

Измерение массы нейтрального каона на КМД-3 на коллайдере ВЭПП-2000

Даниил Иванов 19.6.23

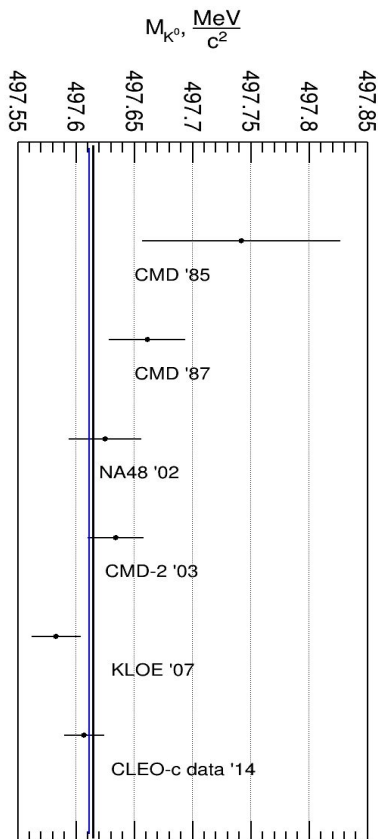
Научный руководитель: Евгений Петрович Солодов

План презентации

1. Мотивация
2. Методы измерения массы нейтрального каона
3. Моделирование. Оптимизация отборов. Отработка методики
4. Поправки. Оценка систематических неопределенностей
5. Изучение стабильности энергии пучков.
6. Предварительные результаты
7. Заключение

Мотивация

Предыдущие результаты измерения массы K^0



Value (MeV)	Events	Document ID	Experiment
497.742 ± 0.085	780	Barkov	CMD
497.661 ± 0.033	3713	Barkov	CMD
$497.625 \pm 0.001 \pm 0.031$	655k	Lai	NA48
$497.583 \pm 0.005 \pm 0.020$	35k	Ambrosino	KLOE
$497.607 \pm 0.007 \pm 0.015$	261k	Tomoradze	CLEO-c*
497.611 ± 0.013	PDG Fit (Error includes scale factor of 1.2)		
497.634 ± 0.024	49k	Зайцев	CMD-2
497.615 ± 0.010	NewFit (scale factor = 1.22)		

Наблюдается небольшое рассогласование в измерениях. $S=1.22$. С детектором КМД-3 можно провести новое измерение с лучшей или сравнимой точностью.

* – использованы данные CLEO-c, но работа не за авторством коллаборации CLEO.

Изучение возможности нового измерения

В сезоне PH1/OMEGA 2018 с детектором КМД-3 вблизи пика ϕ -мезонного резонанса был набран интеграл светимости равный 10.3 пб^{-1} , что соответствует 10^6 отобранных пар $K_S K_L$ из распадов ϕ -мезона.

$E_{\text{beam}}, \text{ MeV}$	505	508	508.5	509	509.5	510	510.5	511	511.5	514
$\int L dt, \text{ nb}^{-1}$	454.9	549.0	1395.1	979.5	2621.6	2041.3	1053.5	780.3	561.3	520.9

$$\Sigma \int L dt \approx 10.3 \text{ pb}^{-1}$$

По сравнению с прошлым анализом, проведённым в стенах ИЯФ (КМД-2), улучшилось:

- в ~ 3 раза угловое разрешение,
- Появилась система непрерывного контроля энергии,
- ~ 30 раз больше статистики ($\sim 10 \text{ пб}^{-1}$ против 355 нб^{-1})

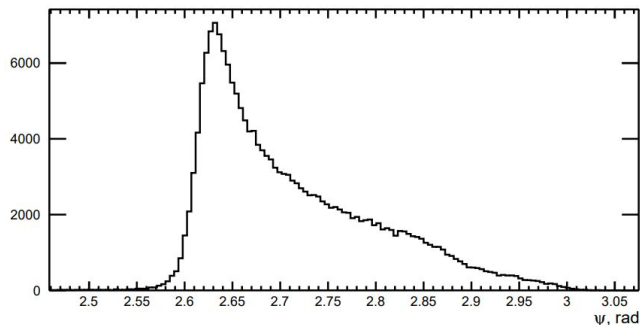
Было проведено моделирование и реконструкция процесса $e^+e^- \rightarrow KSKL$ для всех экспериментальных энергий со сравнимым числом событий.

Метод предельного угла

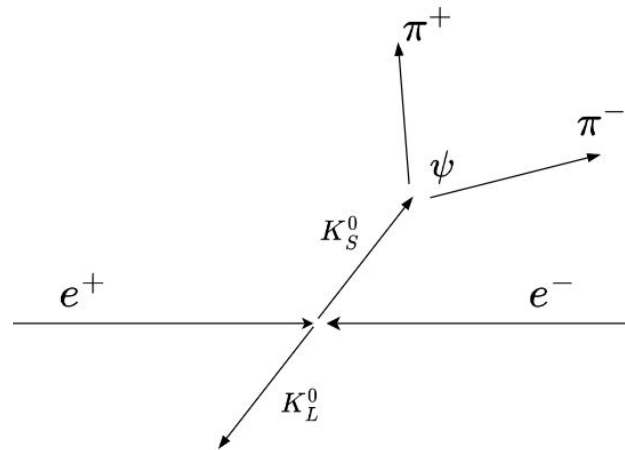
Импульс нейтрального каона, определяется по импульсам и углам распадных пионов. Можно определить импульс по предельному углу разлета – это позволяет убрать систематические погрешности в измерении импульсов пионов.

$$M_K = \sqrt{E_K^2 - \vec{p}_K^2}, \quad E_K = E_{beam}$$

$$M_{K_S^0} = E_{K_S^0} \sqrt{1 - \beta_m^2 \cos(\frac{\psi_c}{2})}, \quad \beta_m^2 = 1 - \frac{M_\pi^2}{E_{K_S^0}^2}.$$



Распределение угла
разлёта ($E = 509 \text{ MeV}$)



Метод полной реконструкции

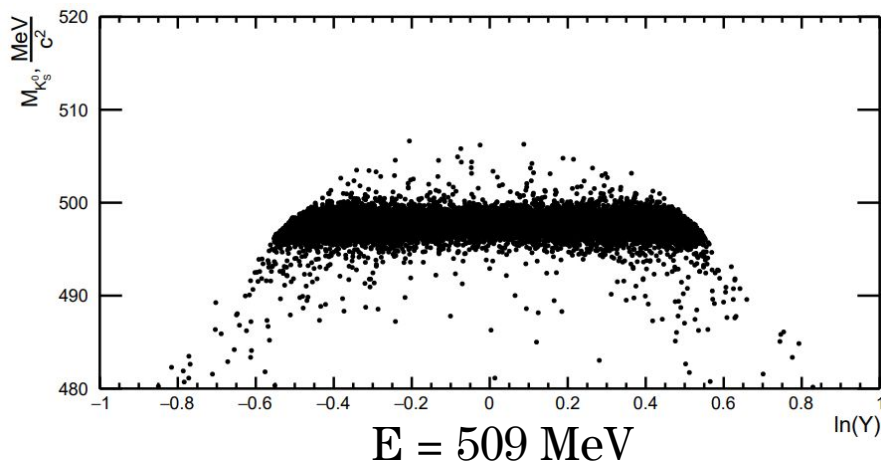
Предложен А.С. Зайцевым в его дипломной работе.

$$M_{K_S^0} = E_{K_S^0} \sqrt{1 - \frac{1}{\eta^2} (1 + \sqrt{1 - \eta^2 \cos(\psi)}) (1 - \sqrt{1 - \eta^2 \beta_m^2})}$$

$$\eta^2 = \frac{1-Y^2}{1+Y^2}, Y = \frac{|\vec{p}_{\pi^+}|}{|\vec{p}_{\pi^-}|}. \quad \text{В отличие от метода предельного угла данный метод}$$

позволяет использовать всю статистику.

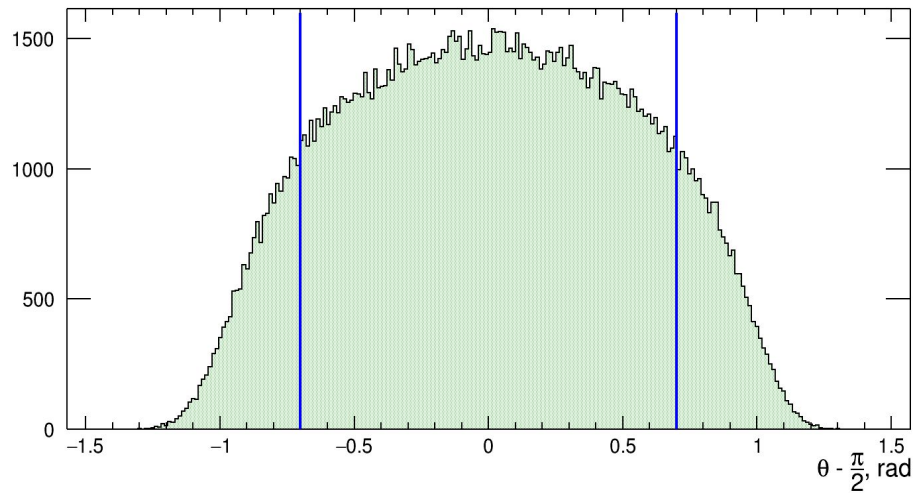
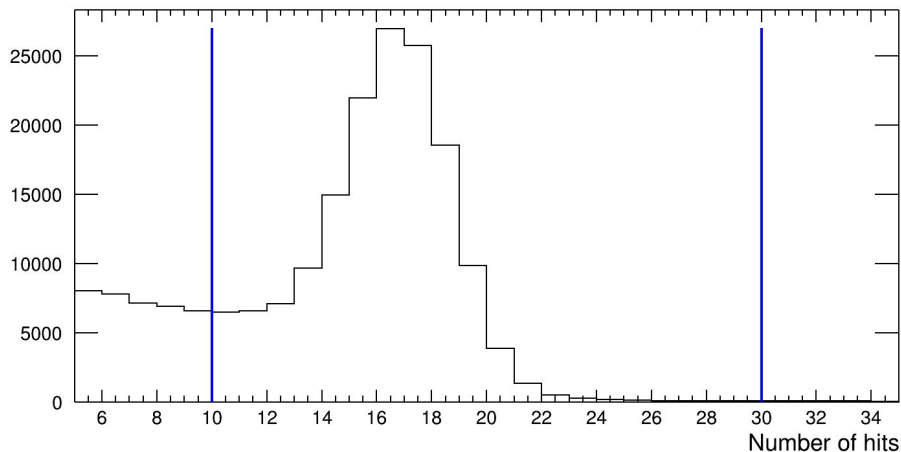
Метод полной реконструкции обладает малой чувствительностью к систематическим погрешностям абсолютных величин импульсов пионов, так как они входят в виде отношения.



Критерии отбора событий (1)

Отбор “хороших” треков:

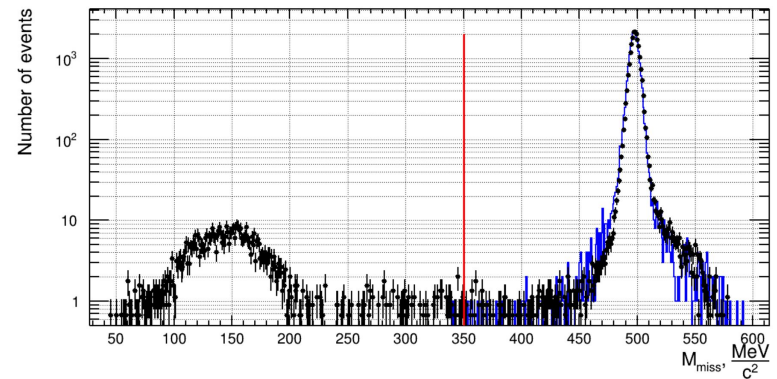
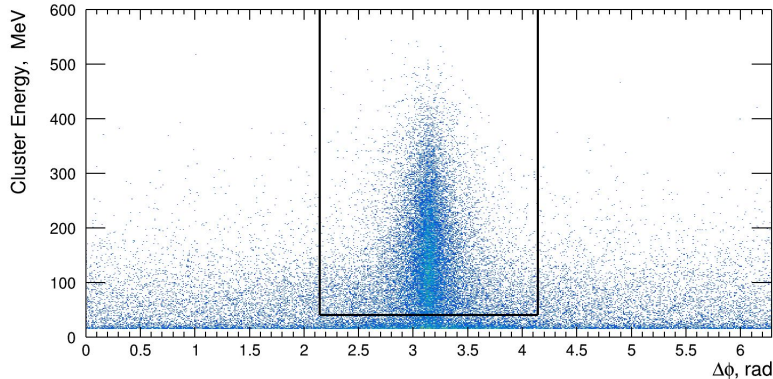
1. Координата вдоль пучка: $|z| < 12$ см,
2. Качество реконструкции трека по r-φ и по z: $\chi^2_{r-\phi} < 15$, $\chi^2_z < 10$
3. Количество сработанных проволочек: $10 < n_{\text{hit}} < 30$
4. Полярный угол трека $|\theta - \frac{\pi}{2}| < 0.7$



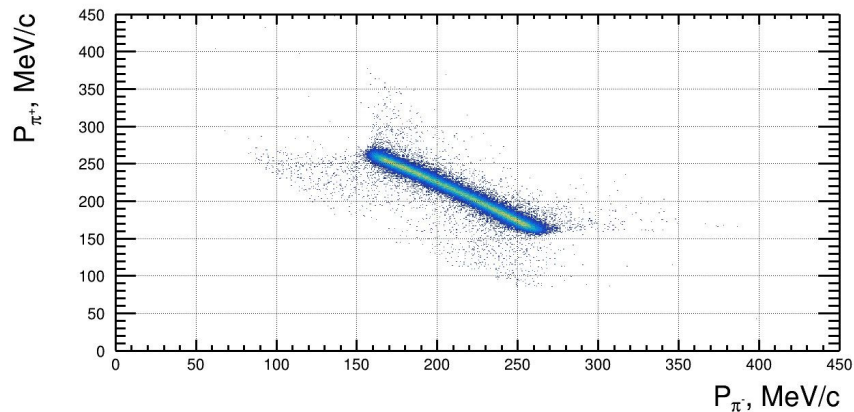
Критерии отбора событий (2)

Если в событии нашлось два “хороших” трека, то к этим трекам применялись следующие отборы, которые определяли пионы из распада K_S

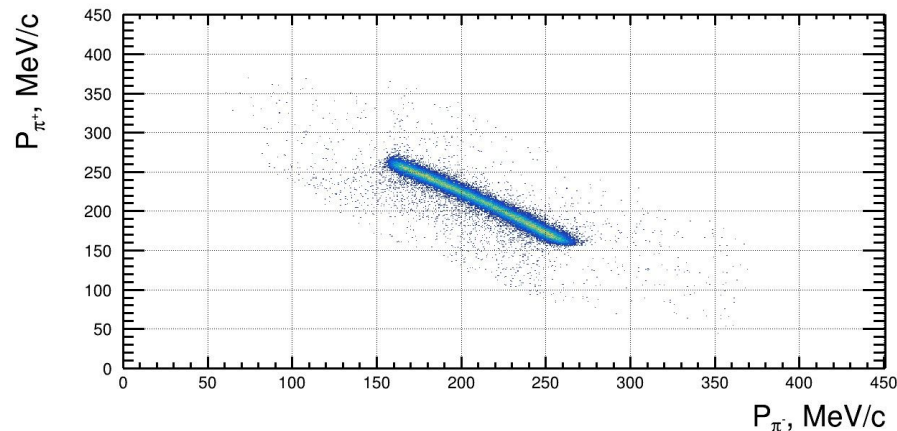
1. Неколлинеарность треков, $||\phi_1 - \phi_2| - \pi| > 0.15$ || $\Delta\theta = |(\theta_1 + \theta_2) - \pi| > 0.25$
2. Противоположные заряды,
3. Поперечный отлёт каона: $kstlen < 1.7$ см,
4. Косинус угла между радиус-вектором, соединяющим место встречи пучков с вершиной распада K_S в r-φ плоскости: $\cos(\alpha) > 0.85$
5. Средние потери двух треков на ионизацию в DC: $dE_{avg}/dx < 5000$
6. $M_{miss} > 350 \text{ MeV}/c^2$,
7. Наличие кластер с $E > 40 \text{ MeV}$ и направлением относительно K_S $|\Delta\phi - \pi| < 1, |\Delta\theta| < 1$.



Критерии отбора событий (3)



Моделирование $E_{\text{beam}} = 509 \text{ MeV}$



Эксперимент $E_{\text{beam}} = 509 \text{ MeV}$

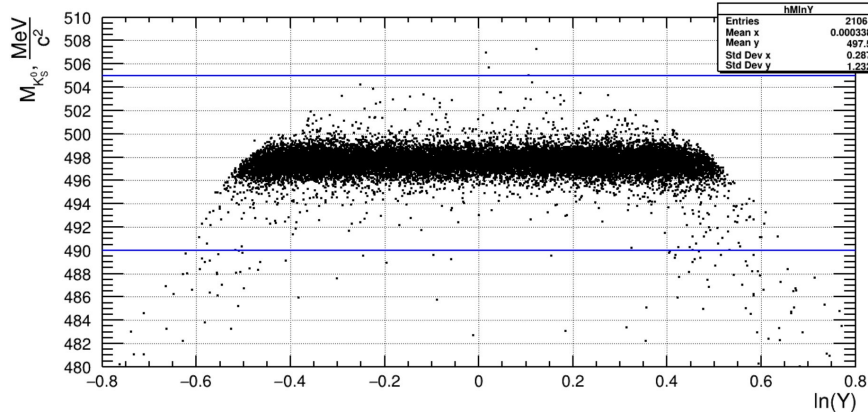
$$\epsilon_{MC} \cong 14\%$$

Всего отобрано 1001541 пар каонов.

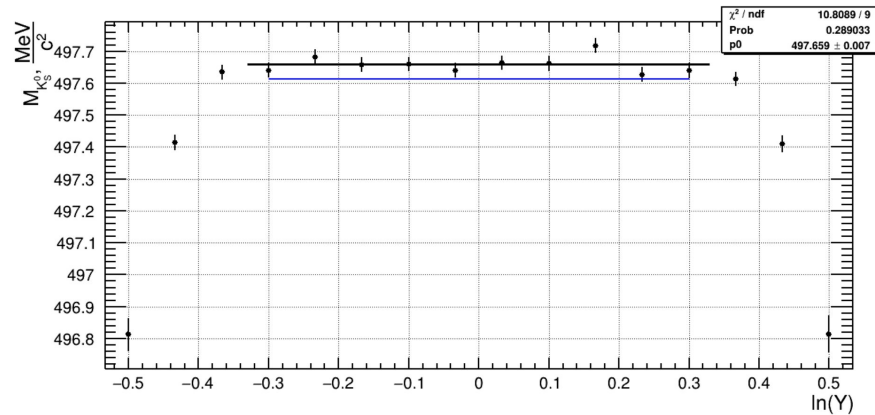
Методика определения массы

Строится profile M vs $\ln Y$, для полосы по оси Y от 490 до 505. Получившийся график фиттируется константой в пределах, в которых фазовый объём не влияет на профайл. Ниже приведены графики для МС $E_{\text{beam}} = 509 \text{ MeV}$.

M vs $\ln Y$ (события из синей области идут в профайл).



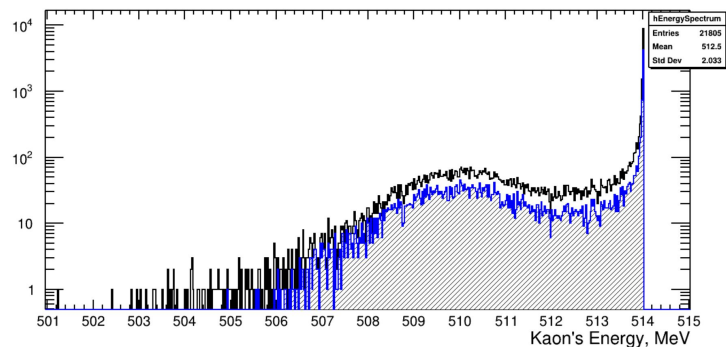
Profile (чёрное - реконструированное, синее - генераторные данные).



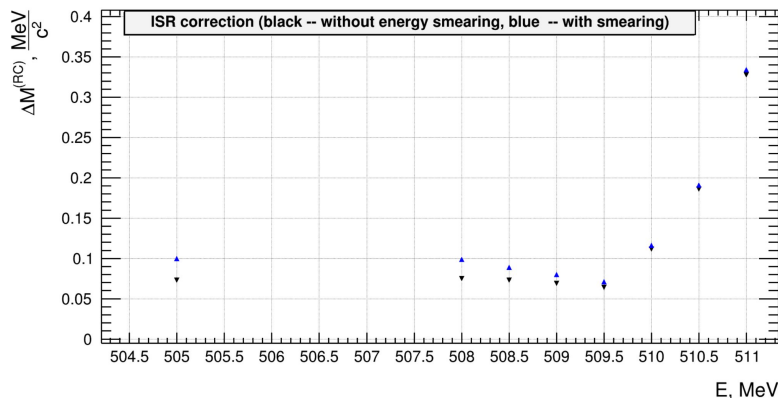
Учет излучения начальными частицами (ISR)

Чтобы учесть отличие истинной энергии каона от энергии пучка, связанное с ISR, в качестве энергии каона бралось среднее по спектру каона с учётом ISR (построен по генераторным данным о фотонах).

Учет разброса энергии в пучке (он измеряется лазерной системой; его величина $\sim 250\text{--}270$ кэВ) приводит к небольшому $10\text{--}20$ кэВ сдвигу радипоправки к массе.



Спектр энергии каонов из МС ($E_{\text{beam}} = 514$ MeV, чёрное – до отборов, синее – после отборов).



Зависимость радипоправки от энергии (чёрное – без размазки по энергии, синее – с размажкой).

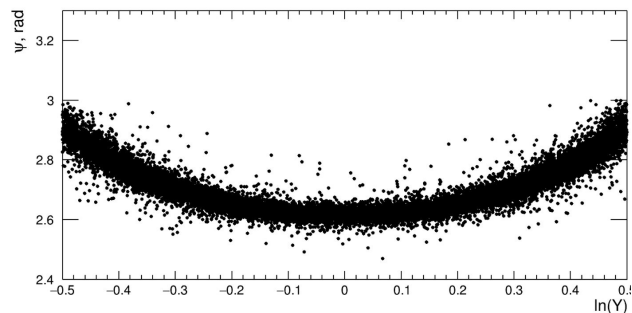
Поправка на угловое разрешение

$$\Delta_{NC}M = -M(\langle\psi\rangle) + \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_\psi^2}} \int d\psi M(\psi) \exp\left[-\frac{(\psi - \langle\psi\rangle)^2}{2\sigma_\psi^2}\right] \approx \frac{\sigma_\psi^2}{2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \psi^2} M_{K_S^0} + \mathcal{O}(\sigma_\psi^3)$$

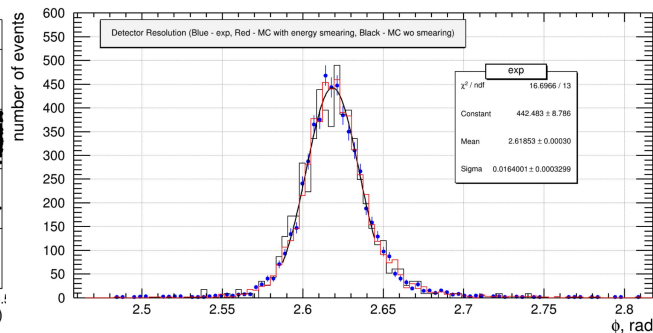
σ_ψ – разрешение по пространственному углу между пионами.

Так как по краям распределение заметно расширяется, решено использовать переменное разрешение $\sigma_\psi = \sigma_\psi(\ln Y)$

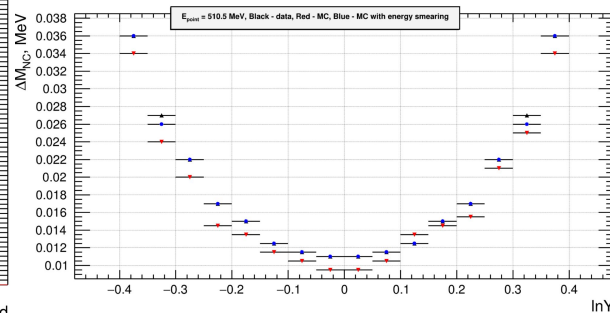
E = 510.5 MeV



Угол ψ vs $\ln Y$



Профайл одного слайса по $\ln Y$ (точки – данные, красная гистограмма – MC, чёрное – гистограмма – MC с энергетической размазкой)



Зависимость поправки на разрешение к массе от $\ln Y$ (чёрные – данные, красные – MC, синие – MC с энергетической размазкой)

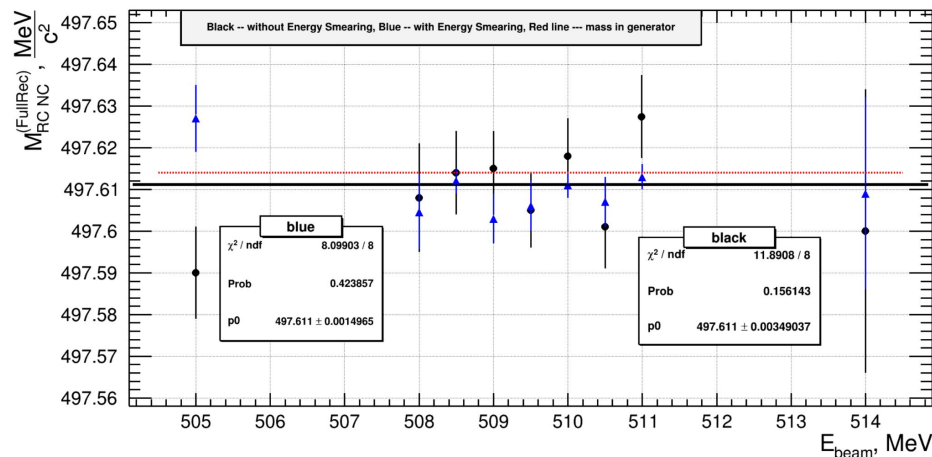
Проверка методики по моделированию

Чёрное – МС (линия – фит, точки – результаты), Синяя линия – заложенное в МС (использовался генератор MCGPJ). Вторая ошибка в ответе – оценка систематических неточностей.

$$M_{K_S^0}^{(FullRec)} = 497.611 \pm 0.002 + 0.012 \frac{MeV}{c^2}; \quad \frac{\chi^2}{ndf} = \frac{8.1}{8}$$

Заложено в генераторе: $M_{K_S^0}^{(MC)} = 497.614 \frac{MeV}{c^2}$

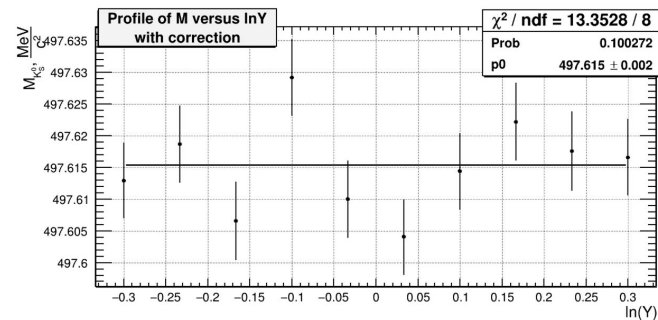
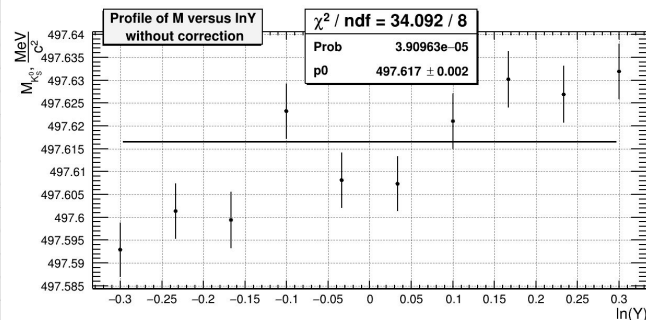
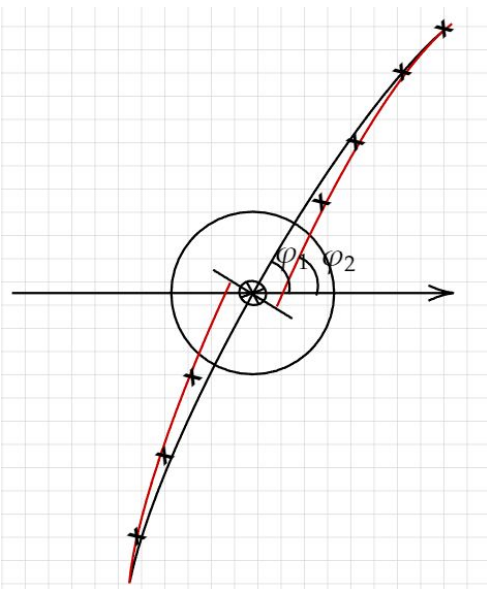
Для проверки использовалось полное моделирование с учётом разрешений детектора и условий набора данных, соответствующих тем, что были в эксперименте.



Чёрные точки - МС с разбросом по энергии, синие маркеры – МС без разброса по энергии, красная пунктирная линия – заложенная в МС масса.

Коррекция ошибок реконструкции треков в ДК

$E = 509.5 \text{ MeV}$



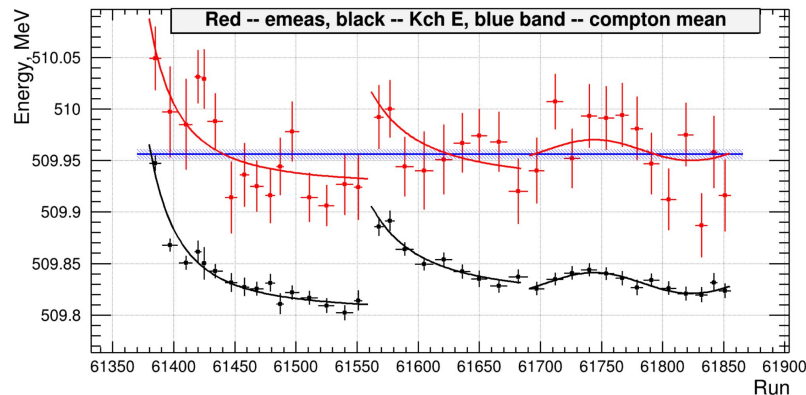
Наблюдается систематическое отклонение импульсов и углов
реконструированных треков из-за низкого разрешения внутренних слоёв.
Для треков, летящих из пучка, можно проводить фитирование с общей
вершиной в месте встречи, что существенно уменьшает неточность
реконструкции трека.

В качестве оценки поправки использовалось $\phi_1 - \phi_2$ и $p_1 - p_2$ для коллинеарных событий с импульсами,
соответствующими средним импульсам пионов из распада K_S^0 .

Контроль дрейфа энергии пучков по заряженным каонам

В качестве дополнительного контроля при измерении энергии лазерной системой вблизи пика ϕ -мезона можно использовать среднее значение импульса K^+K^- пары в процессе (см. презентацию “Контроль энергии по заряженным каонам на пике ϕ -мезона” для семинара КМД-3)

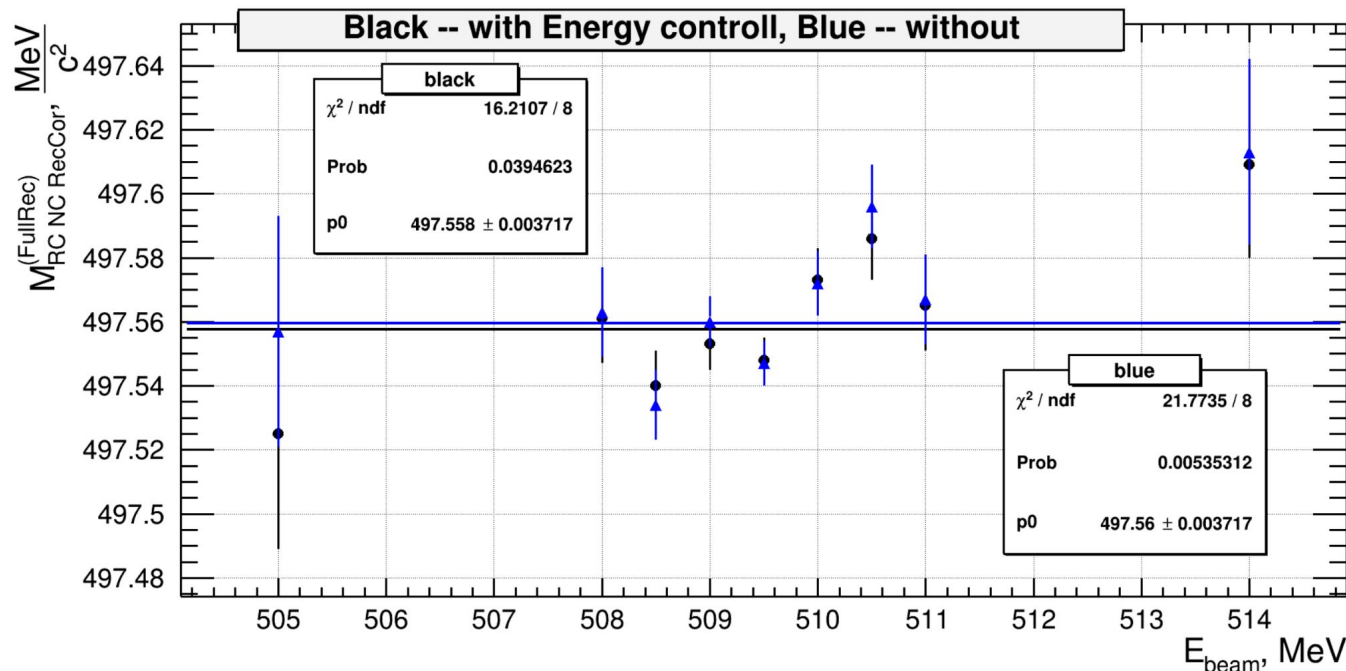
$$e^+e^- \rightarrow \phi \rightarrow K^+K^- \quad E_{K^\pm} = \sqrt{p_{K^\pm}^2 + M_{K^\pm}^2}; \quad M_{K^\pm} = 493.677 \frac{\text{MeV}}{c^2} \quad \text{PDG}$$



Для каждого захода энергия каонов определялась при помощи фита распределения величины $E_{K^\pm} = \sqrt{P^2 + M_{K^\pm}^2}$. Проводилось кусочное фитирование зависимости энергии каонов от номера захода. Далее фиксировались все параметры кроме константы и этой функцией фитировали зависимость *emeas* от номера захода. Полученную функцию используем для вычисления энергии.

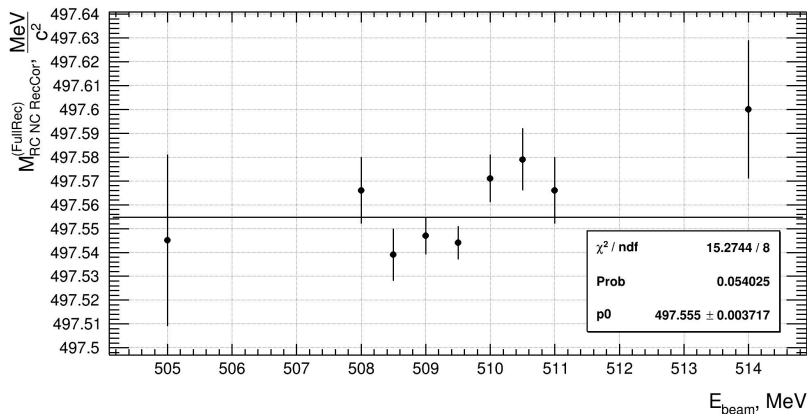
Неточность контроля: $\sigma_E = 9.2 \text{ keV}$

Влияние поправок на дрейф энергии пучков



Зависимость рассчитанной массы K_s в зависимости от экспериментальной точки (чёрное – с контролем энергии, синее – без контроля энергии).

Предварительный результат



Источник	Сдвиг, кэВ/ c^2	Ошибка, кэВ/ c^2
ISR	-(62 \div 1453)	2 \div 12
Поправка на нелинейность	9 \div 38	1 \div 7
Влияние условий отбора	—	6
Контроль дрейфа энергии	—	9
Измерение энергии	—	30

Зависимость рассчитанной массы K_S^0 от экспериментальной точки

$$M_{K_S^0} = 497.555 \pm 0.005 \pm 0.008 \pm 0.009 \pm 0.030 \text{ МэВ}/c^2$$

Ошибки: 1) статистическая (применён $S = 1.37$), 2) систематическая, связанная с отборами, ISR, поправками на разрешение, 3) систематическая ошибка контроля энергии, 4) систематическая ошибка измерения энергии лазерной системой. Последние две ошибки коррелированные.

Чего добились?

1. Отработана методика измерения массы
2. Проведен расчет основных поправок
3. По заряженным каонам учтен дрейф энергии в процессе набора статистики
4. Проведена оценка основных систематических погрешностей
5. Получена предварительная величина массы нейтрального каона
6. Показано, что погрешности детектора составляют ~ 10 кэВ
7. Требуется улучшение систематической неопределенности в измерении энергии пучков.
8. Анализ продолжается.