

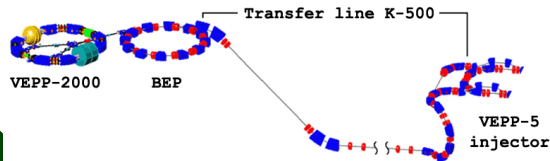
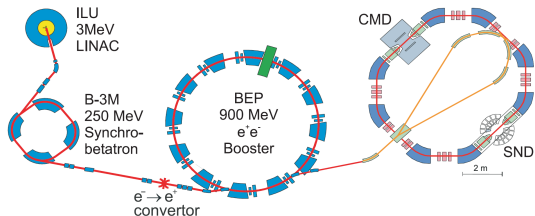
Измерение сечения $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ с детектором СНД на ускорительном комплексе ВЭПП-2000

Купич А.С.
группа Сферического Нейтрального Детектора

Сессия-конференция **Физика фундаментальных взаимодействий**
Март 10 – 13, 2026



VEPP-2000 e^+e^- collider

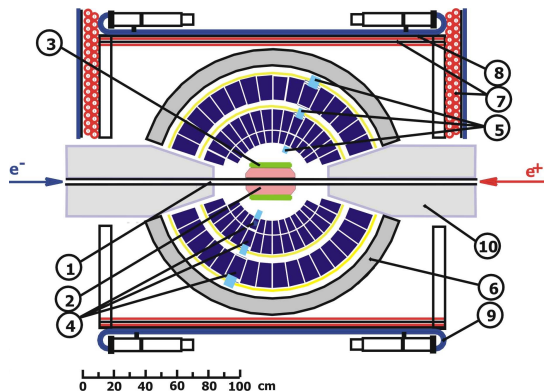


VEPP-2000 parameters

- c.m. energy $E=0.3\text{-}2.0$ GeV
- Luminosity at $E=1.8$ GeV
 $10^{32} \text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$ (project)
 $6 \times 10^{31} \text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$ (achieved)
- Beam energy spread - 0.6 MeV at $E=1.8$ GeV

- 10 times more intense positron source
- Experiments at upgraded VEPP-2000 were continued in the late 2016



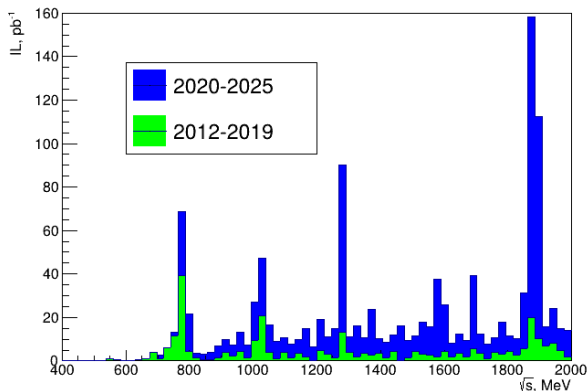


1-beam pipe, 2-tracking system, 3- aerogel Cherenkov counter , 4 - NaI(Tl) crystals, 5 - phototriodes, 6 - iron muon absorber, 7-9 - muon detector, 10 - focusing solenoids.

Main physics task of SND is study of all possible processes of e^+e^- annihilation into hadrons below 2 GeV

- The total hadronic cross section, which is calculated as a sum of exclusive cross sections
- Study of hadronization (dynamics of exclusive processes)
- Study of the light vector mesons
- Production of the C-even resonances





Current $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ analysis is based on the statistics, collected in **2017 – 2018** in 100 energy points $\sqrt{s} < 1$ GeV. In recent years 900 pb^{-1} data are collected in the $\sqrt{s} \approx M_\omega$ and $M_\omega < \sqrt{s} < 2$ GeV energy regions. With 1.1 and 3.9 times greater statistics.

Timeline

MHAD2012 – 48 pb^{-1}
 RHO 2013 – 32 pb^{-1}
 MHAD2017 – 50 pb^{-1}
RHO 2018 – 90 pb^{-1}
 MHAD2019 – 65 pb^{-1}
 RHO 2019 – 1 pb^{-1}
 MHAD2020 – 45 pb^{-1}
 MHAD2021 – 57 pb^{-1}
 MHAD2022 – 360 pb^{-1}
 MHAD2023 – 223 pb^{-1}
 MHAD2024 – 114 pb^{-1}
 PHI 2024 – 57 pb^{-1}
 RHO 2024 – 33 pb^{-1}
 OMEG2024 – 48 pb^{-1}

- 1 Количество заряженных частиц $N_{cha} \geq 2$, при этом событие может содержать произвольное число нейтральных частиц
- 2 $|\Delta\theta| = |180^\circ - (\theta_1 + \theta_2)| < 14^\circ$ и $|\Delta\phi| = |180^\circ - |\phi_1 - \phi_2|| < 6^\circ$, где $\theta_{1,2}$ и $\phi_{1,2}$ – полярные и азимутальные углы заряженных частиц с наибольшим энерговыведением. Позволяют существенно подавить вклады неколлинеарных процессов.
- 3 $E_{1,2} > 40$ МэВ, где E_i – энерговыведение заряженной частицы с номером i . Обеспечивает высокую эффективность триггера для отобранных событий, подавляет вклад пучкового фона.
- 4 $60^\circ < \theta_0 < 120^\circ$, где $\theta_0 = (\theta_1 - \theta_2 - 180^\circ)/2$ – «средний угол» события. В данном диапазоне распределения по θ_0 для всех коллинеарных процессов близки к равномерным, а конечные частицы с большой вероятностью проходят через все подсистемы детектора.



- 5 $|r_{1,2}| < 1$ см, где r_i – расстояние между треком частицы с номером i и осью пучков. Доля событий e^+e^- аннигиляции удовлетворяющих данному условию отбора больше 99,9 %.
- 6 $|z_{1,2}| < 8$ см, где z_i – координата точки вылета частицы вдоль оси пучков.
- 7 Нет срабатывания мюонной системы: $veto = 0$. В области энергий выше 900 МэВ использовались аналогичные условия отбора, но без условия $veto = 0$ и другими ограничениями на положение точки вылета: $|r_{1,2}| < 5$ мм, $|z_{1,2}| < 10$ см.

События $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$, $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$, $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ и остаточного космического фона проходят данные условия отбора. Вклады $e^+e^- \rightarrow e^+e^-e^+e^-$ (0.2 – 3.5 %) и $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ (0.01 – 0.6 %) в $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ оценивались по экспериментальным данным. Эффективность отборов оценивалась по событиям моделирования. Генератор первичных частиц: **BABAYAGA-NLO**.

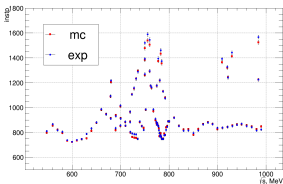


- 1 $N_{ch} \geq 2$ – число треков
- 2 $|\Delta\theta| = |180^\circ - (\theta_1 + \theta_2)| < 14^\circ$ и $|\Delta\varphi| = |180^\circ - |\varphi_1 - \varphi_2|| < 6^\circ$
- 3 $E_{1,2} > 40$ МэВ, где E_i – энергосодержание i -й частицы
- 4 $60^\circ < \theta_0 = (\theta_1 - \theta_2 + 180^\circ) \times 0.5 < 120^\circ$
- 5 $0.5 < |r_1| < 1$ см , $0.5 < |r_2| < 1$ см, r_i – поперечный параметр i -го трека относительно оси пучка
- 6 $4 < |z_{01}| < 10$ см , $4 < |z_{02}| < 10$ см, где z_i – продольная координата вершины трека

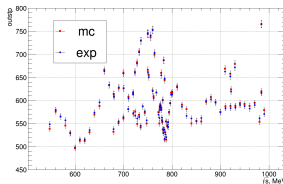
Используется для оценки эффективности космического вето (0.92 - 0.98)



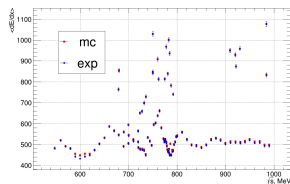
Потребовались модификации алгоритмов реконструкции и моделирования для улучшения согласия между экспериментальными результатами обоих сканирований и моделированием.



Внутренний катод



Внешний катод



Проволочки ДК



События процессов $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$, $\mu^+\mu^-$ и $\pi^+\pi^-$ различаются по характеру энергетических потерь заряженных частиц в калориметре

- 1E_j – энергосодержание в j -ом слое башни с наибольшим энергосодержанием ($j = 1, 2, 3$)
- 2E_j – сумма энергосодержаний в j -ом слое восьми башен расположенных вокруг башни с наибольшим энергосодержанием
- 3E_j – сумма энергосодержаний в j -ом слое остальных башен кластера
- E_j – энергосодержание в j -ом слое
- 1E – энергосодержание в башне с наибольшим энергосодержанием
- 2E – сумма энергосодержаний в восьми башнях, расположенных вокруг башни с наибольшим энергосодержанием
- 3E – остаточное энергосодержание кластера
- E – полное энергосодержание частицы
- $A = (^2E \times 9^\circ + ^3E \times 18^\circ)/E$ – угловая ширина кластера
- $L = (E_1 \times 30 + E_2 \times 40 + E_3 \times 60)/E$ – условная глубина кластера

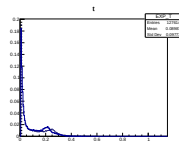
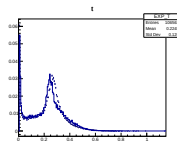
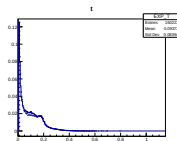
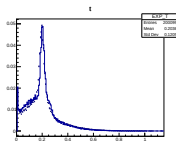
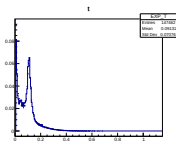
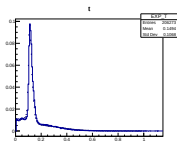
Итого $(4 \times 3 + 3 + 2 + 1) \times 2 = 36$ входных параметров для дискриминатора BDTG.

Также созданы дискриминаторы для отдельных частиц.

В том числе для μ/π разделения.



Входные параметры разделения для $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ в точке $\sqrt{s} = 680$ MeV



1E1/E_{beam}

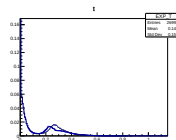
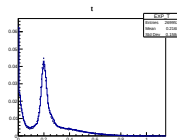
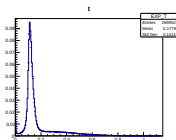
2E1/E_{beam}

1E2/E_{beam}

2E2/E_{beam}

1E3/E_{beam}

2E3/E_{beam}



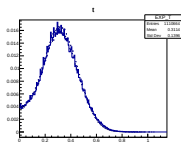
E1/E_{beam}

E2/E_{beam}

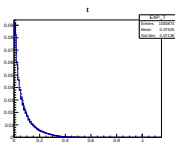
E3/E_{beam}



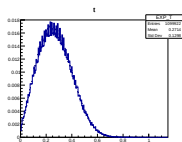
Входные параметры разделения для $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ в точке $\sqrt{s} = 680$ MeV



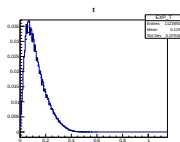
$^1E_1/E_{beam}$



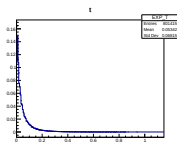
$^2E_1/E_{beam}$



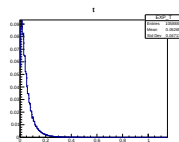
$^1E_2/E_{beam}$



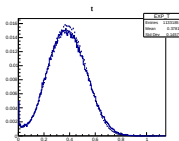
$^2E_2/E_{beam}$



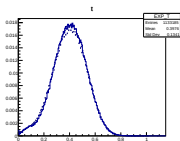
$^1E_3/E_{beam}$



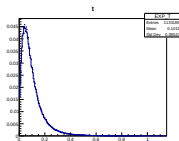
$^2E_3/E_{beam}$



E_1/E_{beam}



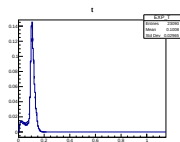
E_2/E_{beam}



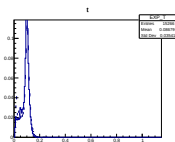
E_3/E_{beam}



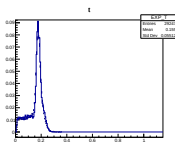
Входные параметры разделения для $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ в точке $\sqrt{s} = 680$ MeV



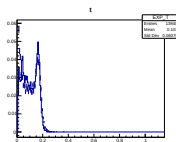
$^1E_1/E_{beam}$



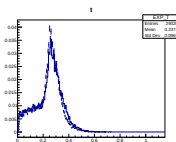
$^2E_1/E_{beam}$



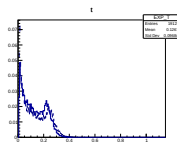
$^1E_2/E_{beam}$



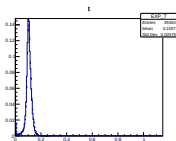
$^2E_2/E_{beam}$



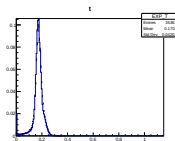
$^1E_3/E_{beam}$



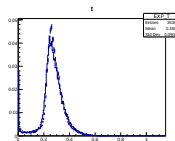
$^2E_3/E_{beam}$



E_1/E_{beam}



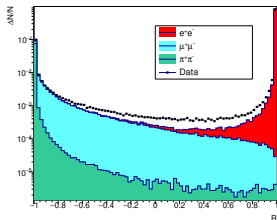
E_2/E_{beam}



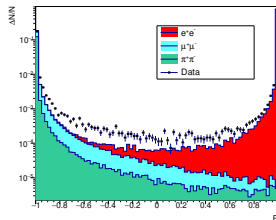
E_3/E_{beam}



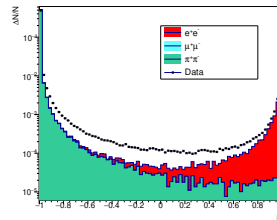
Распределение по R



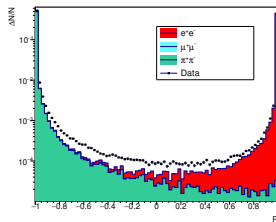
$\sqrt{s} = 548$ MeV



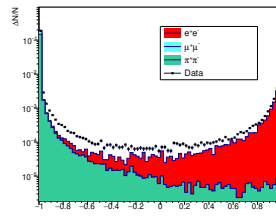
$\sqrt{s} = 600$ MeV



$\sqrt{s} = 750$ MeV



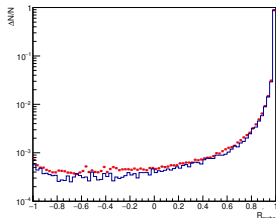
$\sqrt{s} = 775$ MeV



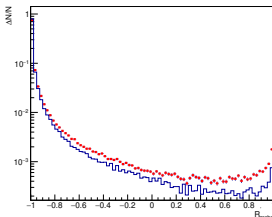
$\sqrt{s} = 930$ MeV



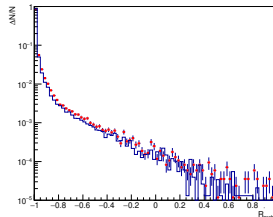
Отклики дискриминаторов в точке $\sqrt{s} = 680$ MeV



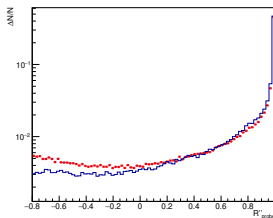
$e/\pi: e^+e^-$



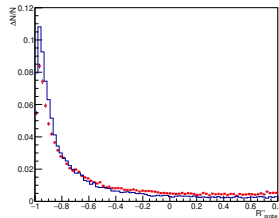
$\pi^+\pi^-$



$\mu^+\mu^-$



$\mu/\pi: \pi^+\pi^-$



$\mu^+\mu^-$

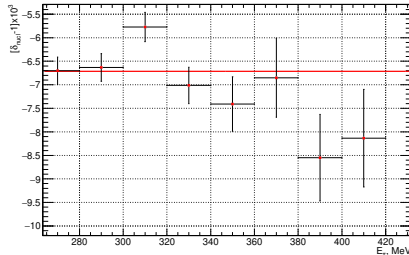


- Вклад процесса $e^+e^- \rightarrow e^+e^-e^+e^-$ оценивался по специальному числу событий (N_{4e}), удовлетворяющих следующим условиям отбора: неколлинеарные события с двумя заряженными частицами, вызвавшими срабатывания АЧС и энерговыделением в калориметре $\sqrt{s}/4$
- Отношение числа событий $e^+e^- \rightarrow e^+e^-e^+e^-$ попавших в коллинерный поток к N_{4e} оценивалось по экспериментальным данным (кроме условия $E_{tot} < 0.25\sqrt{s}$)
- Вклад фона $e^+e^- \rightarrow e^+e^-e^+e^-$ в $\pi^+\pi^-$ меньше 0,2% в пике $\rho(770)$, но становится существенным в области высоких энергий, достигая 3,5%

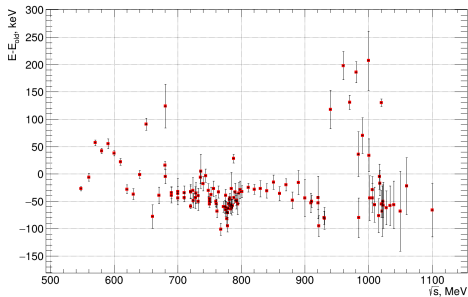


Определение вероятности потери пиона

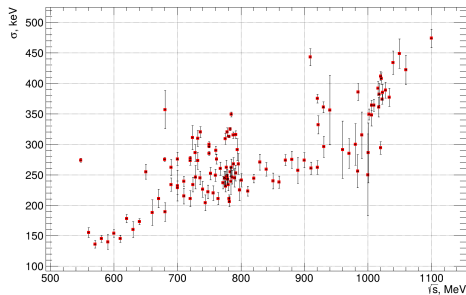
События процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ могут не пройти условия отбора из-за ядерного взаимодействия конечных частиц с веществом до газового объема трековой системы. События $e^+e^- \rightarrow \omega, \varphi \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ используются для оценки вероятности данного эффекта, они отбирались с применением кинематической реконструкции в гипотезе, что в событии произошёл распад π^0 на пару фотонов, а число зарегистрированных центральных треков не больше 1. Энергии заряженных пионов E_1 и E_2 вычислялись путём решения уравнений сохранения энергии и импульса. Среднее значение поправки для событий $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ с энергией пионов $E_\pi \in [250, 450]$ МэВ равно **0.9936**. Вариация поправки с энергией задаёт значение вклада в систематическую неопределённость эффективности равное 0.1 %.



Брались средние значения с весами, пропорциональными числу событий $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ (зависимость сечения процесса от энергии внутри точки не учитывалась). Заходы, отмеченные как **плохие**, не учитывались при усреднении. Для точки **475.0/0** измерений нет.



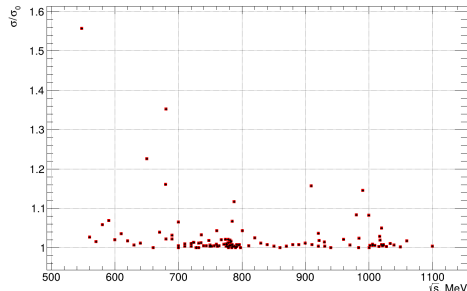
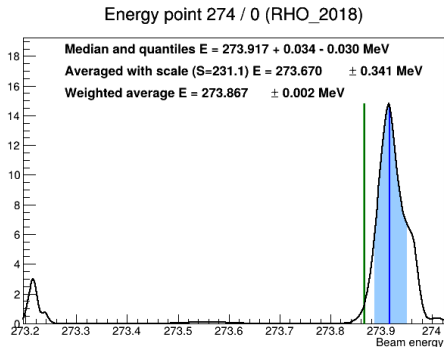
Отличие от старого измерения



Разброс энергии в СЦМ



Дрейф энергии в пучке учитывался как добавка к разбросу энергии в СЦМ.



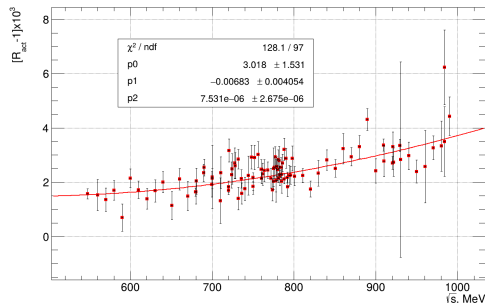
Распределение энергии в точке **274.0/0**

Увеличение разброса от дрейфа энергии в пучке

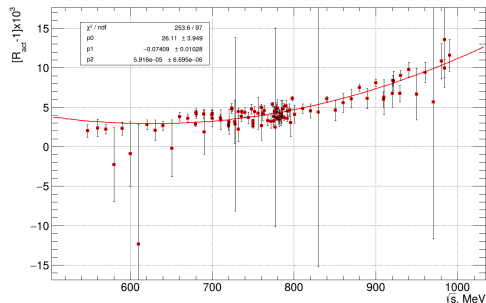


Эффективность условия $veto = 0$

Эффективность определена по событиям e^+e^- и $\pi^+\pi^-$, набранных с дополнительными условиями отбора для подавления $\mu^+\mu^-$ и космического фона



Поправка для e^+e^-



Поправка для $\pi^+\pi^-$

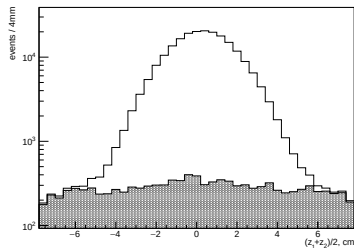
Вероятность срабатывания мюонной системы в моделировании больше чем в эксперименте



Остаточный космический фон оценивался по формуле:

$$N_{\text{cosm}} = N_{\text{exp}}^{\text{veto}=1} \frac{N_{\text{cosm}}^{\text{veto}=0}}{N_{\text{cosm}}^{\text{veto}=1}}, \quad (1)$$

где $N_{\text{exp}}^{\text{veto}=1}$ – количество коллинеарных событий, но инвертированным условием на veto , $N_{\text{cosm}}^{\text{veto}=0}$ и $N_{\text{cosm}}^{\text{veto}=1}$ – числа космических событий для которых $\text{veto} = 0$ и $\text{veto} = 1$ соответственно. Отношение $N_{\text{cosm}}^{\text{veto}=0}$ к $N_{\text{cosm}}^{\text{veto}=1}$, характеризующее неэффективность подавления космического фона мюонной системой, менялось в течение всего сканирования в пределах 1–7%.



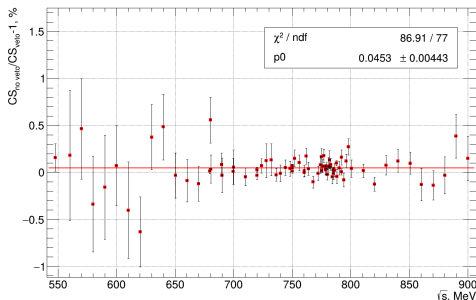
Вклад от процессов e^+e^- аннигиляции дает нормальное распределение с пиком в области $z = 0$, а присутствие вклада от космических мюонов, распределение для которого близко к равномерному



Вычисление сечения $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ без мюонного вето

При $\sqrt{s} > 900$ МэВ в событиях $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ мюоны с большой вероятностью проходят через железный поглотитель

Сравнение сечений при
 $\sqrt{s} < 900$ MeV



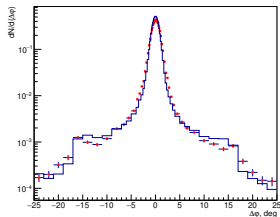
Среднее отношение составило 4.5×10^{-4} , данное значение взято в качестве вклада в систематику от условия $\text{veto} = 0$

Оценка числа событий космического фона (СКФ):

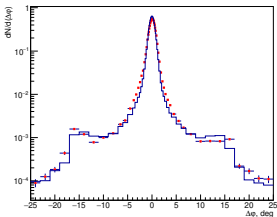
- Вычисляем эффективность космического вето для СКФ
- Отбираем события с $\text{veto} > 0$
- Из подгонки распределения $(z0_1 + z0_2)/2$ определяется число СКФ с $\text{veto} > 0$
- Восстанавливаем полное число СКФ для каждого типа событий, используя эффективность космического вето



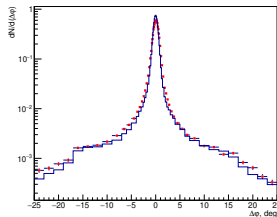
Распределение по $\Delta\varphi$



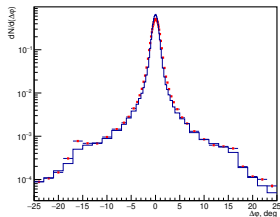
$\pi^+\pi^-: \sqrt{s} < m_\rho$



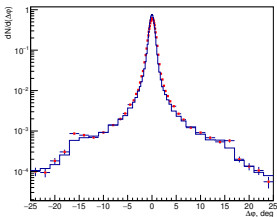
$\sqrt{s} \approx m_\rho$



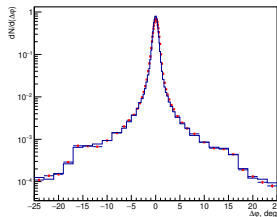
$\sqrt{s} > m_\rho$



$e^+e^-: \sqrt{s} < m_\rho$



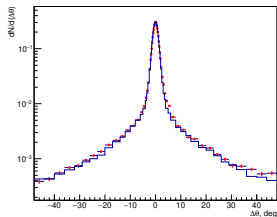
$\sqrt{s} \approx m_\rho$



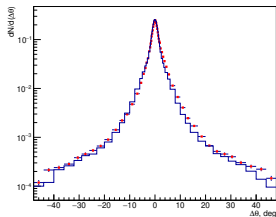
$\sqrt{s} > m_\rho$



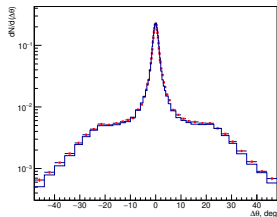
Распределение по $\Delta\theta$



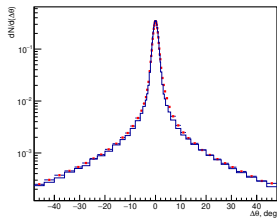
$\pi^+\pi^-: \sqrt{s} < m_\rho$



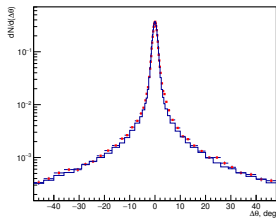
$\sqrt{s} \approx m_\rho$



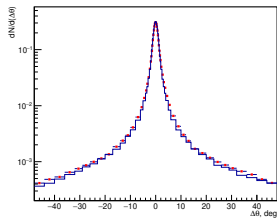
$\sqrt{s} > m_\rho$



$e^+e^-: \sqrt{s} < m_\rho$



$\sqrt{s} \approx m_\rho$



$\sqrt{s} > m_\rho$



Эффективность условий отбора по углам

Между угловыми распределениями в моделировании и в эксперименте есть небольшие отличия. Вследствие чего, эффективность условий отбора по углам в моделировании может существенно отличаться от истинной. На первом этапе рассматривались условия отбора: $|\Delta\phi| = |180^\circ - |\phi_1 - \phi_2|| < 6^\circ$ и $|\Delta\theta| = |180^\circ - (\theta_1 + \theta_2)| < 14^\circ$. Для изучения отличий между моделированием и экспериментом в каждой точке по энергии вводилась поправка к эффективности:

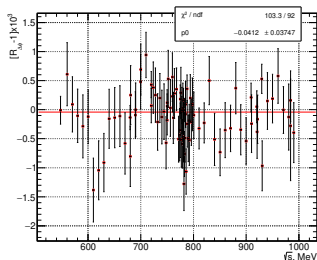
$$R_i(x) = \frac{\epsilon_i^{exp}(x)}{\epsilon_i^{mc}(x)} \epsilon_i^{exp} = \frac{N_i(|x| < A_x)}{N_i(|x| < B_x)} \epsilon_i^{mc} = \frac{M_i(|x| < A_x)}{M_i(|x| < B_x)}$$

Где $x = \Delta\phi, \Delta\theta$; $i = ee, \pi\pi$ и $\mu\mu$ – тип событий; A_x - ограничение на x ($A_{\Delta\phi} = 6^\circ$, $A_{\Delta\theta} = 14^\circ$), используемое при измерении сечения; B_x - расширенный интервал допустимых значений x ($B_{\Delta\phi} = 25^\circ$, $B_{\Delta\theta} = 38^\circ$); N и M - число событий в эксперименте и моделировании соответственно. Из числа экспериментальных событий $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ вычитался вклад процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$. Значение последнего определялось по эффективности моделирования, и измеренных ранее сечении и интегральной светимости: $N_{3\pi} = \sigma_{3\pi} \mathcal{L} \varepsilon_{3\pi}$.

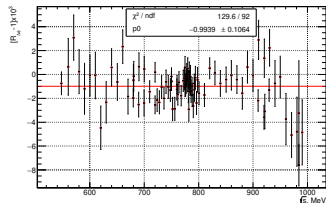


Эффективность для $|\Delta\varphi| < 6^\circ$

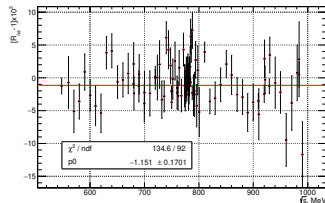
Эффективность определена по событиям e^+e^- и $\pi^+\pi^-$, набраным с дополнительными условиями отбора для подавления $\mu^+\mu^-$, $\omega \rightarrow 3\pi$ и космического фона



$$e^+e^- \rightarrow e^+e^-$$



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

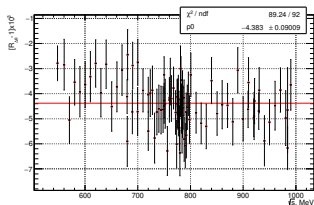


$$e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$$

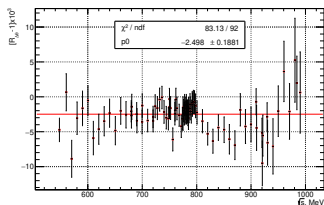
Средние значения поправок отклоняются от 1 не более чем на 0.1%



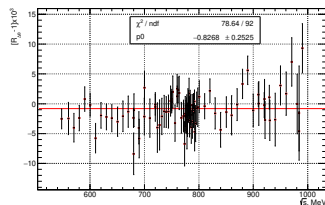
Эффективность определена по событиям e^+e^- и $\pi^+\pi^-$, набранных с дополнительными условиями отбора для подавления $\mu^+\mu^-$, $\omega \rightarrow 3\pi$ и космического фона



$$e^+e^- \rightarrow e^+e^-$$



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



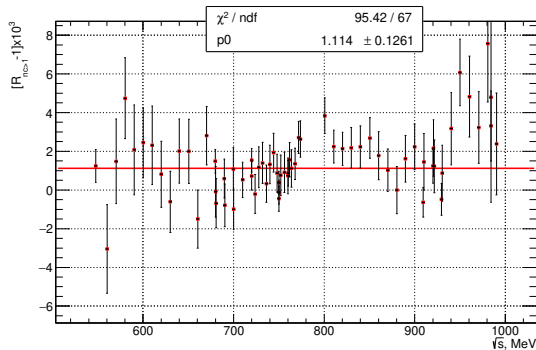
$$e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$$

Поправка в среднем = -0.44% для e^+e^- , и -0.25% для $\pi^+\pi^-$



Эффективность реконструкции треков

Эффективность определена по событиям e^+e^- и $\pi^+\pi^-$, набранных с дополнительными условиями отбора для подавления $\gamma\gamma$ и космического фона, область ω исключена

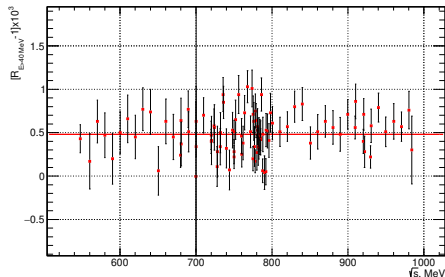


Среднее значение отношения поправок e^+e^- и $\pi^+\pi^-$ отстоит от 1 на 0.1%

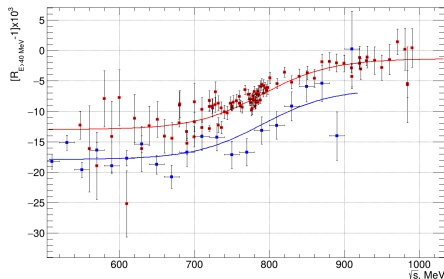


Эффективность отбора $E_i > 40 \text{ MeV}$

Используем события $e^+e^- \rightarrow 2\pi$ и 3π (с дополнительными ограничениями*) для вычисления поправок



$$e^+e^- \rightarrow e^+e^-$$



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

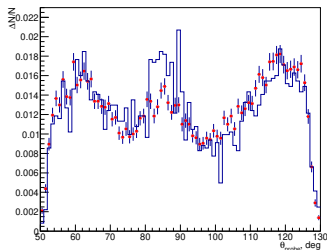
$R(s) = a_1 + a_2(\tanh((\sqrt{s} - a_3) \times a_4)) \times 0.5$. Разница между параметрами a_1 из аппроксимации поправок, полученными из $e^+e^- \rightarrow 2\pi$ и $e^+e^- \rightarrow 3\pi$, составила 0.5 %



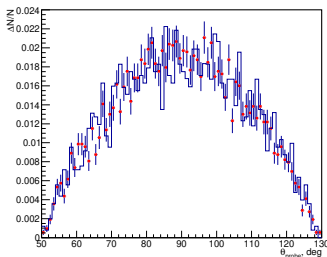
* (не)срабатывание АЧС, разделение μ/π , $E_{\text{max}} > 160 \text{ MeV}$

Псевдособытия

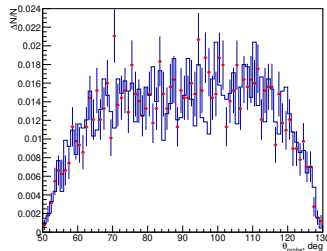
Псевдо- $e e$ и псевдо- $\pi\pi$ события конструировались, с применением метода, аналогичного методике Tag-and-Probe. При отборе таких частиц использовались сигналы АЧС (счетчик срабатывает от e , но не π) и параметры e/π и μ/π разделения R' и R'' . Probe-частица считалась «пионом», если обе коллинеарные частицы не вызвали срабатывания черенковского счетчика и для tag-частицы $R' > 0$ и $R'' > 0$. И «электроном» когда $R' < 0$ для tag-частицы и счетчик сработал для обеих частиц. Отобранные probe-частицы из разных событий объединялись попарно в псевдособытия, при условии, что они коллинеарны. Псевдо- $\mu\mu$: probe-частица считалась «мюоном» если обе частицы не вызвали срабатывания АЧС, для tag-частицы $R' > 0$ и $R'' < -0.8$ и $R'' < 0.8$ для probe-частицы.



$e^+e^- \rightarrow e^+e^-$



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

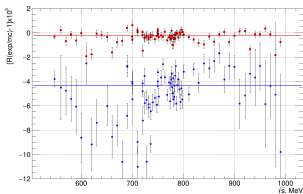


$e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$

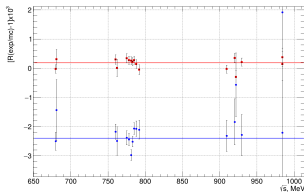
Даже при 100 кратном подавлении отбираемых событий условием $R' > 0.5$ ($R' < -0.5$) угловое распределение описывается моделированием соответствующего процесса



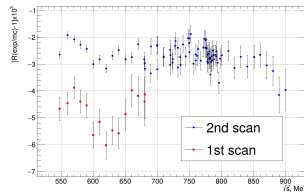
Поправка вычислялась по псевдо-событиям ee and 2π



Corrections for **electrons** and **pions** for the 1-st scan.



Corrections for **electrons** and **pions** for the 2-nd scan.



Corrections for pions in pseudo-events from $e^+e^- \rightarrow 3\pi$ for the **first** and **second** scans

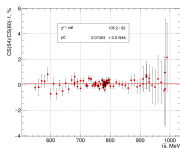
Поправка для событий $e^+e^- \rightarrow e^+e^- < 0.1\%$. В случае $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ они равны 0.24% и 0.42% для 1-го и 2-го сканирования.

Они согласуются с результатом для псевдо-событий из $e^+e^- \rightarrow 3\pi$.

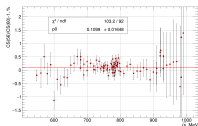


Изменение сечения $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ при вариации условия на θ_0

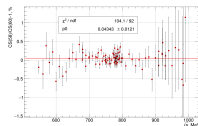
Влияние условия на средний полярный угол $\theta_{min} < \theta_0 < 180^\circ - \theta_{min}$ на точность измерения сечения $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ определялось путём вариации θ_{min} . Отношения сечений, вычисленных для $\theta_{min} = 54^\circ, 56^\circ, 58^\circ, 62^\circ, 64^\circ, 66^\circ, 68^\circ, 70^\circ, 72^\circ$, к сечению, посчитаному со стандартным условием отбора $60^\circ < \theta_0 < 120^\circ$



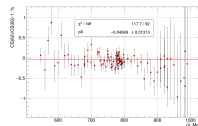
$\theta_{min} = 54^\circ$



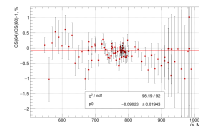
$\theta_{min} = 56^\circ$



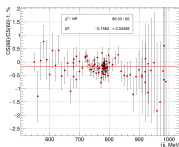
$\theta_{min} = 58^\circ$



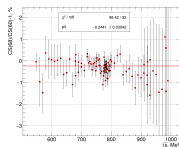
$\theta_{min} = 62^\circ$



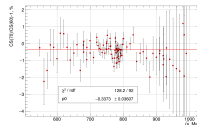
$\theta_{min} = 64^\circ$



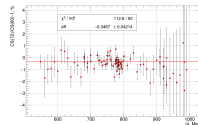
$\theta_{min} = 66^\circ$



$\theta_{min} = 68^\circ$



$\theta_{min} = 70^\circ$

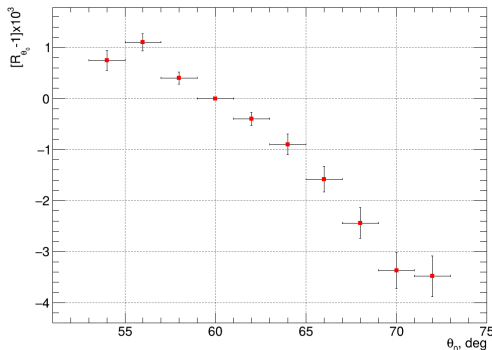


$\theta_{min} = 72^\circ$



Изменение сечения $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ при вариации условия на θ_0

Variation of θ_0 cut results in changes of the cross section measurement results. They show no energy dependence. Averaged shifts of cross sections for different θ_0 cuts are:



Systematics θ_0 :

- Improvements of the reconstruction algorithm are followed by reduction of discrepancy between MC and Data
- Deviation from unity is in 10^{-3} to -3.5×10^{-3} range
- Contribution of the $60^\circ < \theta_0 < 120^\circ$ cut to the systematic uncertainty is **0.4 %**
- For the measured IL variation is **0.1 %**



Систематическая неопределённость

Полная систематическая погрешность определения борновского сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ включает в себя несколько составляющих: ошибку эффективности регистрации, погрешности вычитания фона, точность расчета радиационной поправки и точность моделирования ядерного взаимодействия в веществе до трековой системы. В пике $\rho(770)$ полная систематическая неопределённость на 57% определяется ошибками $\sigma_{E>40}$ и σ_{θ_0} . Вариация сечения при изменении триггерных условий даёт σ_{ncor}

Ошибка	$600 < \sqrt{s} < 900$ МэВ, %	$\sqrt{s} \leq 600$ МэВ и $\sqrt{s} \geq 900$ МэВ, %
$\sigma_{e/\pi}$	0.05–0.1	0.1–0.3
σ_{μ}	0.03–0.1	0.1–0.3
σ_{Δ}	0.2	
σ_{θ_0}	0.4	
$\sigma_{E>40}$	0.5	
$\sigma_{nc>1}$	0.1	
σ_{rad}	0.1	
σ_{ncor}	0.2	
σ_{nucl}	0.1	
суммарная	0.7	0.7–0.8



Сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ можно выразить через электромагнитный формфактор пиона $F_\pi(s)$:

$$\sigma_{\pi^+\pi^-} = \frac{\pi\alpha^2}{3s} \beta_\pi^3 |F_\pi(s)|^2, \quad (2)$$

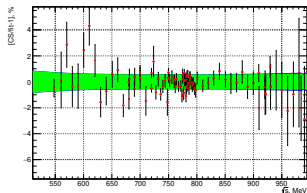
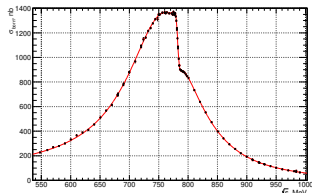
здесь s – квадрат энергии в системе центра масс (с. ц. м), $\beta_\pi = \sqrt{1 - 4m_\pi^2/s}$ и m_π – скорость в с. ц. м. и масса заряженного пиона.

Формфактор пиона хорошо описывается вкладами семейства векторных мезонов ρ , ρ' и ρ'' , а также изоскалярного ω резонанса:

$$F_\pi(s) = \frac{GS_\rho(s) \left(1 + \frac{A_\omega s}{s - m_\omega^2 + i m_\omega \Gamma_\omega}\right) + \beta \cdot GS_{\rho'}(s) + \delta \cdot GS_{\rho''}(s)}{1 + \beta + \delta}, \quad (3)$$

где параметры $\beta = |\beta|e^{i\phi_{\rho\rho'}}$ и $\delta = |\delta|e^{i\phi_{\rho\rho''}}$ описывают вклады ρ' и ρ'' мезонов относительно основного вклада ρ . Для описания зависимости от энергии вклада векторного мезона $V = \rho, \rho', \rho''$ использовалась модель Гунариса-Сакураи



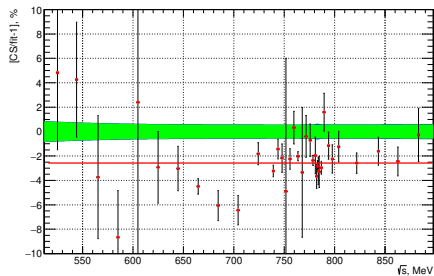


Вклад разброса энергии в пучке учитывался с точностью до 2-й производной

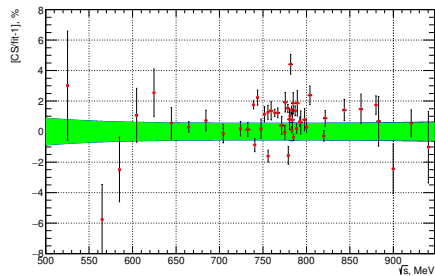
Параметр	Данная работа	BaBar
m_ρ , МэВ	$775,556 \pm 0,077 \pm 0,05$	$774,998 \pm 0,157$
Γ_ρ , МэВ	$149,092 \pm 0,215 \pm 0,045$	$149,954 \pm 0,358$
m_ω , МэВ	$782,381 \pm 0,06 \pm 0,05$	$781,962 \pm 0,191$
Γ_ω , МэВ	$8,822 \pm 0,132 \pm 0,06$	$8,074 \pm 0,372$
$B(\omega \rightarrow \pi^+\pi^-)$	$0,0169 \pm 0,00028 \pm 0,0005$	$0,01481 \pm 0,00072$
$ \beta $	$0,2445 \pm 0,012 \pm 0,0389$	$0,16283 \pm 0,011$
$ \delta $	$0,1974 \pm 0,01 \pm 0,0155$	$0,02946 \pm 0,0076$
$\phi_{\rho\omega}$, рад.	$0,1334 \pm 0,013 \pm 0,0039$	$0,02116 \pm 0,0381$
$\phi_{\rho\rho'}$, рад.	$4,283 \pm 0,009 \pm 0,13$	$3,7935 \pm 0,0623$
$\phi_{\rho\rho''}$, рад.	$1,8278 \pm 0,0169 \pm 0,33$	$1,408 \pm 0,168$
χ^2/ndf	108,6/83	257,8/260

Массы и ширины ρ' и ρ'' фиксировались на значениях, полученных из аппроксимации данных **BaBar**. Значение рад. поправки вычислялось по генератору **BABAYAGA-NLO** итерационно.



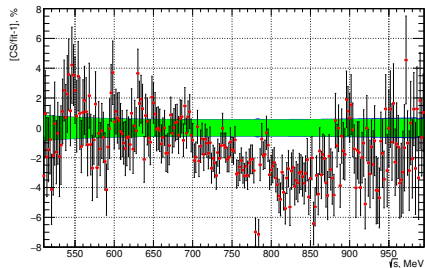


Сечения, ранне опубликованные СНД,
лежат на 2.5 % ниже

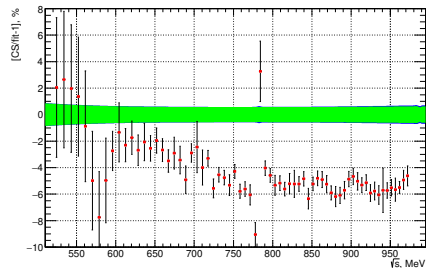


После переобработки данных 2013 года
(использовались в старом анализе СНД)
сечения в среднем выросли на 3%



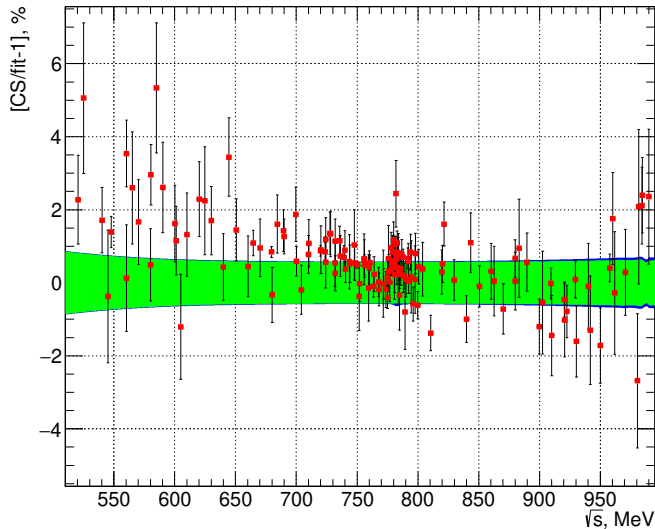


BaBar results deviation from our fit, green area – systematics, blue one - total uncertainty



KLOE results deviation from our fit, green area – systematics, blue one - total uncertainty





Вычисление вклада в аномальный магнитный момент мюона

Вклад $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ в аномальный магнитный момент мюона в главном порядке теории возмущений выражается через дисперсионное соотношение:

$$a_\mu(\pi\pi, \sqrt{s_{max}} \leq \sqrt{s} \leq \sqrt{s_{min}}) = \left(\frac{\alpha m_\mu}{3\pi} \right)^2 \int_{s_{min}}^{s_{max}} \frac{R(s)K(s)}{s^2} ds, \quad (4)$$

$$R(s) = \sigma_{\pi\pi}^{pol} \times \frac{3s}{4\pi\alpha^2} \quad \sigma_{\pi\pi}^{pol}(s) = \sigma_{\pi\pi}^0(s) \times |1 - \Pi(s)|^2 \times \left(1 + \frac{\alpha}{\pi} a(s)\right) \quad (5)$$

Таблица: Значения $a_\mu(\pi\pi, 548\text{МэВ} \leq \sqrt{s} \leq 990\text{МэВ}) \times 10^{10}$, полученные в этой работе, и посчитанные по данным экспериментов BABAR и КМД-3

Измерение	$a_\mu(\pi\pi) \times 10^{10}$
Данная работа	$430,15 \pm 0,49 \pm 2,94$
BABAR	$423,87 \pm 2,1 \pm 2,2$
КМД-3	$433,62 \pm 0,37 \pm 2,9$



- 1 Разработан метод разделения событий $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ и $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ по профилю энерговыведения конечных частиц, с эффективностью идентификации не хуже 99.4%. Была проведена независимая проверка корректности работы данного алгоритма
- 2 Измерено полное сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ в диапазоне энергий $\sqrt{s} = 548 - 990$ МэВ (области рождения ρ и ω мезонов) с систематической ошибкой 0.7–0.8% при энергии $\sqrt{s} \geq 900$ и $\sqrt{s} \leq 600$ МэВ и 0.7% при $600 < \sqrt{s} < 900$ МэВ. Точность измерения сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ соответствует прецизионным мировым измерениям
- 3 Проведен анализ полученных экспериментальных данных в рамках модели доминантности векторных мезонов, показавший, что измеренные при $\sqrt{s} < 0.99$ ГэВ сечения процесса $\pi^+\pi^-$ описываются при учете вкладов ρ , ω , ρ' и ρ'' резонансов
- 4 Определены масса и полная ширина ρ мезона:
 $m_\rho = 775.556 \pm 0.077 \pm 0.05$ МэВ,
 $\Gamma_\rho = 149.092 \pm 0.215 \pm 0.045$ МэВ
А также:
 $B_{\rho \rightarrow \pi^+\pi^-} B_{\rho \rightarrow e^+e^-} = (5.04 \pm 0.02 \pm 0.04) \times 10^{-5}$



- 5 Вычислены масса, полная ширина и вероятность распада в $\pi^+\pi^-$ для ω мезона:
 $m_\omega = 782.381 \pm 0.06 \pm 0.05 \text{ МэВ},$
 $\Gamma_\omega = 8.822 \pm 0.132 \pm 0.06 \text{ МэВ}$
 $B_{\omega \rightarrow \pi^+\pi^-} B_{\omega \rightarrow e^+e^-} = (1.19 \pm 0.051 \pm 0.031) \times 10^{-6}$
- 6 Вычислен вклад $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ в аномальный магнитный момент мюона в области энергий $548 < \sqrt{s} < 990 \text{ МэВ}$:
 $a_\mu(\pi\pi, 548\text{MeV} \leq \sqrt{s} \leq 990\text{MeV}) = (430.15 \pm 0.49 \pm 2.94) \times 10^{-10}$
- 7 Представленные результаты находятся в согласии с результатами измерений на КМД-3. Имеется заметное расхождение с данными BaBar ($\approx 2\sigma$). Полное разногласие с KLOE.
- 8 В будущем планируется провести аналогичное измерение с данными, набранными в 2024–2026 годах, что позволит существенно уменьшить статистическую ошибку, особенно в области энергий за пределами m_ρ и m_ω



Спасибо за внимание !

