

# Измерение массы нейтрального каона

Е.Солодов

КМД-3 Коллаборация

Институт Ядерной физики им. Будкера

Памяти Льва Митрофановича Баркова и

Николая Мержакифовича Рыскулова

# Мотивация

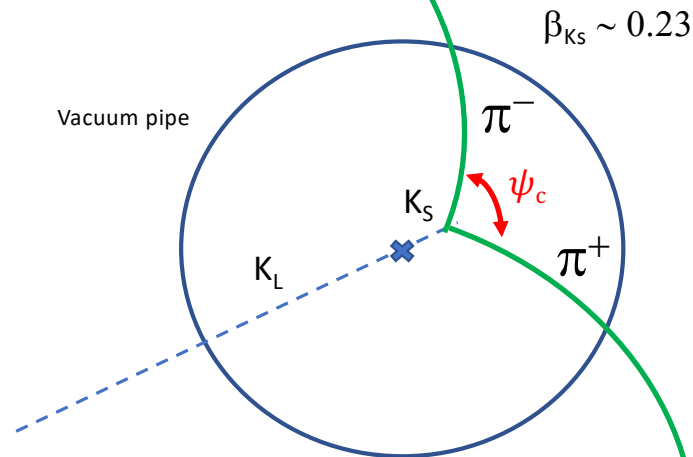
| VALUE (MeV)                                                                                |                    | EVTS | DOCUMENT ID            | TECN  | COMMENT                                |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|------|------------------------|-------|----------------------------------------|
| <b>497.611 ± 0.013</b>                                                                     | <b>OUR FIT</b>     |      |                        |       | Error includes scale factor of 1.2.    |
| <b>497.611 ± 0.013</b>                                                                     | <b>OUR AVERAGE</b> |      |                        |       | Error includes scale factor of 1.2.    |
| 497.607 ± 0.007 ± 0.015                                                                    |                    | 261k | <sup>1</sup> TOMARADZE | 2014  | $\psi(2S) \rightarrow K_S^0 X$         |
| 497.583 ± 0.005 ± 0.020                                                                    |                    | 35k  | AMBROSINO              | 2007B | KLOE $e^+ e^- \rightarrow K_L^0 K_S^0$ |
| 497.625 ± 0.001 ± 0.031                                                                    |                    | 655k | LAI                    | 2002  | NA48 $K_L^0$ beam                      |
| 497.661 ± 0.033                                                                            |                    | 3713 | BARKOV                 | 1987B | CMD $e^+ e^- \rightarrow K_L^0 K_S^0$  |
| 497.742 ± 0.085                                                                            |                    | 780  | BARKOV                 | 1985B | CMD $e^+ e^- \rightarrow K_L^0 K_S^0$  |
| • • We do not use the following data for averages, fits, limits, etc. • •                  |                    |      |                        |       |                                        |
| 497.44 ± 0.50                                                                              |                    |      | FITCH                  | 1967  | OSPK                                   |
| 498.9 ± 0.5                                                                                |                    | 4500 | BALTAY                 | 1966  | HBC $K^0$ from $\bar{p}p$              |
| 497.44 ± 0.33                                                                              |                    | 2223 | KIM                    | 1965B | HBC $K^0$ from $\bar{p}p$              |
| 498.1 ± 0.4                                                                                |                    |      | CHRISTENSON            | 1964  | OSPK                                   |
| <sup>1</sup> Obtained by analyzing CLEO-c data but not authored by the CLEO Collaboration. |                    |      |                        |       |                                        |

1. Измерений не много
2. Последнее измерение довольно давно
3. Есть небольшое рассогласование в значениях массы  $C = 1.2$
4. Масса много куда входит – хорошо бы уточнить...

# Метод предельного угла

Прорыв в точности с появлением коллайдеров – с 0.3 МэВ до 0.03 МэВ:

- реакция  $e^+e^- \rightarrow \phi(1020) \rightarrow K_S K_L$  с простой кинематикой
- метод резонансной деполаризации дает точное измерение  $E_{K_S}$



$$\beta_{K_S} \sim 0.23, L_{\text{decay}} \sim 0.6 \text{ cm}$$

Угол между пионами минимальный (предельный  $\psi_c$ ) при распаде перпендикулярно к импульсу  $K_S$

Зная массу пиона по предельному углу вычисляется импульс  $K_S$

$$m_{K_S} = \left[ E_{K_S} * \sin^2 \left( \frac{\psi_c}{2} \right) + 4m_\pi^2 * \cos^2 \left( \frac{\psi_c}{2} \right) \right]^{1/2}$$

Использовать метод предельного угла предложен Л.М.Барковым и реализован Н.М.Рыскуловым на ВЭПП-2М с детектором КМД

Импульсы и углы (зеркально) идентичны – множество систематических неточностей в разнице углов сокращается.  
Измерения импульсов пионов не требуется!  
Мало событий вблизи предельного угла.

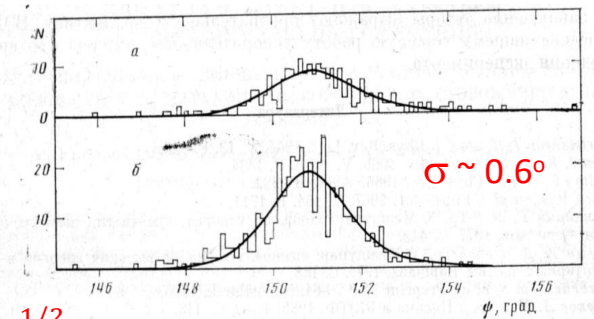
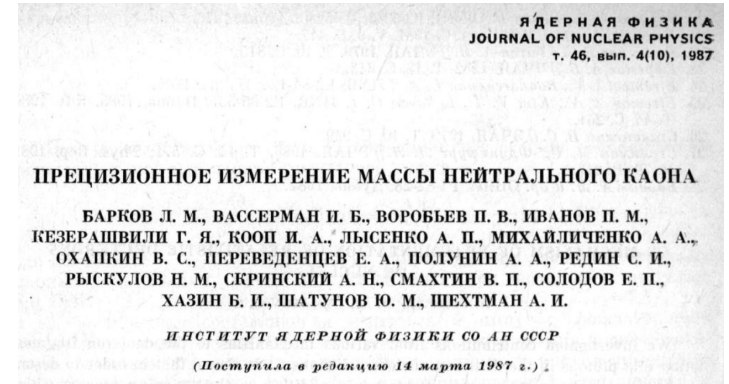
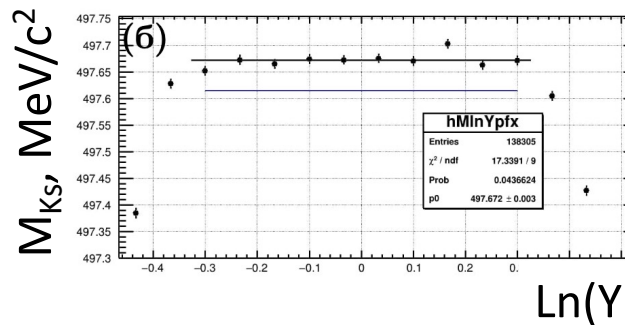
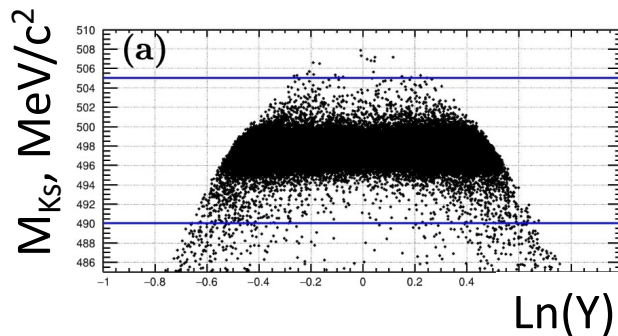


Рис. 4. Распределение событий второй группы по углам разлета пионов. Сплошная кривая – расчет. а –  $M=497.719$  МэВ,  $H=14.93$  кГс; б –  $M=497.657$  МэВ,  $H=24.70$  кГс

# Метод полной кинематики

$$\beta_{K_S^0}^2 \equiv 1 - \left( \frac{M_{K_S^0}}{E_{K_S^0}} \right)^2 \quad \beta_{K_S^0}^2 = \frac{1}{\eta^2} \left( 1 + \cos \psi \sqrt{1 - \eta^2} \right) \left[ 1 - \sqrt{1 - \beta_m^2 \eta^2} \right]$$

$$\beta_m^2 \equiv 1 - \left( \frac{2M_{\pi^\pm}}{E_{K_S^0}} \right)^2 \quad \eta \equiv \frac{1 - Y^2}{1 + Y^2}$$



$$Y = p_+/p_-, \quad p_\pm \equiv |\vec{p}_\pm|$$

Формула для предельного угла

$$Y = 1 \quad \beta_{K_S^0}^2 = \beta_m^2 \cos^2 \frac{\psi_c}{2}$$

1. Используются все события распада Ks
2. Сразу строится масса – профайл(?)
3. Зависит только от отношения  $Y = P+/P-$
4. Хорошо если мало статистики

Предложено и использовано А.Зайцевым на ВЭПП-2М с КМД-2 - (2005)

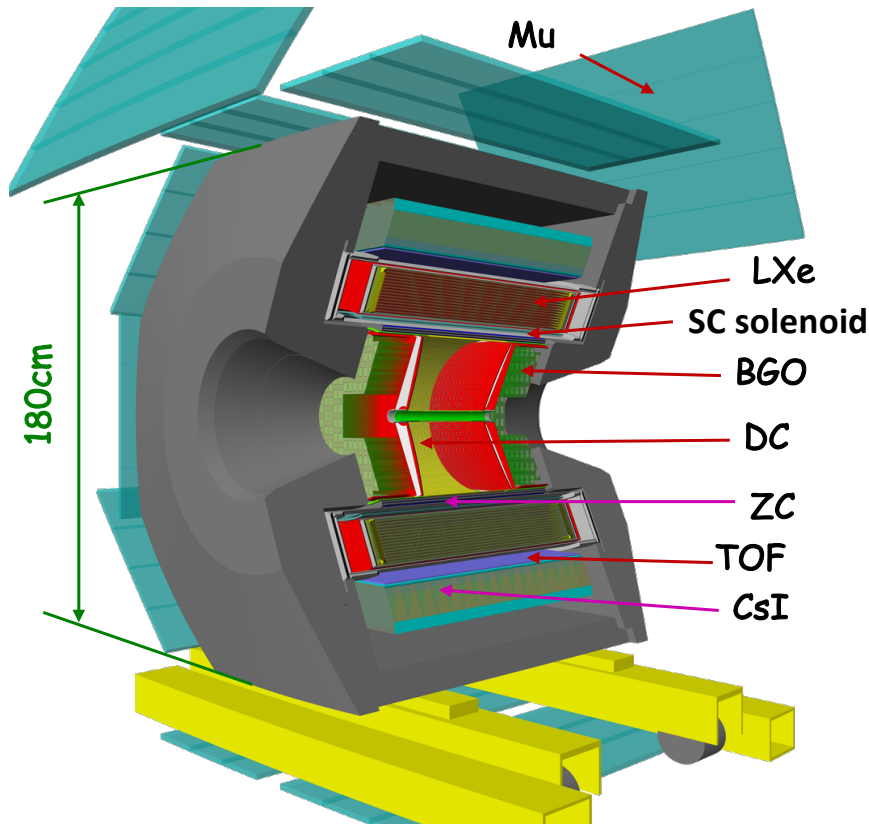
$$m(K^0) = 497.634 \pm 0.024 \quad - 49k$$

(not published in peer review journal)

1. Кинематические искажения
2. Зависимость разрешения от  $\log Y$
3. Зависимость от зоны профайла
4. Профайл зависит от хвостов – большая радиоправка
5. В отношении  $P+/P-$  не все сокращается
6. Масса сдвигается – нужна поправка на разрешение
7. Поправки на углы? Как?
8. ...

A. S. Zaitsev, (CMD-2 Collaboration), Frascati Phys.Ser. 36 (2004) 467-471: Workshop on Physics at Meson Factories, 467-471.

# CMD-3 detector



## Tracking:

× Drift Chamber in 1.3 T magnetic field

$$\sigma_{R\phi} \sim 100 \mu\text{m}, \sigma_Z \sim 2.5\text{mm}, \sigma_{\phi} \sim 0.7^{\circ}$$
$$\sigma_p/P \sim \sqrt{0.6^2 + (4.4 \cdot p[\text{GeV}])^2}, \%$$

## Magnet:

0.25  $X_0$  1.3 T SC solenoid in common cryostat with LXe calorimeter

## Calorimetry:

× Combined EM calorimeter (LXe, CsI, BGO)

13.4  $X_0$  in barrel part

$$\sigma_E/E \sim 0.034/\sqrt{E} [\text{GeV}] \oplus 0.020 - \text{barrel}$$

$$\sigma_E/E \sim 0.024/\sqrt{E} [\text{GeV}] \oplus 0.023 - \text{endcap}$$

× LXe calorimeter with 7 ionization layers with strip readout

~2mm measurement of conversion point,  
tracking capability,  
shower profile (from 7 layers + CsI)

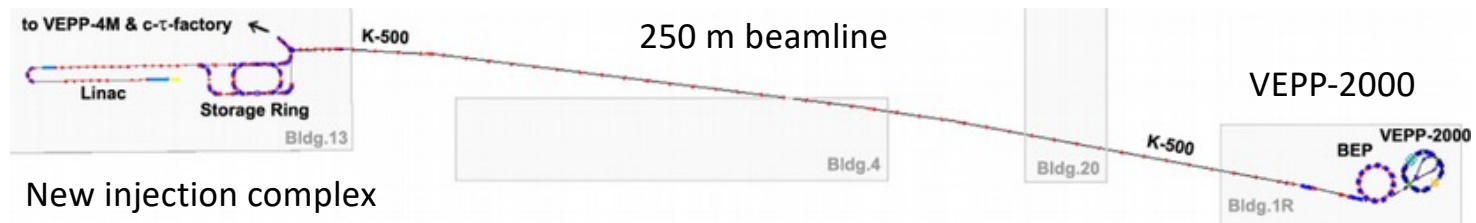
## PID:

× TOF system ( $\sigma_T < 1\text{nsec}$ )

particle ID mainly for p, n

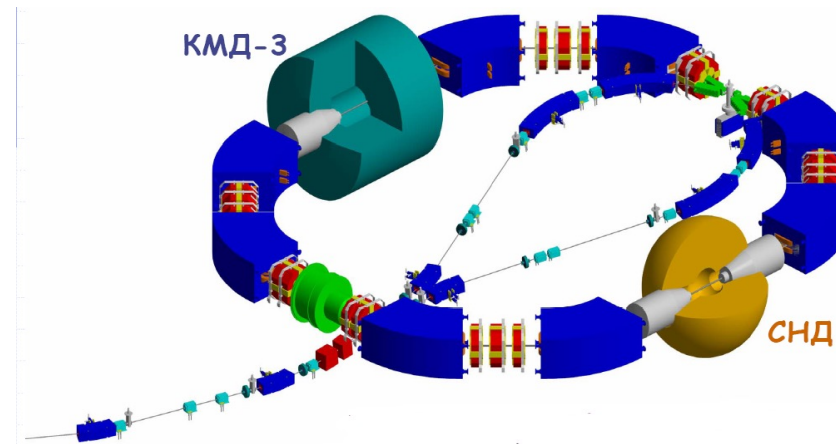
× Muon range system

# VEPP-2000 (after upgrade 2013-2016)



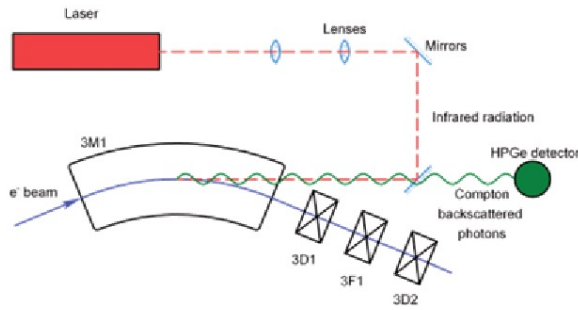
## VEPP-2000 parameters:

- c.m. energy 0.3-2.0 GeV
- circumference – 24.4 m
- round beam optics
- Luminosity at 2 GeV:
  - $1.0 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$  (project)
  - $0.8 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$  (achieved)

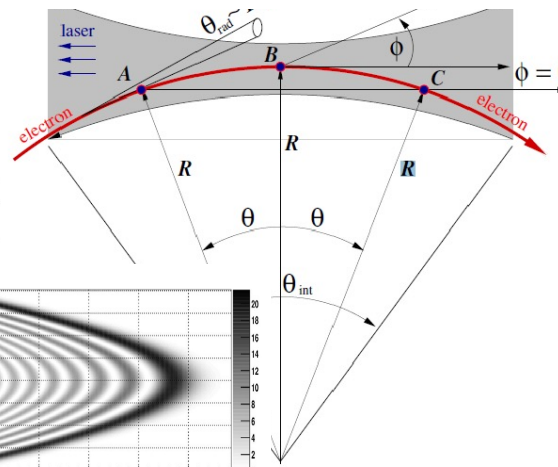
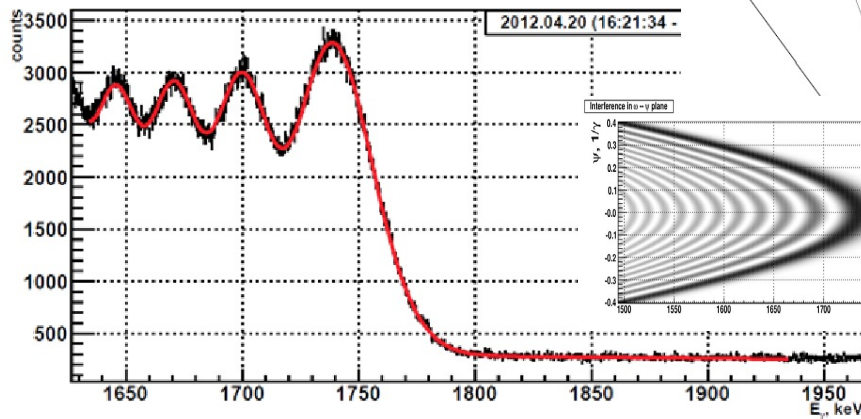


# Energy measurement

Starting from 2012, beam energy and energy spread are monitored continuously using Compton backscattering system with about 30 keV uncertainty



Two sources of photons are used: **ytterbium** and **CO lasers**.  
**CO (5 nm)** at the energy above 500 MeV,  
**Nd:YAG (1 nm)** at the energy below 500 MeV.



$$E = 993.662 \pm 0.016 \text{ MeV}$$

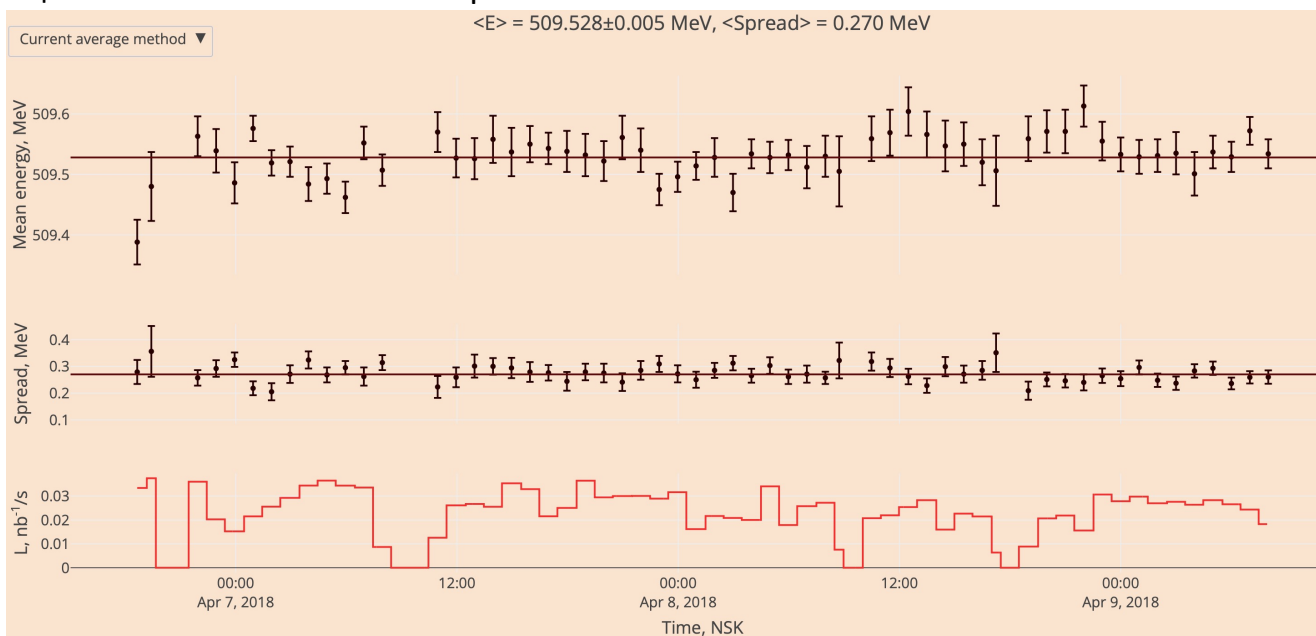
M.N. Achasov et al. arXiv:1211.0103v1 [physics.acc-ph] 1 Nov 2012

# Набор данных. Контроль энергии

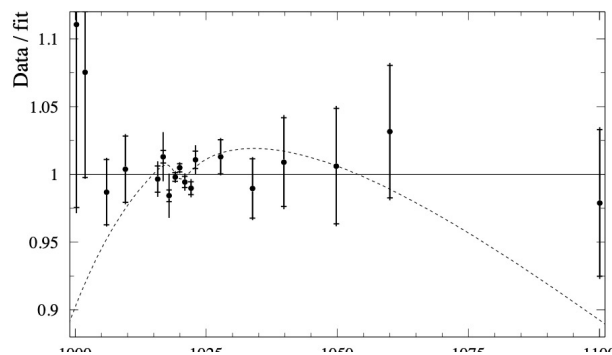
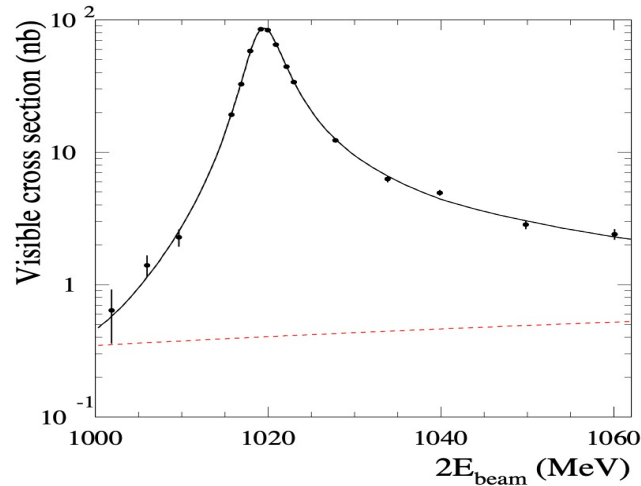
15 точек по энергии в сканировании Фи-мезона с интегралом светимости 14.3 пб-1  
 Энергия непрерывно измерялась - каждые ~20 минут – точность одного измерения ~ 20-30 keV. Оператор контролировал стабильность энергии в течение набора статистики.

Возможные дрейфы энергии увеличивают суммарные ошибки среднего для каждой точки. Контроль дрейфа по импульсам заряженных К показал «уплывание» среднего на единицы (3-4) кэВ – используется для оценки систематической погрешности.

|         |       |       |       |
|---------|-------|-------|-------|
| 500.954 | 0.015 | 0.237 | 0.006 |
| 502.993 | 0.011 | 0.252 | 0.008 |
| 504.798 | 0.008 | 0.250 | 0.009 |
| 507.868 | 0.009 | 0.272 | 0.009 |
| 508.400 | 0.017 | 0.248 | 0.014 |
| 508.957 | 0.016 | 0.249 | 0.013 |
| 509.539 | 0.008 | 0.264 | 0.006 |
| 509.970 | 0.008 | 0.281 | 0.008 |
| 510.454 | 0.007 | 0.280 | 0.009 |
| 511.046 | 0.007 | 0.257 | 0.008 |
| 511.466 | 0.014 | 0.261 | 0.016 |
| 513.868 | 0.012 | 0.264 | 0.012 |
| 516.908 | 0.018 | 0.259 | 0.011 |
| 519.894 | 0.018 | 0.299 | 0.016 |
| 524.902 | 0.023 | 0.302 | 0.016 |



# Калибровка комптона по массе $\phi$ -мезона



Отличие фита VMD и с добавлением порогового эффекта

*Phys.Part.Nucl.* 56 (2025) 2, 405-411

Работа СНД является наиболее точным анализом реакции  $\phi \rightarrow K_S K_L$  0.6% (lumi) + 0.7%(events) и полученными параметрами  $\phi(1020)$

The uncertainty of PDG  $\phi$ -meson mass  $1019.461 \pm 0.016$  MeV [19] is significantly smaller than the systematic uncertainty of the collider energy measurement (60 keV). Therefore, the PDG mass can be used for calibration of the c.m. energy scale. To do this we introduce into the fit an additional parameter  $\Delta_E$  (common shift of all energy points). Its fitted value

$$\Delta_E = 0.017 \pm 0.018 \text{ MeV} \quad (12)$$

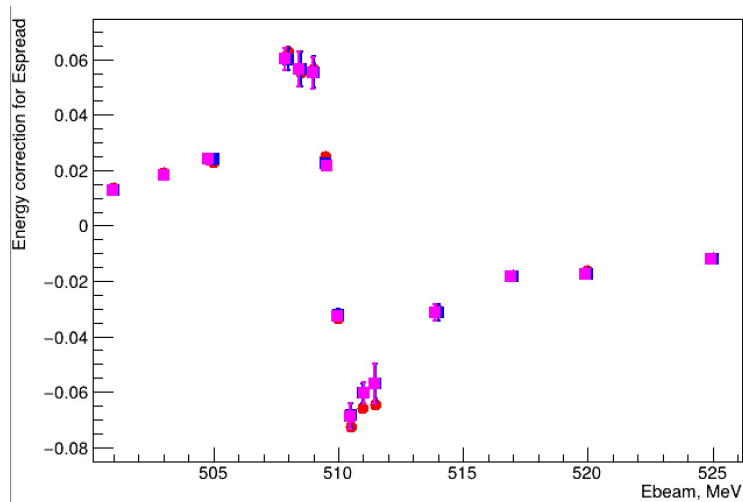
can be used to correct the energies in the first column of Table IV.

Данные СНД набирались одновременно с КМД-3 с одинаковой интегральной светимостью. Используем для вычислений энергии и калибровку опубликованные СНД, а другие наборы используем для оценки систематических эффектов

# Поправка на разброс энергии в пучке

Разброс энергий в пучках приводит к тому, что на склонах Фи-резонанса часть событий рождается с большей энергией чем средняя энергия пучков, а часть с меньшей. Из-за этого распределение по энергий рождающихся адронов смещено в разные стороны на склонах резонанса, и средняя энергия этих распределений отличается от энергии пучков.

Проведена свертка параметров резонанса с гауссом, соответствующим разбросу энергии для каждой точки и получены отклонения средней энергии каонов от измеренной энергии пучков.



Поправка для Eсм, 1/2 для Ebeam

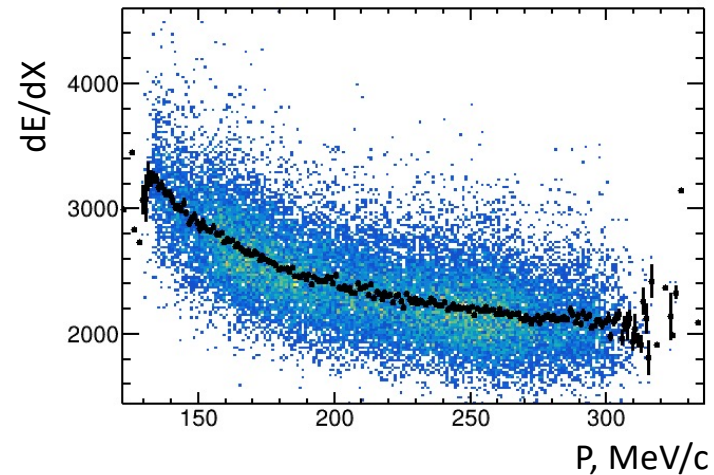
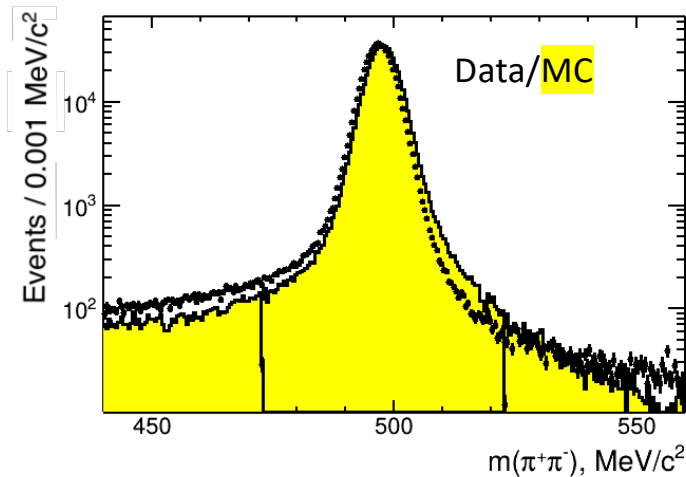
Проведены расчеты для параметров Фи из PDG, Для параметров Фи и разброса энергий из работы СНД, и для разбросов энергий из расчетов с сайта CMD-3. Разброс поправок не превышает **2 кэВ** – оценка систематики. Ошибки в измерениях разброса должны быть добавлены в вычисления.

# Отбор событий

Стандартный отбор «хороших» треков в ДК:

- Два трека разного знака,
- $>10$  хитов на треке,
- полярный угол  $1 < \theta < \pi - 1$  рад. (трек пересекает все слои ДК),
- $dE/dX$  соответствует потерям пионов
- Есть восстановленная точка пересечения треков в пространстве – вершина
- Инвариантная масса двух пионов в пределах  $475\text{—}525 \text{ МэВ}/c^2$  ( $\pm 8 \sigma$ )
- Вершина внутри вакуумной трубы (радиус  $1.7 \text{ см}$ , отлет  $K_s \sim 0.6 \text{ см}$ )

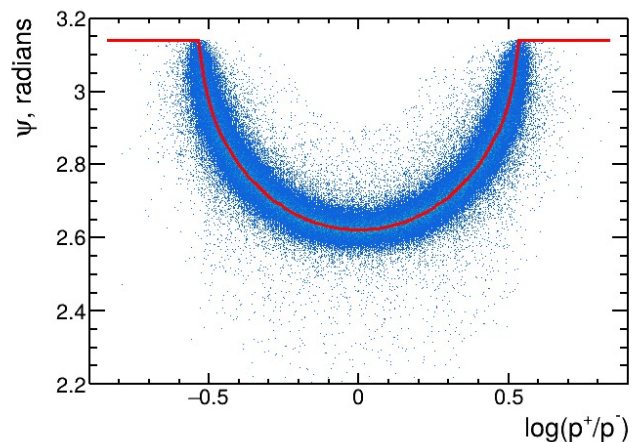
Отобрано  $\sim 2$  млн событий



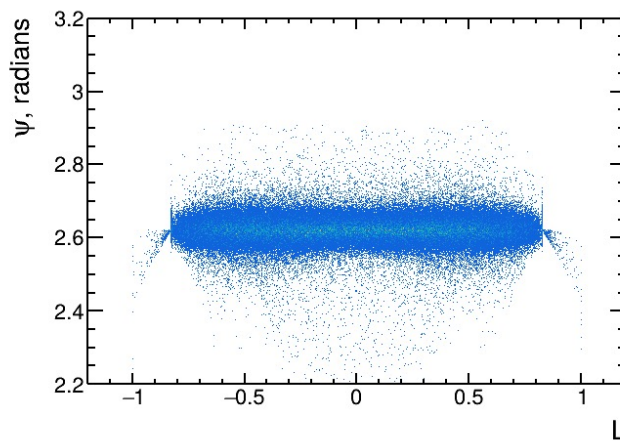
# Предельный угол – наш подход (1)

В формуле Зайцева подставлена энергия  $E_{K_S}$  и масса  $K_S$  – построена зависимость угла между пионами от  $\text{Log}Y$

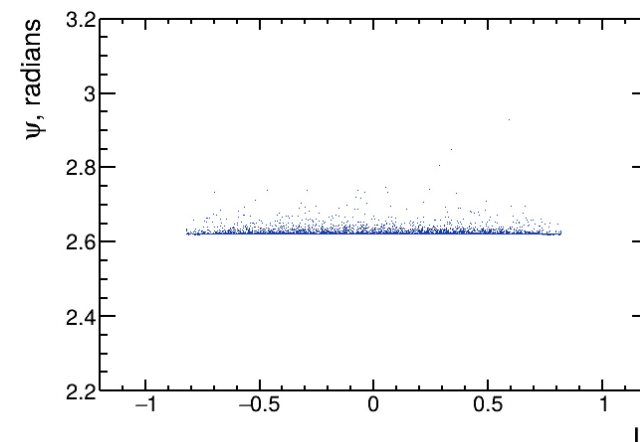
Измеренные углы и импульсы



Коррекция к предельному углу



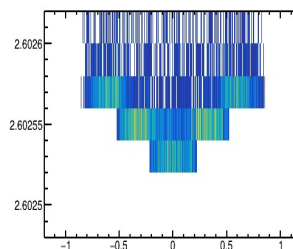
Генераторные углы



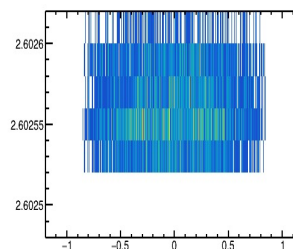
Написана процедура, которая строит минимальное среднеквадратичное (взвешенное с ошибками в угле и  $\text{Log}Y$ ) расстояние от реконструированного угла до расчетного в зависимости от длины  $L_{\text{Log}Y}$  в единицах  $\text{Log}Y$

- Нет кинематических искажений
- Разрешение слабо зависит от длины
- В расчете массы нет поправок на разрешение
- Слабо зависит от массы  $K$  в формуле

$mK_0 = 497.587$



$mK_0 = 497.611$

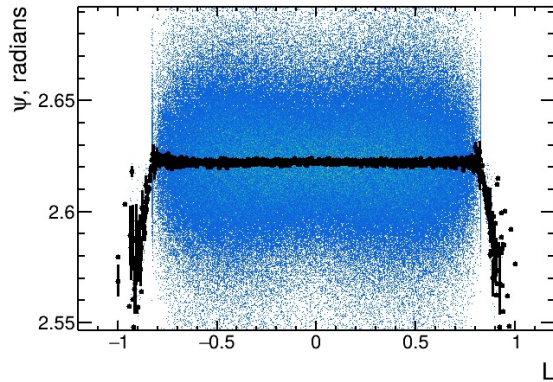


1 bin  $\sim$  1 keV

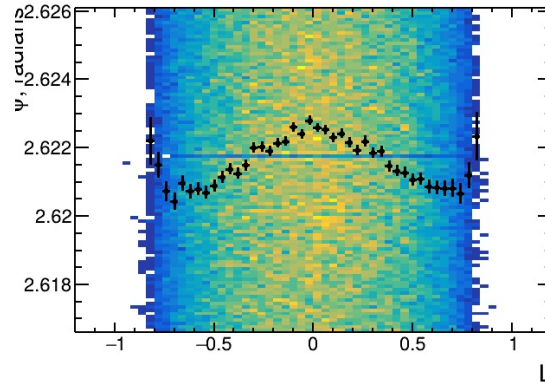
Видны радпоправки – после реконструкции одна сторона это чистое разрешение, вторая искажена радиационными хвостами

# Предельный угол – поправка к импульсам (МС)

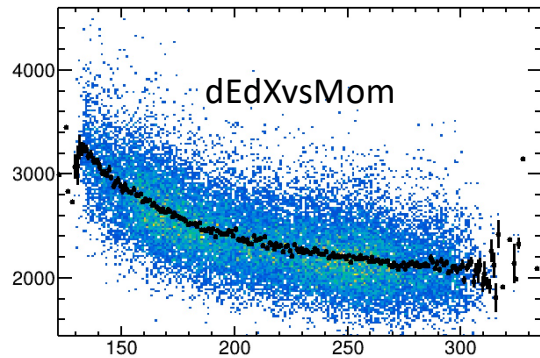
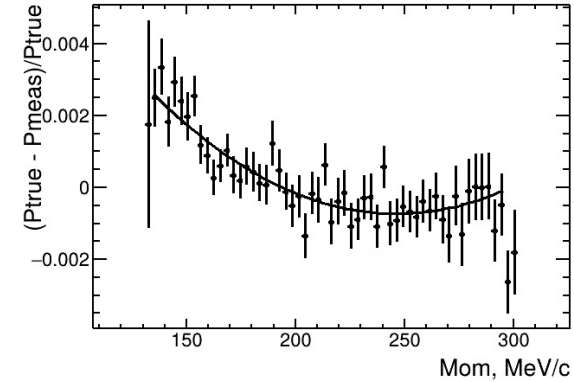
Что дает профайл и МС?



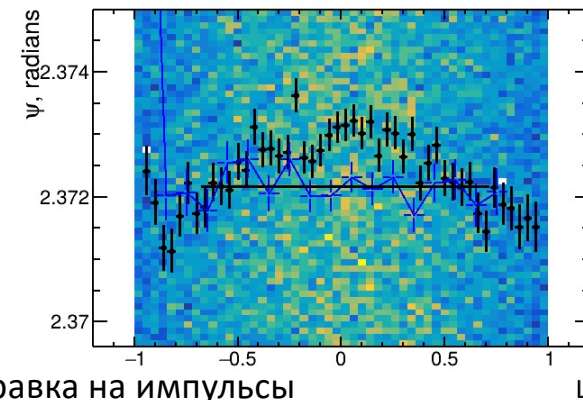
1mrad ~ 50 keV в массе



Поправка к импульсам (МС)



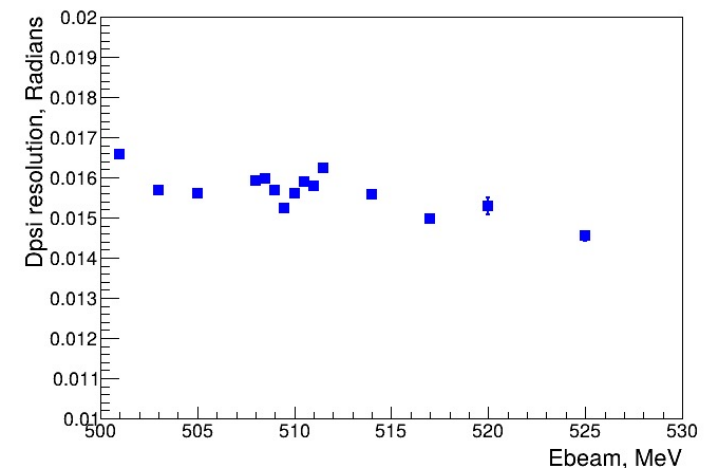
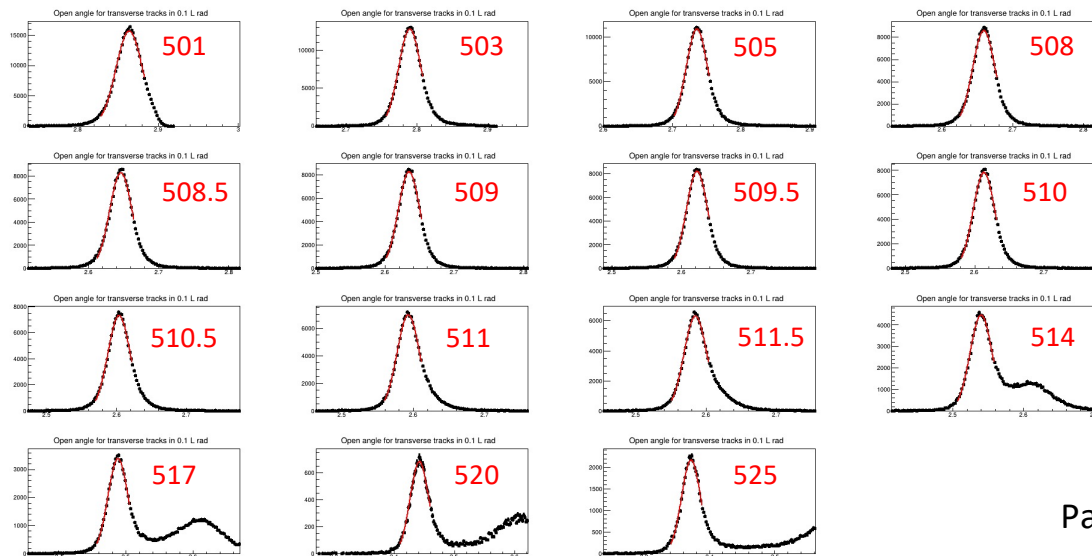
Резкое изменение потерь пионов и области импульсов распада  $K_s$  приводит к заметному искажению параметра  $\log Y = \log(P+/P-)$  и к искажению направления импульса  $K_s$ !



1. Для каждой точки по энергии делается поправка на импульсы
2. Вместо стандартного профайла используется гауссовый профайл
3. С шагом 0.1 от длины делается фит Гауссом в пределах 0.1—0.5

# Предельный угол а моделировании

1. Отбираются события в диапазоне  $-0.2—0.2$  от длины
2. Делается фит Гауссом в пределах  $0.1—0.5$  от максимума
3. Строится разность среднего с генераторным предельным углом – радипоправка к предельному углу
4. По формуле вычисляется масса – правильно пересчитывается ошибка
5. Строится разность с массой из генератора –  $497.611$  МэВ – для наглядности величины поправки
6. Строится разрешение в угле для каждой энергии

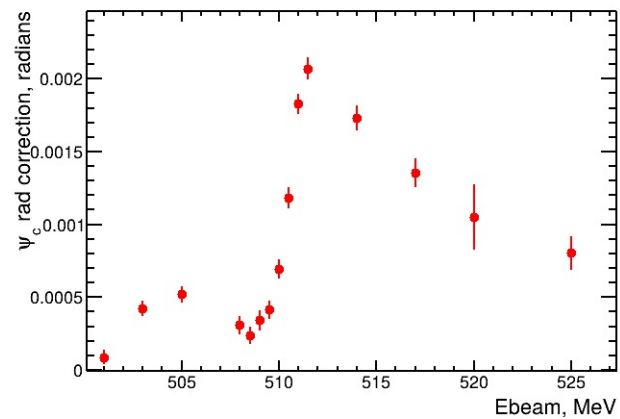
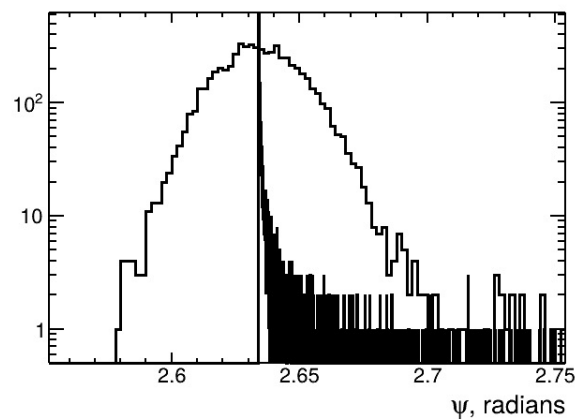


Разрешение при таком подходе около 16 mrad!

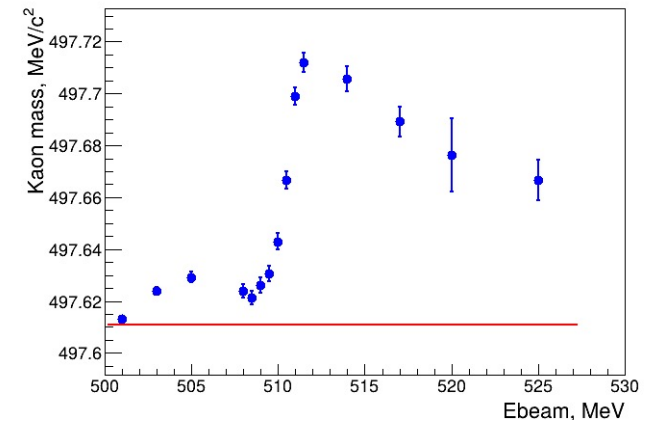
# Предельный угол а моделировании - радпоправка

Фит Гауссом в пределах 0.1—0.5 от максимума уменьшает влияние радиационных эффектов.

Но среднее сдвигается – радиационная поправка к предельному углу.



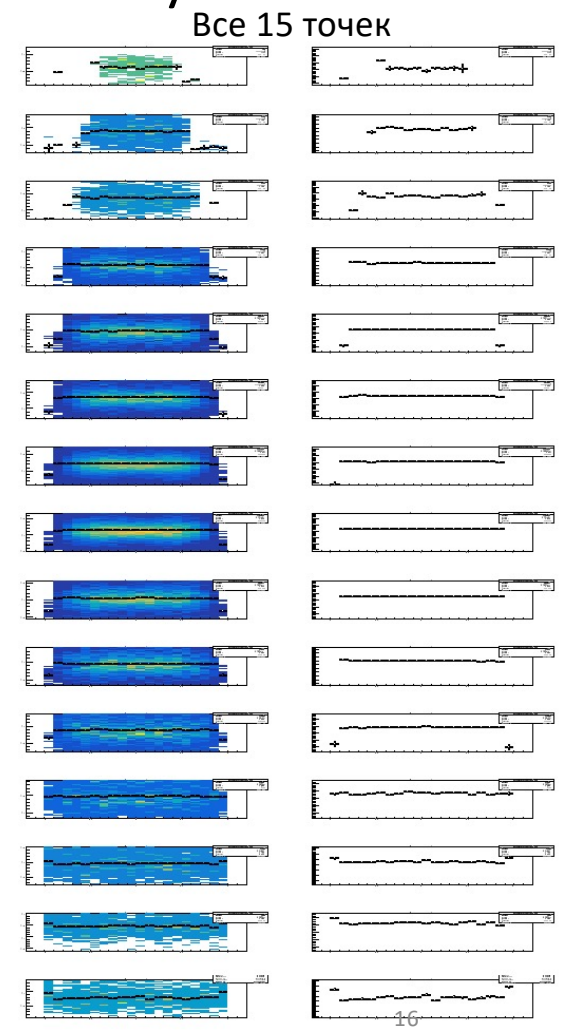
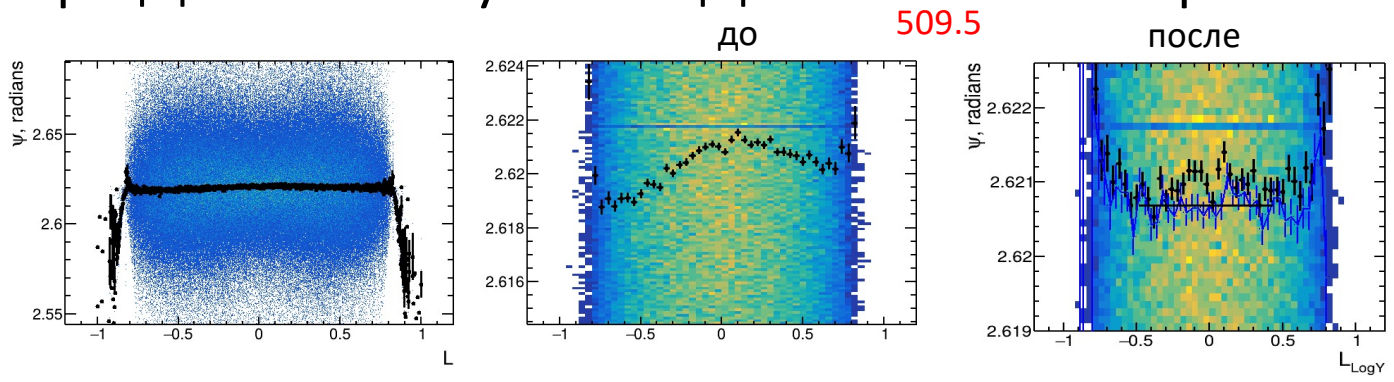
Эквивалент к массе каона



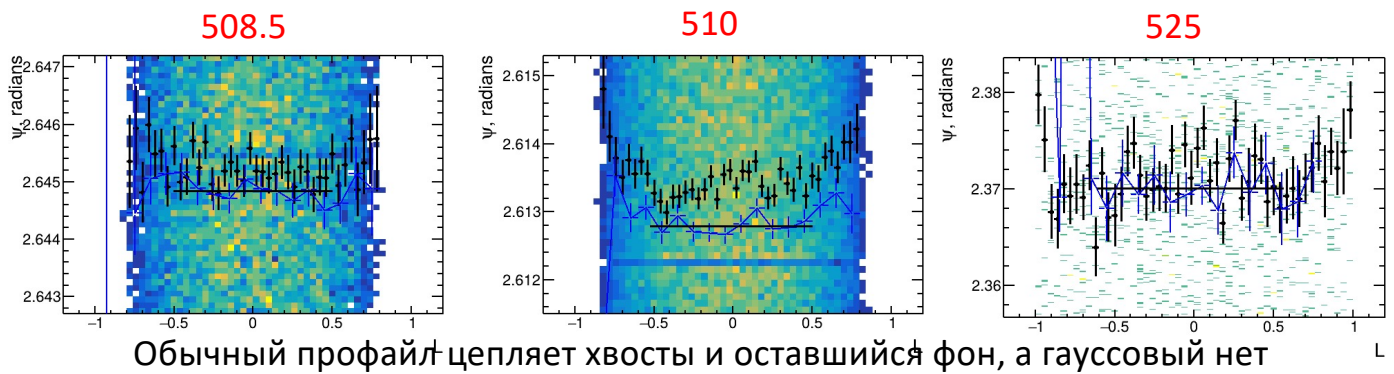
**Рад поправка в минимуме около 10 кэВ к массе каона и не более 100 кэВ!**

Из-за сдвига средней энергии каонов на склонах резонанса слегка меняется величина радпоправки, рассчитанной в МС с фиксированной энергией – это изменений не превышает 2 кэВ на максимуме изменения ( $30/2000 \cdot 100 \sim 1.5$  кэВ) – учтена как поправка без нового моделирования.

# Предельный угол в данных – поправка к импульсам



1. Без поправок – похожее поведение
2. Наблюдаемый сдвиг из-за разницы P+ и P- - предельный угол не при P+/P- = 1.
3. Поправка на импульсы взята из моделирования (+- 10% подстройка)
4. Вводятся сдвиги  $Y=1 \rightarrow Y=1.005$  -- подстройка от 1.001 – 1.005
5. Проверяется, что гауссовый профайл (0.1—0.5) вблизи 0 столик



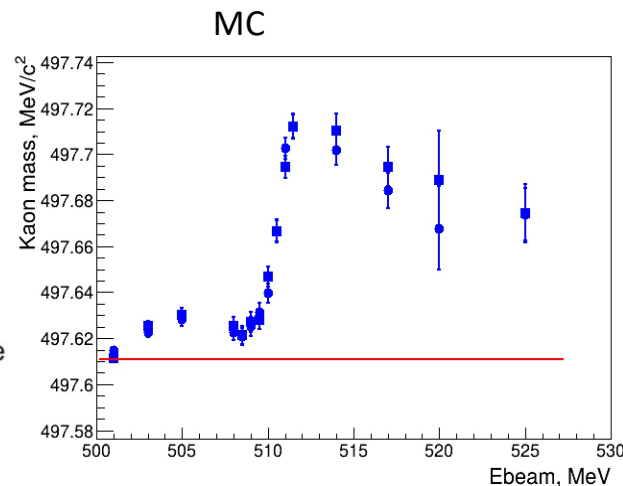
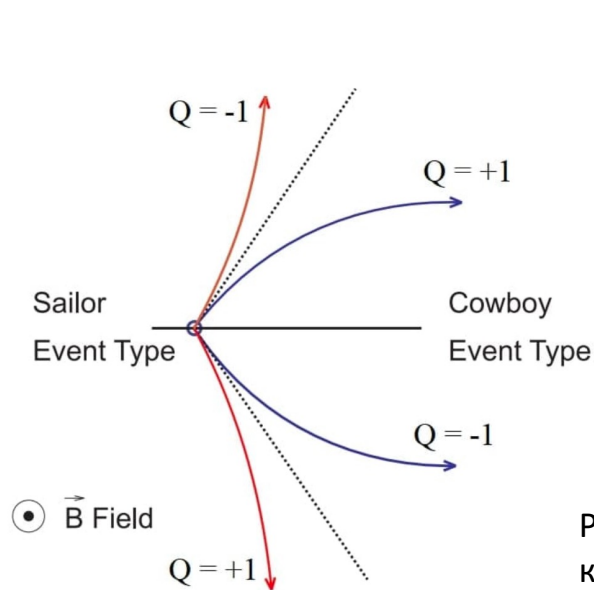
Обычный профайл цепляет хвосты и оставшийся фон, а гауссовый нет

03.06.2026

Solodov CMD-3 K0 mass

# Предельный угол в данных – поправка к углам (1)

Знаменитые «птички» и «рыбки». Магнитное поле загибает импульсы или во внутрь угла между распадными пионами, или наружу. Импульсы + и – реконструируются с погрешностями (1-2% разница), поэтому и предельный угол для пионов из распада каона может отличаться для двух типов событий. . Это эффект скрещенных электрического поля в ячейках ДК и магнитного поля соленоида, и несовершенства процедуры калибровки для внутренних слоев ДК.

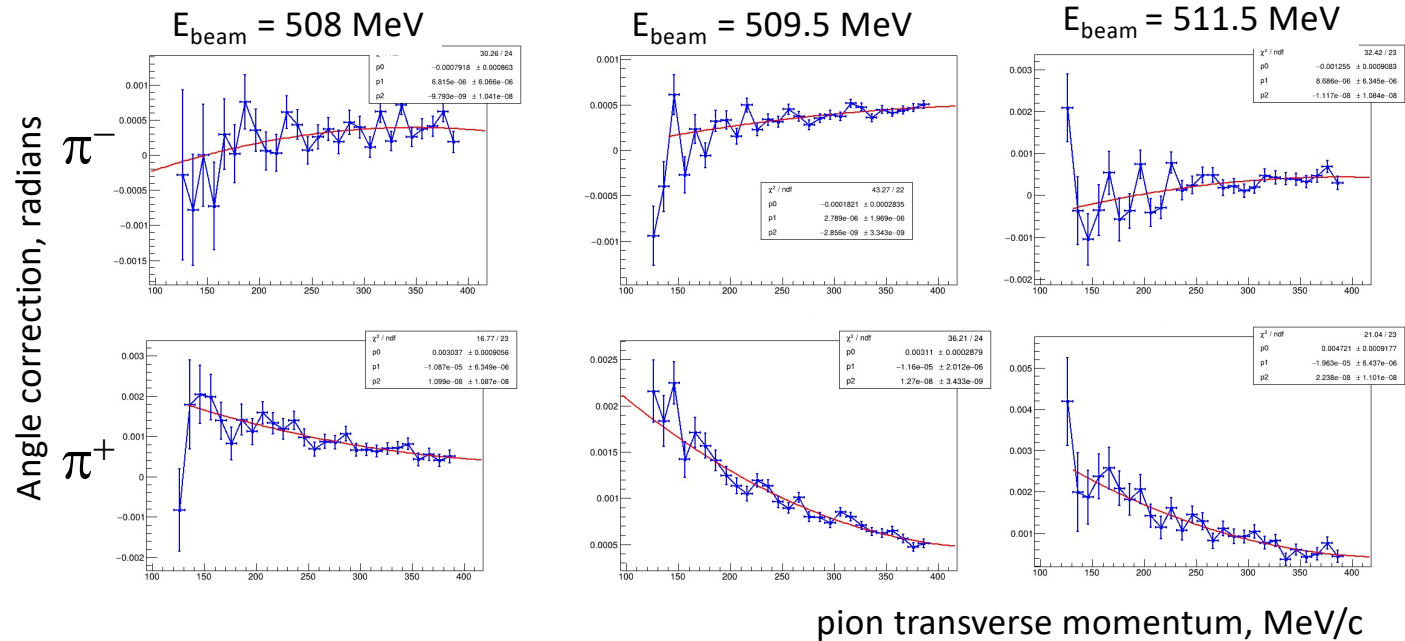
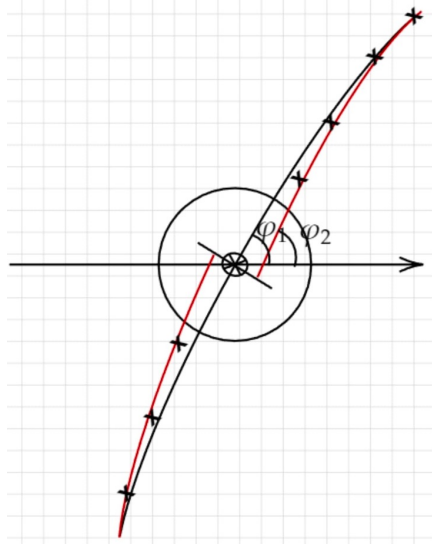


Нет разницы в моделировании!  
Углы реконструируются хорошо.

Разделение на эти два класса в моделировании не приводит к отличию в массе каона в пределах статистики, а в эксперименте отличие около  $1 \text{ mrad} \sim \pm 25 \text{ кэВ}$ . Этот эффект в сумме высредняется, но если какого-то типа событий больше, или разрешения отличаются, среднее будет сдвинуто.

# Предельный угол в данных – поправка к углам (2)

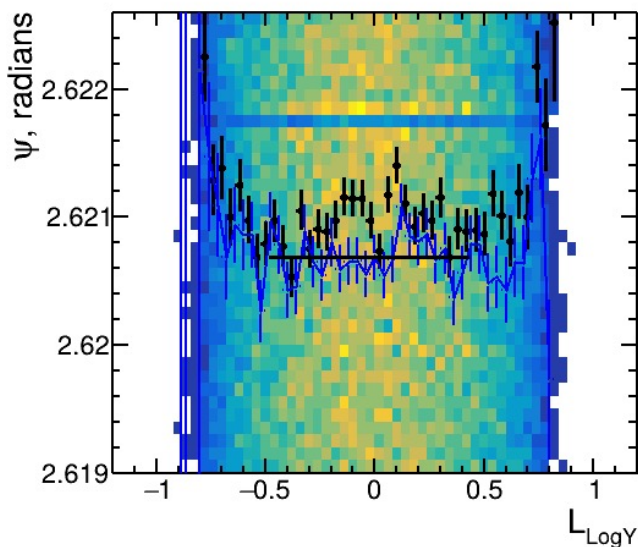
Для получения поправок использовались события  $\Phi \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^0$  из этого же сканирования и конкретно для нужной точки по энергии. Отбор «стандартный» - два трека и два фотона с массой близкой к  $\pi^0$ . Для + и - строится двумерный плот разницы углов  $\Phi$  в зависимости от поперечного импульса пиона. Делается Гауссовый профиль в интервале  $0.1-0.1$  от максимума. Делается фит параболой и используется для поправки угла пиона в каждом событии.



В 4-х импульсах для каждой точки азимутальные углы пионов поправляются в зависимости от поперечного импульса

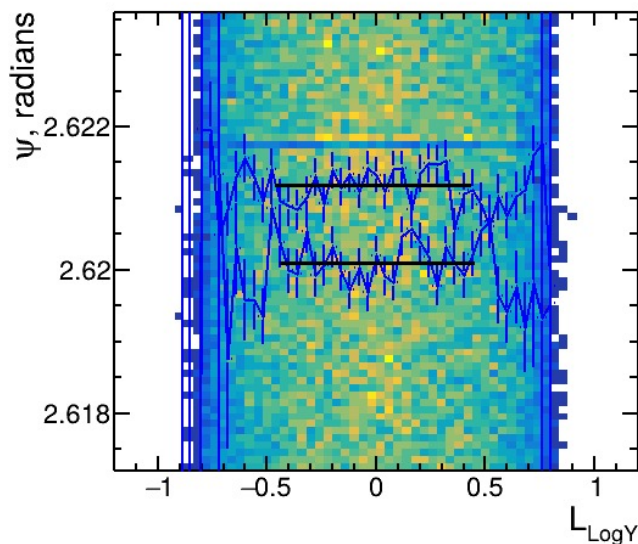
# Предельный угол в данных – поправка к углам (3)

Поправки только на импульсы



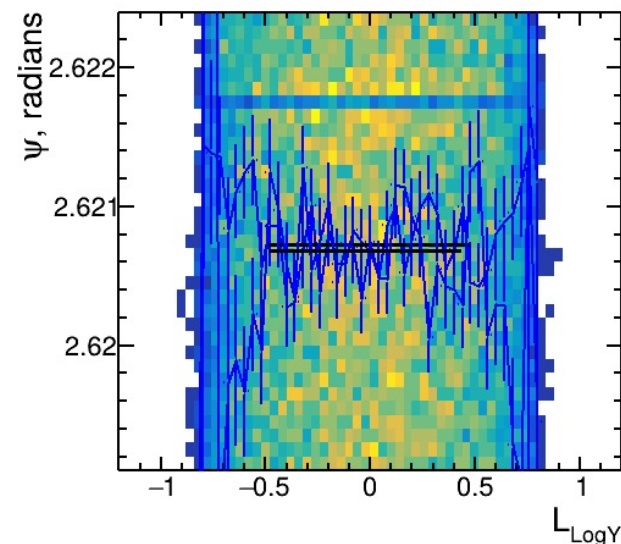
$\psi_c = 2.62069 \pm 0.00004$  radians

“fish” – “bird” выделены



$2.62119 \pm 0.00006$  “fish”  
 $2.62008 \pm 0.00005$  “bird”      $\sim 1$  mrad

После поправок



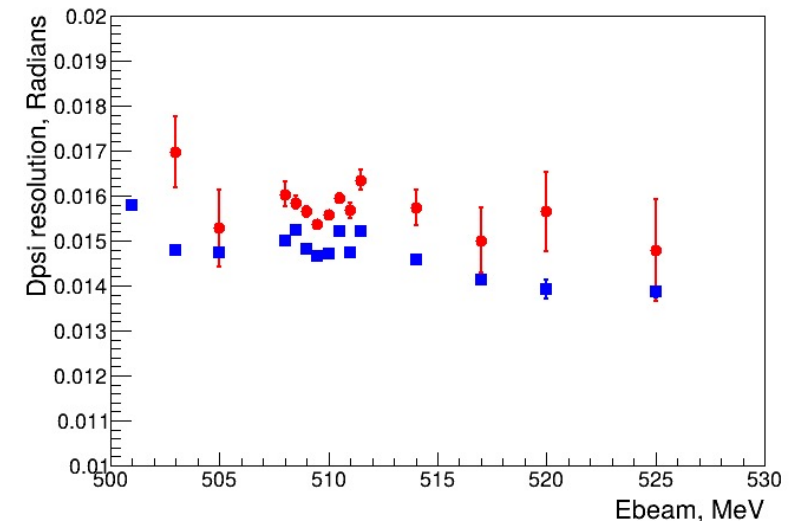
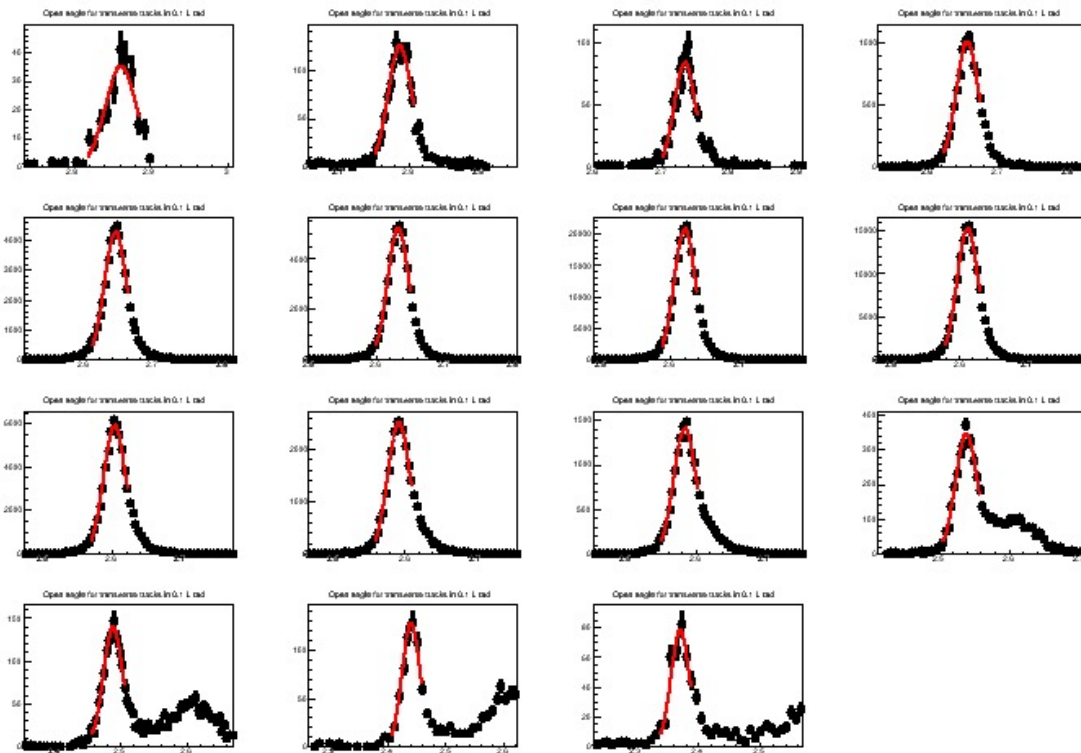
$2.62069 \pm 0.00006$  “fish”  
 $2.62073 \pm 0.00005$  “bird”

После поправок разница уменьшилась в 10 раз:  $0.04 \pm 0.08$  mrad  $\rightarrow \pm 2$  keV/c<sup>2</sup> в массе  $K_0$

Средние значения углов практически не сдвинулось.  $\sim 2$  keV/c<sup>2</sup> оценка систематики

# Предельные углы в данных

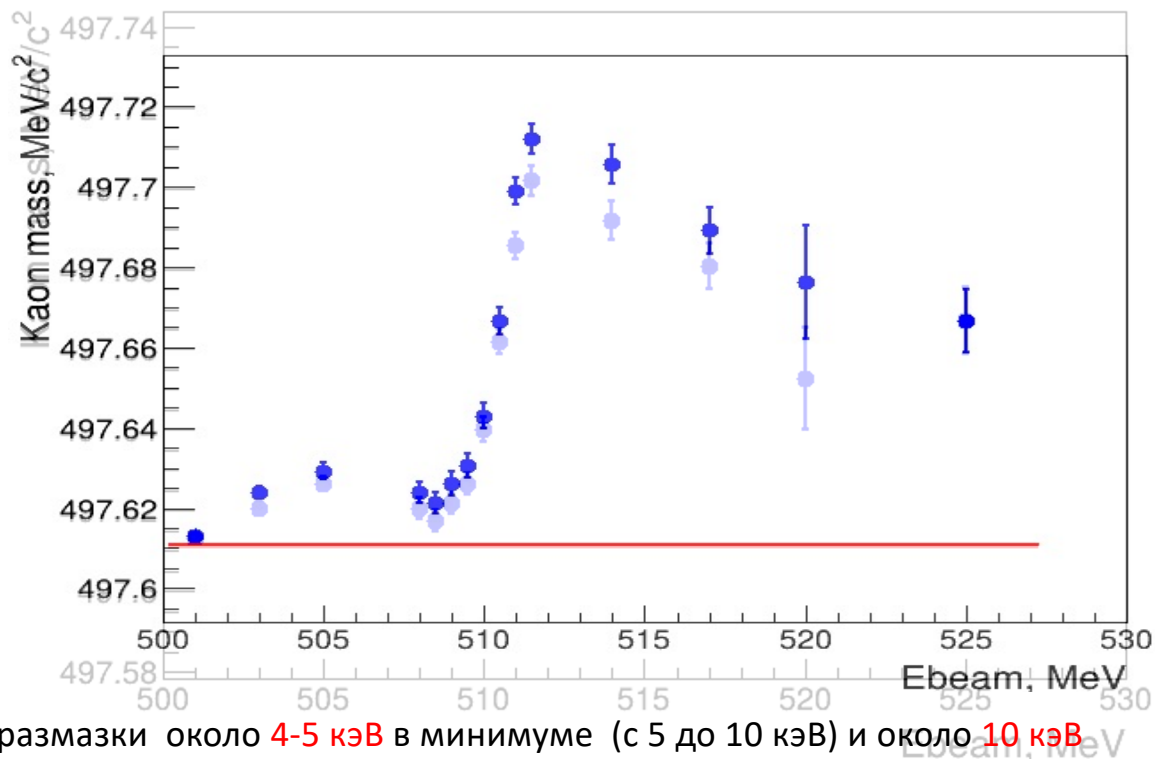
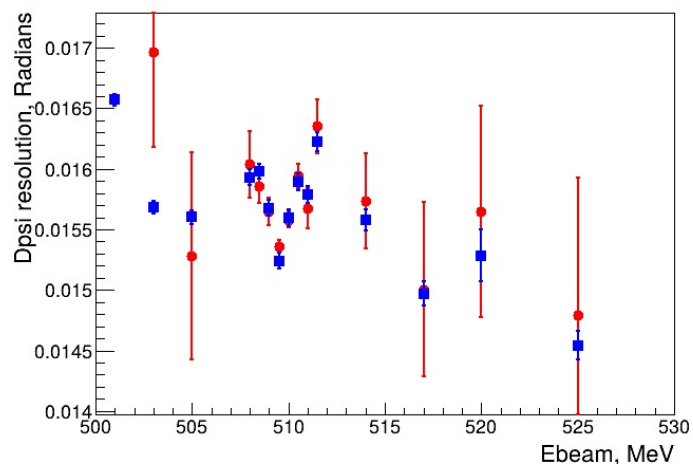
Отбор  $-0.2—0.2$  по длине. Фит гауссом от 0.1 до 0.5 от максимума



После поправок на «fish-bird» разрешение улучшилось на  $\sim 0.3--0.5$  mrad, приблизилось к MC: разрешение в данных все равно чуть хуже, чем в моделировании. Но все равно очень хорошее

# Поправка на разницу разрешений дата-МС

Добавление 4 кэВ к разрешению в моделировании удивительным образом приводит к согласию в разрешении для данных и моделирования во всех точках до уровня стат. ошибок (0.1—0.2 mrad) при начальной разнице до 1 mrad! Учет состояния детектора в МС работает!



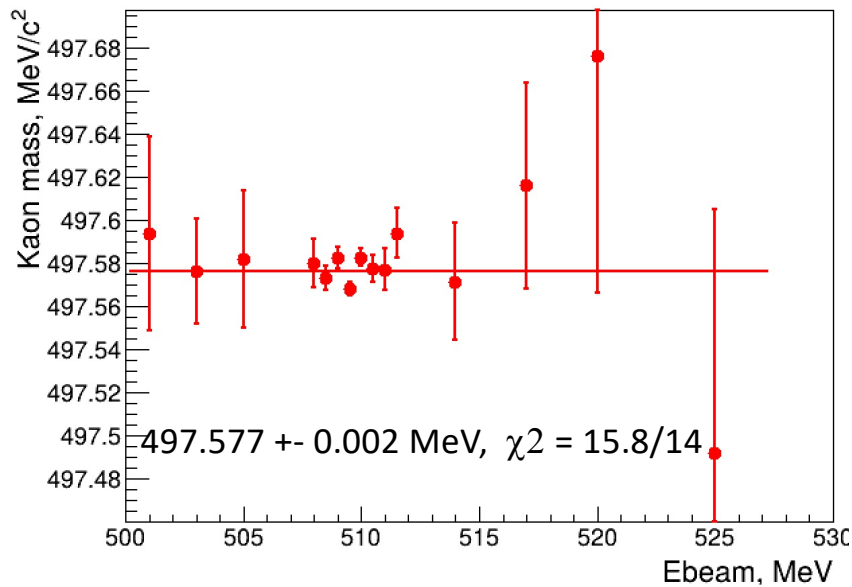
Сдвиг радпоправки от дополнительной размазки около **4-5 кэВ** в минимуме (с 5 до 10 кэВ) и около **10 кэВ** при полной поправке около 100 кэВ - систематика не более **2 кэВ** – из оценки от оставшегося несоответствия на уровне стат.ошибки

# Масса нейтрального каона

$$m(K^0) = \left[ (E + \Delta E) * \sin\left(\frac{\psi - \Delta\psi}{2}\right) + 4m_\pi^2 * \cos\left(\frac{\psi - \Delta\psi}{2}\right) \right]^{1/2}$$

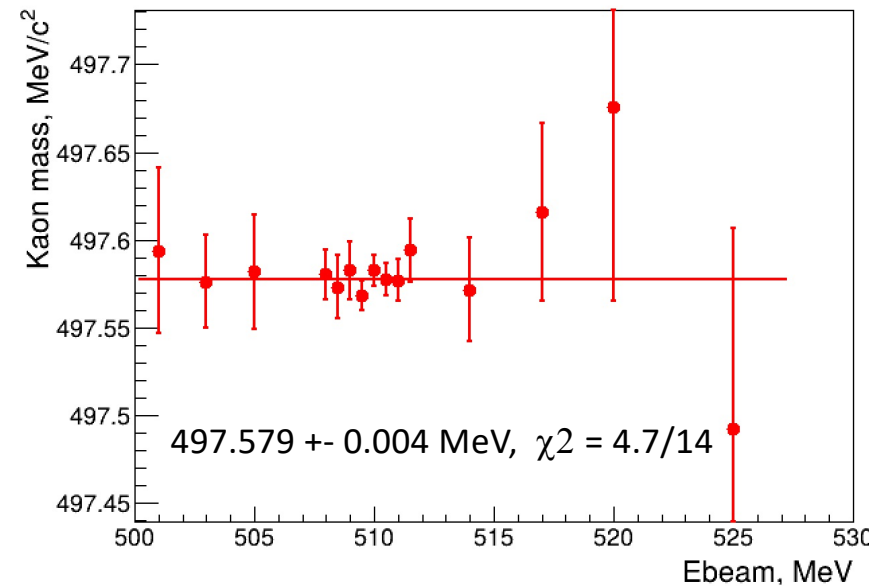
где  $\Delta E_{cor}$  поправка на сдвиг средней энергии от разброса,  
 $\Delta\psi$  – радпоправка к углу

Ошибки только от числа событий в  $\psi$



Есть запас по статистике

Учет ошибок в измерении энергии



# Систематические погрешности. Энергия

С учетом калибровки энергии по Фи-мезону от СНД  $\Delta E_{cal} = (17 \pm 18)/2 \text{ keV}$

$$m(K^0) = 497.587 \pm 0.004 \text{ (stat.)} \pm 0.009 \text{ (syst.cal)} \pm 0.002 \text{ (syst.res)} \pm \dots \text{ MeV}$$

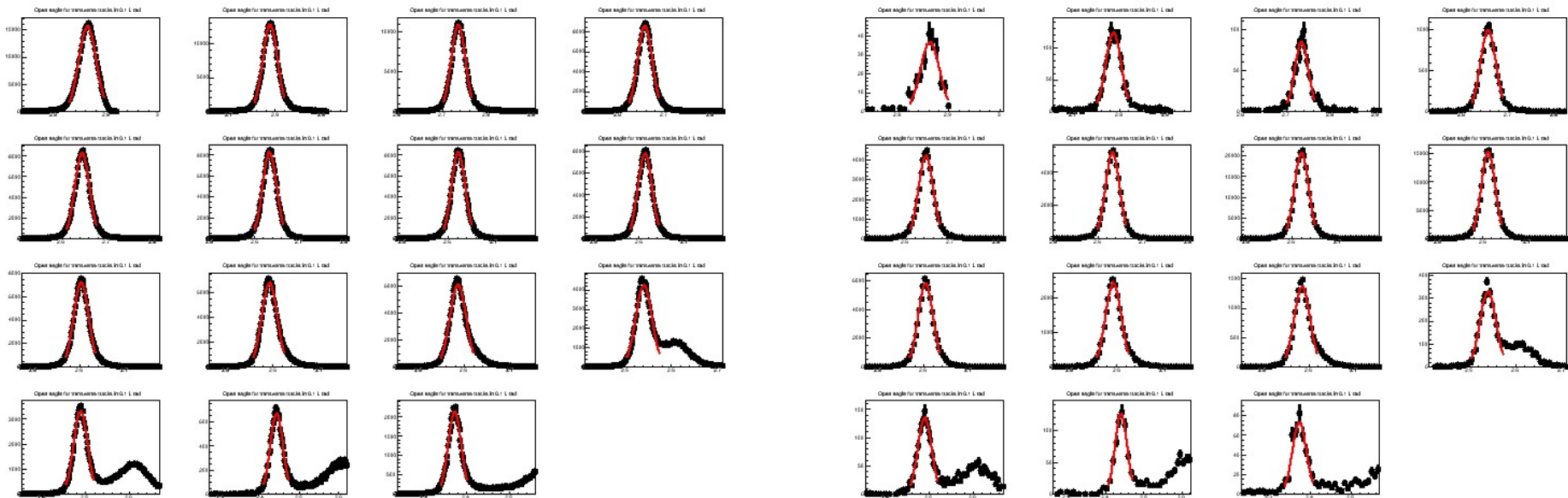
Для оценки подставлены энергии из расчетов и усреднения текущих данных (с сайта КМД-3) или учет дрейфа по заряженным каонам.

Масса сдвигается на **4 кэВ** из-за заметного дрейфа энергий для 509.5 и 510 МэВ, и небольшого различия в разбросе энергий.

$$m(K^0) = 497.587 \pm 0.004 \text{ (stat.)} \pm 0.009 \text{ (syst.cal.)} \pm 0.002 \text{ (syst.res)} \pm 0.004 \text{ (syst.fit)} \dots \text{ MeV}$$

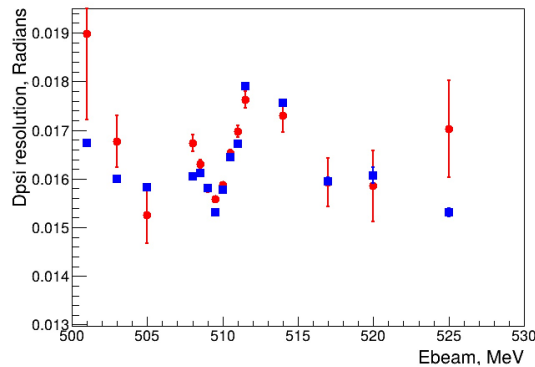
# Систематические погрешности. Радпоправка (1)

Радпоправка зависит от разрешения по углу. При стандартном моделировании отличие в разрешении около 1 мили радиана. После дополнительной свертки с 4 мили радиана отличие не превышает 0.1 мили радиан. Радпоправка после свертки меняется не более, чем на 10 кэВ - может остаться систематика на уровне 1 кэВ. Более кардинальная проверка получается если фитировать углы в области 0.1-0.1 от максимума - использовать весь пик распределения.



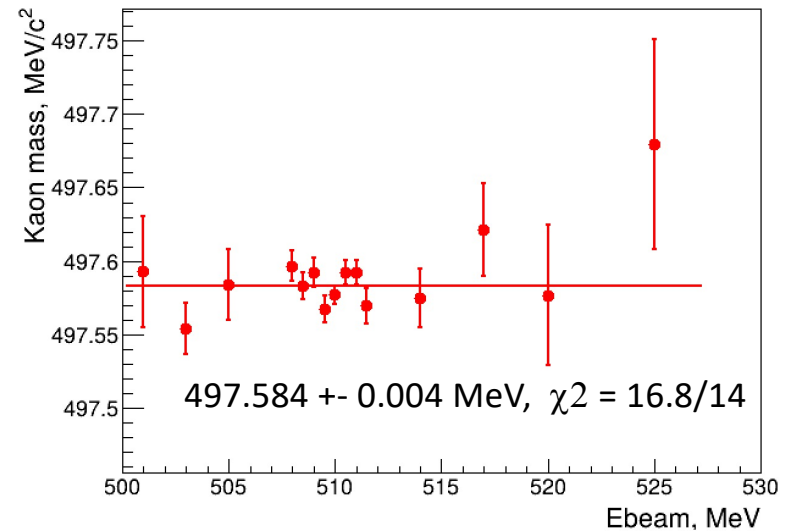
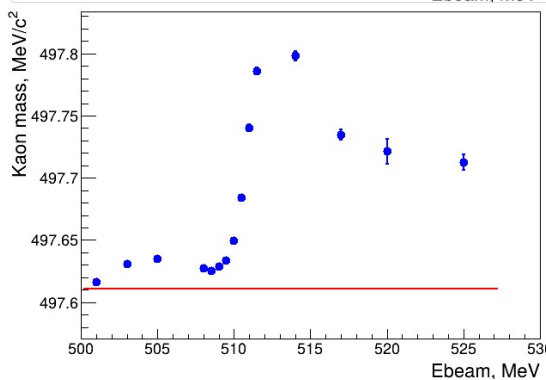
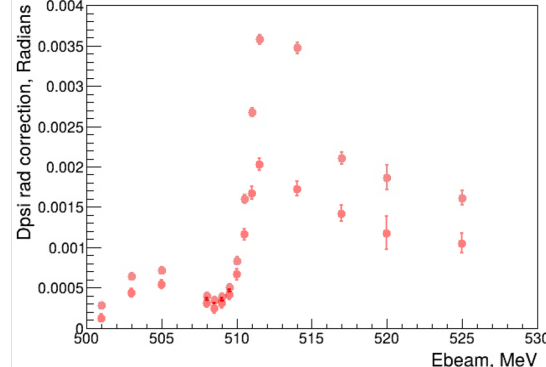
# Систематические погрешности. Радпоправка (2)

Более кардинальная проверка получается если фитировать углы в области 0.1-0.1 от максимума - использовать весь пик распределения.



Разрешение больше не монотонно с энергией – фит цепляет рад.хвост

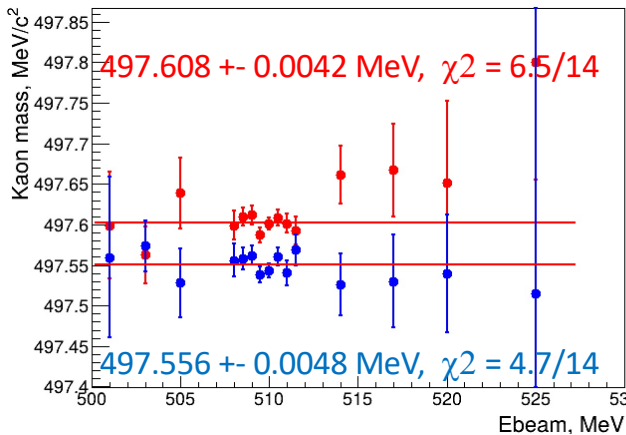
Поправка вырастает в 2 раза  
масса каона сдвигается на **3 кэВ**



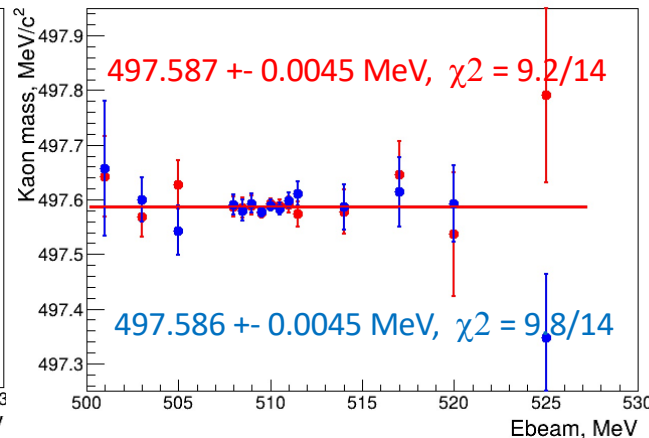
**$m(K^0) = 497.587 \pm 0.004(\text{stat}) \pm 0.009(\text{syst.cal}) \pm 0.002(\text{syst.res}) \pm 0.004(\text{syst.fit}) \pm 0.003(\text{syst.rad}) \dots(?)$**

# Систематические погрешности. Углы

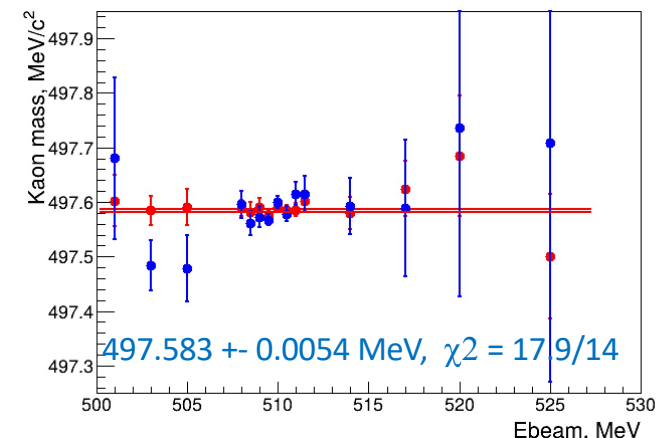
Делаются поправки к углам Фи для каждого трека используя функции от импульса с небольшим – 10-15% масштабированием, и требуется, чтобы для каждой точки масса каона для «птичек» и «рыбок» согласовывалась в пределах стат.ошибок. Для крайних точек, где пионов мало, брались поправки из ближайших по энергии.



До поправок на углы пионов



После поправок на углы «птички-рыбки» отличаются на **1 кэВ** и среднее не изменилось.

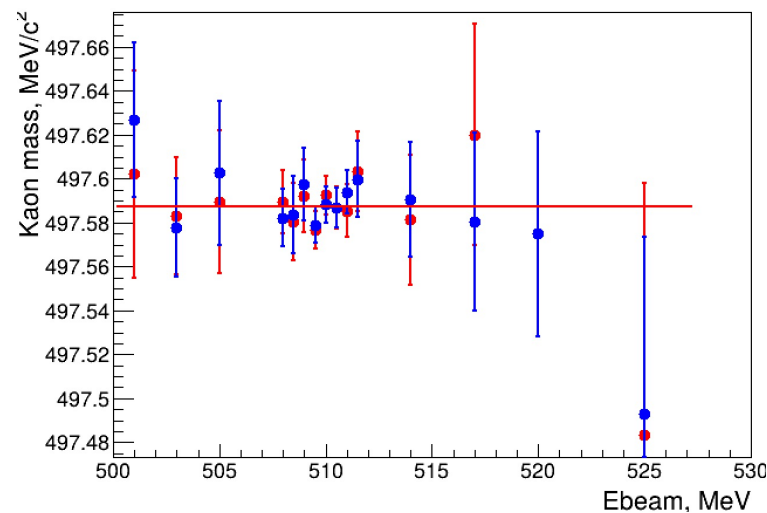
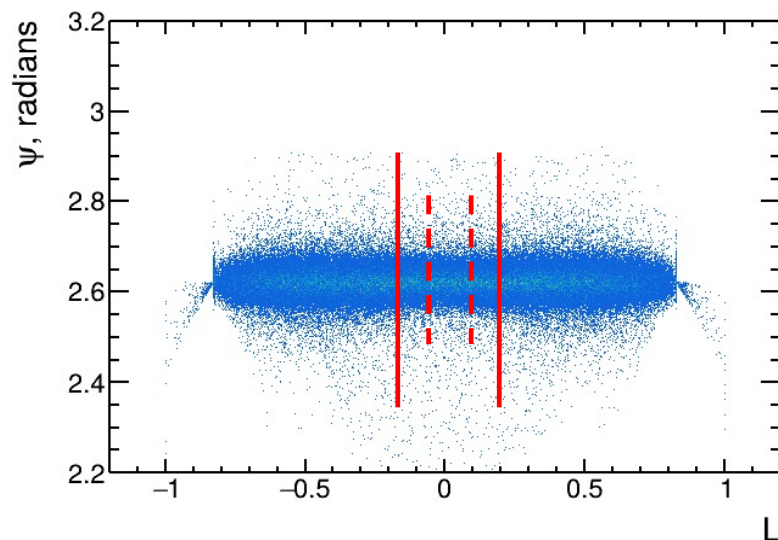


Более жесткий тест – все треки летят поперек в пределах  $\pm 0.2$  радиана. Число событий уменьшилось в 2 раза. Изменение на **4 кэВ**.

$$m(K^0) = 497.587 \pm 0.004(\text{stat}) \pm 0.009(\text{syst.cal}) \pm 0.002(\text{syst.res}) \pm 0.004(\text{syst.fit}) \pm 0.003(\text{syst.rad}) \pm 0.004(\text{syst.ang}) \dots (?)$$

# Систематические погрешности. Еще тесты

1. Параметр  $\text{LogY}$  в формуле для получения распределения поправлялся или используя поправки к импульсам из моделирования, или просто модифицировался линейно или сдвигался так, чтобы распределение по длине выстраивалось в линейку по гауссовому профилю. Перепроверка дала сдвиг на **1 кэВ** - **497.586 ± 0.004(stat)**
2. «Стандартный» тест – изменение диапазона с  $\pm 0.2$  на  $\pm 0.1$  или на  $\pm 0.3$  – сдвиг не более **1 кэВ** - **497.587 ± 0.0045(stat)** для  $\pm 0.1$  и **497.588 ± 0.0039(stat)** для  $\pm 0.3$



$$m(K^0) = 497.587 \pm 0.004(\text{stat}) \pm 0.009(\text{syst.cal}) \pm 0.002(\text{syst.res}) \pm 0.004(\text{syst.fitE}) \pm 0.003(\text{syst.rad}) \pm 0.004(\text{syst.ang}) \pm 0.001(\text{syst.mom}) \pm (?)$$

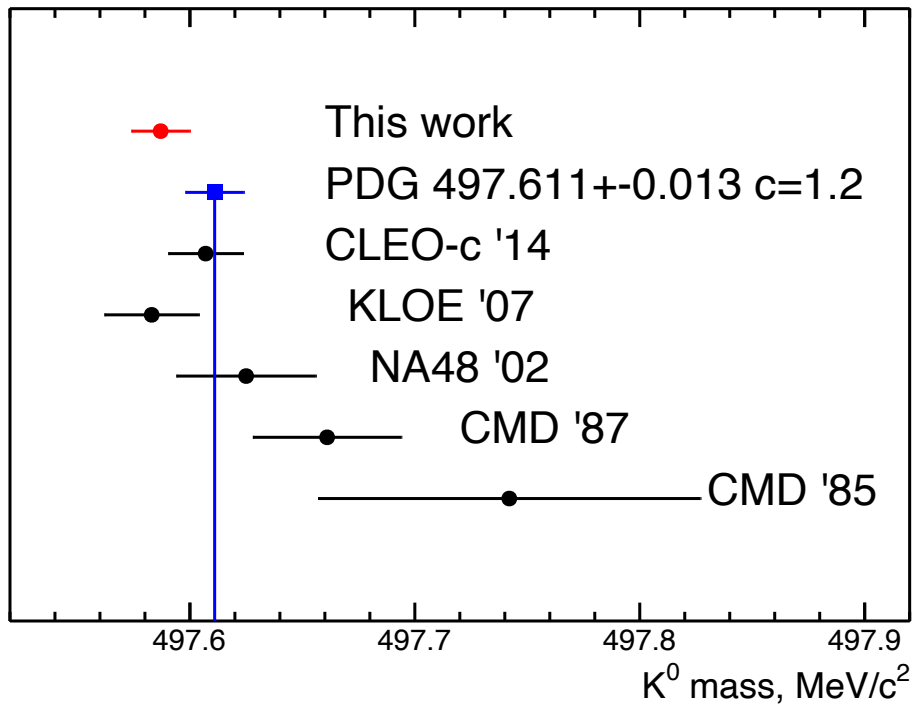
# Систематические погрешности.

| Uncertainty source                        | Mass correction, MeV/c <sup>2</sup> | Mass uncertainty MeV/c <sup>2</sup> |
|-------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Energy calibration                        | 0.0085                              | 0.009                               |
| Energy fit variation                      | -                                   | 0.004                               |
| Energy spread at $\phi$                   | -                                   | 0.002                               |
| log(Y) corrections                        | -                                   | 0.001                               |
| $ \log(Y)  < 0.2$ cut                     | -                                   | 0.001                               |
| Angle corrections                         | -                                   | 0.002                               |
| Strong angle cut $\pm 0.2$                | -                                   | 0.004                               |
| $\psi_c$ resolution correction            | 0.005÷0.010                         | 0.002                               |
| Radcorr ( $E_{\text{beam}}$ spread shift) | 0.002                               | 0.002                               |
| Radcorr ( $\psi$ fit)                     | 0.015÷0.100                         | 0.003                               |
| Sum in quadrature                         |                                     | 0.012                               |

# Результат (preliminary)

$$m(K^0) = 497.587 \pm 0.004(\text{stat}) \pm 0.009(\text{syst.calbr}) \pm 0.008(\text{syst.cmd}), \text{ MeV}/c^2$$

$$m(K^0) = 497.587 \pm 0.004(\text{stat.}) \pm 0.012(\text{syst.}), \text{ MeV}/c^2 \quad (+- 12.4 \text{ keV}/c^2)$$

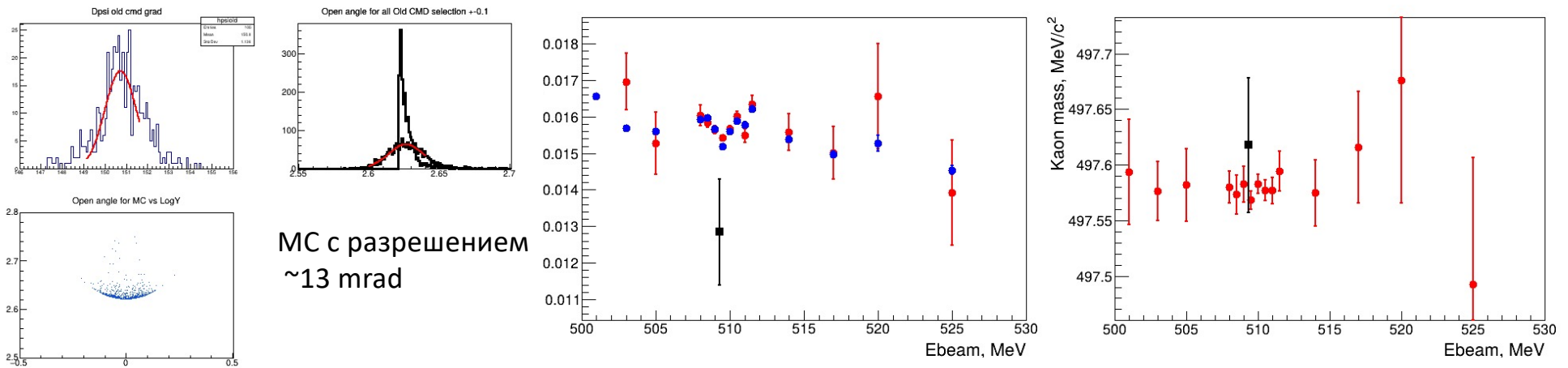


- Самое точное измерение с 600к событий (как NA48) – основная ошибка идет от калибровок энергии!
- На 1.27 ошибки отличается от PDG – тянут старые измерения КМД с=1.2
- Практически совпадает с KLOE – тоже калибровка по Фи-мезону

# Back to the future

Экскурс в историю:

Фит распределения из статьи 1987 года и поправка из нашего моделирования



Отбор  $dP/P < 0.1$  собирает довольно широкую область вокруг предельного угла - поправка 0.0045 радиана ( $\sim 200$  keV)

$$M_{ksOld} = 497.618 \pm 0.061$$

В статье для этой точки приводится значение

$$M_{ks} = 497.657 \pm 0.048 \text{ (высреднено по 2-м наборам)}$$

# BACK UP

# Есть углы. Есть радпоправка. Какие взять энергии?

Есть два набора значений энергии для использования в данном анализе.

- Один взят с нашего сайта и получен путем высреднения многих измерений лазером в течении набора статистики. Для энергии и разброса в пучке.

- Второй набор сделан и опубликован СНД в работе по измерению сечения Фи -> [KSKL](#): получен методом фитирования суммарных распределений энергетических спектров обратного комптона. Это позволило более надежно определять энергетический разброс, и кроме того как-то высреднять небольшие уходы энергии.

| Table IV         |                  |                         | СНД (Ebeam) |       |       |       | Сайт КМД-3 |         |       |       |
|------------------|------------------|-------------------------|-------------|-------|-------|-------|------------|---------|-------|-------|
| $E$ , GeV        | $\sigma_E$ , keV | $IL$ , pb <sup>-1</sup> |             |       |       |       |            |         |       |       |
| 1000.280 ± 0.086 | 249 ± 58         | 601.2 ± 2.3 ± 11.0      | 500.954     | 0.015 | 0.237 | 0.006 | 501.0      | 500.928 | 0.008 | 0.247 |
| 1001.908 ± 0.030 | 335 ± 8          | 634.2 ± 2.5 ± 2.7       | 502.993     | 0.011 | 0.252 | 0.008 | 503.0      | 502.980 | 0.005 | 0.257 |
| 1005.986 ± 0.022 | 356 ± 11         | 1680.2 ± 4.1 ± 7.3      | 504.798     | 0.008 | 0.250 | 0.009 | 505.0      | 504.797 | 0.010 | 0.244 |
| 1009.596 ± 0.016 | 352 ± 13         | 725.7 ± 2.7 ± 4.3       | 507.868     | 0.009 | 0.272 | 0.009 | 508.0      | 507.862 | 0.007 | 0.278 |
| 1015.736 ± 0.018 | 385 ± 13         | 627.9 ± 2.5 ± 4.2       | 508.400     | 0.017 | 0.248 | 0.014 | 508.5      | 508.404 | 0.008 | 0.245 |
| 1016.800 ± 0.034 | 351 ± 20         | 1650.1 ± 4.4 ± 8.4      | 508.957     | 0.016 | 0.249 | 0.013 | 509.0      | 508.956 | 0.009 | 0.251 |
| 1017.914 ± 0.032 | 352 ± 18         | 1257.5 ± 3.7 ± 7.4      | 509.539     | 0.008 | 0.264 | 0.006 | 509.5      | 509.528 | 0.005 | 0.270 |
| 1019.078 ± 0.016 | 373 ± 8          | 2454.7 ± 5.7 ± 14.5     | 509.970     | 0.008 | 0.281 | 0.008 | 510.0      | 509.956 | 0.006 | 0.294 |
| 1019.940 ± 0.016 | 397 ± 11         | 2637.2 ± 6.0 ± 13.4     | 510.454     | 0.007 | 0.280 | 0.009 | 510.5      | 510.458 | 0.007 | 0.288 |
| 1020.908 ± 0.014 | 396 ± 13         | 1426.6 ± 4.1 ± 6.2      | 511.046     | 0.007 | 0.257 | 0.008 | 511.0      | 511.033 | 0.006 | 0.268 |
| 1022.092 ± 0.014 | 363 ± 11         | 1232.5 ± 3.7 ± 7.3      | 511.466     | 0.014 | 0.261 | 0.016 | 511.5      | 511.448 | 0.008 | 0.277 |
| 1022.932 ± 0.028 | 369 ± 23         | 820.0 ± 2.9 ± 4.2       | 513.868     | 0.012 | 0.264 | 0.012 | 514.0      | 513.864 | 0.009 | 0.269 |
| 1027.736 ± 0.024 | 373 ± 17         | 659.2 ± 2.6 ± 5.0       | 516.908     | 0.018 | 0.259 | 0.011 | 517.0      | 516.900 | 0.011 | 0.255 |
| 1033.816 ± 0.036 | 366 ± 16         | 537.4 ± 2.3 ± 4.1       | 519.894     | 0.018 | 0.299 | 0.016 | 520.0      | 519.897 | 0.013 | 0.290 |
| 1039.788 ± 0.036 | 423 ± 23         | 585.8 ± 2.5 ± 9.0       | 524.902     | 0.023 | 0.302 | 0.016 | 525.0      | 524.902 | 0.016 | 0.295 |
| 1049.804 ± 0.046 | 427 ± 23         | 634.2 ± 2.6 ± 5.4       |             |       |       |       |            |         |       |       |
| 1060.016 ± 0.032 | 393 ± 35         | 607.1 ± 2.5 ± 3.6       |             |       |       |       |            |         |       |       |
| 1100.020 ± 0.046 | 447 ± 13         | 1426.1 ± 4.4 ± 6.2      |             |       |       |       |            |         |       |       |