



Изучение сечения процесса $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^+\pi^-$ с детектором КМД-3 на коллайдере ВЭПП-2000

Дмитрий Шемякин

Апробация кандидатской диссертации

Научный руководитель: д.ф.м.н. Федотович Г.В.

Новосибирск 2018

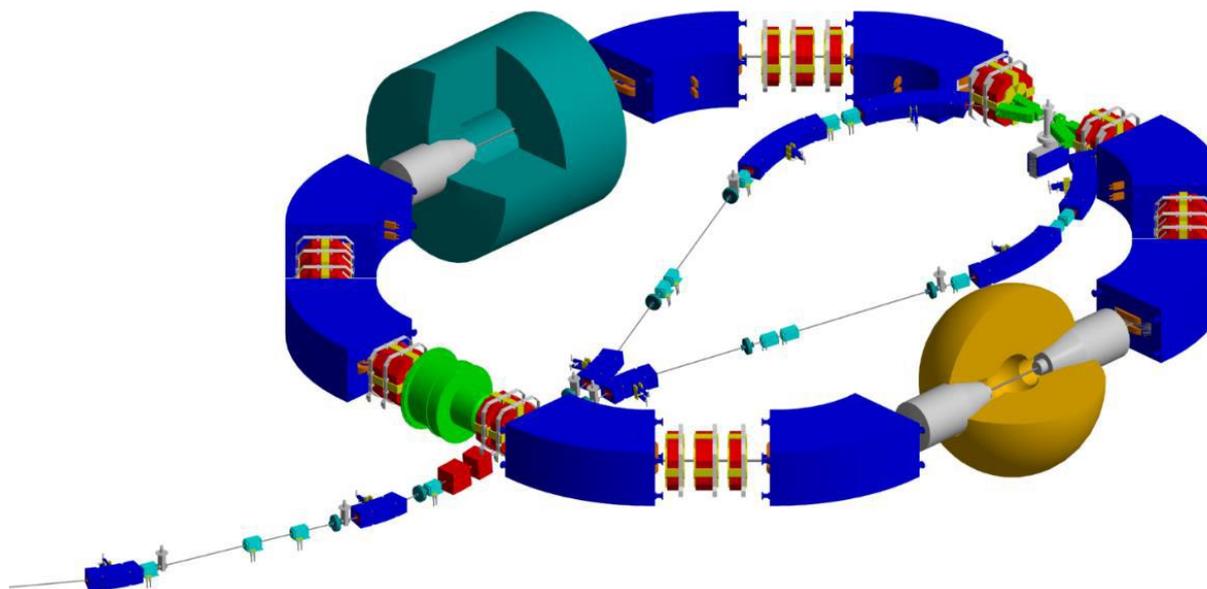


План выступления

- Коллайдер ВЭПП-2000 и детектор КМД-3
- Z-камера детектора КМД-3
- Восстановление продольной координаты трека
- Мотивация измерения сечения $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^+\pi^-$
- Феноменологическая модель
- Измерение сечения $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^+\pi^-$
- Заключение



ВЭПП-2000



e^+e^- -коллайдер с круглыми пучками.

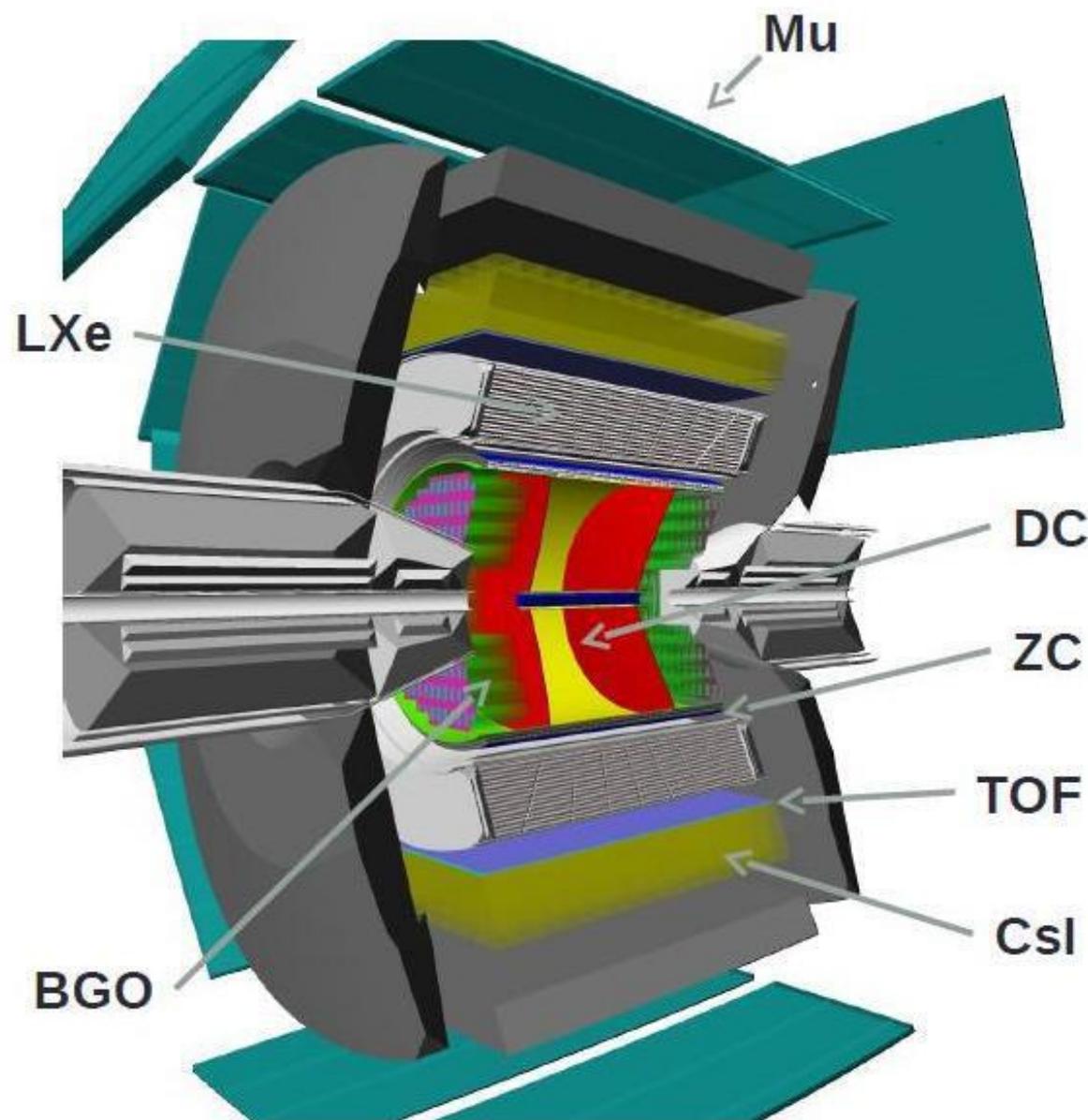
Энергия 320-2000 МэВ в с.ц.м.

Планируемая светимость 10^{31} см⁻²с⁻¹ на 1 ГэВ и 10^{32} см⁻²с⁻¹ на 2 ГэВ.

Измерение энергии методом обратного комптоновского рассеяния
 $\Delta E/E = 6 \cdot 10^{-5}$



Детектор КМД-3



DC – дрейфовая камера

BGO – электромагнитный
калориметр BGO

ZC – Z – камера

LXe – электромагнитный
калориметр LXe

CsI – электромагнитный
калориметр CsI

Mu -мюонная система

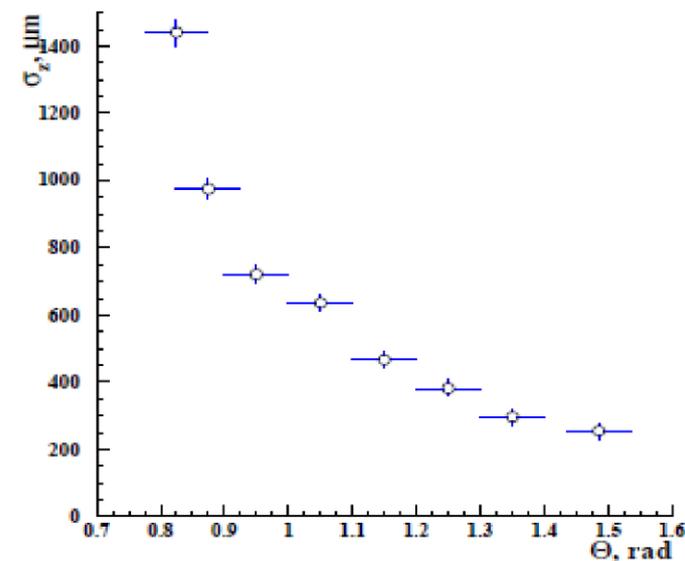
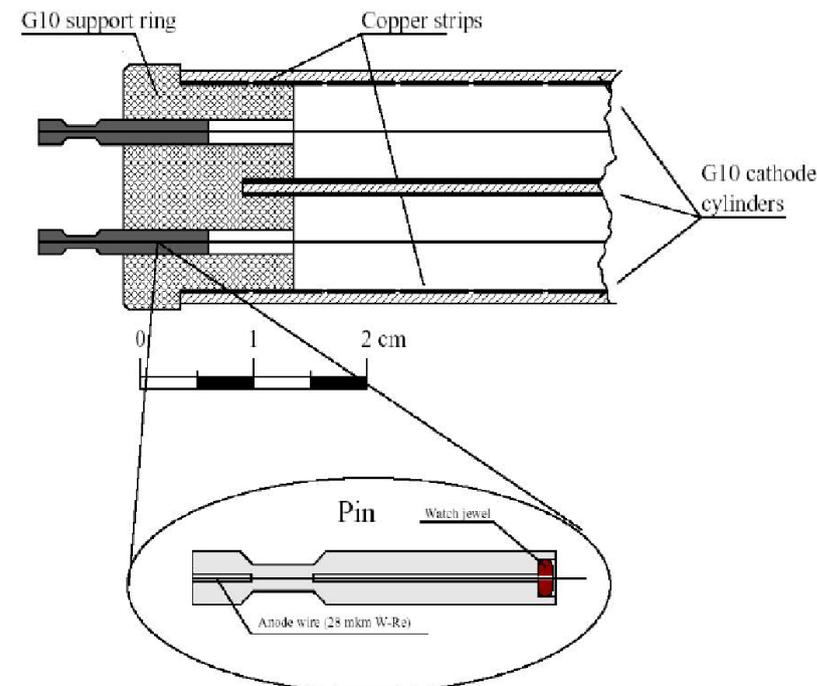
TOF – времяпролетная
система



Z-камера



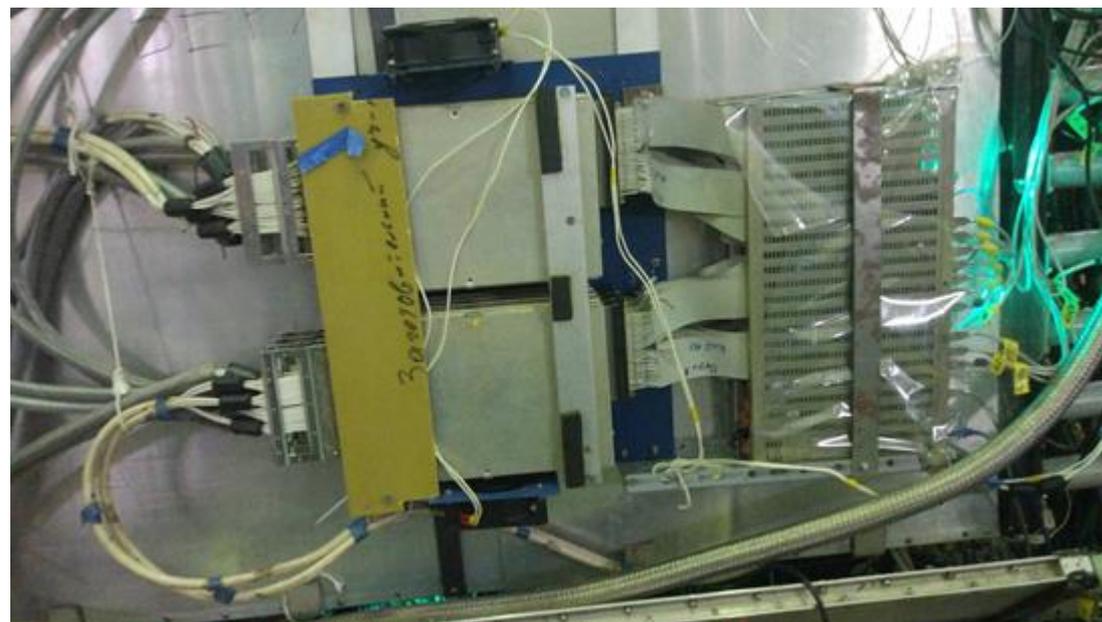
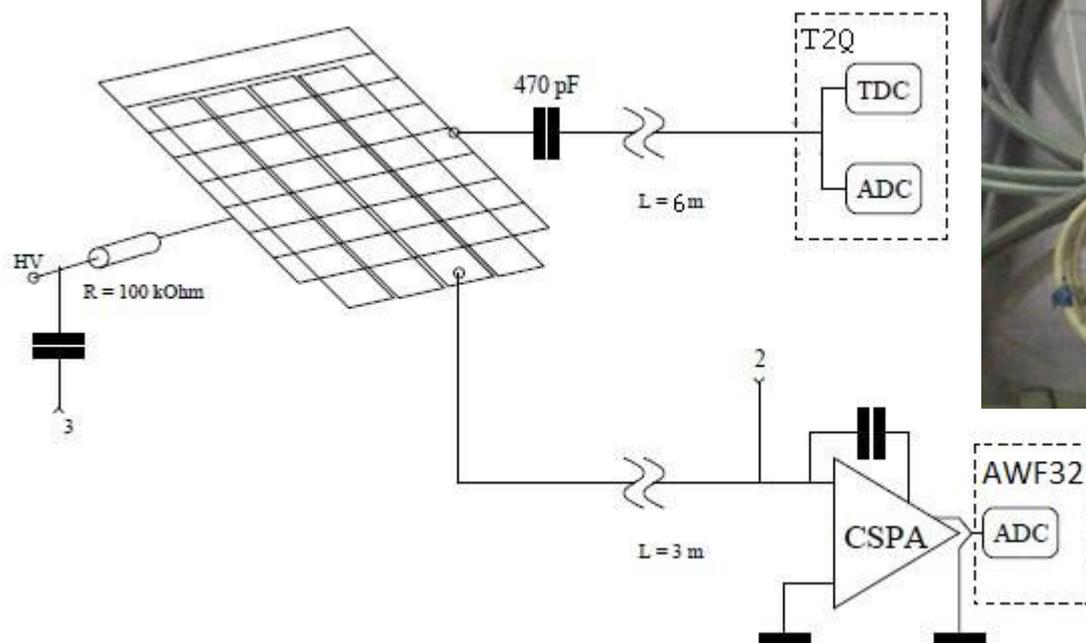
- 2 x 704 проволочек
- 2 x 24 секторов (деление по φ)
- 2 x 256 полосок (деление по Z)
- продувка Fr14: $C_4H_{10} = 80:20$





Модернизация электроники Z-камеры

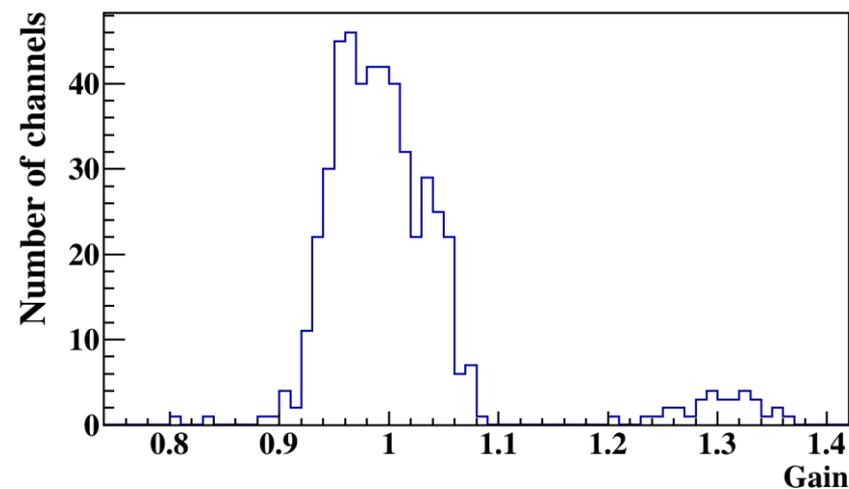
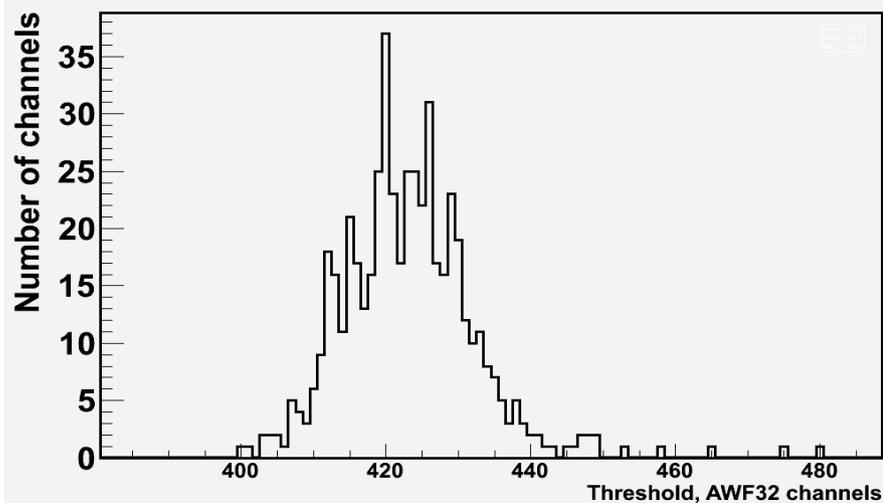
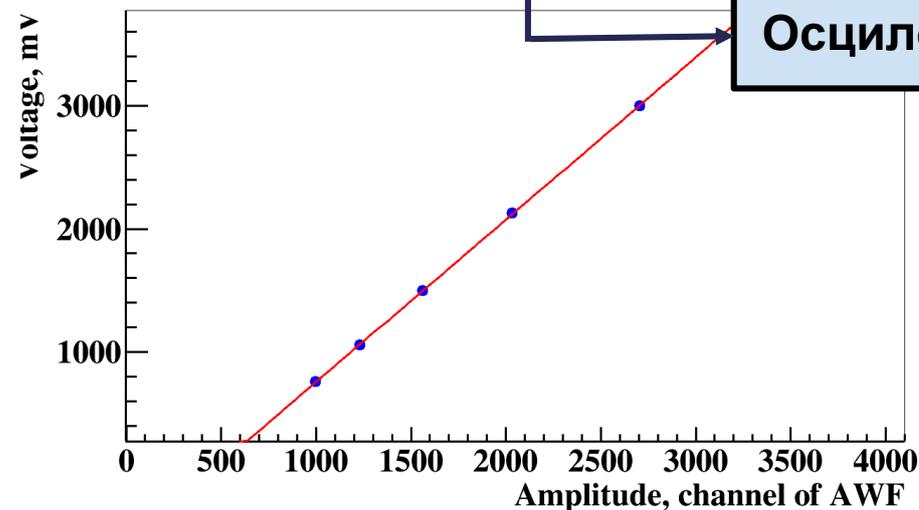
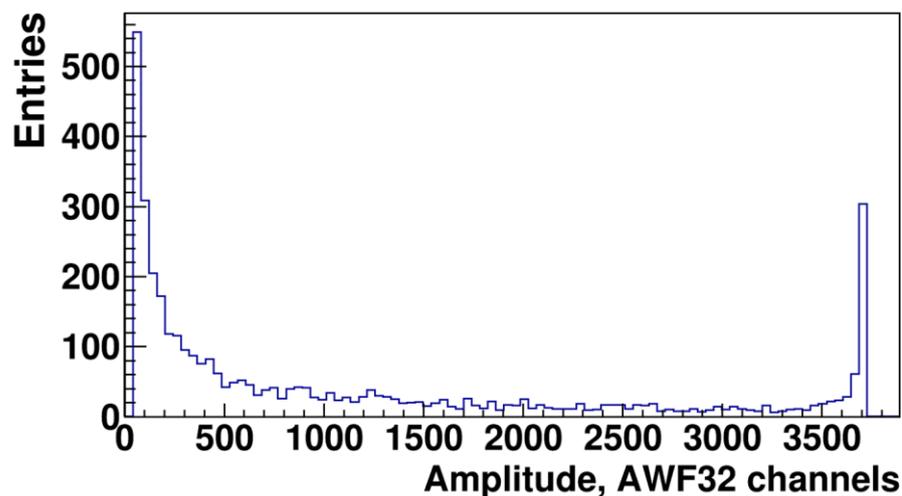
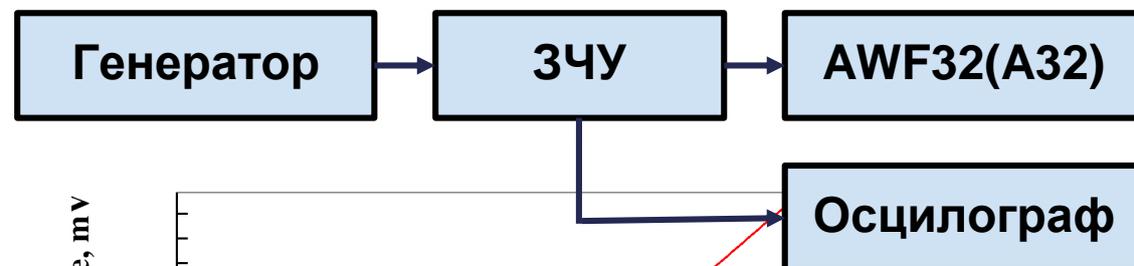
В 2013 году была произведена замена плат оцифровывающей электроники катодного тракта А32 на платы АWF32 (Рубан, Козырев). Число неработающих каналов А32 было 30-50, с новой электроникой их число уменьшилось до 12-15.





Онлайн калибровка

- проверка работоспособности
- коэффициенты усиления
- пьедесталы





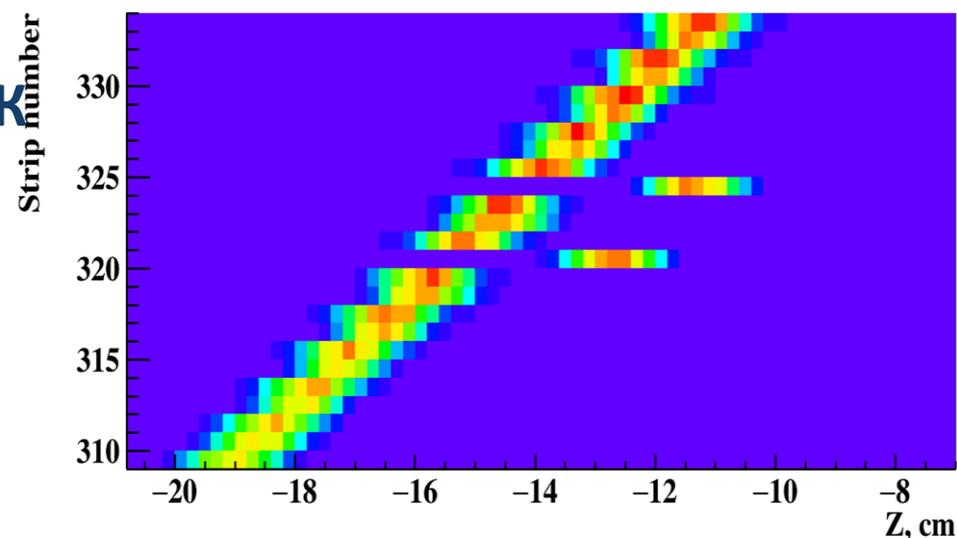
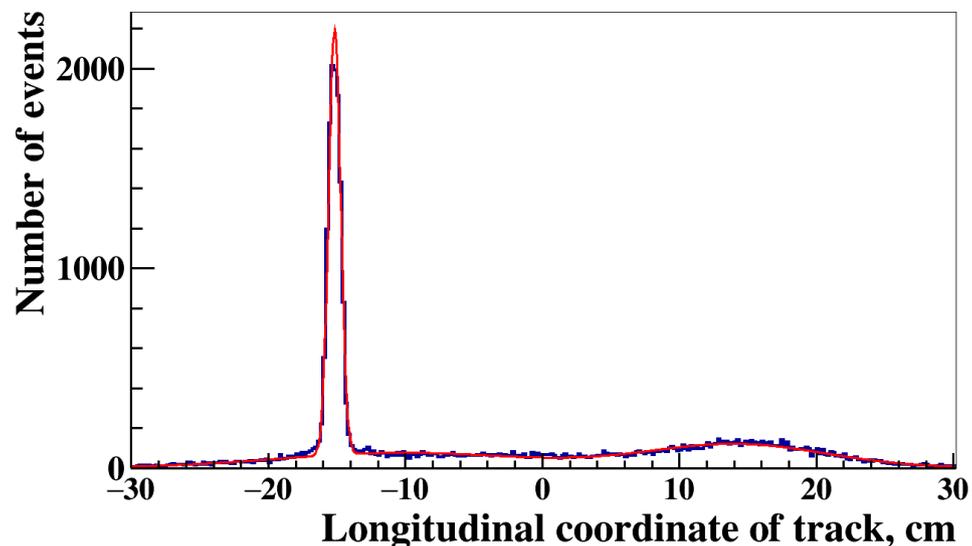
Калибровка по космике

Цели:

- исправление перепуток
- наводки на соседей
- поиск неработающих каналов

Метод:

- 1) отбираются одотрековые космические события
- 2) трек из ДК продлевается в Z-камеру, каждой сработавшей полоске сопоставляется z-координата восстановленная в ДК
- 3) результат аппроксимируется для определения Z-координаты полоски
- 4) выполняется ежедневно

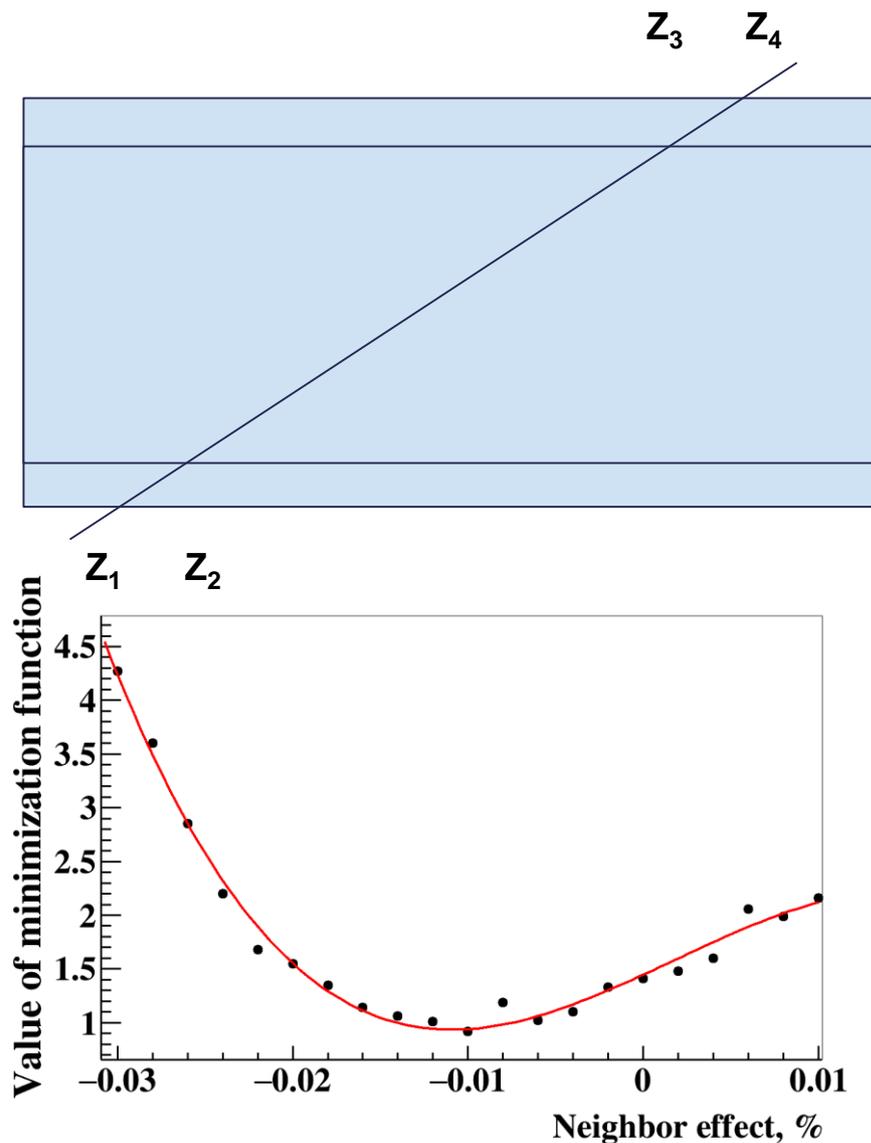


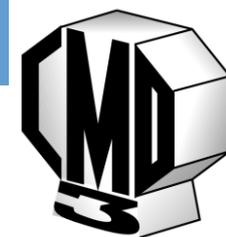


Определение кросстока между соседними полосками

- по ДК отбираются космические однотрековые события
- по 4 восстановленным кластерам в Z-камере вычисляется координата трек с учетом наводки на соседей
- минимизируется функция:

$$M = \sum_{events} (Z_1 - Z_2 - Z_3 + Z_4)^2$$



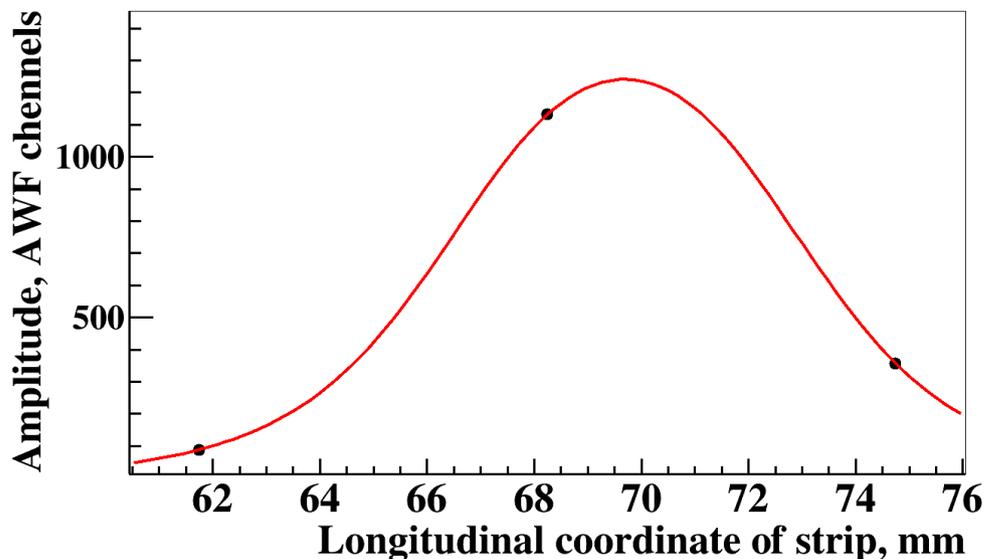


Восстановление z-координаты

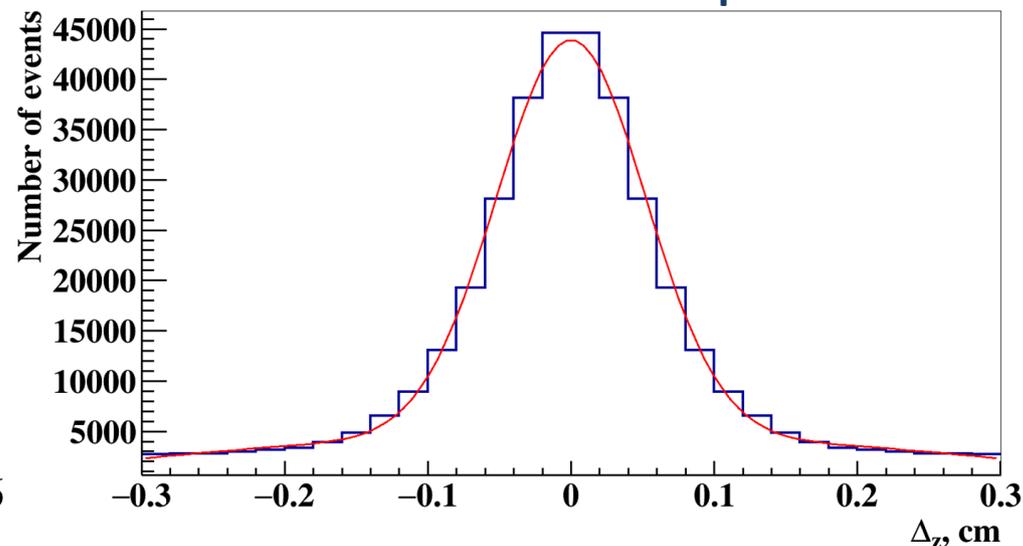
Полоски собираются в кластеры согласно алгоритму:

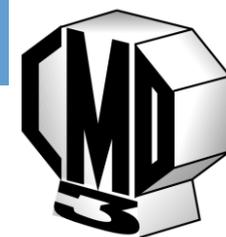
- 1) Поиск полоски с максимальной амплитудой
- 2) Пришиваются соседи, соседи соседей и так далее пока они есть. Если соседняя полоска не работает, то пришивается полоска через одну.
- 3) Сшиваются соседние кластеры в азимутальной плоскости.
- 4) Если в кластере больше 3 полосок, то берется с максимальной амплитудой и соседние с ней для определения z-координаты трека.
- 5) Определяется тип кластера и Z-координата по аппроксимации теоретическим распределением.

Теоретическое распределение.



Отклонение z-координаты кластера от трека восстановленного по Z-камере $\sigma \sim 0.5$ мм.



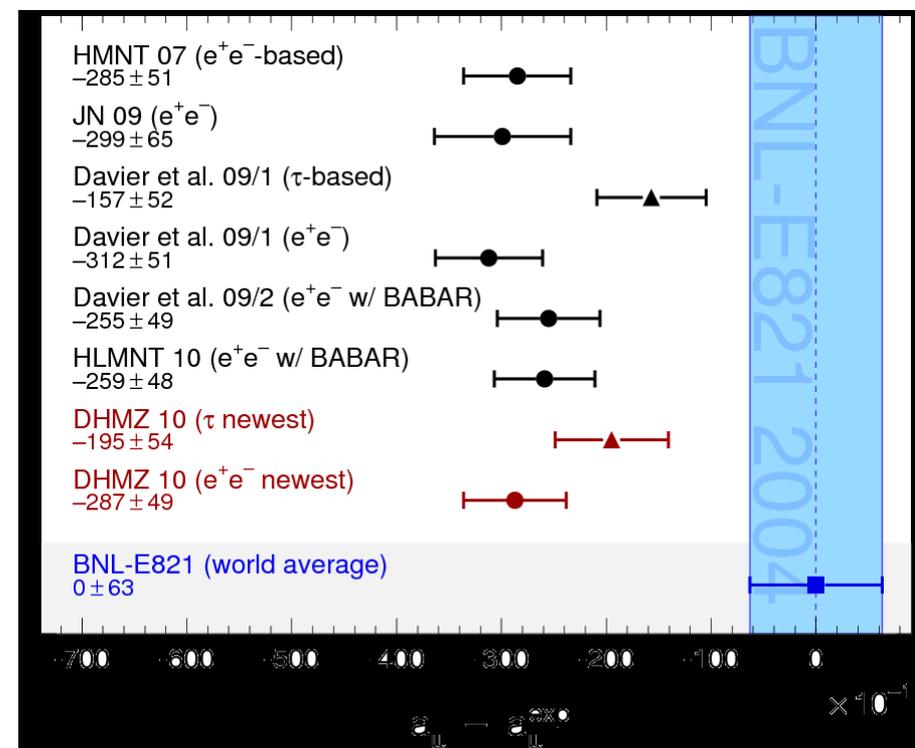


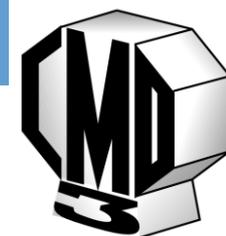
Мотивация

- Аномальный магнитный момент мюона
 $a_\mu^{\text{exp}} = (g-2)_\mu / 2 = 11\,659\,208.9 \pm 6.3 \times 10^{-10}$
 готовятся новые эксперименты по
 измерению a_μ с точностью 1.5×10^{-10} .

Вклад от $e^+e^- \rightarrow \text{КК}\pi\pi$ $(3.31 \pm 0.58) \times 10^{-10}$
 основано на данных ВаBar (arXiv:1105.3149)

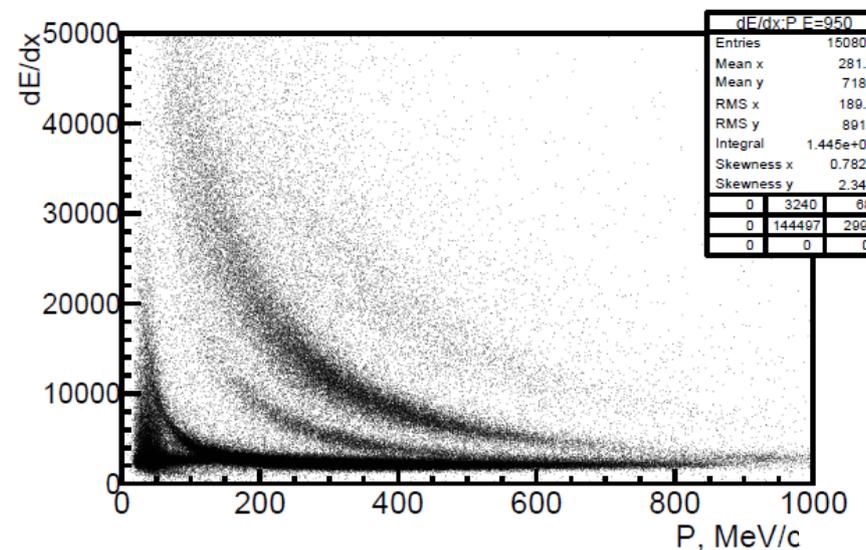
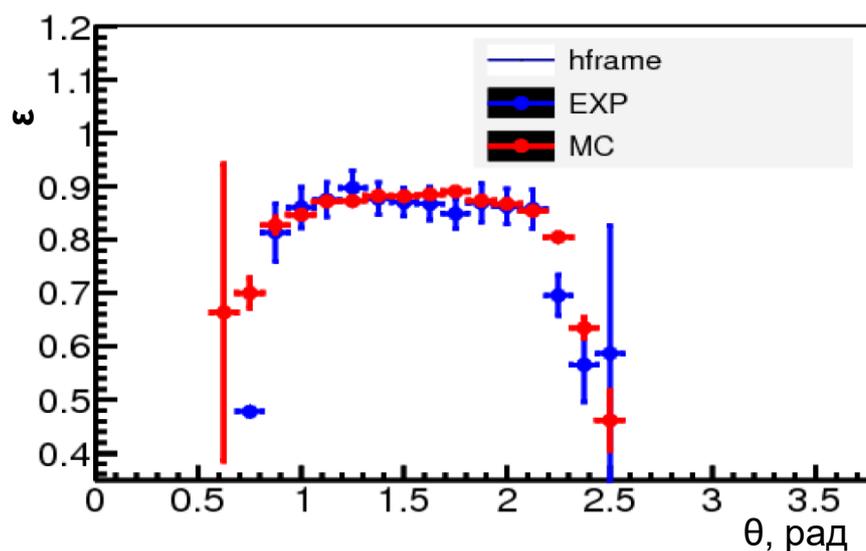
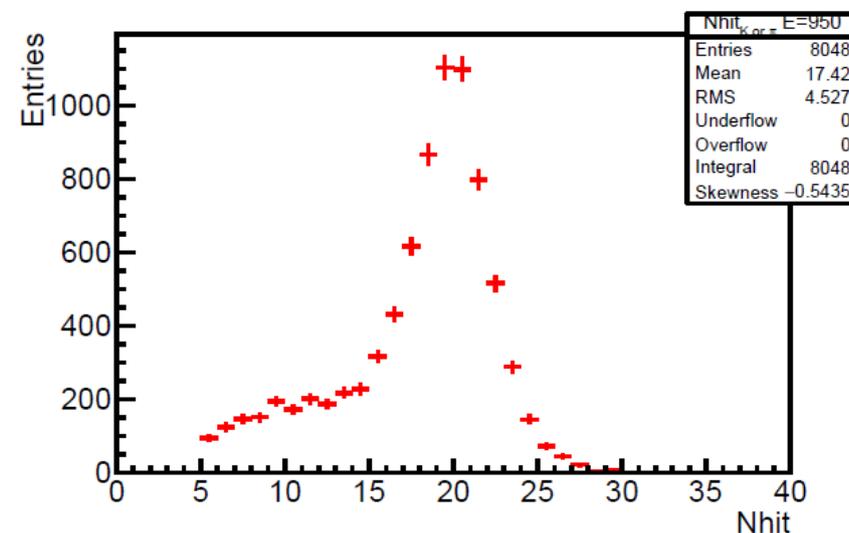
- Изучение динамики
- Изучение угла смешивания
 $K_1(1270, 1400)$ мезонов (arXiv:1111.6307)
- Поиск новых экзотических состояний
- Структура в сечении





Условия на трек

- $|z| < 10$ см
- $r < 0.4$ см
- $p > 50$ МэВ/с
- $N_{hit} \geq 9$
- условие на dE/dx
- $0.85 < \theta < \pi - 0.85$





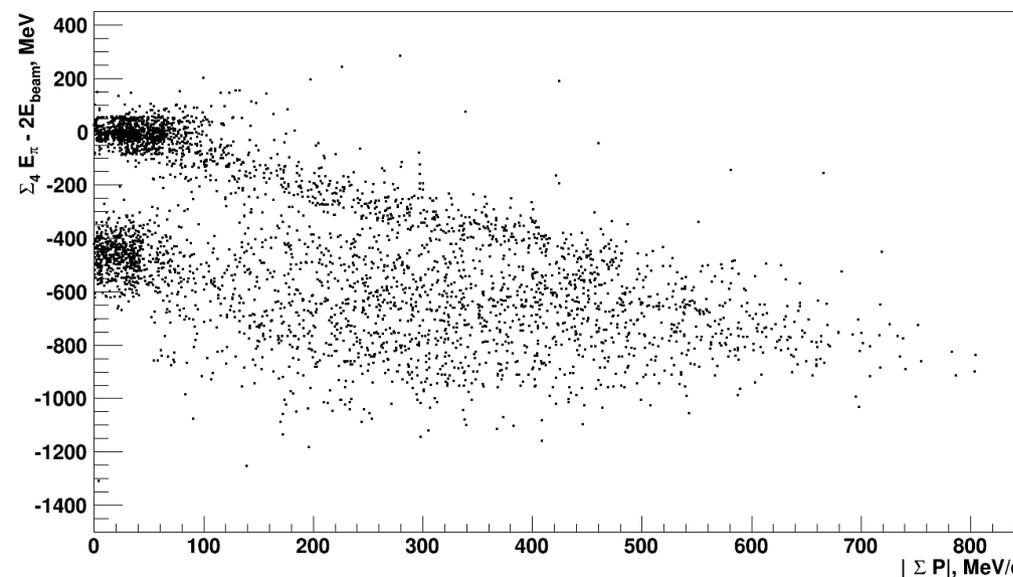
$e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^+\pi^-$

Анализ данных основан на статистике $\sim 23 \text{ пбн}^{-1}$, набранных при $E_{\text{с.м.}} = 1500\text{-}2000 \text{ МэВ}$ в 36 точках. Энергия пучка определена с точностью 1-3 МэВ.

Законы сохранения энергии-импульса позволяют выделить события $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^+\pi^-$.

Импульсы частиц восстанавливаются по трекам в ДК. Масса частицы определяется по разделению каонов от пионов по dE/dX в ДК.

В анализе используются события с $N_{\text{tr}} = 3, 4$.



$$E_{4\pi} = \sum_{i=1}^4 \sqrt{p_i^2 + m_\pi^2}$$



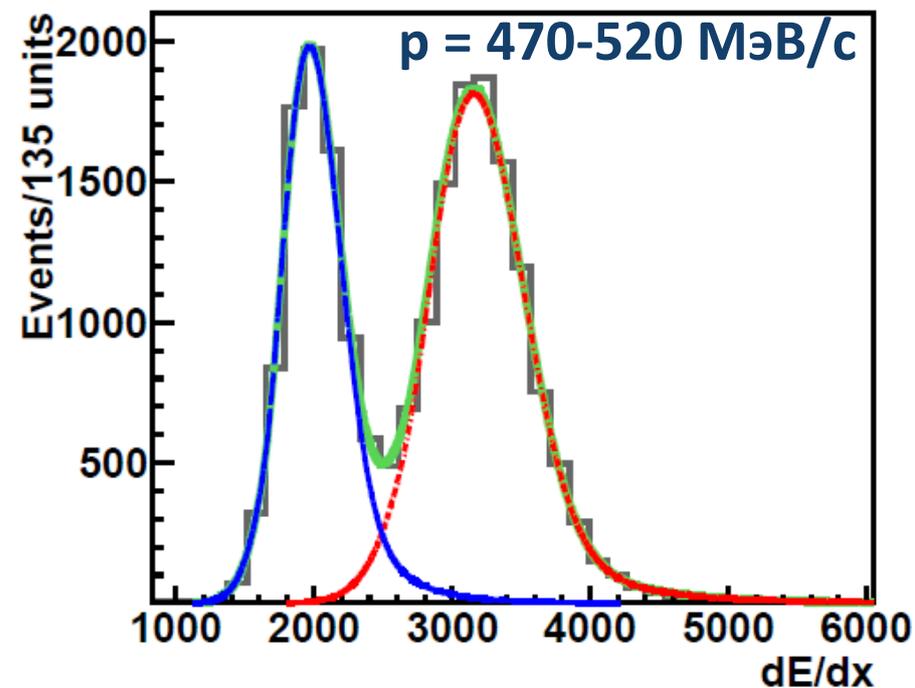
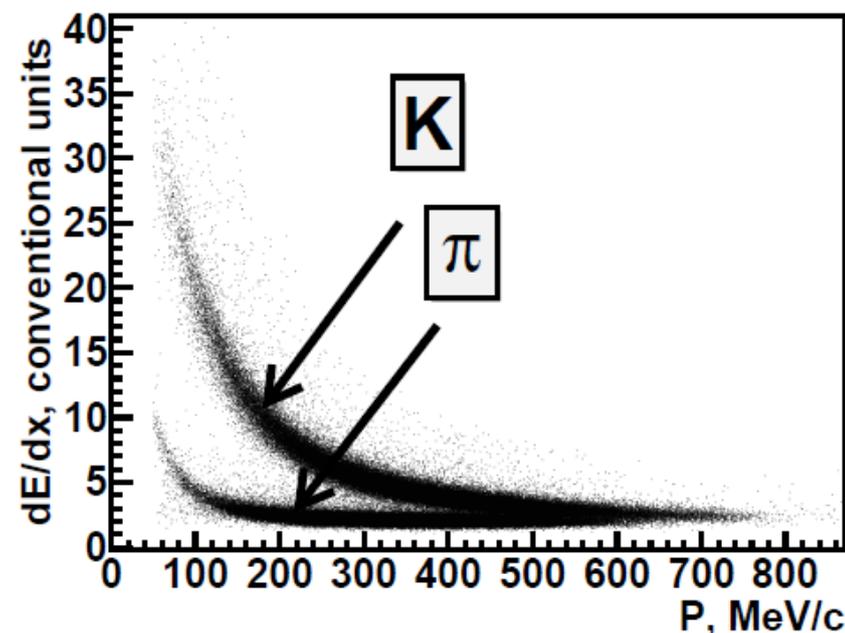
К/π разделение

Разделение π и K мезонов основано на минимизации функции максимального правдоподобия ($L_{KK\pi\pi}$), параметрами для которой являются импульс и ионизационные потери частиц в дрейфовой камере.

$L_{KK\pi\pi}$ для событий $K^+K^-\pi^+\pi^-$ с четырьмя или тремя восстановленными треками определяется по формуле:

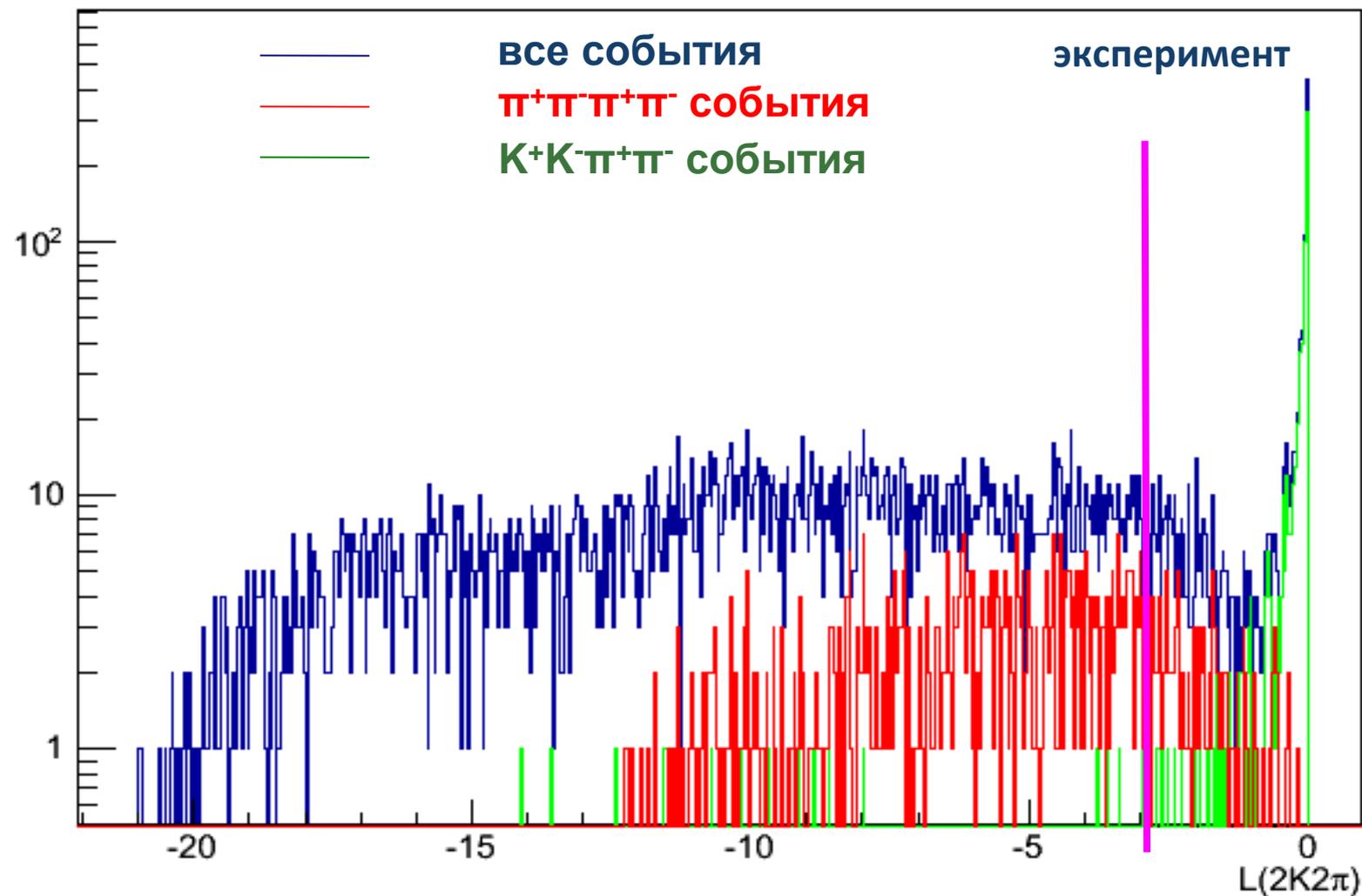
$$L_{KK\pi\pi} = \log \left(\frac{\prod f_{\alpha}^i(p, dE/dx_{DC})}{\prod [f_{\pi}^i(p, dE/dx_{DC}) + f_{K}^i(p, dE/dx_{DC})]} \right)$$

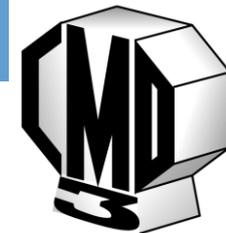
здесь f_{α}^i - функция плотности вероятности, i - номер трека (от 1 до 4 или 3).



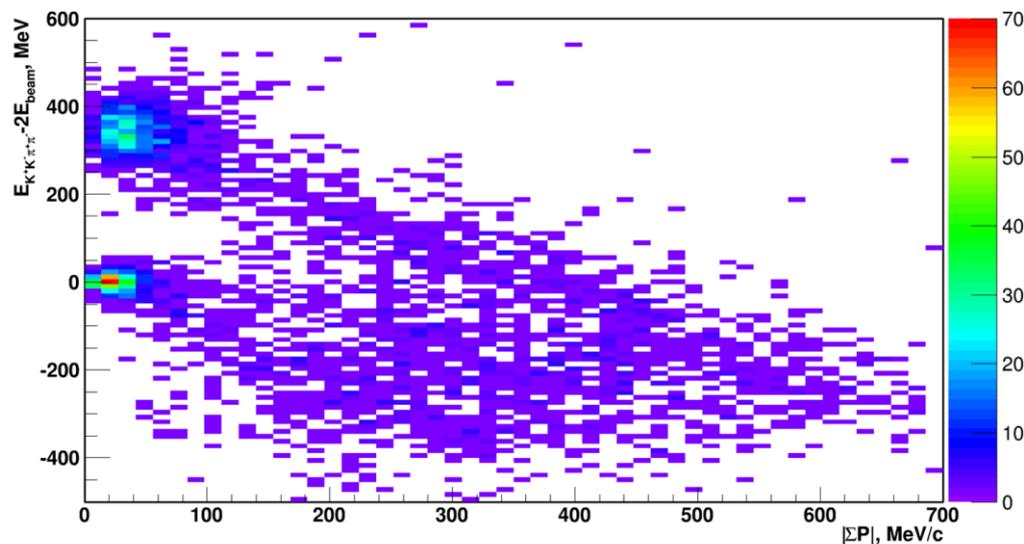


Значение $L_{KK\pi\pi}$





События с четырьмя треками

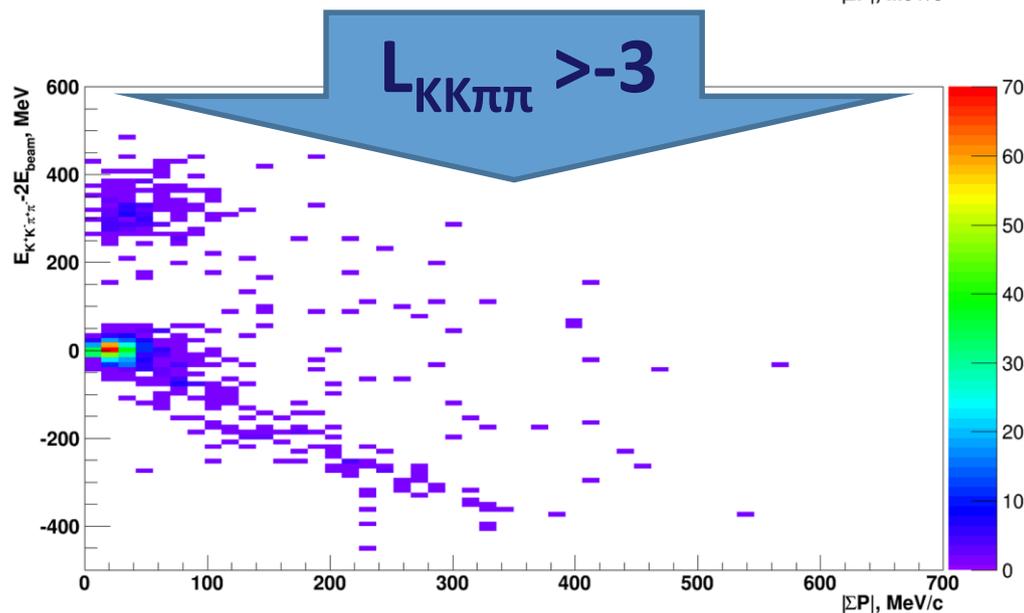


Условия отбора:

$$|\Sigma E - 2 * E_{beam}| < 80 \text{ MeV}$$

$$|\Sigma P| < 80 \text{ MeV/c}$$

$$L_{KK\pi\pi} > -3$$



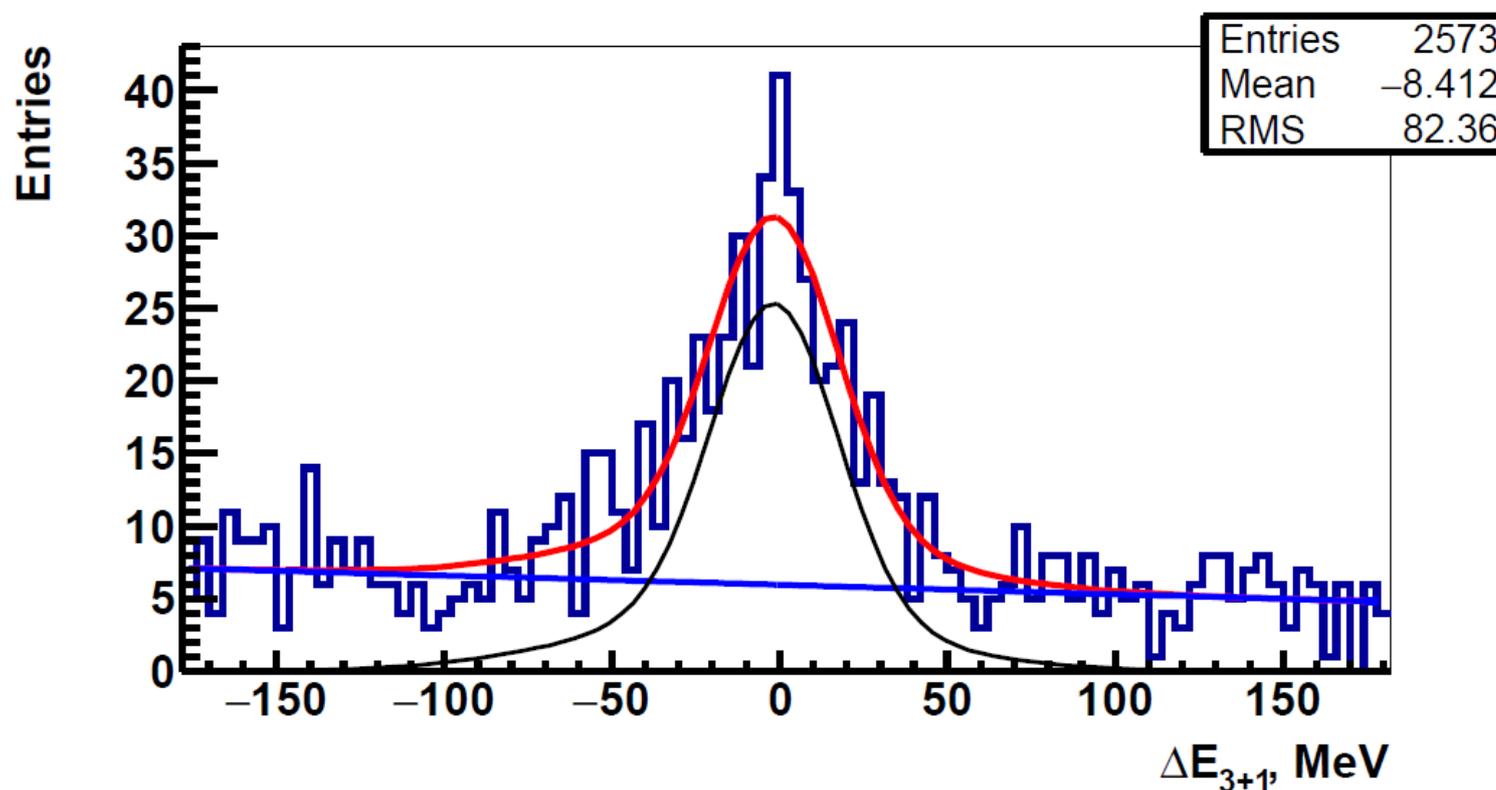
Подавление фона за счет условия $L_{KK\pi\pi} > -3$ оценивается по моделированию фоновых процессов и составляет ~ 10 раз.

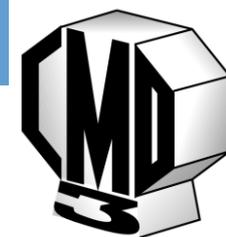


События с тремя треками

Для трехтрековых событий, используя закон сохранения импульса, восстанавливается импульс четвертой частицы. Предполагая, что событие $2K2\pi$ определяется масса улетевшей частицы.

На гистограмме представлено число событий в зависимости от полной энергии четырех частиц минус удвоенной энергии пучка. Гистограмма аппроксимируется функцией, полученной из четырехтрековых событий, и линейной подложкой.



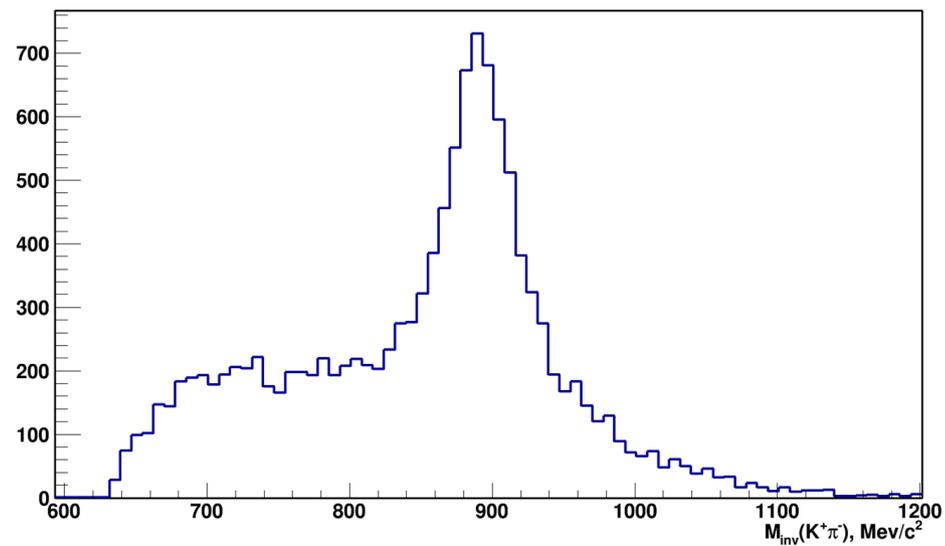
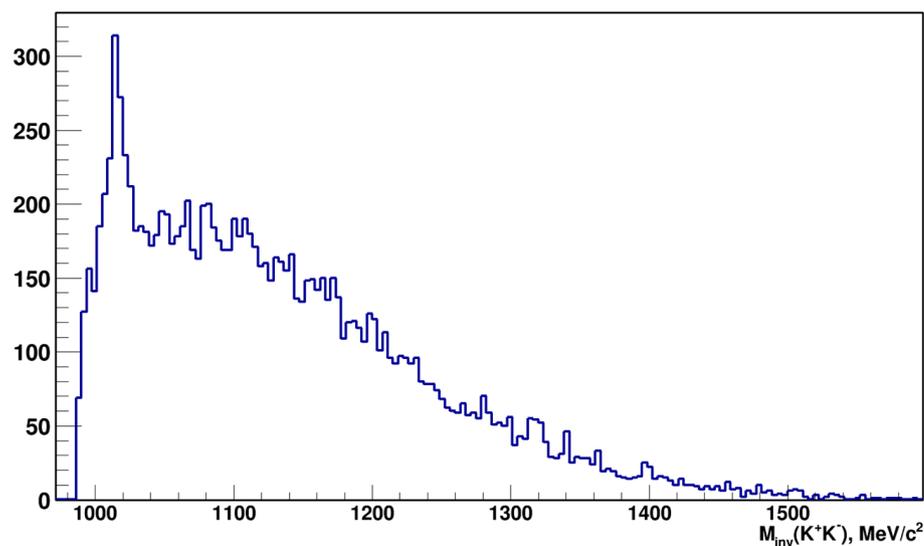


Моделирование

Моделирование необходимо для вычисления эффективности регистрации и проводилось при помощи пакета Cmd3Sim.

Для вычисления сечения не подходит первичный генератор с распределением частиц по фазовому объему т.к.:

- Телесный угол трековой части детектора покрывает $\sim 70\% 4\pi$
- Экспериментальные импульсные и угловые распределения для частиц сильно отличаются от распределения из моделирования по фазовому объему

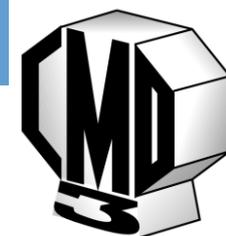




Модель

- ~~$e^+e^- \rightarrow K^*(892)^0 K \pi + c.c.$~~
- ~~$e^+e^- \rightarrow K^*(892)^0 \bar{K}^*(892)^0$~~
- $e^+e^- \rightarrow f_0(980)\phi$
- $e^+e^- \rightarrow f_0(500)\phi$
- $e^+e^- \rightarrow \rho(KK)_{S\text{-wave}}$
- $e^+e^- \rightarrow (K_1(1270)K)_{S\text{-wave}} \rightarrow (K^*\pi)_{S\text{-wave}}K$
- $e^+e^- \rightarrow (K_1(1400)K)_{S\text{-wave}} \rightarrow (K^*\pi)_{S\text{-wave}}K$
- $e^+e^- \rightarrow (K_1(1270)K)_{S\text{-wave}} \rightarrow (\rho K)_{S\text{-wave}}K$

Все фазы ~ 0 or π



Определение параметров модели

Использовались только 4-трековые события (всего около 10000). Точки по энергии объединялись в 9 групп, в которых проводилась аппроксимация (100-2500 событий в каждой). Минимизировалась следующая функция:

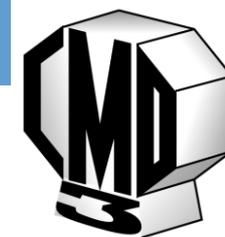
$$L_{\text{sim}} \propto \prod_i \frac{|M_0(\vec{p}_{K^+}^i, \vec{p}_{K^-}^i, \vec{p}_{\pi^-}^i, \vec{p}_{\pi^+}^i, \vec{\alpha})|^2}{Z(\vec{\alpha})}$$

M_0 - сумма амплитуд с коэффициентами α . Z - нормировка, вычисляемая при помощи моделирования по формуле:

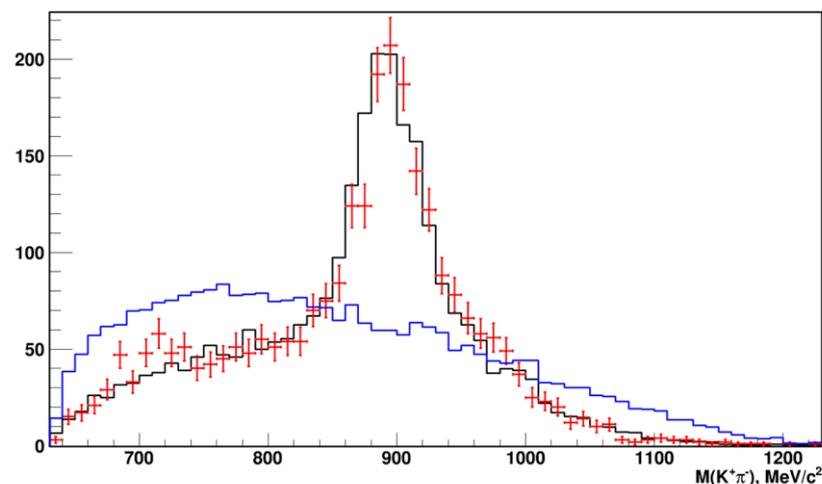
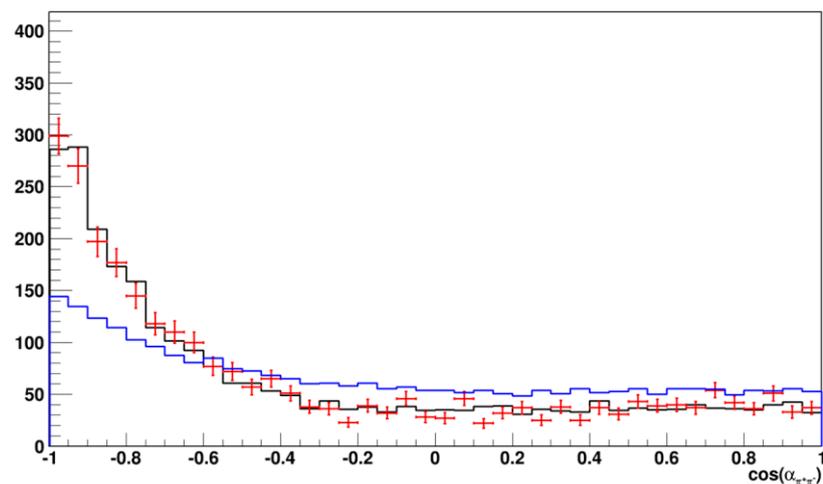
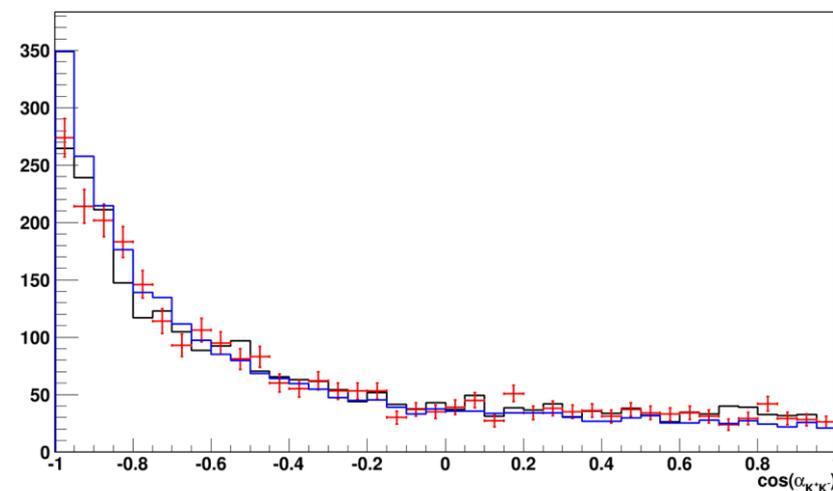
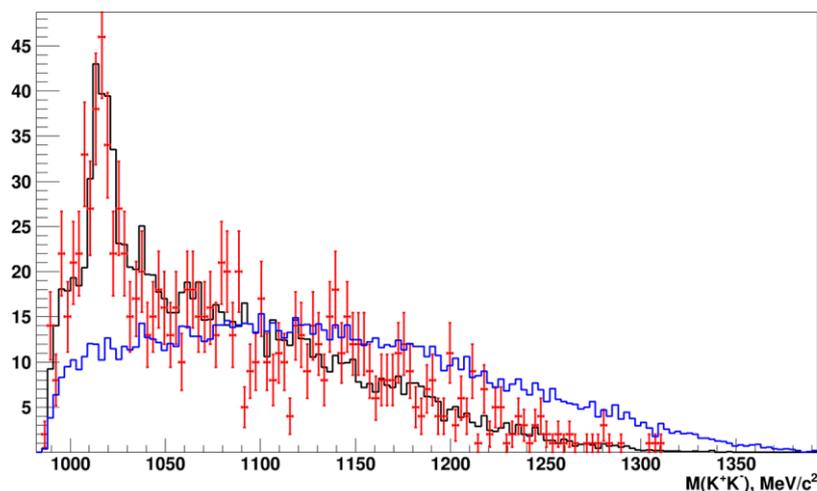
$$Z(\vec{\alpha}) = \frac{\int |M(\vec{p}_{K^+}, \vec{p}_{K^-}, \vec{p}_{\pi^-}, \vec{p}_{\pi^+}, \vec{\alpha})|^2 \epsilon(\vec{p}_{K^+}, \vec{p}_{K^-}, \vec{p}_{\pi^-}, \vec{p}_{\pi^+}) dF}{N_{\text{event}}}$$

N_{event} - число событий в моделировании. ϵ - эффективность.

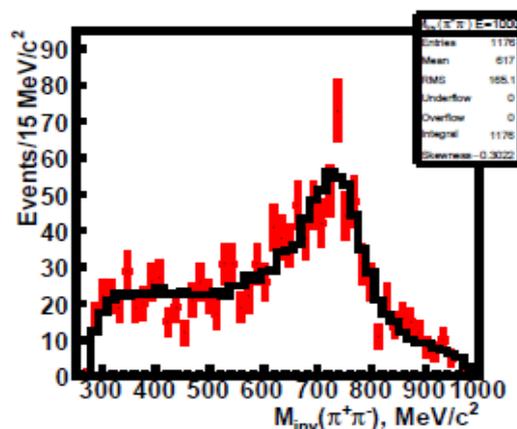
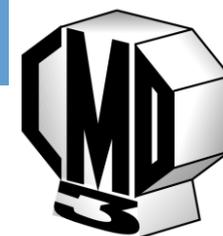
Массы и ширины ρ и ϕ мезонов были зафиксированы из PDG. Массы и ширины $f_0(980)$, σ , $K_1(1270)$ и $K_1(1400)$ были определены на семпле событий с максимальной энергией и зафиксированы при более низких энергиях.



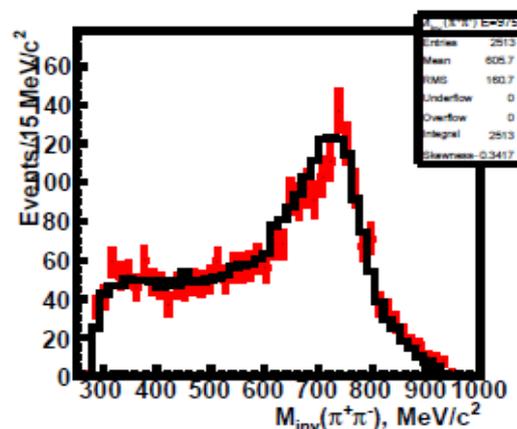
Результат аппроксимации



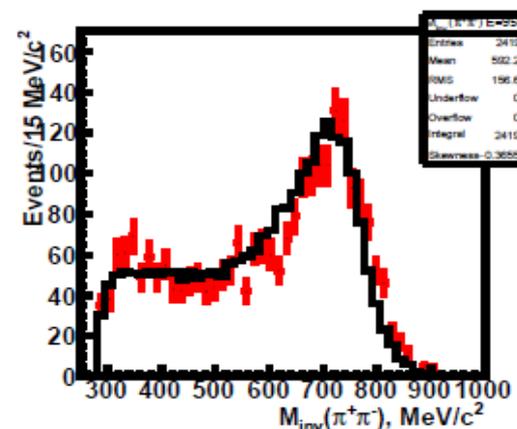
$E_{\text{с.м.}} = 1900$ МэВ. Красные точки - эксперимент, синяя линия - моделирование с фазовым объемом, черная линия - наша модель.



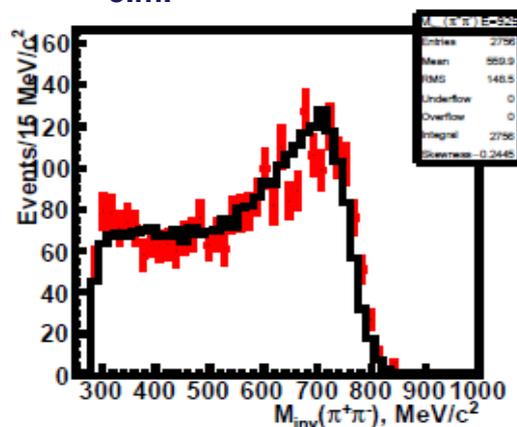
$E_{c.m.} = 2000$ МэВ



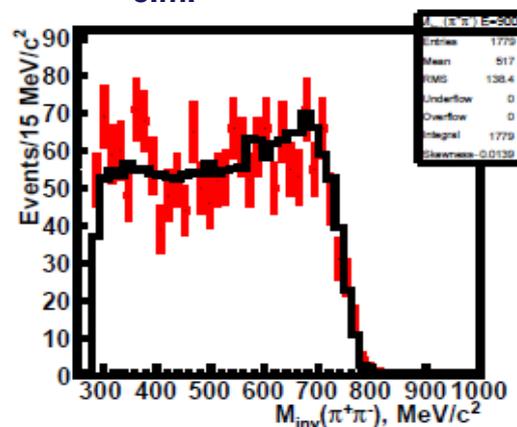
$E_{c.m.} = 1950$ МэВ



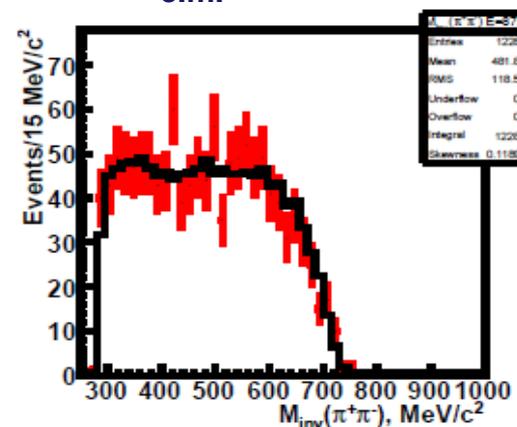
$E_{c.m.} = 1900$ МэВ



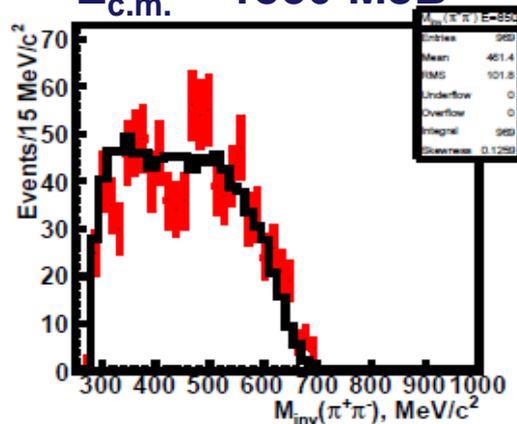
$E_{c.m.} = 1850$ МэВ



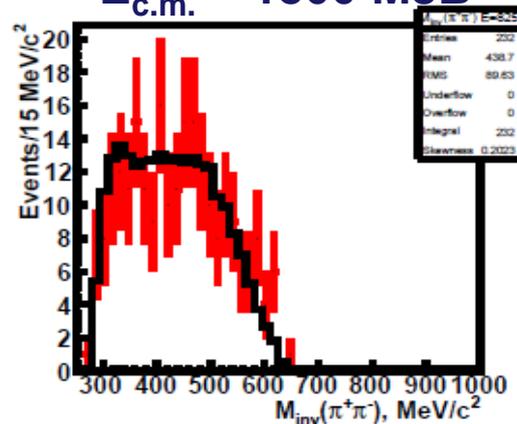
$E_{c.m.} = 1800$ МэВ



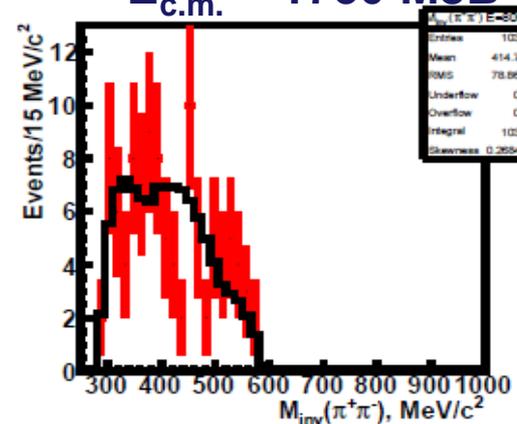
$E_{c.m.} = 1750$ МэВ



$E_{c.m.} = 1700$ МэВ



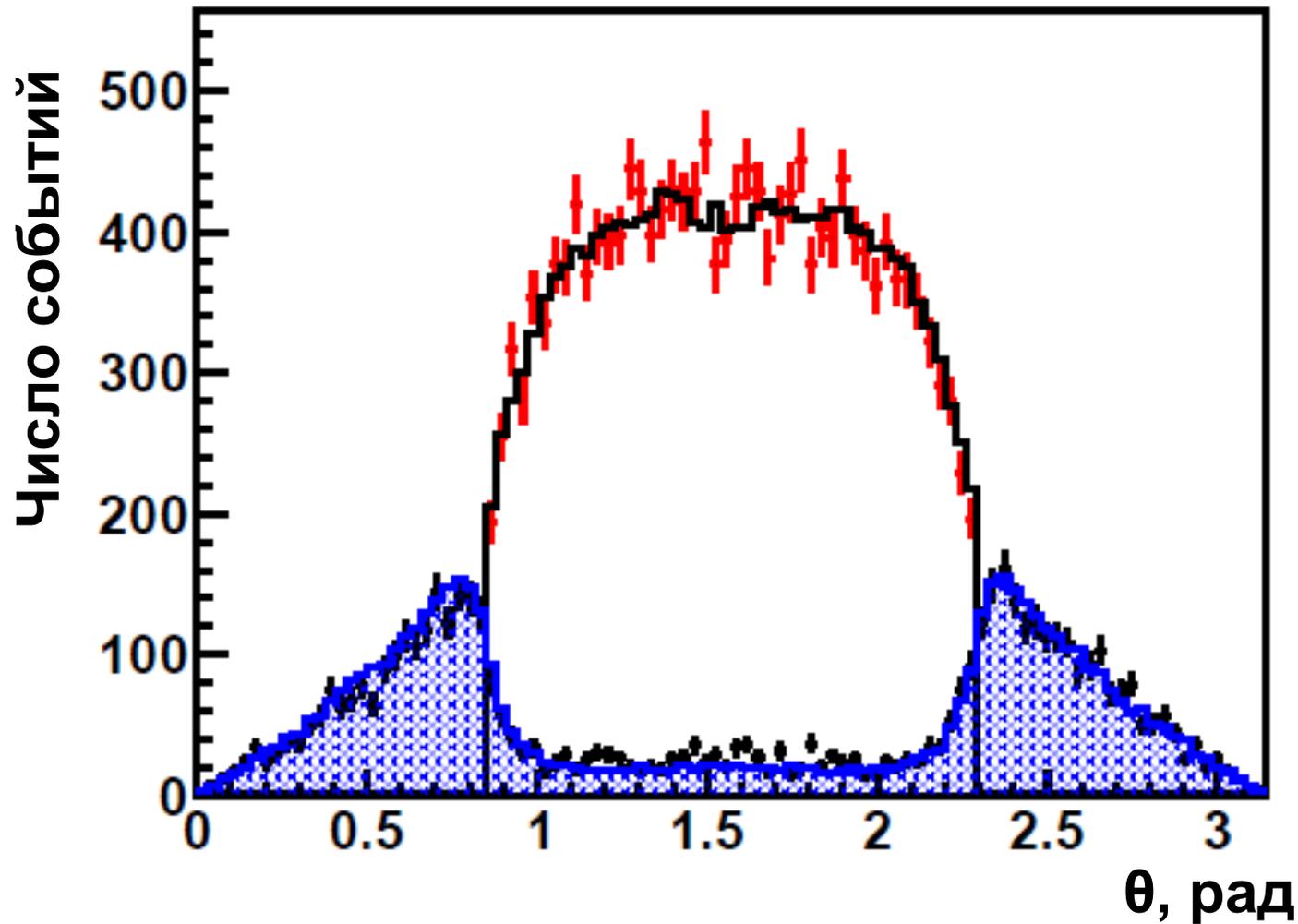
$E_{c.m.} = 1650$ МэВ



$E_{c.m.} = 1600$ МэВ



Результат аппроксимации



Полярный угол каона или пиона. Точки - эксперимент, линия - моделирование.



Поправка на эффективность

Трехтрековые события делились на два класса:

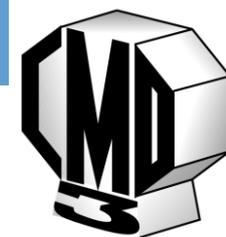
- пропавшая частица должна лететь в ДК.
- пропавшая частица должна лететь мимо ДК.

События, когда пропавшая частица должна лететь в ДК, использовались для оценки отличия эффективности регистрации в эксперименте и моделировании по формулам:

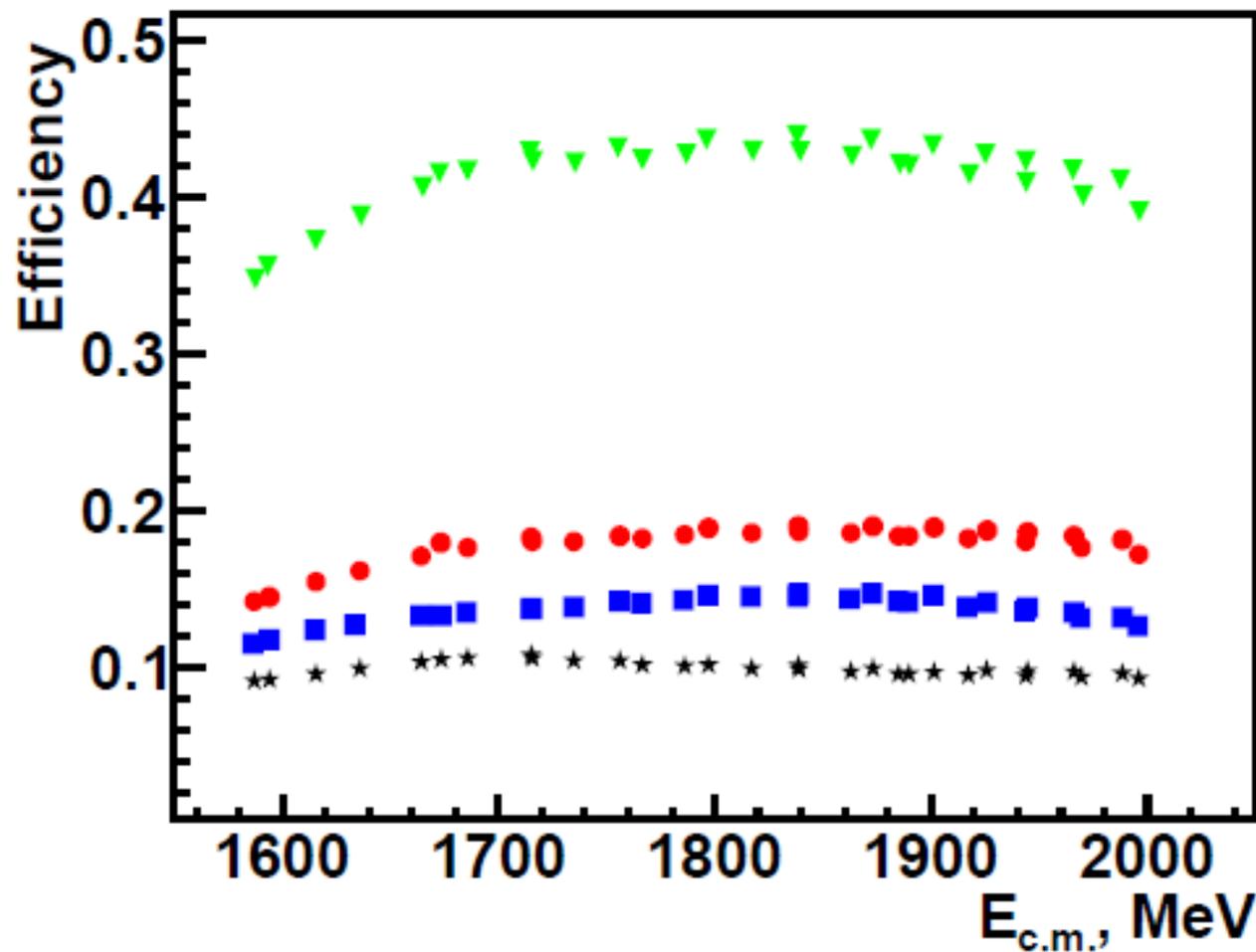
$$\xi_{4tr} = \frac{(\varepsilon_{1tr}^{\text{exp}} K)^2 (\varepsilon_{1tr}^{\text{exp}} \pi)^2}{(\varepsilon_{1tr}^{\text{MC}} K)^2 (\varepsilon_{1tr}^{\text{MC}} \pi)^2} \quad \xi_{3tr}^{\pi} = \frac{(\varepsilon_{1tr}^{\text{exp}} K)^2 \varepsilon_{1tr}^{\text{exp}} \pi (1 - \varepsilon_{1tr}^{\text{exp}} \pi)}{(\varepsilon_{1tr}^{\text{MC}} K)^2 \varepsilon_{1tr}^{\text{MC}} \pi (1 - \varepsilon_{1tr}^{\text{MC}} \pi)}$$

$$\xi_{3tr}^K = \frac{(\varepsilon_{1tr}^{\text{exp}} \pi)^2 \varepsilon_{1tr}^{\text{exp}} K (1 - \varepsilon_{1tr}^{\text{exp}} K)}{(\varepsilon_{1tr}^{\text{MC}} \pi)^2 \varepsilon_{1tr}^{\text{MC}} K (1 - \varepsilon_{1tr}^{\text{MC}} K)}$$

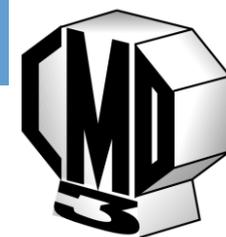
Для используемых условий на трек поправки составляют меньше 1%, но при варьировании условий на трек для определения систематики, поправки на эффективность достигают 5%.



Эффективность регистрации



Красные точки - 4-трековые события, синие точки - трехтрековые события без каона, черные точки - трехтрековые события без пиона, зеленые точки - все события.

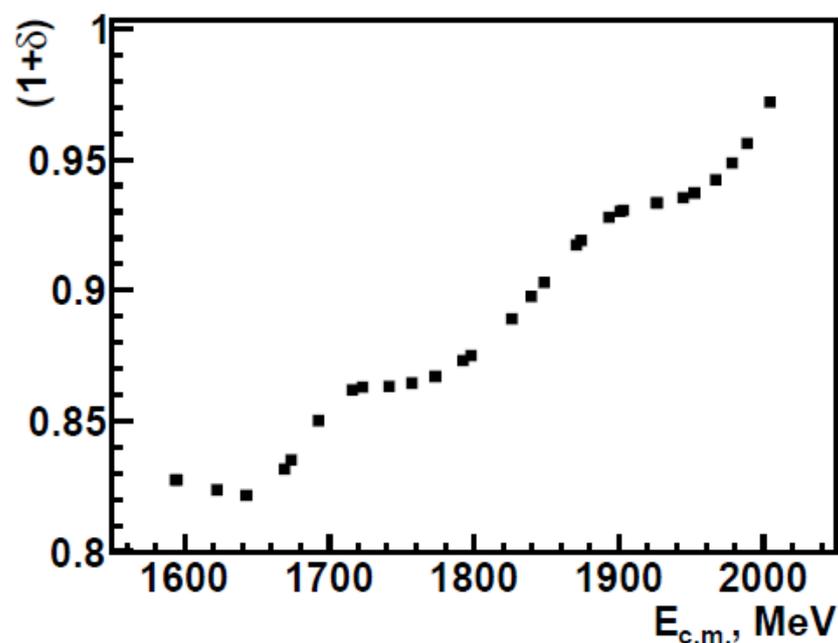


Вычисление сечения

$$\sigma_{4tr} = \frac{N_{4tr}}{\epsilon_{4tr} L_{int} (1 + \delta) \xi_{4tr}}$$

$$\sigma_{3tr} = \frac{N_{3tr}}{\epsilon_{3tr} L_{int} (1 + \delta) \xi_{3tr}}$$

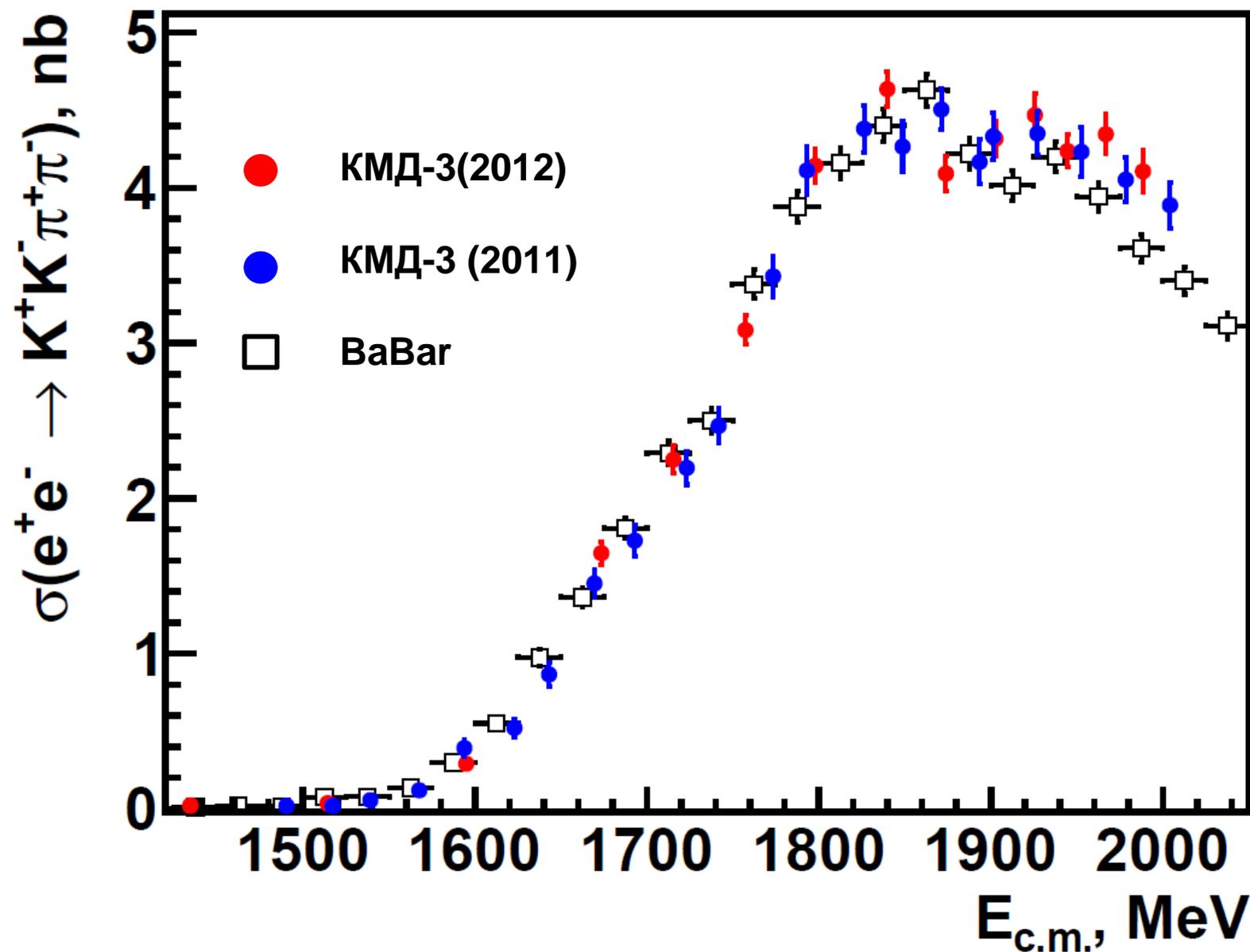
N_4 — число четырехтрековых событий,
 N_3 — число трехтрековых событий,
 L — светимость,
 ϵ — эффективность,
 δ — радиоправка,
 ξ — поправка на отличие моделирования от эксперимента.



Полное сечение $\sigma(e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^+\pi^-)$ рассчитано как среднее взвешенное для трех разных наборов событий σ_{4tr} и σ_{3tr} .



Сечение $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^+\pi^-$

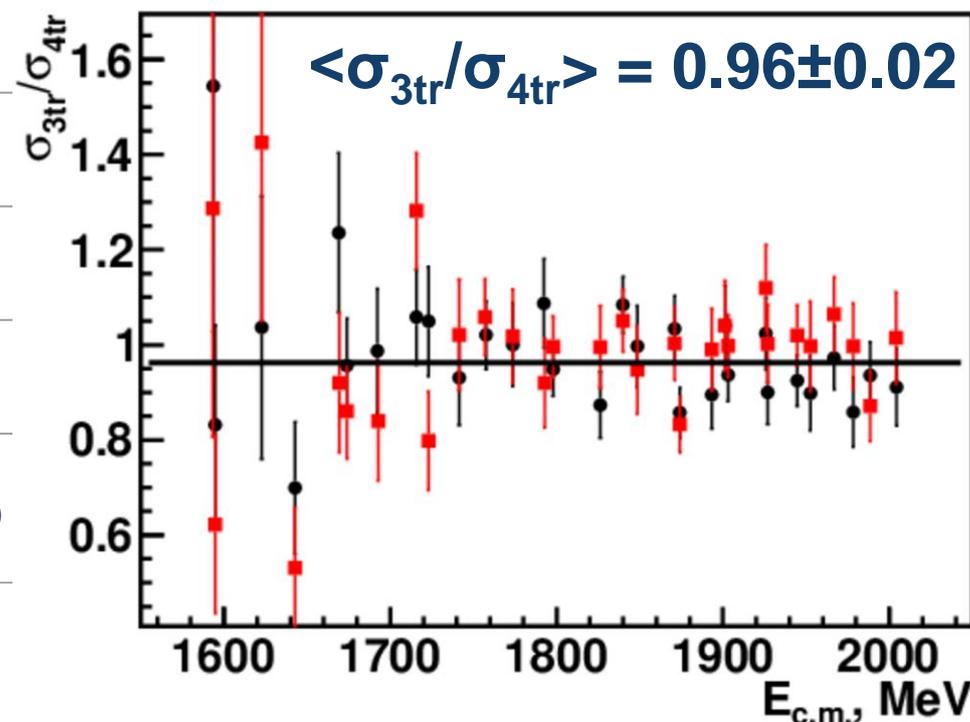




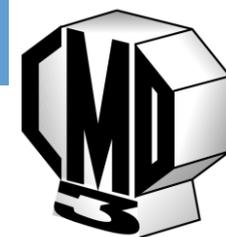
Оценка систематики

Источник	Значение
Определение светимости	1%
Отличие заходов 2011-2012 годов	1.2%
Вычитание фона	1.5%
Критерии отбора	2.6%
Модельная зависимость	5%
Полная	6.1%

Отношение сечения по трем трекам к сечению по четырем трекам

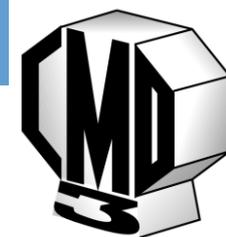


$$\sigma_{syst}^{all} = \sqrt{\sum (\sigma_{syst}^i)^2}$$



Основные положения, выносимые на защиту

- В эксперименте с детектором КМД-3 на коллайдере ВЭПП-2000 измерено сечение процесса $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^+\pi^-$ в области энергий с.ц.м. $E = 1.4-2$ ГэВ с систематической точностью $\sim 6\%$.
- На основе феноменологической модели разработан генератор первичных событий для процесса $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^+\pi^-$.
- Разработана процедура K/π - разделения на основе информации об ионизационных потерях в дрейфовой камере
- Отлажена процедура калибровки пьедесталов и коэффициентов усиления каналов катодного тракта Z-камеры.
- В 2013 году проведена модернизация электроники Z-камеры, что повысило стабильность работы системы.
- Разработана процедура восстановления продольной координаты трека в Z-камере.

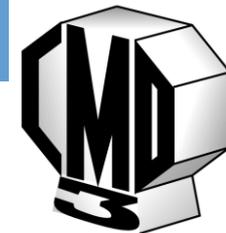


Публикации по теме

- R.R. Akhmetshin, ... D.N. Shemyakin et al. Z-chamber of the CMD-3 detector in the reconstruction of the track longitudinal coordinate. JINST 12 (2017) no.07, C07044
- D.N. Shemyakin et al. Measurement of the $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^+\pi^-$ cross section with the CMD-3 detector at the VEPP-2000 collider. Phys.Lett. B756 (2016) 153-160
- D.N. Shemyakin et al. Kaon Identification using the Tracking System of the CMD-3 Detector. DOI: 10.23727/CERN-Proceedings-2017-001.159
- G.V. Fedotovich, ... D.N. Shemyakin et al. Cross sections of hadronic reactions $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^n$ ($n=1,2,3$) measured with the CMD3 detector at the VEPP-2000 electron-positron collider. Phys.Part.Nucl. 48 (2017) no.5, 763-768
- R.R. Akhmetshin, ... D.N. Shemyakin et al. Study of the Process $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^+\pi^-$ with the CMD-3 Detector at the VEPP-2000 e^+e^- Collider. Int.J.Mod.Phys.Conf.Ser. 35 (2014)

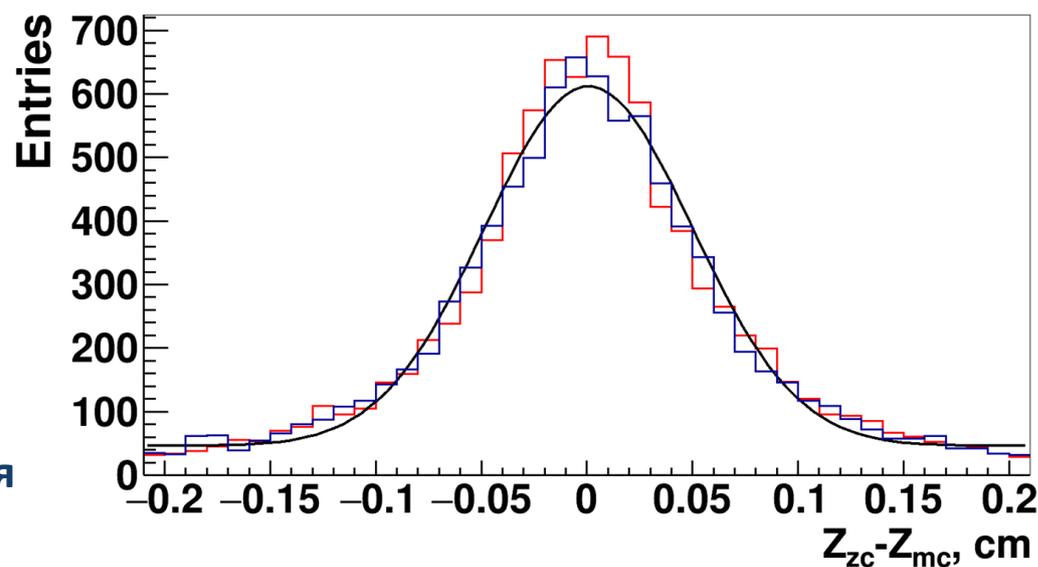


Backup



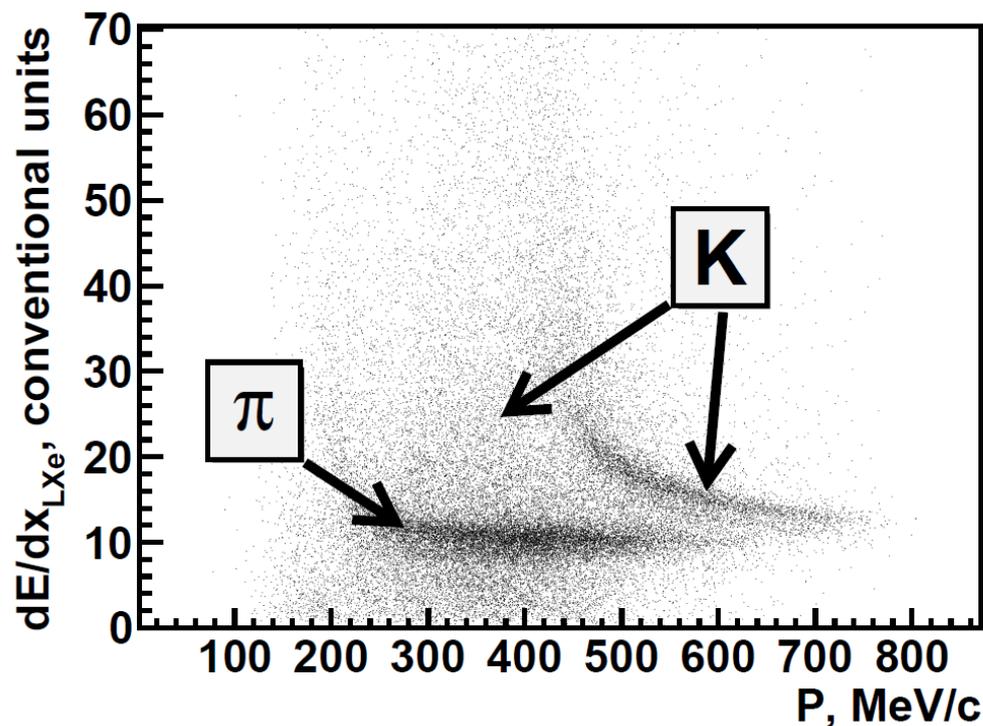
Систематическая ошибка восстановления z-координаты

- Катодные полосы были изготовлены с точностью 50 мкм.
- Дрейф лавины в магнитном поле. Из-за симметрии относительно анодной проволочки равен нулю.
- Не работающие каналы.
Неопределенность оценивается с использованием моделирования космических событий и карты неработающих каналов. На гистограмме синий соответствует реальной ситуации в марте 2011 года (38 сломанных каналов). Среднее значение распределений статистически одинаково. Отклонения составляет 8.9 ± 6 мкм

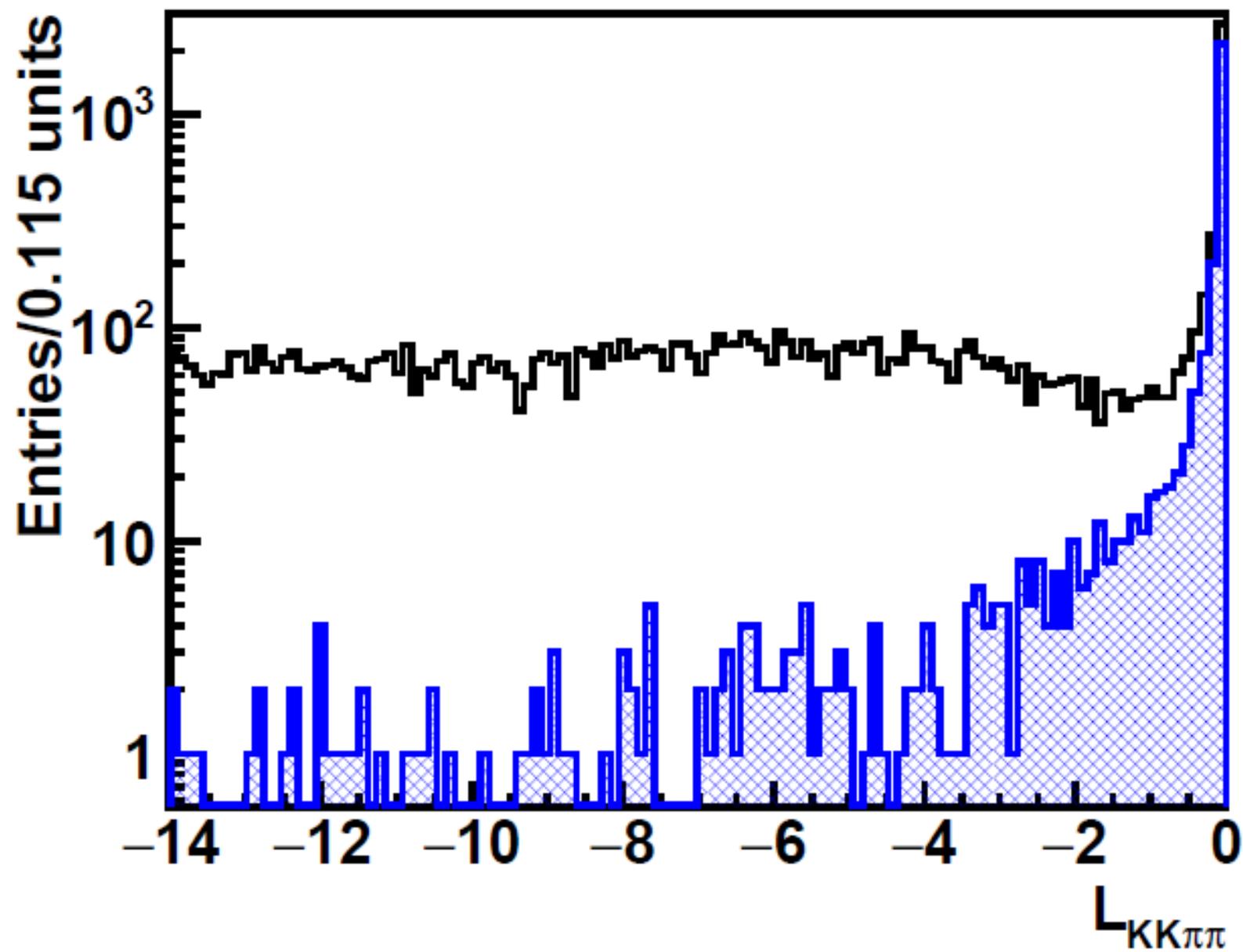


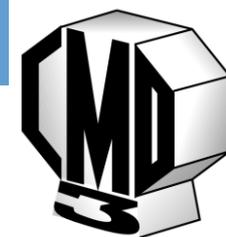


Ионизационные потери



~ 2% событий имеют две одинаково заряженные частицы с импульсом более 500 МэВ/с, что приводит к менее чем 0.5% событий с неправильной идентификацией.





Параметры заложенные в генератор

$M\{K_1(1270)\} = 1.255$ ГэВ, $\Gamma\{K_1(1270)\} = 0.17$ ГэВ

$M\{K_1(1400)\} = 1.425$ ГэВ, $\Gamma\{K_1(1400)\} = 0.25$ ГэВ

$M\{f_0(980)\} = 0.98$ ГэВ, $\Gamma\{f_0(980)\} = 0.1$ ГэВ

$M\{\sigma\} = 0.499$ ГэВ, $\Gamma\{\sigma\} = 0.25$ ГэВ

$g\{K_1(1270)\rightarrow\rho K\} = 1$

