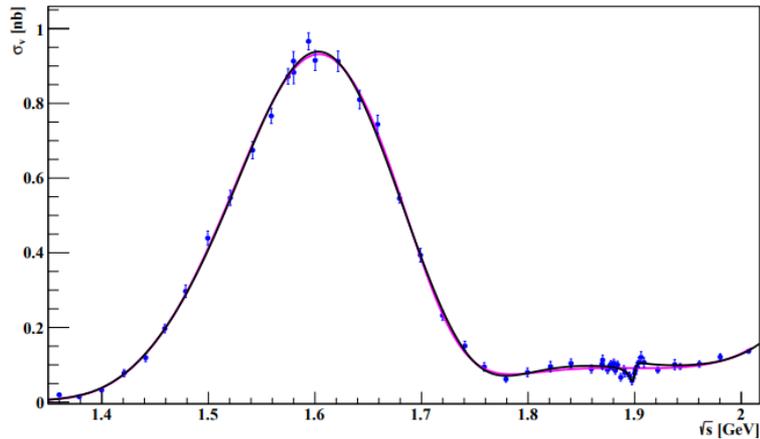
Измерение сечения $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0\eta$



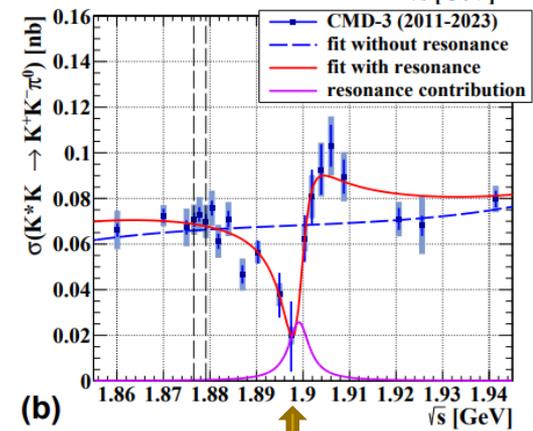
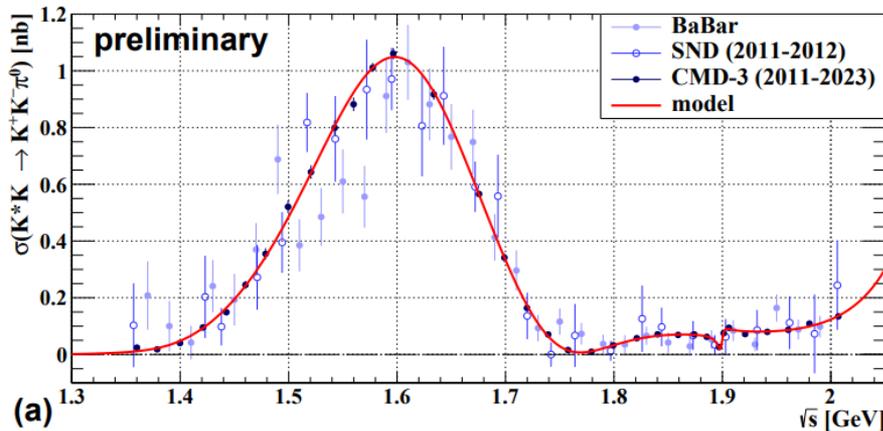
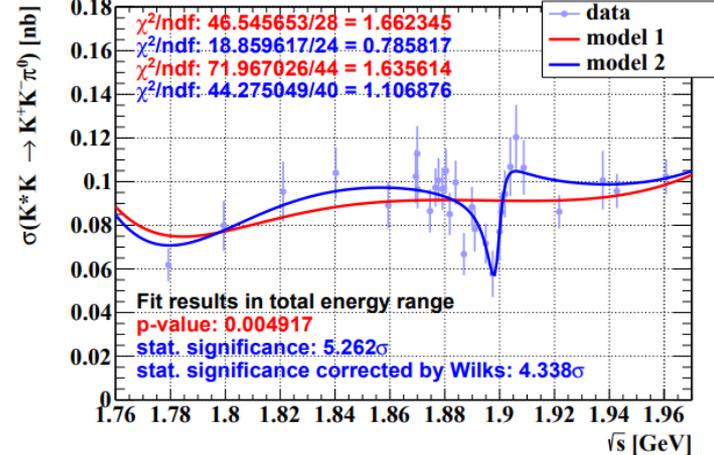
Статья на стадии реферирования

Анализ процесса $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^0$

Видимое сечение $\sigma_v = N/\varepsilon L$ в полном диапазоне \sqrt{s}

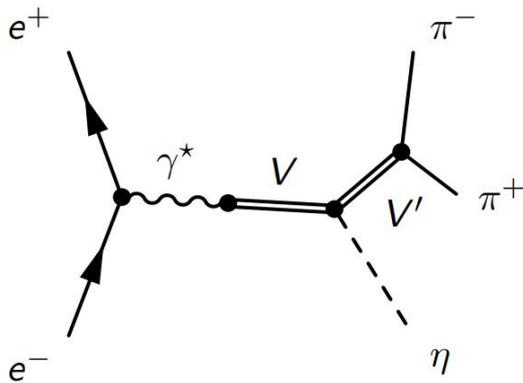


Видимое сечение $\sigma_v = N/\varepsilon L$ в области структуры



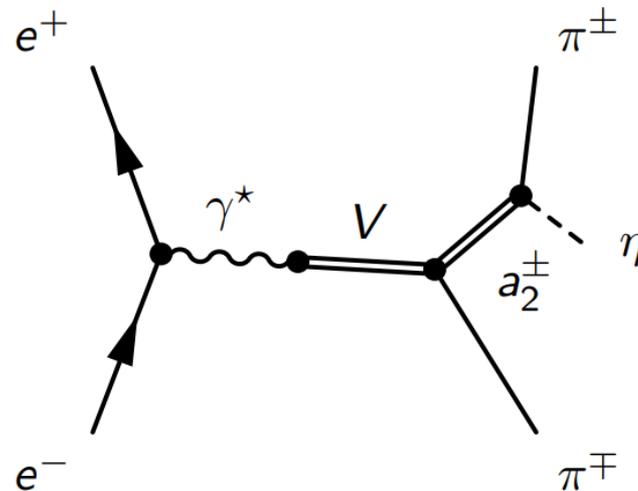
Значительно выше порога PРbar

Амплитудные анализ $\eta\pi + \pi -$



$$\mathcal{M}_{V'\eta}^{\text{P-wave}} \propto \text{BW}_{V'}(q^2) e_{\mu\nu\alpha\beta} J_\mu k_\nu p_\alpha^- p_\beta^+,$$

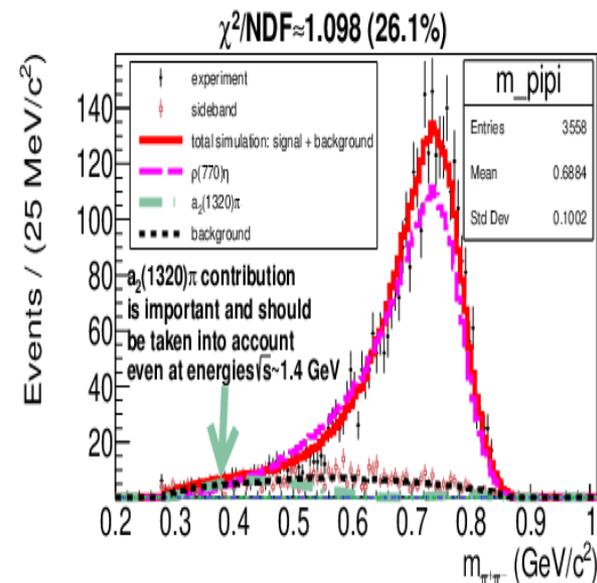
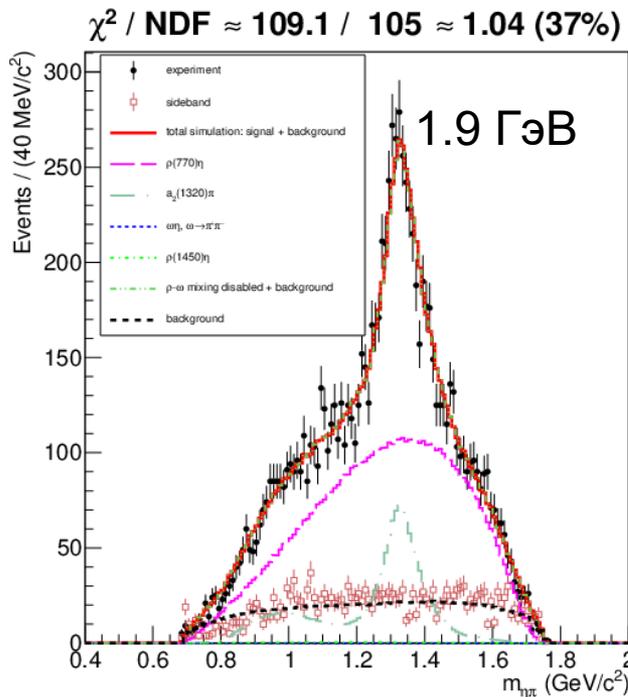
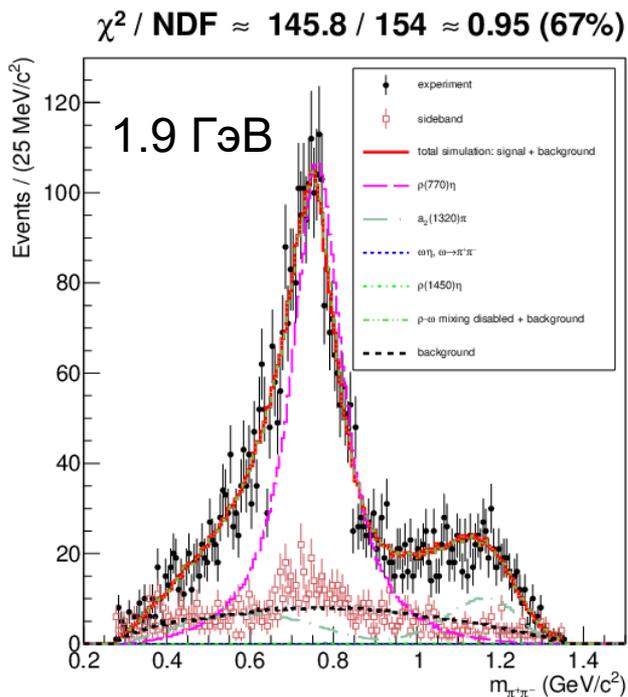
$$q = p^+ + p^-,$$



$$\mathcal{M}_{a_2\pi}^{\text{D-wave}} \propto \left\{ \text{BW}_{a_2}((p^- + k)^2) \left[p^+ p^- - p^+ k + (p^+ p^- + p^+ k) \frac{m_\eta^2 - m_{\pi^\pm}^2}{m_{a_2}^2} \right] + \right.$$

$$\left. + \text{BW}_{a_2}((p^+ + k)^2) \left[p^- p^+ - p^- k + (p^- p^+ + p^- k) \frac{m_\eta^2 - m_{\pi^\pm}^2}{m_{a_2}^2} \right] \right\} e_{\mu\nu\alpha\beta} J_\mu k_\nu p_\alpha^- p_\beta^+$$

Амплитудные анализ $\eta\pi + \pi -$

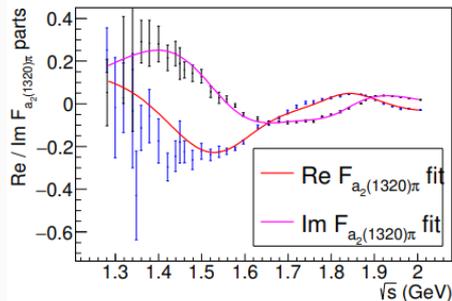
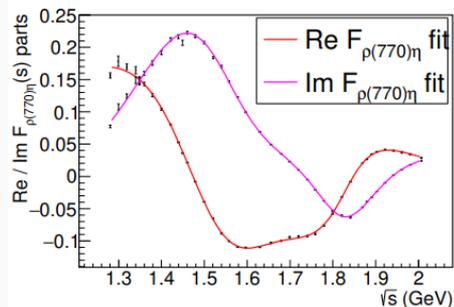
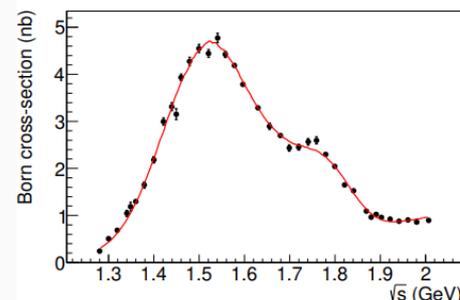
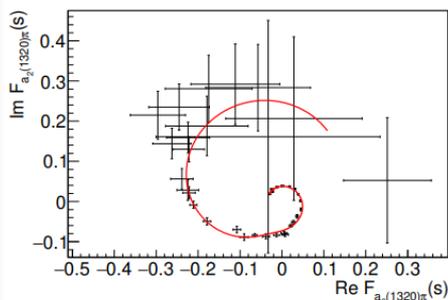
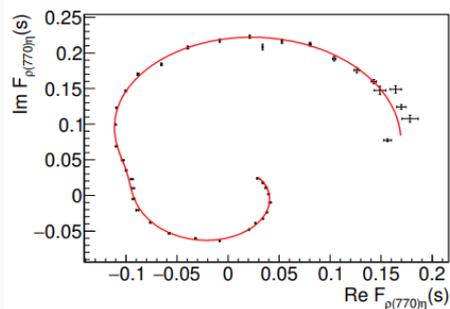


Вклады $\rho\eta, a_2\pi$ и другие

Амплитудные анализ $\eta\pi + \pi -$



фиты коэффициентов в рамках модели векторной доминантности

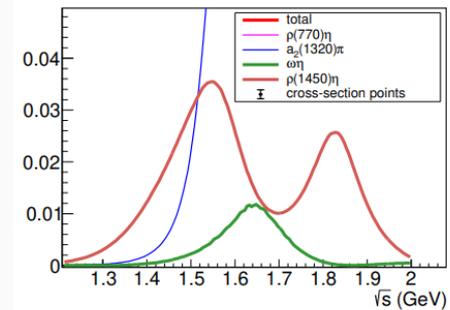
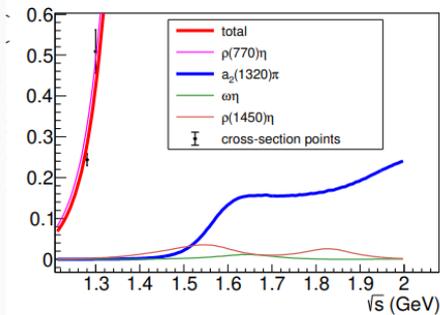
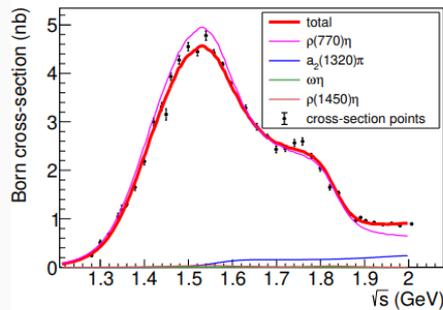


Одновременный фит коэффициентов, полученных из поточечного амплитудного анализа процесса $e^+e^- \rightarrow \eta\pi^+\pi^-$ в модели с промежуточными состояниями $\rho(770)\pi$ и $a_2(1320)\pi$. В s -канале задействованы резонансы $\rho(1450)$, $\rho(1700)$, $\rho(1900)$, $\rho(2140)$.

Амплитудные анализ $\eta\pi + \pi -$

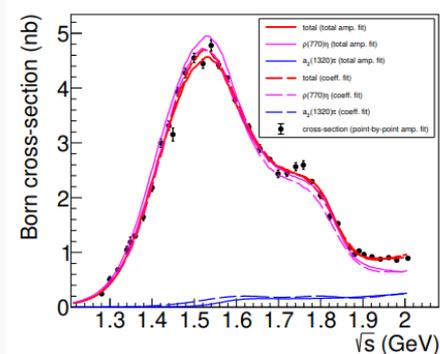
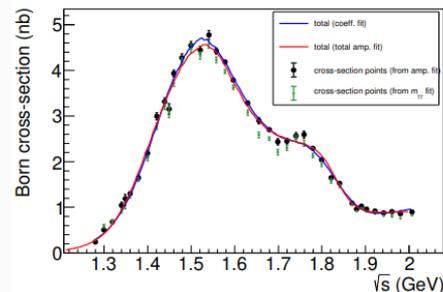


амплитудный фит одновременно во всех энергетических точках (бинах) в рамках модели векторной доминантности (далее: одновременный фит)

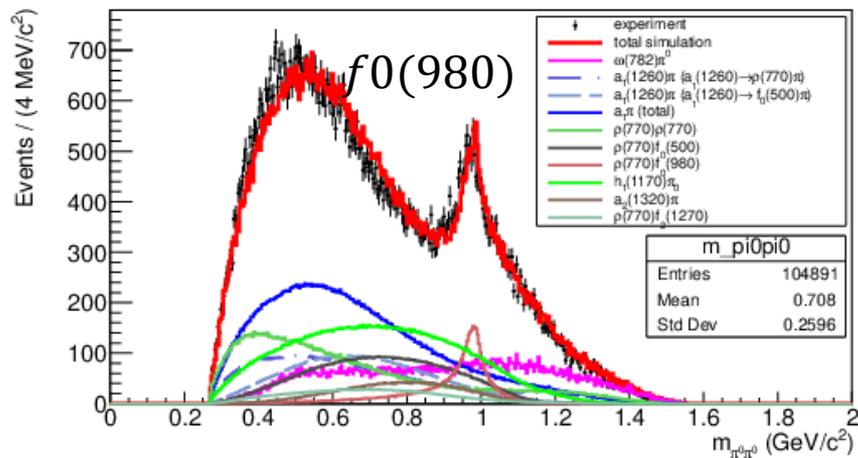
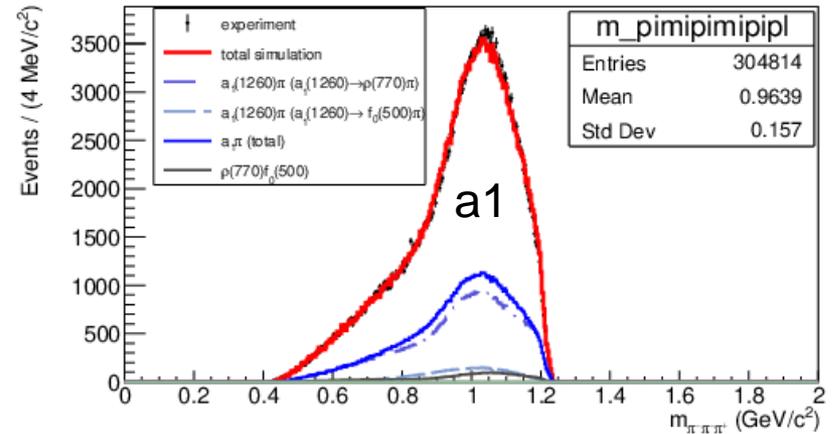
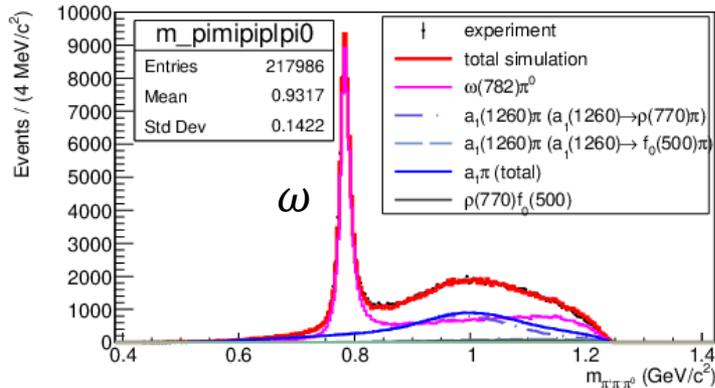


Три верхних рисунка — модель полного и парциальных сечений, извлечённых из совместного по всем энергетическим точкам амплитудного фита в модели векторной доминантности.

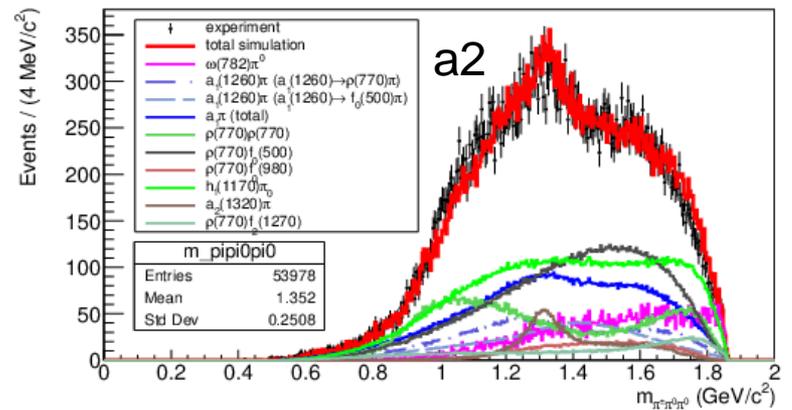
Промежуточное состояние $\omega\eta$ наблюдаем, но парциальное сечение для этого состояния должно быть примерно в два раза выше, чем сейчас.



Амплитудные анализ 4π



Новшество



Физическая задача КМД-4

Измерение формфактора пиона с систематической точностью 0.2 %, для этого, при $1 < \theta < \pi - 1$ (? С углами):

1. На ω пики $\mu\pi$ должны разделяться на 5σ в среднем импульсе, $\Delta P = 10 \text{ MeV} \Rightarrow \frac{\sigma_P}{P} < 0.8\%$
2. На ϕ разделение на 3σ , $\Delta P = 9.5 \text{ MeV} \Rightarrow \frac{\sigma_P}{P} < 0.9\%$
3. Систематика в телесном угле 0.1 мрад

Эффекты

$$\frac{\Delta P_{\perp}}{P_{\perp}} = \frac{\sqrt{720} \sigma}{0.3 B R_{out}^2 \sqrt{n}} P_{\perp}$$

$$\frac{\Delta P_{\perp}}{P_{\perp}} = \frac{0.0523}{\beta B L} \sqrt{\frac{X}{X_0}}$$

$$\Delta \theta = \frac{\sqrt{12} \sigma_z}{R_{out} \sqrt{n} \sin^2 \theta} \cdot 1$$

Эффекты сравнимые, давить надо все в ~2 раза.

Что меняем

B: 1.3 Тл → 1.5 Тл

R, L: 0.25 м → 0.45 м

n: 20 → 40

Что дает

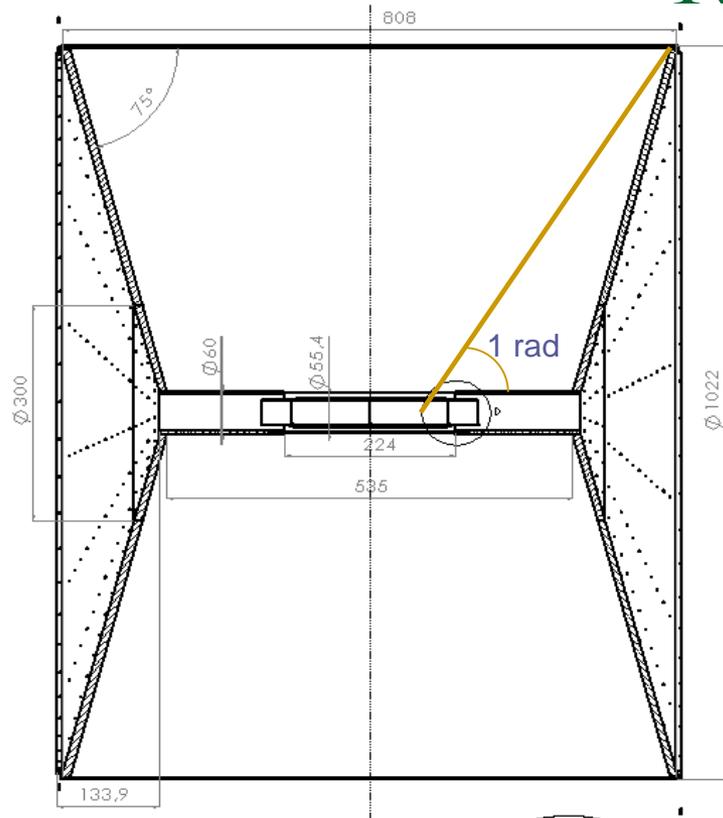
0.18

0.64

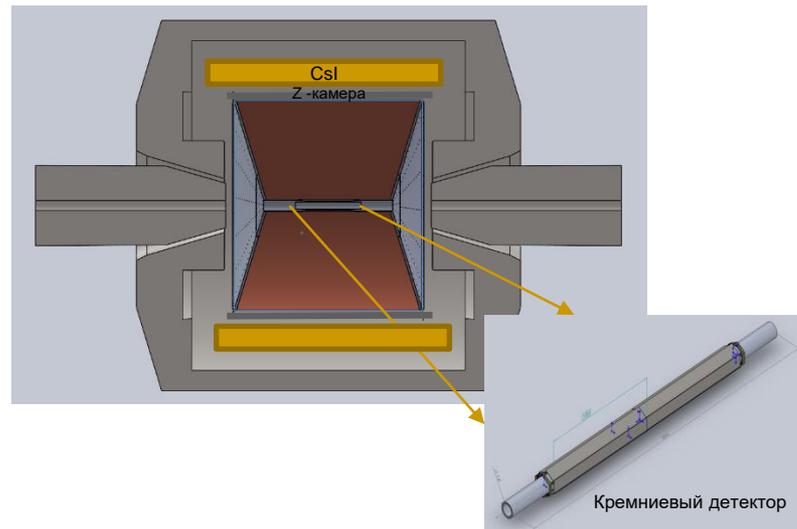
0.39

$$\frac{\Delta P}{P} = 0.8\%$$

КОМПОНОВКА



1. Удаляем LXe и BGO
2. Внешняя и внутренняя обечайки - углепластик
3. Фланцы - сплав алюминия или углепластик



Ключевые компоненты

- Углепластик -- Россия
 - Проволока – Китай
 - Пины – сами или Китай
 - Электроника, кабели –Россия,Китай
-

