

# Study of the $\omega \rightarrow \pi^0 e^+ e^-$ conversion decay with the CMD-3 detector at VEPP-2000 collider

Bogdan Kutsenko<sup>1,2</sup>, Vasiliy Kazanin<sup>1,2</sup>

1 Budker Institute of Nuclear Physics

2 Novosibirsk State University

Moscow International School of Physics  
30 July 2022



# Content

## 1 Introduction

- VEPP-2000
- CMD-3
- Motivation

## 2 Data Analysis

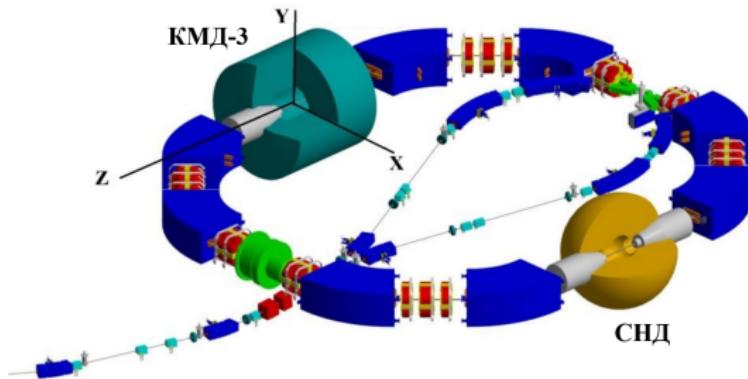
- Linear selections of  $\omega \rightarrow \pi^0 e^+ e^-$
- Neural network application

## 3 Results

- Born cross-section from VMD
- Branching  $\omega \rightarrow \pi^0 e^+ e^-$

## 4 Conclusion

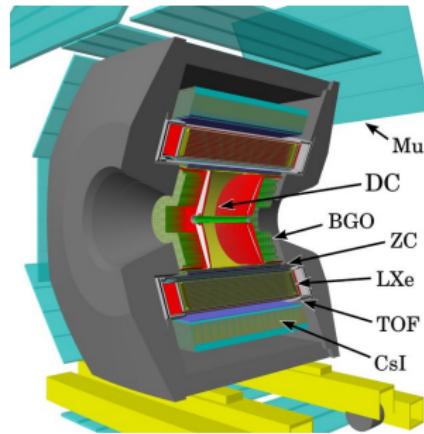
# VEPP-2000



The layout of the VEPP-2000 electron-positron collider complex

- Energy from 0.32 GeV to 2 GeV in c.m. reference frame
  - Circumference 24.39 m
  - Luminosity  $(0.6 - 0.7) \cdot 10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
  - Two experiments on the collider - CMD-3 and SND

# CMD-3



The layout of CMD-3 detector. Mu - muon system; DC - drift chamber; BGO - endcap calorimeter; ZC - Z camera; TOF - time-of-flight system; CsI, LXe - cylindrical calorimeter

- Precision measurements of hadronic cross sections and investigation of exclusive hadron annihilation channels  $e^+ e^-$  for accurate measurement of  $R(s) = \frac{\sigma(e^+ e^- \rightarrow \text{hadrons})}{\sigma(e^+ e^- \rightarrow \mu^+ \mu^-)}$ 
  - ▶  $R(s)$  is used to calculate the anomalous magnetic moment of the g-2 muon
- Study of the properties of vector mesons and their excited states

# Introduction

- The process  $e^+e^- \rightarrow (\omega, \rho) \rightarrow \pi^0 e^+ e^-$  in the decay channel  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$
- Motivation to study: accurate knowledge of decay probabilities mesons with the production of dileptons is necessary to study quark-gluon plasma, branching measurement: VMD check.
- The data from CMD-3 detector
- Integral luminosity  $\sim 10 \text{ pb}^{-1}$

Purpose of the work: Measurement of  $\omega \rightarrow \pi^0 e^+ e^-$  decay probability

# Selections

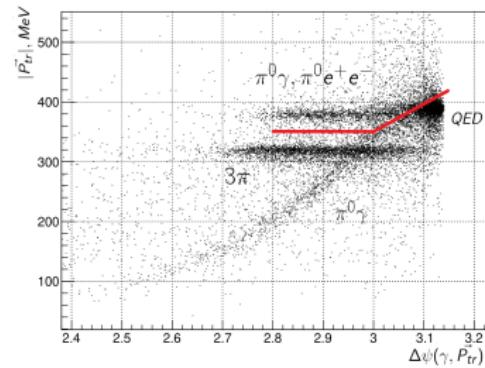
Table: Background processes

Resonant ( $\rho, \omega$ )	Nonresonant
$\pi^0 \pi^+ \pi^-$	Cosmic particles
$\pi^0 \gamma$ (Dalitz decay $\pi^0 \rightarrow \gamma e^+ e^-$ ) $\pi^0 \gamma$ (Photon conversion on matter)	QED events Particles scattered from the beam

- The minimal distance to beams  $\rho < 1$  cm
- Z vertex coordinate  $|Z_{\text{vert}}| < 8$
- Two “good” tracks (more than 10 triggered wires,  
 $P_{tr1,2} > 40 \text{ MeV}/c$ ,  $0.9 < \theta_{1,2} < -0.9$ ,  $Q_{tot} = 0$ )
- $N_\gamma \geq 2$  with energy  $40 \text{ MeV} < E_{\gamma_{1,2}} < 2 \cdot E_{beam}$   $0.5 < \theta_\gamma < \pi - 0.5$

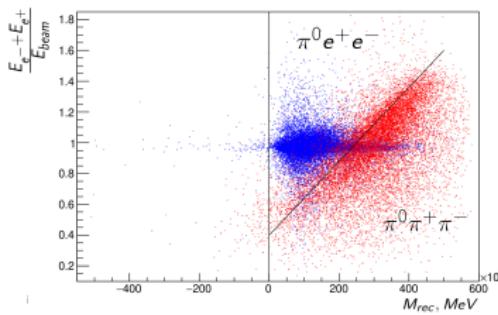
# Selections

- $M_{inv}(e^+ e^- \gamma_{max}) < 1.9 \cdot E_{beam}$
- Noncollinearity of tracks in  $R - \phi$  projections  
 $|\pi - |\phi_1 - \phi_2|| > 0.15$
- Spatial angle between average track momentum and each photon is more than 1.5 rad
- The angle between photons is less than 1.6 rad
- Spatial angle between tracks  $\Delta\psi < 1$  rad

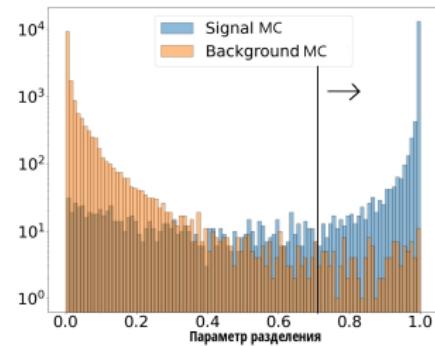


Dependence of the total momentum of charged particles  $P_{tr}$  on the angle between the mean track momentum and photon of maximum energy  $\gamma_0$

# Selections



Recoil pair mass dependence  $M_{rec}^2 = (2E_0)^2 - 4E_0 E_{\pi_0} + m_{\pi_0}^2$  on the sum of track momentum normalized to the beam energy



Distribution of the signal event separation parameter and photon conversion to  $e^+ e^-$  on the detector material in front of the detector obtained from a neural network (multilayer perceptron)

# Suppression of photon conversion events on the detector substance

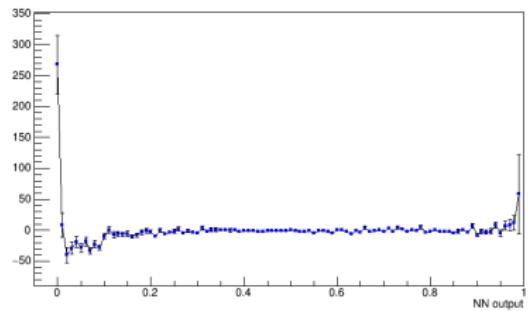
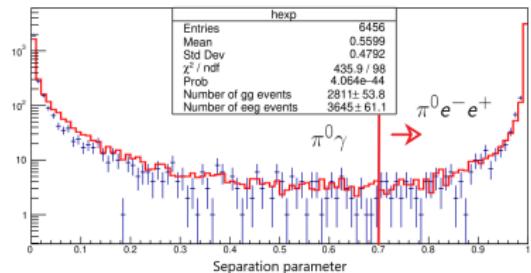
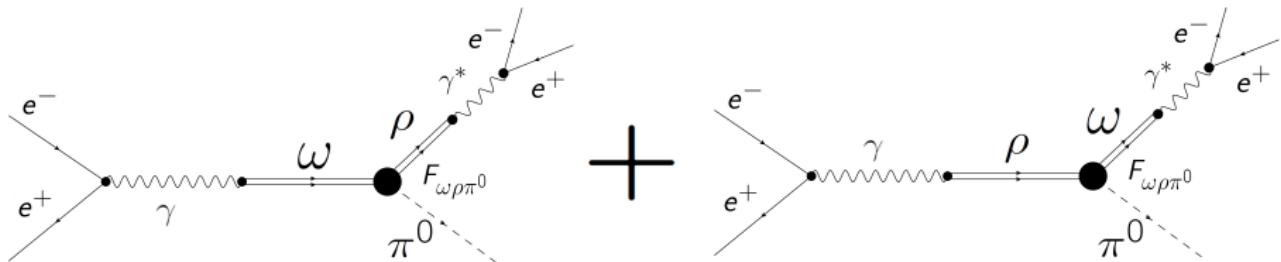


Table: The result of calculating the ratio of events  $[N_{ee\gamma}/N_{\gamma\gamma}]_{mc} / [N_{ee\gamma}/N_{\gamma\gamma}]_{exp}$  for all models and energy points

Table: The result of calculating the ratio of events  $[N_{ee\gamma}/N_{\gamma\gamma}]_{mc} / [N_{ee\gamma}/N_{\gamma\gamma}]_{exp}$  for all models and energy points

	Calculation efficiency		Systematic error
	680 MeV	750 MeV	
The MP	$0.966 \pm 0.025$	$1.020 \pm 0.017$	2.5 %
The GBDT	$0.973 \pm 0.025$	$1.031 \pm 0.016$	2.6 %
Ансамбль	$0.968 \pm 0.025$	$1.035 \pm 0.016$	2.7 %

# Born cross-section from VMD



Feynman diagrams contributing to the process  $e^+e^- \rightarrow (\omega, \rho) \rightarrow \pi^0 e^+e^-$  under study.

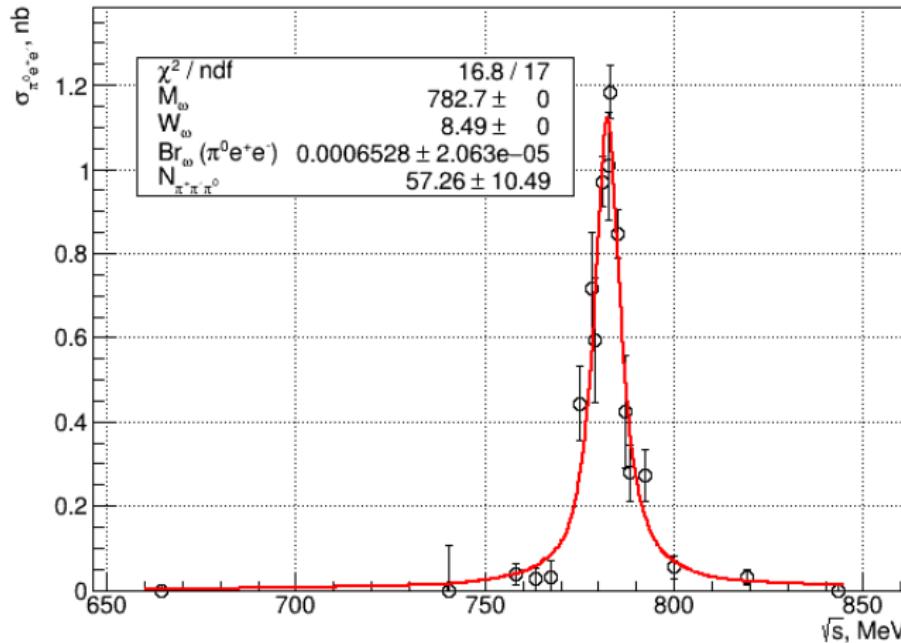
$F_{\omega\rho\pi^0}$  — transition form factor from  $\omega$  to  $\pi^0$

$$\sigma_{\pi^0 e^+ e^-} = \frac{|g_{\gamma\omega} g_{\omega\rho\pi} g_{\rho\gamma}|^2}{4s} \int_{-1}^1 d\cos(\theta_1) \int_0^{2\pi} d\phi_1 \int_0^{2\pi} d\phi_{12} \iint_{\mathcal{D}} d\omega_1 d\omega_2 |L(\vec{p}_1, \vec{p}_2, \vec{p}_3)|^2 \cdot \\ \cdot \left| \frac{1}{D_\omega(s) D_\rho(q^2)} + \frac{1}{D_\rho(s) D_\omega(q^2)} \right|^2$$

$$g_{\gamma V} = \left[ \frac{3m_V^3 \Gamma_V \text{Br}(V \rightarrow e^+ e^-)}{4\pi\alpha} \right]^{1/2}$$

$$g_{V\rho\pi} = \left[ \frac{4\pi \Gamma_V \text{Br}(V \rightarrow \rho\pi)}{W_{\rho\pi}(m_V)} \right]^{1/2}$$

$\mathcal{D}$  — Dalitz surface in the energy variables  $e^- \omega_1$  and  $e^+ \omega_2$ ,  $\theta_1$ ,  $\phi_1$  — polar and azimuthal electron angles,  $\phi_{12}$  — plane rotation angle  $(\vec{p}_1, \vec{p}_2)$ ,  $\vec{p}_1$  and  $\vec{p}_1'$  are electron and positron momenta, respectively,  $D_V(s)$  — meson propagator

Branching  $\omega \rightarrow \pi^0 e^+ e^-$ 

Approximation of the Born section  $\pi^0 e^+ e^-$  :  $\sigma_{\text{born}} = \frac{N_{\text{sig},i}}{L_i(1+\delta_i)\varepsilon_{\text{det}}\varepsilon_{\pi^0}\varepsilon_{\Delta\psi} Br(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma)}$

# Branching $\omega \rightarrow \pi^0 e^+ e^-$

Table: Main contributions to systematic error

Background subtraction	$\rho$ and $\omega$ resonance parameters	Conversion suppression	Luminosity	Form factor	$3\pi$	Close tracks	Radiation correction
3.6%	2.4%	2%	1.5%	1.2%	0.9%	0.5%	0.5%

Table: Branching of  $\omega \rightarrow \pi^0 e^+ e^-$  in various experiments

	ND	SND	CMD-2	CMD-3 (preliminary)
$\text{Br}(\omega \rightarrow \pi^0 e^+ e^-), 10^{-4}$	$5.9 \pm 1.9$	$7.61 \pm 0.53 \pm 0.64$	$8.19 \pm 0.53 \pm 0.62$	$6.53 \pm 0.21 \pm 0.34$
Integral luminosity, $pb^{-1}$	-	9.8	3.3	10

# Conclusion

- Machine learning models have **systematic uncertainties** if trained on MC but **high efficiency**;
- Linear classifications are **simpler** but require **manual feature selection**;
- The main contributions to systematic uncertainty was evaluated;
- The relative decay probability is determined:

$$Br(\omega \rightarrow \pi^0 e^+ e^-) = (6.53 \pm 0.21(\text{stat.}) \pm 0.34(\text{sys.})) \cdot 10^{-4}.$$

bdkutsenko@gmail.com

Thank you for your attention!

# Дополнительные слайды

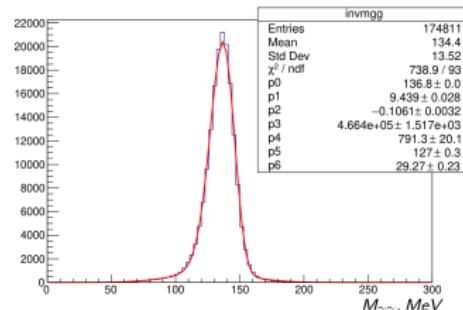
# Аппроксимация в различных моделях

Table: Результаты аппроксимации борновского сечения для четырёх различных моделей.

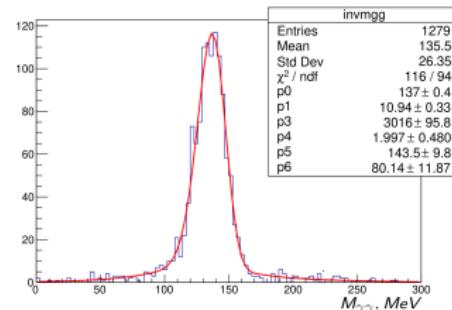
Модель	$Br(\omega), 10^{-4}$	$M_\omega, \text{ МэВ}$	$\Gamma_\omega, \text{ МэВ}$	$Re(A_0), \text{ МэВ}^{-4}$	$Im(A_0), \text{ МэВ}^{-4}$	$\chi^2/NDF$
I	$6,52 \pm 0.21$	782,65	8,49	-	-	16,8/17
II	$6,79 \pm 0.32$	$782,7 \pm 0.2$	$8,11 \pm 0.65$	-	-	16,82/15
III	$7,19 \pm 0.95$	782,65	8,49	$(-1,0 \pm 2,8) \cdot 10^{-6}$	$(-5,7 \pm 10,5) \cdot 10^{-6}$	16,85/15
IV	$7,2 \pm 1,2$	$782,7 \pm 0,25$	$8,19 \pm 0,64$	$(-7,7 \pm 37,6) \cdot 10^{-7}$	$(-5,4 \pm 12,8) \cdot 10^{-6}$	16,64/13

# Подсчёт сигнальных и фоновых событий

- Из МС находится форма сигнального спектра  $M_{\gamma\gamma}$
- Вся статистика описывается суммой сигнального спектра и фона.
- Для определения количества сигнальных событий в каждой точке по энергии спектр инвариантной массы аппроксимируется найденной формой сигнала и фона

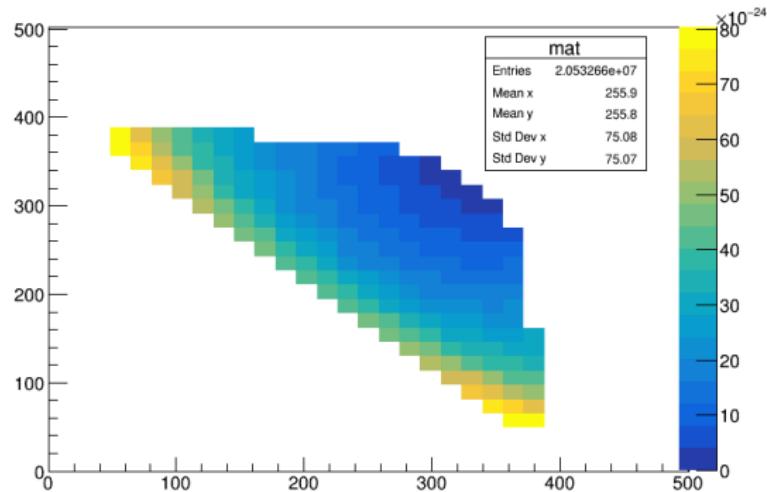


Инвариантная масса двух гамма квантов в моделировании



Инвариантная масса двух гамма квантов в эксперименте по всей статистике

# Поверхность Далица



Поверхность Далитца

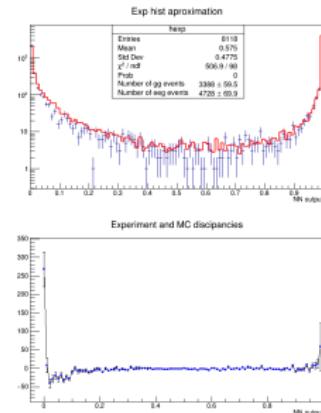
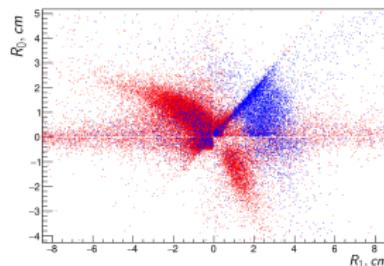
# Отборы событий КЭД

Для отбора событий процессов КЭД  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\gamma$  и  $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$  применялись следующие критерии:

- $N_\gamma \geq 1$  с энергией  $0,5 \cdot E_{beam} < E_{\gamma_{Emax}} < 1,5 \cdot E_{beam}$ , для остальных фотонов  $E_\gamma < 40$  МэВ;
- Прицельный параметр треков  $\rho < 1$  см;
- Z координата вершины  $|Z_{vert}| < 8$ ;
- Два “хороших” трека (более 10 сработавших проволочек,  $P_{tr_{1,2}} > 40$  МэВ/с,  $0,9 < \theta_{1,2} < \pi - 0,9$ ,  $Q_{tot} = 0$ );
- Суммарный заряд 0;
- Угол между треками  $\Delta\psi < 1$  радиан;
- $0,5 < \theta_{Emax} < \pi - 0,5$ ;
- $\chi^2$  восстановленной вершины треков  $< 9$ ;
- Расколлинеарность треков в  $R - \phi$  проекции  $|\pi - |\phi_1 - \phi_2|| > 0.15$ ;
- Пространственный угол между средним импульсом треков и фотоном более 2 радиан;
- Суммарный импульс  $E_{beam} - 20$  МэВ/с  $< P_{tot}c < E_{beam} + 25$  МэВ/с.

# Разделение внутренней конверсии и конверсии на веществе детектора

- Статистическое вычитание как на КМД-2 приводит к большой статистической ошибке (в 3 раза больше вещества перед детектором)
- Используется многослойный перцептрон, на вход которой подаётся 10 параметров события. На выходе критерий разделения - число от 0 до 1.



Аппроксимация критерия разделения ( $\sqrt{s} = 680 \text{ MeV}$ , верхняя гистограмма). Отклонение эксперимента от МС показано на нижнем графике

# Input model parameters

- ❶ Параметр  $\chi^2$  из МПОВ;
- ❷ Пространственный угол между  $e^+e^-$  до МПОВ;
- ❸ Пространственный угол между  $e^+e^-$  после МПОВ;
- ❹ Расстояние от пучка до реконструированной вершины;
- ❺ Расстояние от пучка до вершины рассчитанной геометрически;
- ❻ Инвариантная масса  $e^+e^-$ ;
- ❼ Полярный угол полного импульса  $e^+e^-$ ;
- ❼ Азимутальный угол полного импульса  $e^+e^-$ ;
- ❽ Полный импульс  $e^+e^-$ , нормированный на энергию пучка;
- ❾ Поперечный импульс  $e^+$ , нормированный на энергию пучка;
- ❿ Поперечный импульс  $e^-$ , нормированный на энергию пучка.

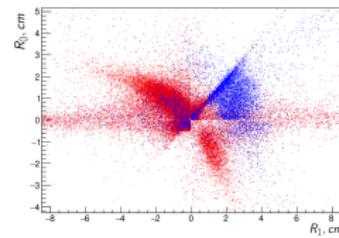
# Разделение внутренней конверсии и конверсии на веществе детектора - систематика

The difference between the calculated and measured number of events

$R_k = \frac{[N_{ee\gamma}/N_{\gamma\gamma}]_{mc,k}}{[N_{ee\gamma}/N_{\gamma\gamma}]_{exp,k}}$  was averaged over two energy points with statistical uncertainties as weights  $\bar{R} = \frac{R_1 \cdot 1/\sigma_{R_1}^2 + R_2 \cdot 1/\sigma_{R_2}^2}{1/\sigma_{R_1}^2 + 1/\sigma_{R_2}^2}$ . The value

of  $\bar{R}$  can be used to fix simulation of photon conversion to  $e^+e^-$  on the material in front of the detector. The uncertainty of  $\bar{R}$  was corrected by a scale factor

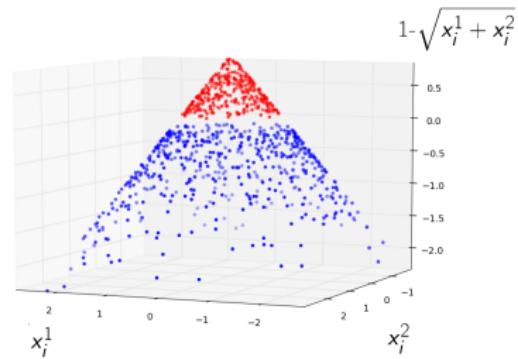
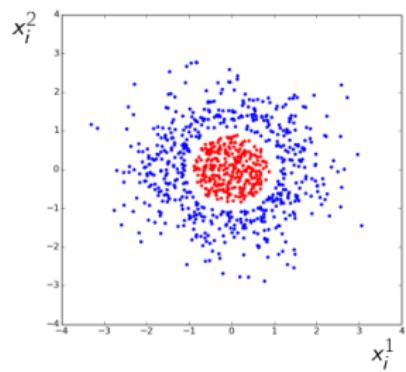
$S_R^2 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^2 \frac{(R_k - \bar{R})^2}{\sigma_{R_k}^2 - \sigma_{\bar{R}}^2}$  and used as a systematic uncertainty of machine learning model application to event selection



Расстояние от вершины до пучка в  $R - \phi$  плоскости.  $R_0$  – найденная вершина;  $R_1$  – пересчитанная из окружностей.  
Знак определяется расположением вершины относительно направления среднего импульса  $e^+e^-$

# Supervision learning

- Each event  $x_i$  from the detector is characterized by the data set  $x_i = x_i^1, x_i^2, x_i^3 \dots$  is necessary to find to which decay (class)  $y_i$  this event belongs
- From the Monte Carlo simulation there is a data set (teacher) -  $D\{(x_i, y_i), i = 1, 2.., N\}$

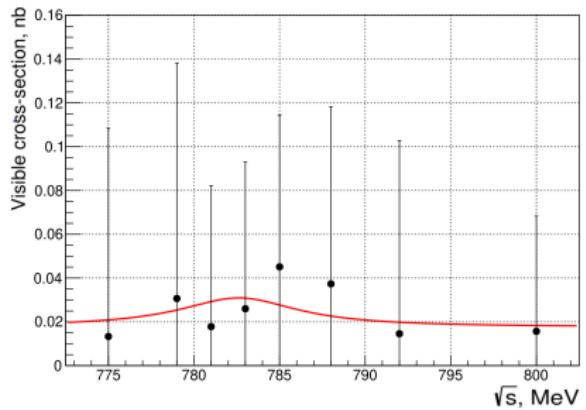


By transforming the initial data set, it is often possible to reduce the problem to a linear one

# Разделение сигнальных и фоновых событий

- Проверяем, что фоновые события не содержат резонансного пика

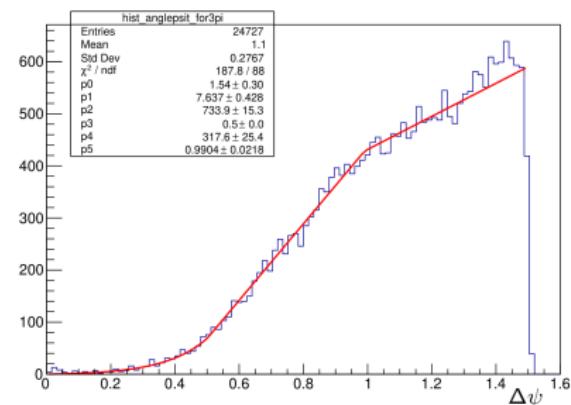
$$\sigma_{vis}^{bg} = \frac{N_i^{bg}}{L_i \cdot \epsilon_{det}}$$



Зависимость видимого сечения фоновых событий, аппроксимируемая резонансной кривой

# Учёт вклада событий $3\pi$

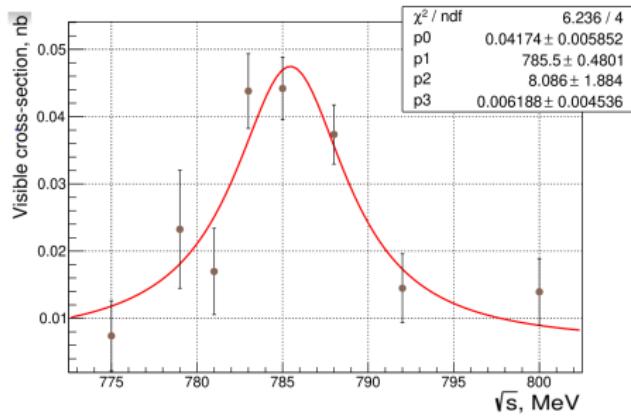
- Определилась форма зависимости  $3\pi$  для событий  $3\pi$ , для этого модифицировали отборы событий – увеличили количество событий  $3\pi$  (отборы «7»,  $M_{rec}(\gamma\gamma)$ , E/P)
- Изменили отбор сигнальных событий:  $0.4 < \Delta\psi < 1.2$



Форма зависимости  $\Delta\psi$  для событий  $3\pi$

# Учёт вклада событий $3\pi$

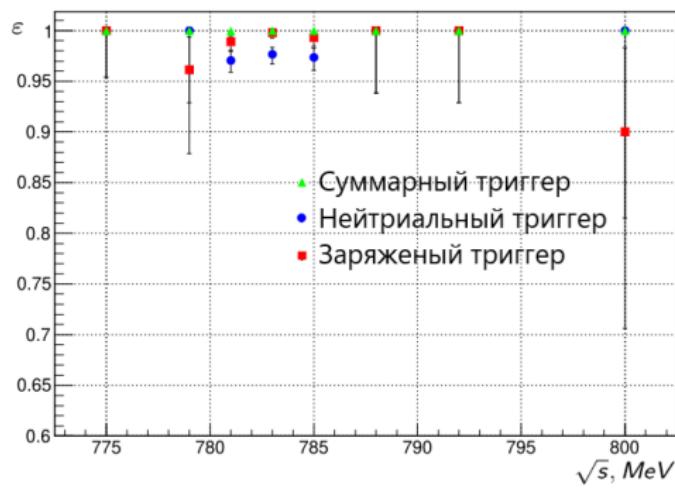
- Резонансные события состоят из сигнальных событий и событий  $3\pi$ , их всего  $228 \pm 15$
- Вклад событий  $\pi^0 e^+ e^-$  оценивали из МС:  $N_{\pi^0 e^+ e^-} = 80 \pm 9$
- Оставшиеся события  $3\pi$  пересчитаны в области углов  $\Delta\psi < 1.0$ :  $N_{3\pi} = 88 \pm 17$
- Используя эффективность отборов  $3\pi$  нейронной сетью получаем итоговое число событий  $N_{3\pi} = 55 \pm 13$



Борновское сечение  $\sigma_{3\pi} = \frac{N_i^{bg}}{L_i \varepsilon_{det}}$ . События прошли отбор  $0.4 < \Delta\psi < 1.2$

# Эффективности

- Эффективности тригера рассчитаны из предположения о их независимости
- Эффективность восстановления  $\pi^0$  рассчитана из эффективности восстановления фотонов. Эффективность, в зависимости от энергии изменяется от  $0.989 \pm 0.006$  до  $1.007 \pm 0.006$ .
- Эффективности детектирования в зависимости от энергии 0.212 - 0.227



Эффективность тригера

# Эффективность восстановления близких треков

Ищем зависимость потери одного трека от его поперечного импульса в событиях  $\omega \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$ , в которых  $\pi^0$  распадается в  $e^+ e^- \gamma$

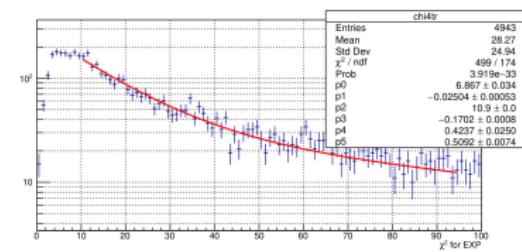
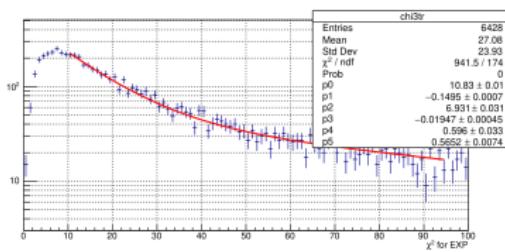
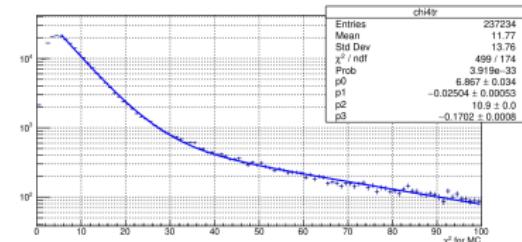
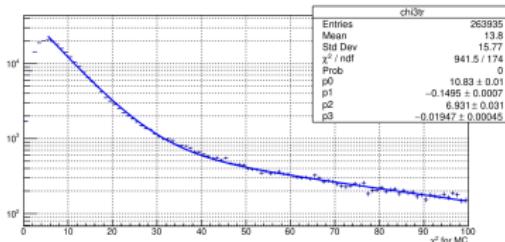
Критерии отбора:

- 3 или 4 трека, суммарный заряд 1 или 0 соответственно, 1 и больше фотонов, прицельный параметр треков  $\rho < 1$  см
- Z координата вершины  $|Z_{\text{vert}}| < 8$
- Импульс трека  $P_{tr} < E_{beam}$
- Полярный угол трека  $0.9 < \theta_{1,2} < \pi - 0.9$
- После процедуры кинематической реконструкции в моделировании  $\chi^2 < 100$ , в эксперименте для 4 треков -  $\chi^2 < 40$ , для трёх треков -  $\chi^2 < 70$

Для определения пионной пары, в отобранных событиях использовался параметр недостающей массы заряженных частиц

# Эффективность восстановления близких треков

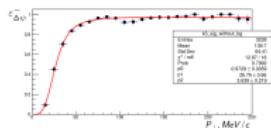
Соответствие шкал находилось из совместной аппроксимации распределений  $\chi^2$  событий моделирования и эксперимента функциями вида:  $dN/d\chi^2 = \exp(P1 + P2 \cdot \chi^2) + \exp(P3 + P4 \cdot \chi^2)$



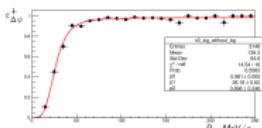
Распределение  $\chi^2$  для событий с 3 треками для данных моделирования и эксперимента

Распределение  $\chi^2$  для событий с 4 треками для данных моделирования и эксперимента

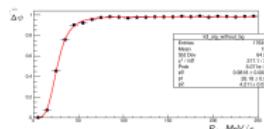
## Эффективность восстановления близких треков



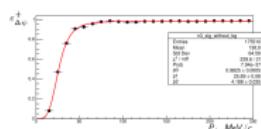
(а) Эксперимент  
электрон



(б) Эксперимент  
позитрон



### (c) Моделирование электрон



(d) Моделирование  
позитрон

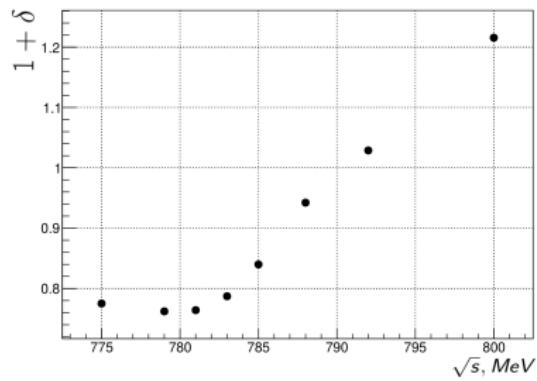
Эффективность реконструкции  $e^-$ -трека от его поперечного импульса аппроксимируется -

$$\varepsilon_{\Delta\psi}^{\pm} = \frac{A}{1+(P/P_{\perp}^{\pm})^{\alpha}}$$

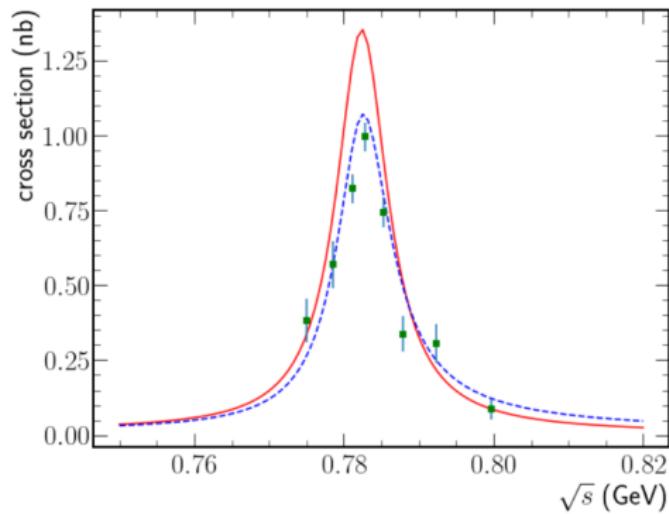
$$\text{Итоговая эффективность } \varepsilon_{\Delta\psi} = \\ \int \frac{\varepsilon_{\Delta\psi, \exp}^-(P_\perp^-)}{\varepsilon_{\Delta\psi, \text{sim}}(P_\perp^+)} \frac{\varepsilon_{\Delta\psi, \exp}^+(P_\perp^+)}{\varepsilon_{\Delta\psi, \text{sim}}(P_\perp^-)} f(P_\perp^-) f(P_\perp^+) dP_\perp^- dP_\perp^+$$

$$\varepsilon_{\Delta\psi} = 0.986 \pm 0.010 \text{ (стат.)} \pm 0.006 \text{ (сист.)}$$

# Радпоправка



Итерационный метод определения  
радпоправок к изучаемому процессу



Аппроксимация экспериментальных  
точек интегралом Кураева-Фадина  

$$\int_0^{1-sT/s} F(x, s) \varepsilon(x, S) \sigma_{Born}(s(1-x)) dx$$