

Измерение инклюзивного сечения e^+e^- -аннигиляции
в заряженные многочастичные адронные состояния в
диапазоне \sqrt{s} 1.8–2.0 ГэВ детектором СНД на
коллайдере ВЭПП-2000

Дмитрий Штоль

Сессия-конференция секции ядерной физики ОФН РАН к 70-летию В.А.
Рубакова

18 февраля 2025 г.

Задача:

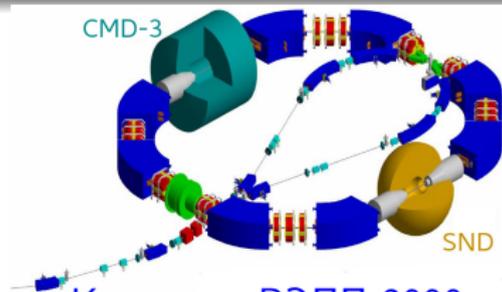
Цель работы — измерение инклюзивного сечения e^+e^- -аннигиляции в заряженные многочастичные (неколлинеарные) адронные состояния в диапазоне $\sqrt{s}=1.8\text{--}2.0$ ГэВ.

События с нейтральным конечным состоянием, включающим η и K_S включаются в состав изучаемых процессов в случае распада η и K_S в заряженные состояния.

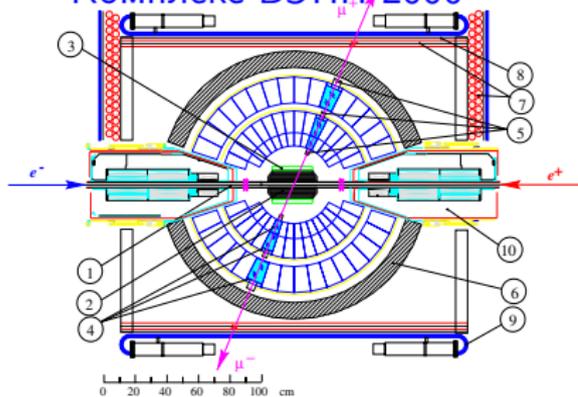
Чем обусловлен такой выбор:

- Сечения двухчастичных процессов с заряженными конечными состояниями ($\pi^+\pi^-$, K^+K^- , $p\bar{p}$) уже измерены отдельно.
- Измерение инклюзивного сечения нейтральных процессов является отдельной задачей.

Коллайдер ВЭПП-2000 и эксперимент Снд



Комплекс ВЭПП-2000



	2019	2020	2021	2022
N_{points}	11	5	4	22
IL, pb^{-1}	26	45	45	184

$$\sum IL = 300 pb^{-1}$$

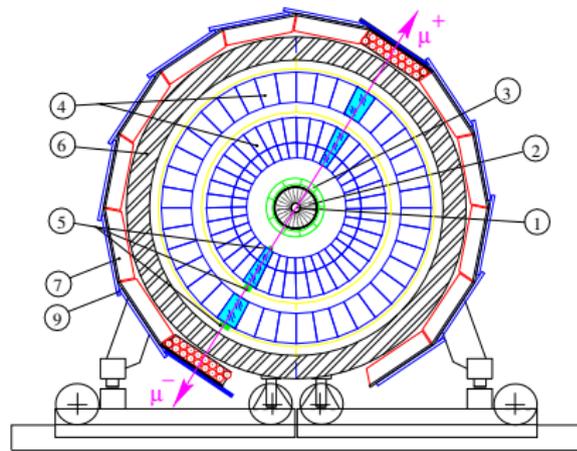


Схема Снд. 1 – вакуумная камера, 2 – дрейфовая камера, 3 – черенковский счетчик, 4 – кристаллы NaI(Tl), 5 – фототриоды, 6 – поглотитель (Fe), 7 – пропорциональные трубки, 8 – 1 см железные пластины, 9 – сцинтилляционные счетчики, 10 – магнитные линзы.

Общий принцип отбора

- Не менее двух заряженных частиц
- Они не должны быть коллинеарны
- Они не должны быть электронами или мюонами
- Обычно в адронном событии есть фотоны

Фоновые процессы:

- $e^+e^-(\gamma)$ — самый главный
- $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$
- $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$
- $e^+e^- \rightarrow p\bar{p}$
- $e^+e^- \rightarrow hadrons (neutral)$
- $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$
- Пучковый фон
- Космический фон

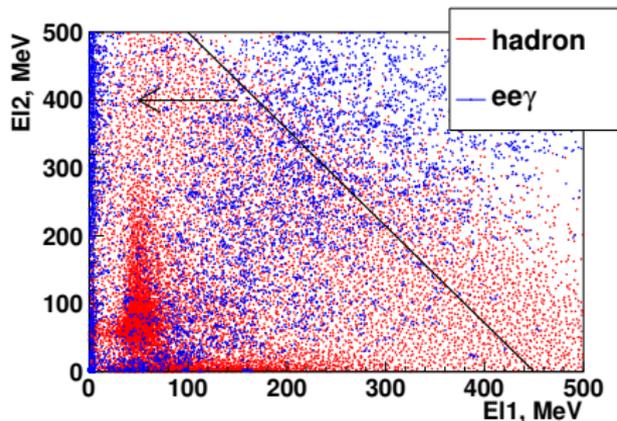
- Моделирование выполняется в Geant4
- Используется генератор начальных событий адронных процессов, изначально разработанный для эксперимента КМД-3 и адаптированный для СНД
 - Поддерживает 42 процесса (на данный момент), среди которых как изучаемые процессы, так и фоновые. Данный генератор также используется в эксперименте СНД для моделирования фона при анализе отдельных процессов.
 - Для моделирования используются сечения процессов, измеренные в различных экспериментах (СНД, КМД-3, BaBar, BES).
 - Процесс для конкретного события выбирается случайно, пропорционально заданному сечению с учетом радиационных поправок.
 - При вычислении эффективности нейтральные события с η и K_S включаются в полное число событий только в случае заряженной моды распада, события с нейтральной модой относятся к фону.

- Отбираются центральные треки: $|d0| < 0.8$ см, $|z0| < 15$ см
- Ищется группа центральных треков, такая, что $|z0_i - z0_j| < 4$ см для любых i, j .
- Требуется (иначе событие бракуется):
 - Наличие группы минимум из двух центральных треков, близких по z
 - Отсутствие **коллинеарных** треков в группе ($|\Delta\phi| > 15^\circ$ для любой пары треков)
 - Подавление пучкового фона:
 - $\sum E_i^{ch} > 5$ МэВ
 - $(dE/dx)|_{layer=1} > 0 \parallel (dE/dx)|_{layer=2} > 0$
 - $E_{tot}/(2E_{beam}) > 0.1$
 - Асимметрия: пусть D_{LR} — разность числа частиц, вылетевших с $\cos\theta > 0$ и с $\cos\theta < 0$. Тогда:
 - $|D_{LR}| \leq 2$ для событий с 2 треками и 2 фотонами
 - $|D_{LR}| \leq 4$ для событий с большим числом частиц
- Вычисляется z_{vtx} — среднее z по группе центральных треков, взвешенное с учетом погрешностей.

Подавление фона $bhabha$ по посылным энерговыведениям

Для всех заряженных частиц:

- $E_{l2} < 500 - 1.43 \cdot (E_{l1} - 100)$
- $E_{l3} < 500 - 2 \cdot (E_{l2} - 150)$

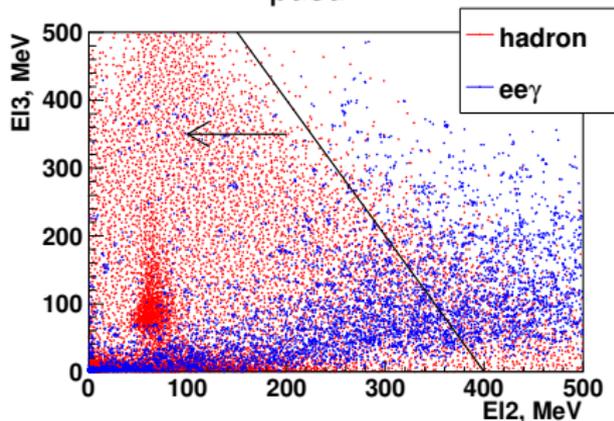


Слой 2 vs слой 1, 1.9 ГэВ

Эффективность отбора по $E_{l,1,2,3}$

Процесс	ε
hadron	0.969–0.984
$ee\gamma$	0.225–0.324

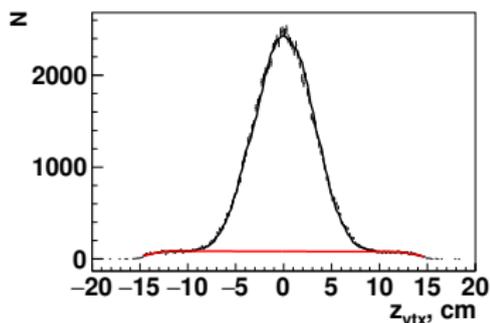
Улучшение hadron/ $ee\gamma$ — ≈ 3.0 – 4.3
раза



Слой 3 vs слой 2, 1.9 ГэВ

Вычитание остаточного фона

- Космический фон выделяется условием $30 \text{ нс} < |t_{\text{evt}}| < 40 \text{ нс}$, где t_{evt} – время события относительно столкновения пучков. Для всех событий $|t_{\text{evt}}| < 40 \text{ нс}$, $F(z_{\text{vtx}}) = F_{\text{exp}}(z_{\text{vtx}}) - 4F_{\text{cosm}}(z_{\text{vtx}})$.
- Вычитание пучкового фона производится аппроксимацией распределения по z_{vtx} .
- Форма эффекта описывается гистограммой по событиям $\pi^+\pi^-2\pi^0$ (эксперимент), отобранным условием кинематической реконструкции $\chi^2_{\pi^+\pi^-2\pi^0} < 100$.
- Форма фона описывается линейной функцией и полиномом 2 степени — на краях.
- Для $e^+e^-(\gamma)$ и адронных событий с заряженными коллинеарными конечными состояниями используется вычитание по моделированию на основании расчетного сечения ($e^+e^-(\gamma)$) и измеренных сечений процессов $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$, K^+K^- , $p\bar{p}$.

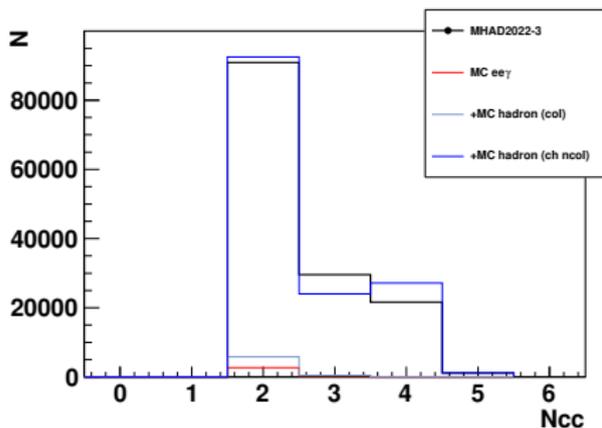


z_{vtx} для событий с двумя треками

Анализ структуры фона по моделированию

Нормировка процессов на экспериментальную светимость производится:

- Для изучаемых событий — на основании сечения, измеренного в работе
- Для нейтральных адронных процессов — измеренные ранее сечения
- Для $ee\gamma$, $\gamma\gamma$, $\mu\mu$ — расчетное сечение.



Процесс	вклад $100 \cdot N_{bkg}/N_{exp}$
$ee(\gamma)$	2.08
h_{col}	2.09
$\mu\mu$	0.15
h_{neu}	0.06
$\gamma\gamma$	0.014
h_{eff}	96.89
Σ	101.29

Анализ поправок и систематических погрешностей, обусловленных отбором: общий подход

Пусть:

- S — изучаемое условие отбора
- $N \pm \sigma N$ и ε^{mc} — число событий и эффективность по моделированию с полным условием отбора $S \&\& S_0$
- $\Delta N \pm \sigma \Delta N$ — число событий и $\delta\varepsilon^{mc}$ — число событий и эффективность по моделированию с условием $\bar{S} \&\& S_0$

$$\delta_S = \frac{\varepsilon^{mc}}{\varepsilon^{mc} + \delta\varepsilon^{mc}} \left(1 + \frac{\Delta N}{N} \right) - 1,$$

$$\sigma\delta_S = \frac{\varepsilon^{mc}}{\varepsilon^{mc} + \delta\varepsilon^{mc}} \cdot \frac{1}{N} \sqrt{(\sigma\Delta N)^2 + \left(\frac{\Delta N}{N} \right)^2 (\sigma N)^2}$$

Сканирование	2019	2020	2021	2022
Поправка, %	4.11 ± 0.41	4.29 ± 0.42	3.97 ± 0.89	3.29 ± 0.98

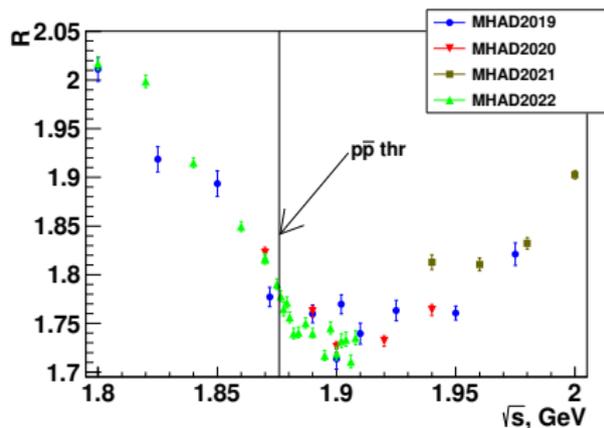
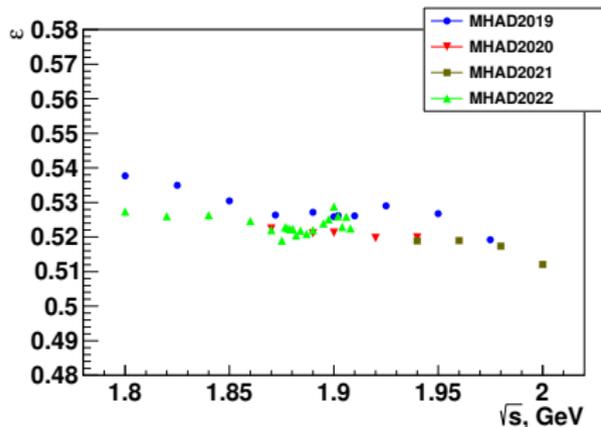
Поправка на излучение фотона начальными частицами

Для учета потери энергии на излучение начального фотона используется аппроксимация числа наблюдаемых событий

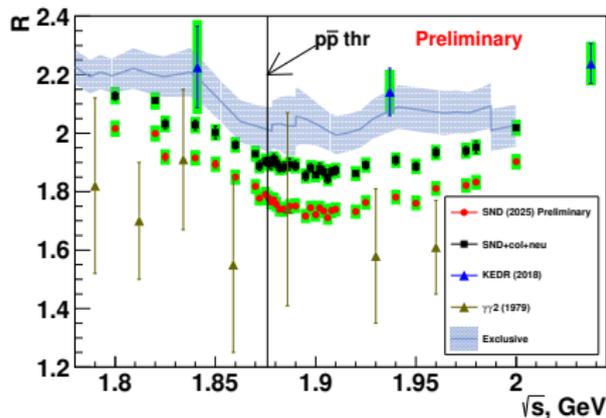
$$N_{evt}^{exp} = \varepsilon \cdot IL \cdot \sigma_{vis} = \varepsilon \cdot IL \cdot \sigma_B \cdot (1 + \delta), \quad R = \sigma_B / \sigma_{e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-}$$

$$\sigma_{vis}(\sqrt{s}, \vec{\alpha}) = \sigma_B(\sqrt{s}, \vec{\alpha})(1 + \delta) = \int_0^{\frac{2E_{max}^\gamma}{\sqrt{s}}} F(\sqrt{s}, x) \sigma_B(\sqrt{s(1-x)}, \vec{\alpha}) dx$$

Для описания $\sigma_B(\sqrt{s}, \vec{\alpha})$ использовался сплайн.



Полное R (предварительное)



Оценки систематических погрешностей:

- Различия между сканированиями (максимум 2.7%, среднее – 0.8%)
- Погрешности поправок к эффективности – до 0.98%
- Итоговая оценка – 1.27% (пока неполная)

Ссылки:

- Phys. Lett. B Vol. 788, (2019), pp 42-51 (КЕДР)
- Phys.Lett.B 86 (1979) 234-238 ($\gamma\gamma 2$)
- <https://cmd.inp.nsk.su/ignatov/vpl/> — сумма эксклюзивных сечений

К измеренному сечению прибавлены сечения процессов¹:

- $\eta\eta\gamma$ (СНД 2022)
- $\eta\gamma$ (СНД 2023)
- K^+K^- (СНД 2016)
- $n\bar{n}$ (СНД)
- $p\bar{p}$ (СНД)
- $\pi^0\gamma$ (СНД 2018)
- $\pi^0\pi^0\gamma$ (СНД 2016)
- $\eta\pi^0\gamma$ (СНД 2020)
- $\eta\pi^0\pi^0\gamma$ (СНД 2016)
- $3\pi^0\gamma$ (СНД)
- $\pi^+\pi^+$ (BABAR 2012)
- $K_S K_L$ (BABAR 2014)
- $K_S K_L \pi^0$ (СНД 2018)
- $K_S K_L 2\pi^0$ (BABAR 2016)
- $\eta K_S K_L$ (СНД 2018, из ηK^+K^-)

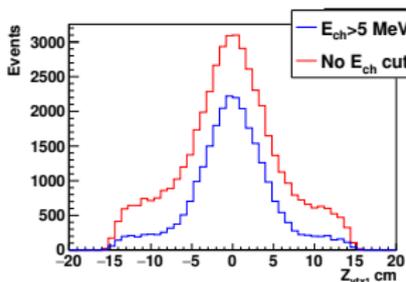
¹Для процессов с K_S и η сечение умножается на вероятность нейтральной моды распада

- Предложены условия отбора неколлинеарных заряженных адронных событий, подавляющие фон $e^+e^-(\gamma)$ и частично — пучковый фон.
- Реализовано вычитание остаточного пучкового фона.
- Изучена структура фоновых процессов и реализовано вычитание их остаточного вклада.
- Получена предварительная зависимость полного R от \sqrt{s} .
- Полученное полное R систематически ниже результатов эксклюзивных измерений на 5-10%. От инклюзивных измерений КЕДР результат отличается на $0.7\sigma_{tot}-1.5\sigma_{tot}^2$ в зависимости от точки и не противоречит измерениям $\gamma\gamma^2$.

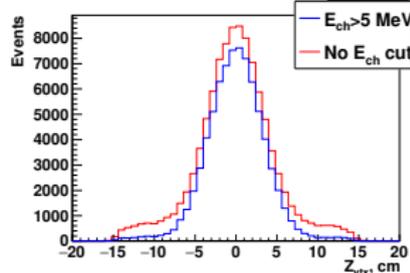
² σ_{tot} включает как статистическую, так и систематическую погрешности

BACKUP

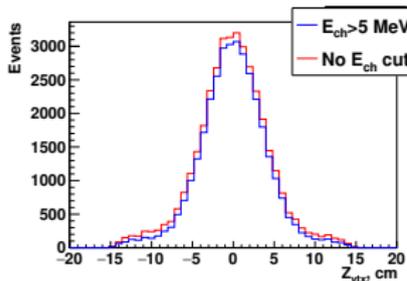
Подавление пучкового фона условием $\sum E_{ch} > 5$ МэВ



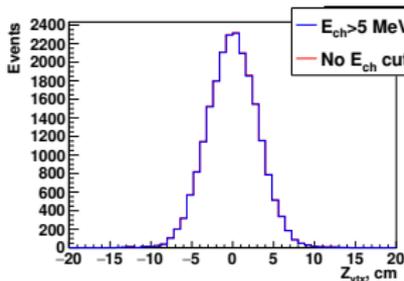
z_{vtx} (2 трека, 2 фотона)



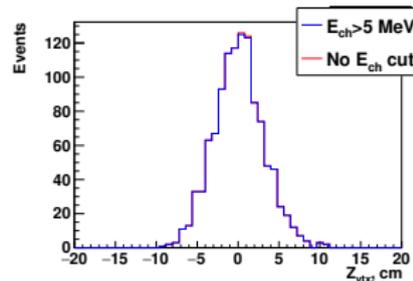
z_{vtx} (2 трека, > 2 фотонов)



z_{vtx} (3 трека)



z_{vtx} (4 трека)

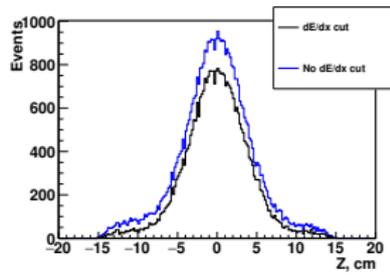
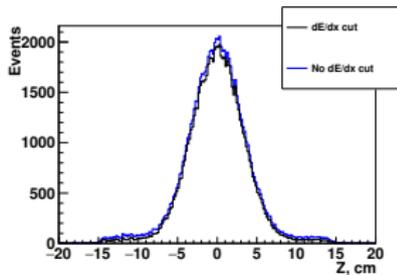
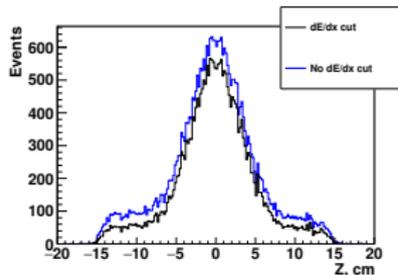


z_{vtx} (>4 треков)

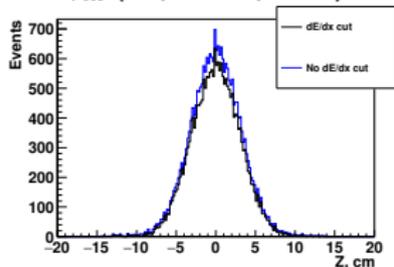
Условие на dE/dx

Для всех заряженных частиц:

$$(dE/dx)|_{layer=1} > 0 \quad || \quad (dE/dx)|_{layer=2} > 0$$

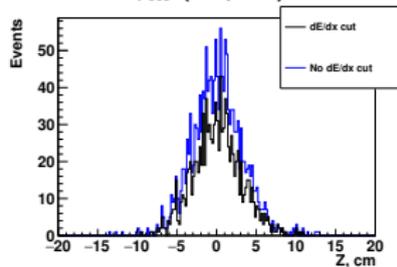


z_{vtx} (2 трека, 2 фотона)



z_{vtx} (2 трека, > 2 фотонов)

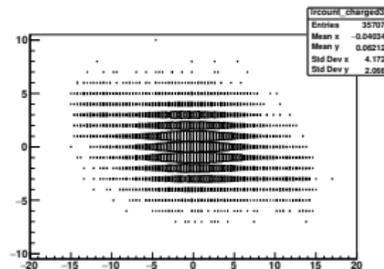
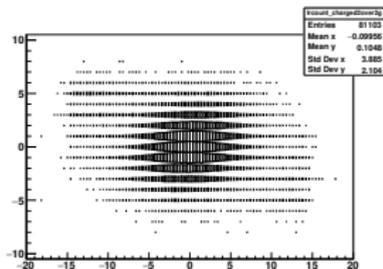
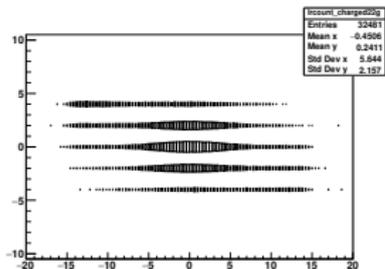
z_{vtx} (3 трека)



z_{vtx} (4 трека)

z_{vtx} (>4 треков)

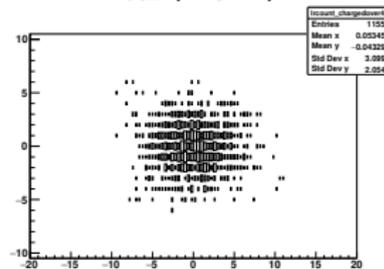
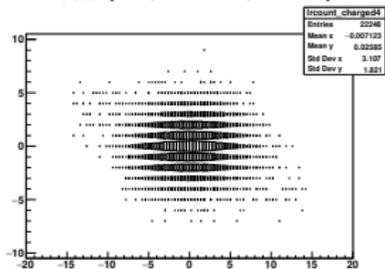
Подавление пучкового фона: асимметрия



z_{vtx} (2 трека, 2 фотона)

z_{vtx} (2 трека, > 2 фотонов)

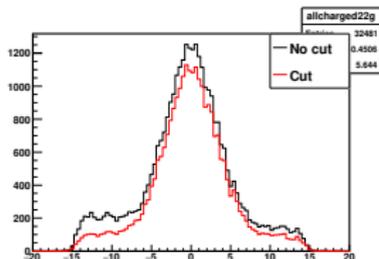
z_{vtx} (3 трека)



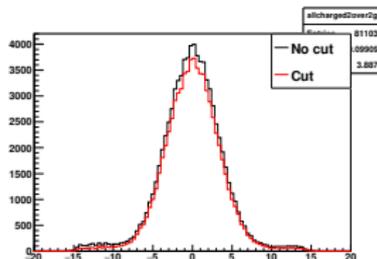
z_{vtx} (4 трека)

z_{vtx} (>4 треков)

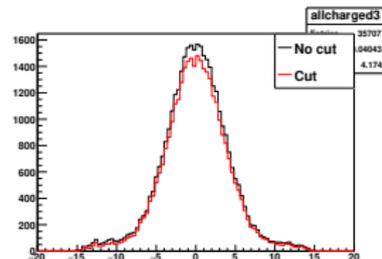
Подавление пучкового фона: асимметрия



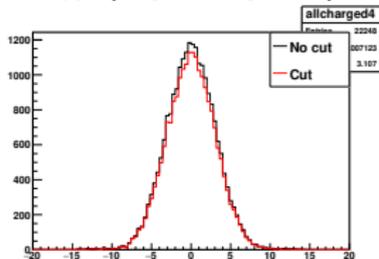
z_{vtx} (2 трека, 2 фотона)



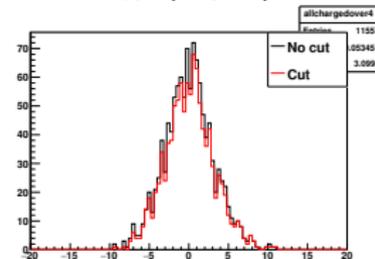
z_{vtx} (2 трека, > 2 фотонов)



z_{vtx} (3 трека)



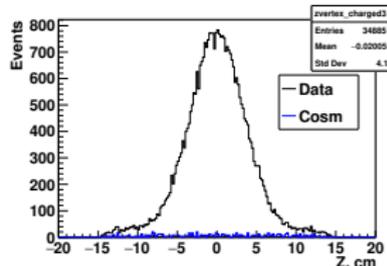
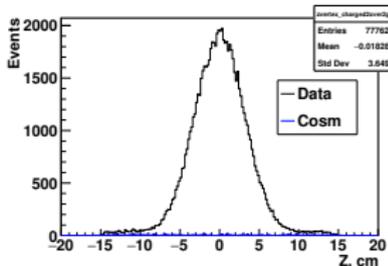
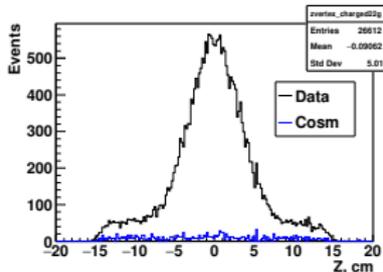
z_{vtx} (4 трека)



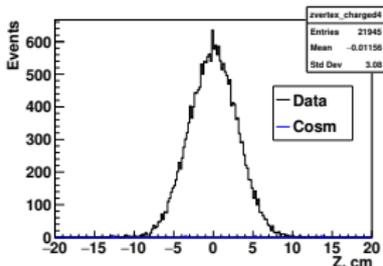
z_{vtx} (>4 треков)

Космический фон

Выделен условием $30 < |t_{\text{evt}}| < 40$. Для всех событий $|t_{\text{evt}}| < 40$, поэтому для сравнения и вычитания распределение для космики умножается на 4.



z_{vtx} (2 трека, 2 фотона)

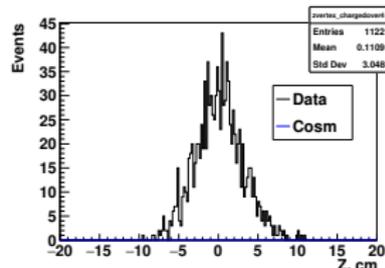


z_{vtx} (4 трека)

z_{vtx} (2 трека, > 2 фотонов)

Класс	Вклад, %
2c2g	5
2c>2g	0.8
3c	2.3
4c	0.07
>4c	0
Total	1.5

z_{vtx} (3 трека)



z_{vtx} (>4 треков)

- Построить функцию для описания зависимости $\sigma_B(\sqrt{s})$ для большого диапазона \sqrt{s} для учета сбросов на все резонансы сложно
- Поэтому события с энергией ISR фотона $E_\gamma > 100$ МэВ вычитаются как фон расчетным путем по МС

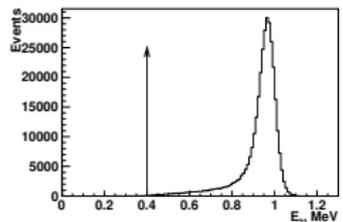
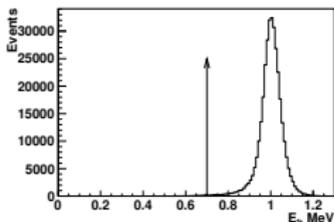
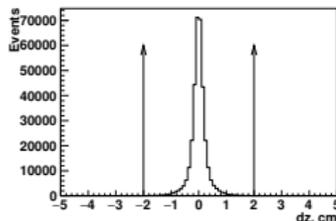
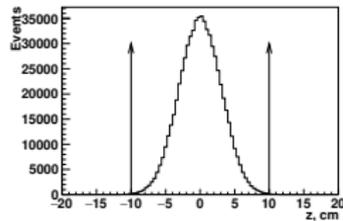
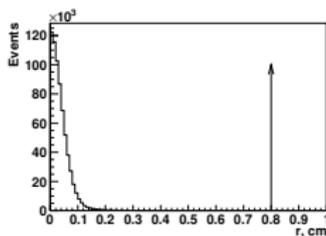
$$N_{E_\gamma < 100 \text{ MeV}}^{\text{exp}} = N^{\text{exp}} \frac{N_{E_\gamma < 100 \text{ MeV}}^{\text{MC}}}{N_{E_\gamma < 100 \text{ MeV}}^{\text{MC}} + N_{E_\gamma > 100 \text{ MeV}}^{\text{MC}}}$$

- Эффективность вычисляется для событий с $E_\gamma < 100$ МэВ
- При аппроксимации сечения энергия ISR-фотона ограничена 100 МэВ.

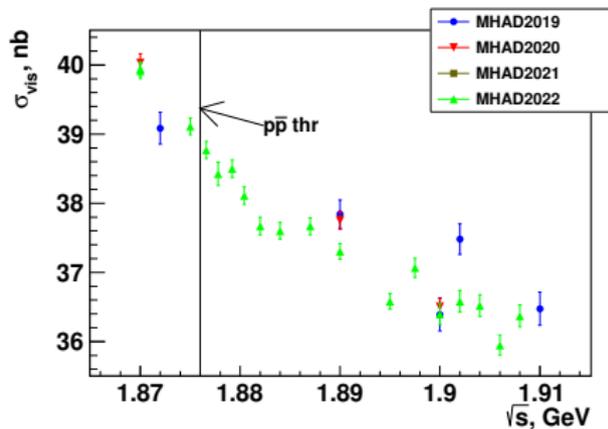
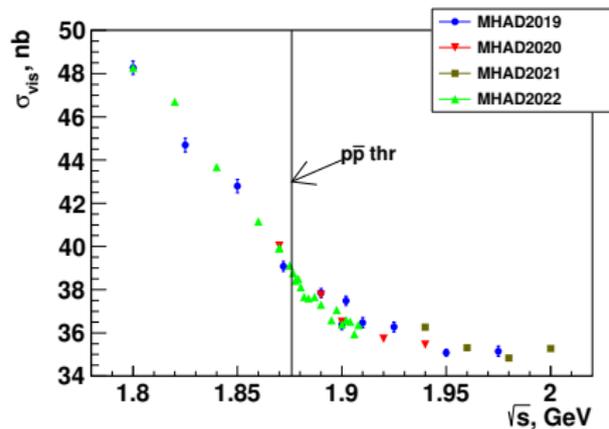
Измерение светимости

Условия отбора $bhabha$:

- $\text{trin} > 0.5$
- col
- $\text{nc} \geq 2$
- $|d0_{1,2}| < 0.8$ см, на другие треки ограничений нет
- $|Z0_{1,2}| < 10$ см,
 $|Z0_1 - Z0_2| < 2$ см
- $E_1 > 0.7E_{\text{beam}}$,
 $E_2 > 0.4E_{\text{beam}}$
- $45^\circ < (180^\circ + \theta_1 - \theta_2)/2 < 135^\circ$
- $\Delta\phi < 5^\circ$, $\Delta\theta < 20^\circ$.
- $(dE/dx)|_{\text{layer}=1} > 0$ || $(dE/dx)|_{\text{layer}=2} > 0$



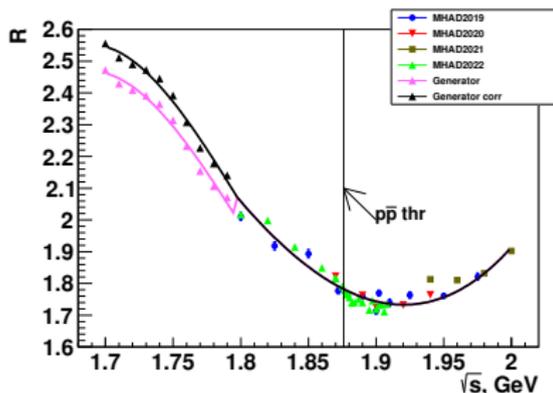
Видимое сечение



Максимальные расхождения:
2020 и 2021– 2.7% (1.94 ГэВ)

Вычисление радиационных поправок

- Требуется подгонка сечения в области 1.7–2.0 ГэВ.
- Сечение задается как $\sigma_{\mu\mu} \cdot R = R \cdot 86.8/s$, аппроксимация R производится полиномами 3 степени с гладкой стыковкой в точке 1.795 ГэВ.
- Для вычисления вклада в ISR области $\sqrt{s} = 1.7 - 1.8$ ГэВ используются эксклюзивные измерения сечения (те же, которые заложены в моделирование).
- При первоначальной подгонке функция в области ниже 1.8 ГэВ умножается на корректирующий коэффициент k_{corr} — параметр подгонки (0.967 ± 0.003).
- При окончательной подгонке сечение в этой области делится на k_{corr} , при этом фиксируется $k_{corr} = 1$.



Список моделируемых процессов

- 1 $\pi^+\pi^-\pi^0$
- 2 $\pi^+\pi^+\pi^-\pi^-$
- 3 $\pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$
- 4 $\pi^+\pi^+\pi^-\pi^-\pi^0$
- 5 $2\pi^+2\pi^-2\pi^0$
- 6 $3\pi^+3\pi^-$
- 7 K^+K^-
- 8 $K_S K_L$
- 9 $K^+K^-\pi^0$
- 10 $K_S K^+\pi^-$
- 11 $K_L K^-\pi^+$
- 12 $K^+K^-\pi^+\pi^-$
- 13 $K^+K^-\pi^0\pi^0$
- 14 $K_S K_L \pi^+\pi^-$
- 15 $K^+K_S \pi^-\pi^0$
- 16 $K^-K_L \pi^+\pi^0$
- 17 $K_S K_L \pi^0\pi^0$
- 18 $\pi^+\pi^-$
- 19 $p\bar{p}$
- 20 $n\bar{n}$
- 21 $\eta\pi^+\pi^-$
- 22 $K_S K^-\pi^+$
- 23 $K_L K^+\pi^-$
- 24 $\pi^+\pi^-3\pi^0$
- 25 $\pi^+\pi^-4\pi^0$
- 26 $K_S K_S \pi^+\pi^-$
- 27 $\pi^0\gamma$
- 28 $\eta\gamma$
- 29 ηK^+K^-
- 30 $K_S K_L \pi^0$
- 31 $\eta K_S K_L$
- 32 $\pi^0\pi^0\gamma$
- 33 $\eta\pi^0\pi^0\gamma$
- 34 $3\pi^0\gamma$
- 35 $\eta\pi^0\gamma$
- 36 $\eta\eta\gamma$
- 37 $\eta\pi^+\pi^-2\pi^0$
- 38 $\eta 2\pi^+2\pi^-$
- 39 $K^+K^-\pi^+\pi^-\pi^0$
- 40 $K^+K^-\pi^0\pi^0\pi^0$
- 41 $\eta\pi^+\pi^-\pi^0$
- 42 $K^-K_S \pi^+\pi^0$