

Изучение процесса  $e^+e^- \rightarrow K_S K_L \pi^0$  до 2 ГэВ с  
детектором КМД-3 на коллайдере ВЭПП-20000

А. Семенов<sup>1</sup>, Б. Шварц<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ИЯФ СО РАН, Новосибирск

Сессия-конференция СЯФ ОФН РАН  
2026

## Цель работы

Цель работы — изучение процесса  $e^+ e^- \rightarrow K_S K_L \pi^0$  в области  $E_{c.m.}$  от порога рождения 1130 МэВ до 2 ГэВ. Данное исследование основано на интегральной светимости  $188.6 \text{ pb}^{-1}$ .

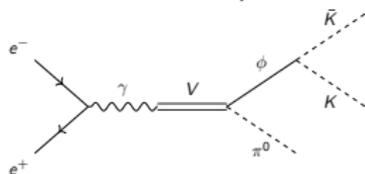
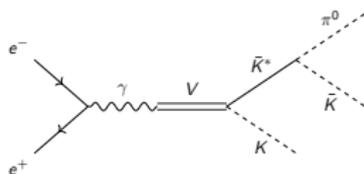
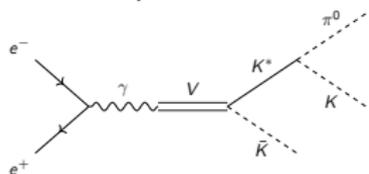
### Мотивация:

- Изучение взаимодействия лёгких кварков
- Конечные состояния с двумя каонами и пионом имеют 12% вклад в адронное сечение при энергии 1650 МэВ., и как следствие вклад в аномальный магнитный момент мюона  $(g - 2)_\mu$
- Сравнение спектров распада  $\tau$ -лептона с изовекторной частью процесса.
- Изучение динамики рождения процесса (МВД).
- Проверка изотопического соотношения совместно с процессами  $K^+ K^- \pi^0$ ,  $K^* K$  ( $K_S K^\pm \pi^\mp$ ).

О процессе  $e^+ e^- \rightarrow K_S K_L \pi^0$ 

$$M \propto \frac{J_\mu \cdot [\vec{P}_1 \times \vec{P}_2]^\mu}{D_\gamma(s)}$$

$$\left( \sum_{V=\phi, \omega, \rho, \dots, l=0,1} \frac{A_V e^{i\alpha_V}}{D_V(s) \cdot D_{K^*}(Q_{K\pi^0})} + \sum_{V=\rho, \dots, l=1} \frac{B_V e^{i\beta_V}}{D_V(s) \cdot D_\phi(Q_{K\bar{K}})} \right)$$



$$\begin{aligned} |1, 0\rangle &= |\uparrow\rangle_{K^*} |\downarrow\rangle_K + |\downarrow\rangle_{K^*} |\uparrow\rangle_K \\ |0, 0\rangle &= |\uparrow\rangle_{K^*} |\downarrow\rangle_K - |\downarrow\rangle_{K^*} |\uparrow\rangle_K \end{aligned}$$

$$|1, 0\rangle = |0, 0\rangle_\phi |1, 0\rangle_\pi$$

Подавлено правилом OZI

$$V = \phi(1020), \phi(1680), \rho(770), \rho(1450), \dots$$

Изотопическое соотношение:

$$M_{K_S K_L \pi^0} = T_{1b} - \frac{1}{\sqrt{3}} T_0; \quad M_{K^+ K^- \pi^0} = T_{1b} + \frac{1}{\sqrt{3}} T_0;$$

$$M_{K^\pm K^0 \pi^\mp} = \pm T_{1a} + \sqrt{\frac{2}{3}} T_0;$$

$$\sigma_{K_S K_L \pi^0} = \sigma_{K_S K^\pm \pi^\mp} - \sigma_{K^+ K^- \pi^0} + Br(\phi \rightarrow K \bar{K}) \cdot \sigma_{\phi \pi^0}$$

Анализ  $e^+ e^- \rightarrow K_S K_L \pi^0$  с КМД-3

Процесс изучается в каналах:

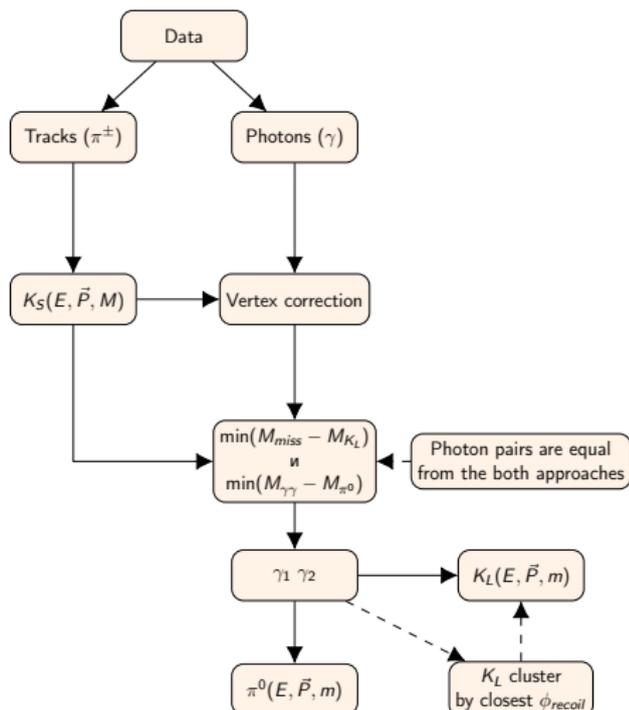
$$K_S \rightarrow \pi^+ \pi^- \text{ и } \pi^0 \rightarrow \gamma \gamma$$

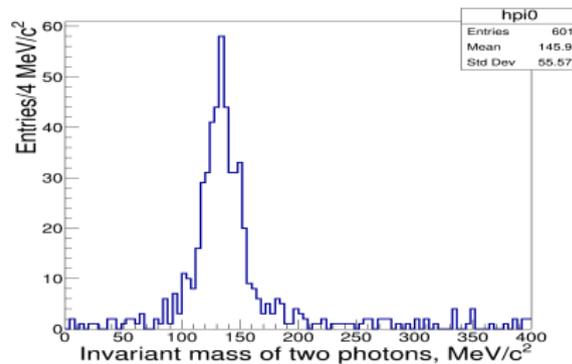
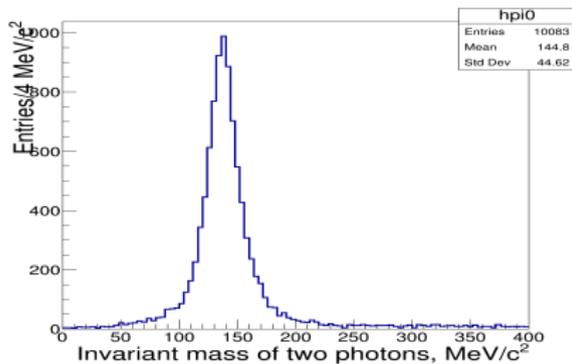
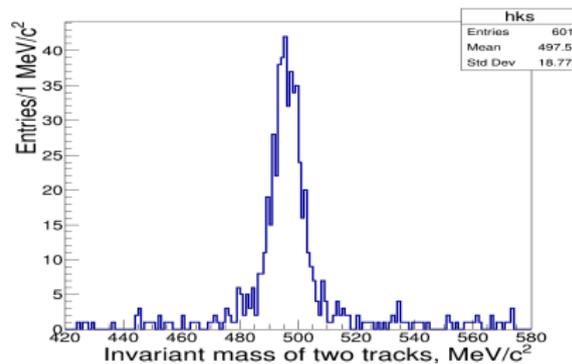
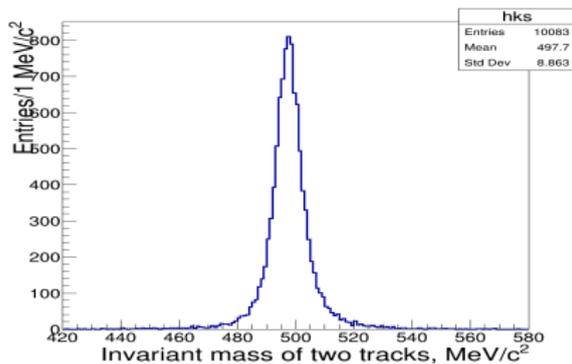
$$\sigma_B = \frac{N_{selected} - N_{background}}{\varepsilon_{rec} \cdot \varepsilon_{trigger} \cdot L \cdot (1 + \delta_{rad})}$$

- Получить число событий сигнала
- Подавить и вычесть фоновые события
- Получить эффективность
- Получить радиационную поправку
- Оценить систематические погрешности

Критерии отбора:

|     |  |
|-----|--|
| 1.  | $N_{tr} = 2$ ( $\rho_{tr} < 6$ cm)                         |
| 2.  | $N_{K_S} = 1$  |
| 3.  | $\xi_{\pm} < 1.6$ ( $dE/dx$ )                              |
| 4.  | $N_{trhit} > 10$<br>( $\theta_{tr} \in (0.8; \pi - 0.8)$ ) |
| 5.  | $\cos XY_{K_S} > 0.8$                                      |
| 6.  | $\rho \perp K_S > 0.1$ cm                                  |
| 7.  | $P_{K_S} < \sqrt{E_{beam}^2 - M_K^2} - 50$ MeV             |
| 8.  | $N_{ph} > 1$   |
| 9.  | $E_{phlx, bgo} > 15$ MeV                                   |
| 10. | $E_{\gamma} < 2 \cdot E_{beam} - 2 \cdot M_K$              |



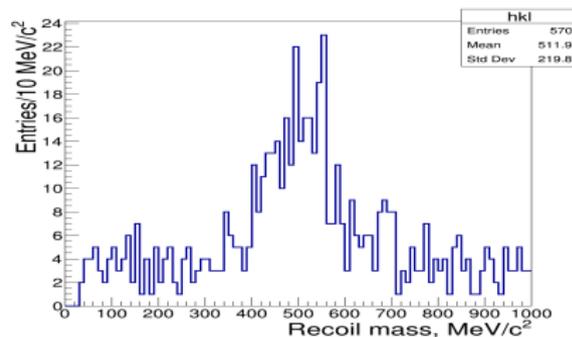
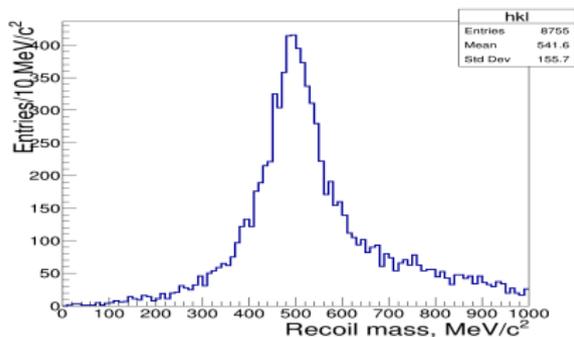
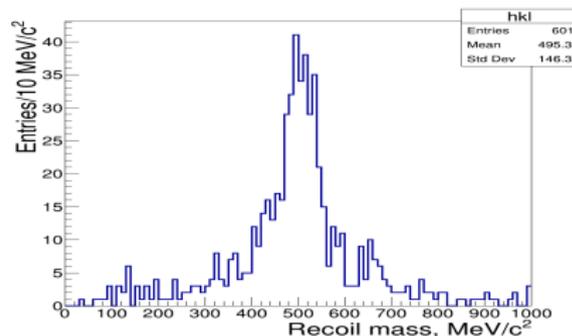
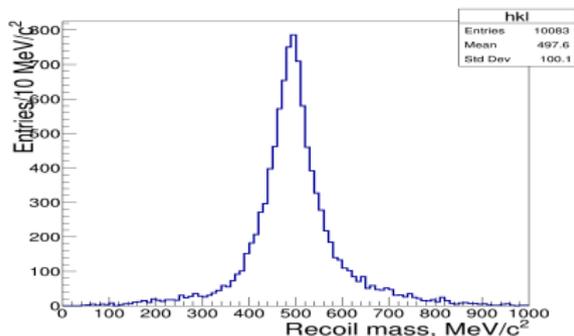
Реконструкция инвариатных масс  $E_{c.m.} = 1675 \text{ MeV}$ 

Моделирование

Эксперимент

# Масса отдачи (1675 MeV и 1950 MeV)

$$2E_{beam} = E_{K_S} + E_{K_L} + E_{\gamma_1} + E_{\gamma_2}; \quad 0 = \vec{P}_{K_S} + \vec{P}_{K_L} + \vec{P}_{\gamma_1} + \vec{P}_{\gamma_2}$$

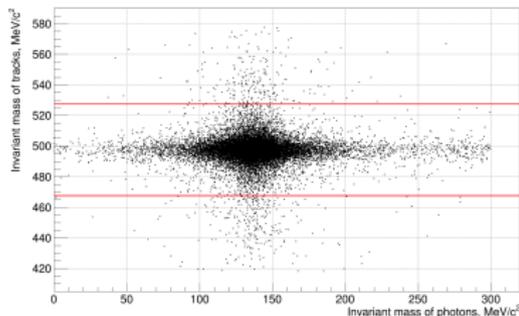


Моделирование

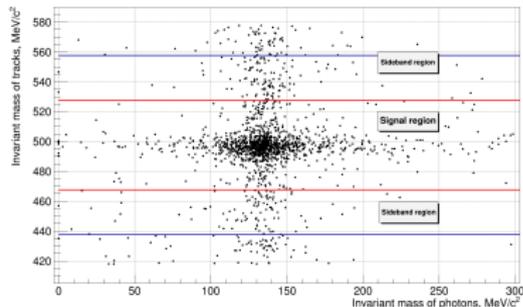
Эксперимент

# Определение числа событий

Число событий определяется как число  $\pi^0$  из небинированной подгонки инвариантной массы фотонов совместного распределения сигнальной и боковой областей с соответствующими весами (+1 и -1) с пакетом RooFit.



Моделирование



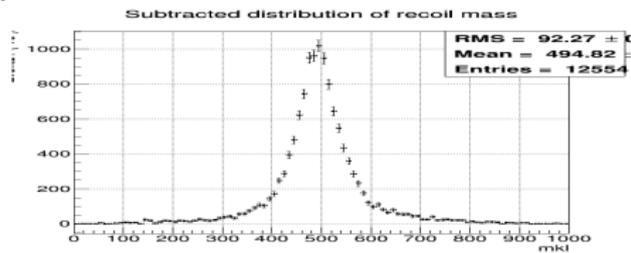
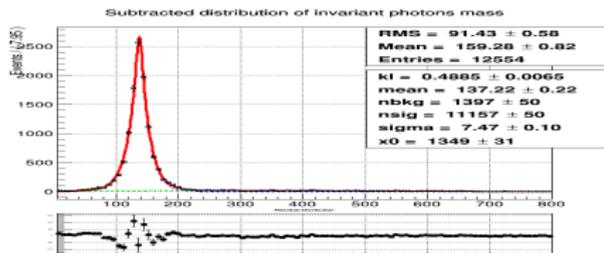
Эксперимент

- С помощью вычитания подавляются процессы без  $K_S$ -мезона (предполагается равномерное распределение инв. массы фона)
- С помощью подгонки определяется число событий с  $\pi^0$ -мезоном

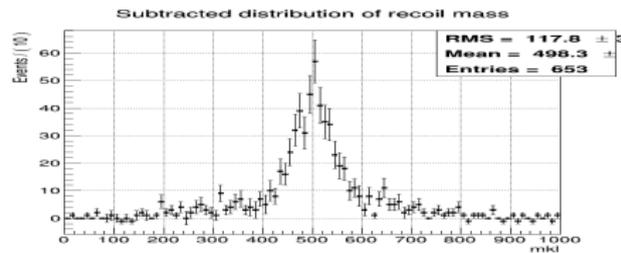
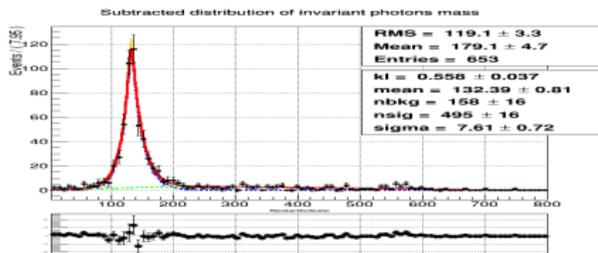
\*Ширина областей  $\pm 30 \text{ MeV}$

# Число событий $E_{c.m.} = 1650 \text{ MeV}$

## Моделирование



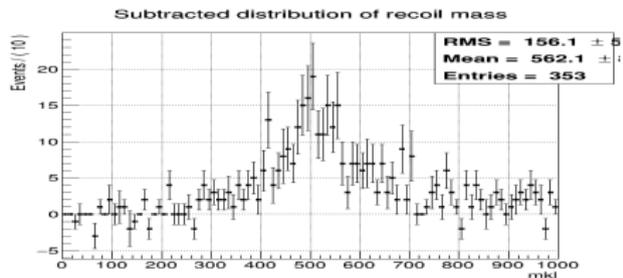
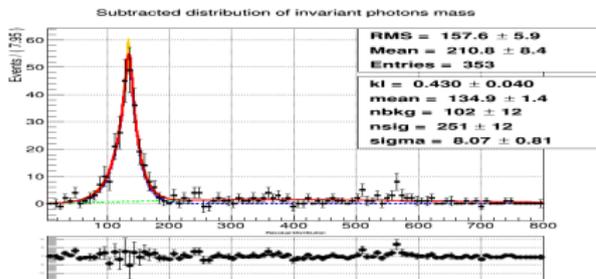
## Эксперимент



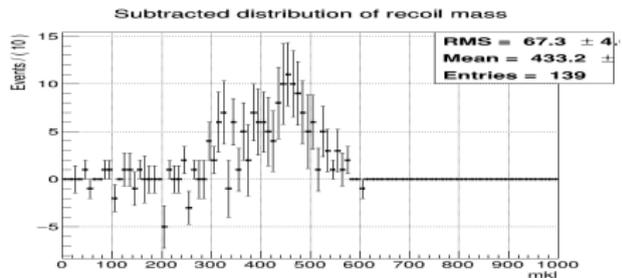
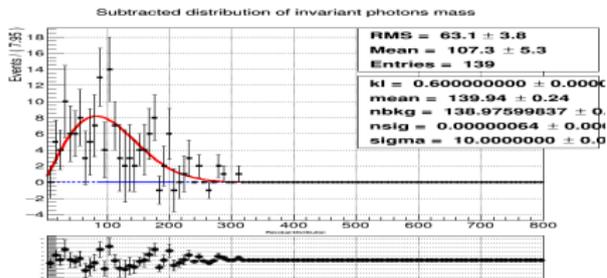
$$S(x; x_0, \sigma, k) = \begin{cases} \exp\left(-\frac{v^2}{2} + k \cdot \left(v + \frac{x-x_0}{\sigma}\right)\right), & \frac{x-x_0}{\sigma} \leq -v \\ \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}\right), & \left|\frac{x-x_0}{\sigma}\right| < v, v = \frac{1}{2} \\ \exp\left(-\frac{v^2}{2} + (1-k) \cdot \left(v - \frac{x-x_0}{\sigma}\right)\right), & \frac{x-x_0}{\sigma} \geq v \end{cases}$$

# Число событий

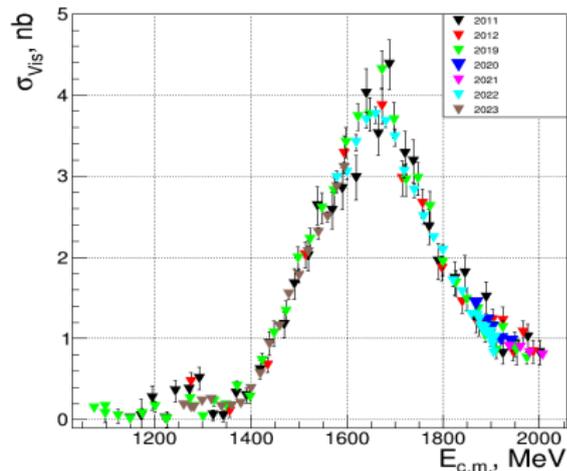
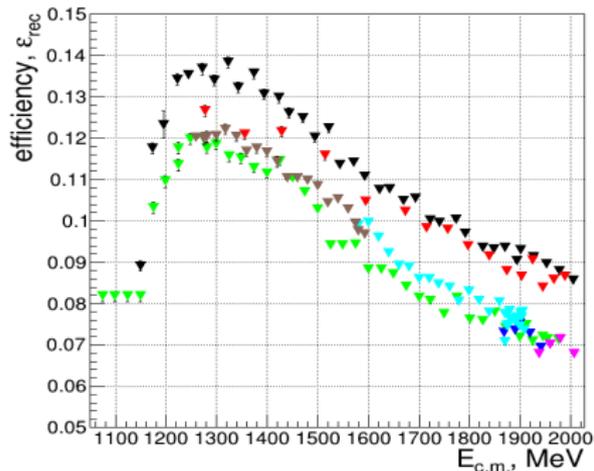
## Эксперимент, 1950 MeV



## Эксперимент, 1150 MeV



$$B(m; m_0, c, p) = m \cdot \left[1 - \left(\frac{m}{m_0}\right)^2\right]^p \cdot \exp\left[c \cdot \left(1 - \left(\frac{m}{m_0}\right)^2\right)\right]$$

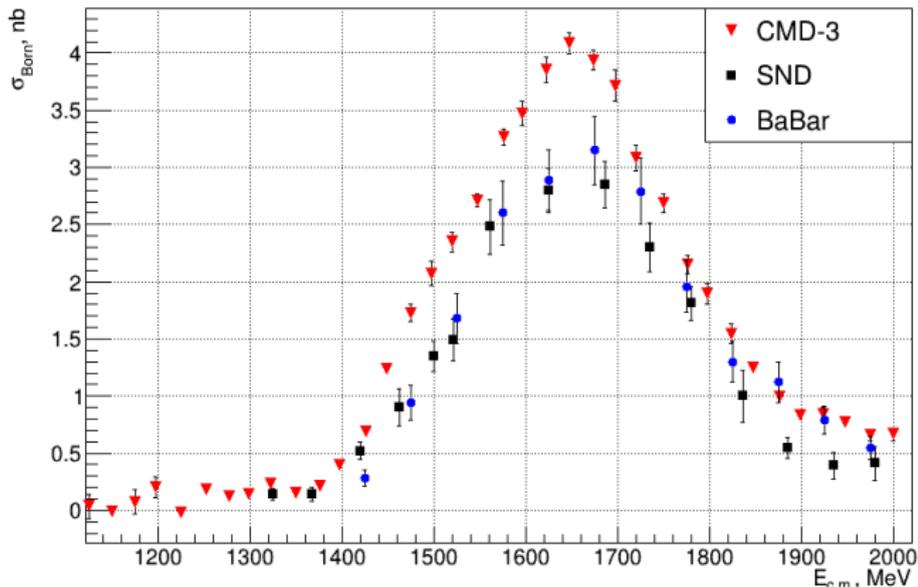
Сечение  $e^+ e^- \rightarrow K_S K_L \pi^0$ 

Специфика:

- Исключён 2017 сезон
- Моделирование с состоянием детектора
- $K_S K_L \pi^0 \pi^0$  — неисключаемый фон,  $\epsilon(K_S K_L \pi^0 \pi^0) \approx 3\%$ , вклад в систематику  $\approx 6\%$

# Борновское сечение $e^+ e^- \rightarrow K_S K_L \pi^0$

Суммарное число событий — 78843.3. Предварительный результат:



Точки усреднены с шагом 25 MeV для лучшего сравнения.  
Систематическая погрешность составляет 8.3%.

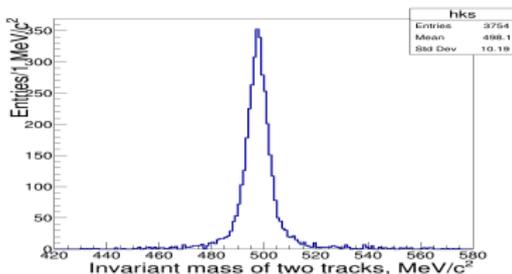
## Фоновые процессы

Основано на моделирование  
генератором MHG2000.

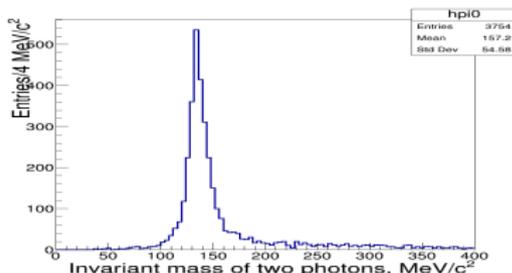
- $e^+e^- \rightarrow K_S K_L (\gamma)$
- $e^+e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0 \pi^0$
- $e^+e^- \rightarrow K_S K_L \pi^0 \pi^0$

Распределения для процесса  $e^+e^- \rightarrow K_S K_L \pi^0 \pi^0$   
(главный вклад в сист. погрешность).

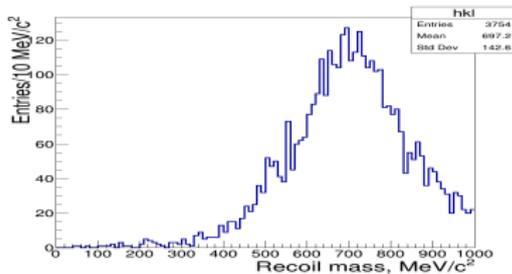
Инвариантная масса треков



Инвариантная масса фотонов

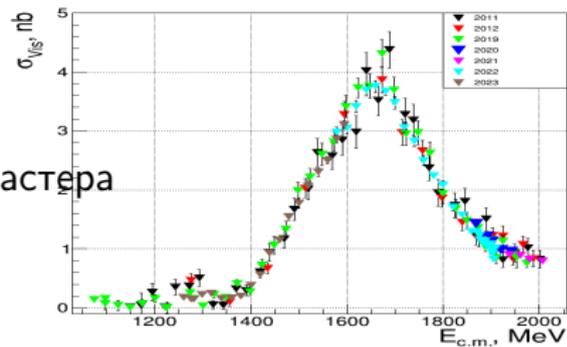
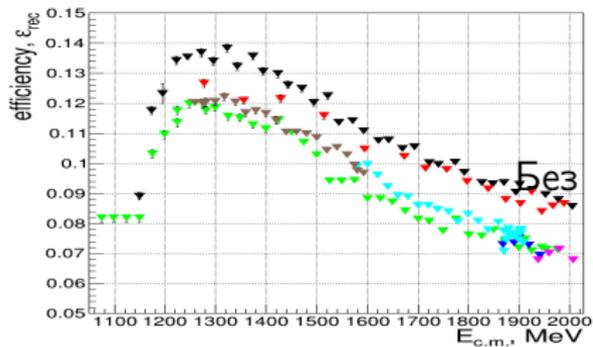
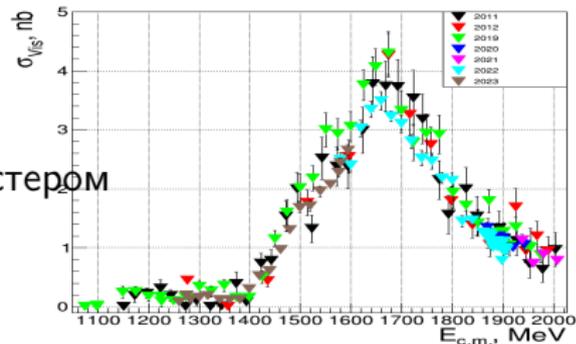
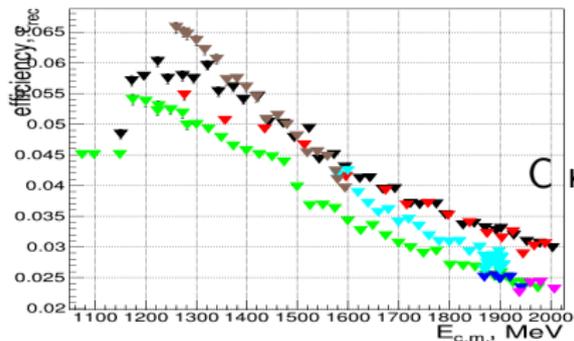


Масса отдачи



## Проверка

Сделаем анализ с детектированием кластера от  $K_I$ .



# Заклучение

## Результаты:

- Получено предварительное сечение процесса  $e^+e^- \rightarrow K_S K_L \pi^0$
- Систематическая погрешность составляет 6% ниже 1.8 ГэВ и 8% выше 1.8 ГэВ)

## Планы:

- Закончить анализ вторым подходом (с детектированием  $K_L$ ).
- Подавить фоновый процесс  $e^+e^- \rightarrow K_S K_L \pi^0 \pi^0$
- Одновременный фит сечений процессов  $K^+ K^- \pi^0$ ,  $K^* K$  ( $K_S K^\pm \pi^\mp$ )
- Наблюдение процессов  $K_S K_L \eta$ ,  $K_S K_L \pi^0 \pi^0$

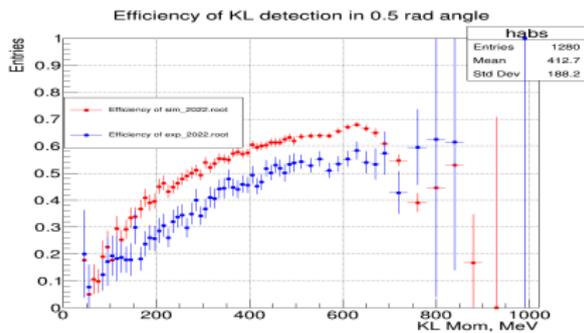
## Систематика

| Criteria                                  | $\delta\sigma, \%$ |
|---|--------------------|
| $\xi(dE/dx)$                              | 3.5                |
| $N_{trhit}$                               | 0.3                |
| $\rho_{\perp K_S}$                        | 1.1                |
| $\cos(\vec{r}_{K_S}, \vec{P}_{K_S})_{XY}$ | 0.5                |
| $E_{\gamma}$                              | 0.1                |
| $\Sigma$                                  | 3.7                |

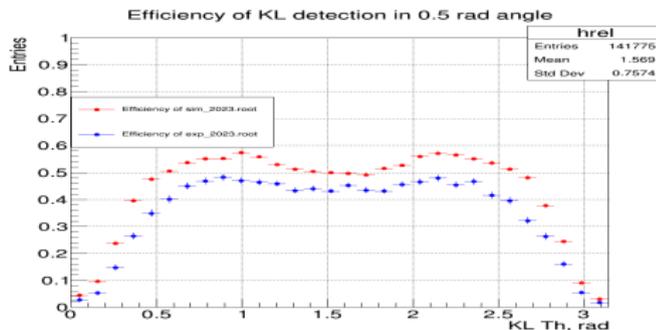
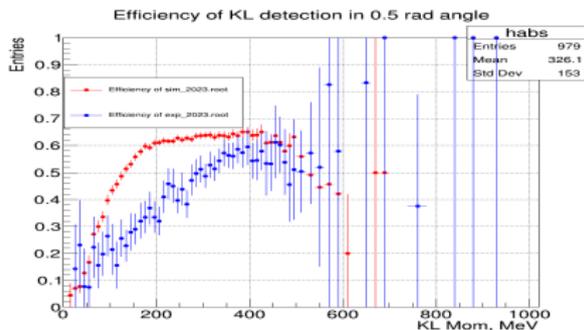
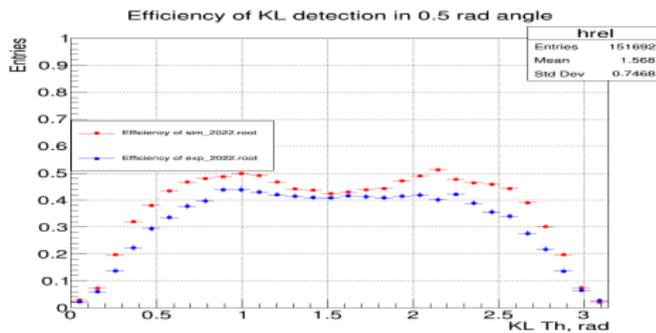
|                                       |      |
|---------------------------------------|------|
| Selection criteria                    | 3.7% |
| Determination of event numbers        | 4%   |
| Contribution of $K_S K_L \pi^0 \pi^0$ | 6%   |
| Registration of charged pions         | 1%   |
| Registration of photons               | 1%   |
| Radiation corrections                 | 1%   |
| Luminosity                            | 1%   |
| $\Sigma$                              | 8.3% |

# Регистрация $K_L$

Эффективность регистрации  $K_L$   
от импульса

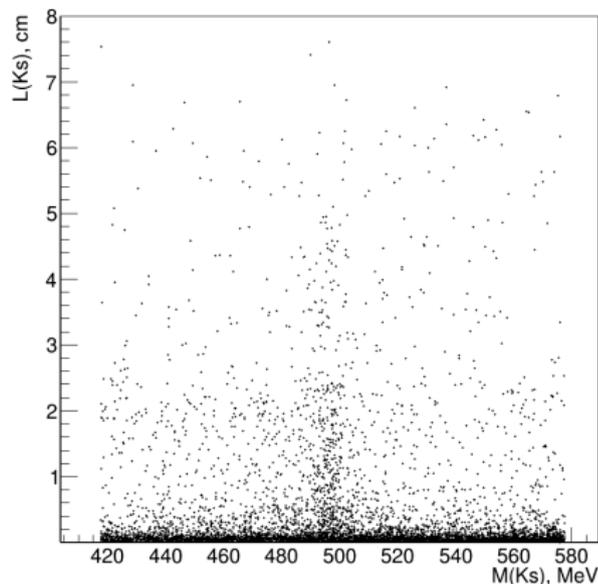
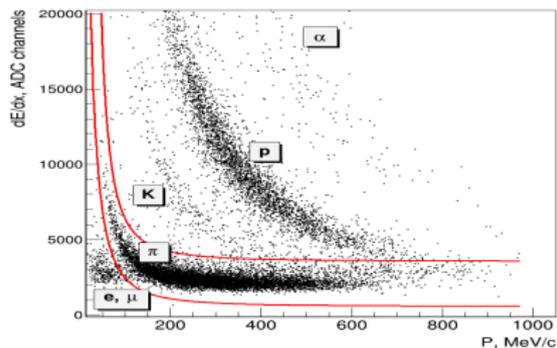
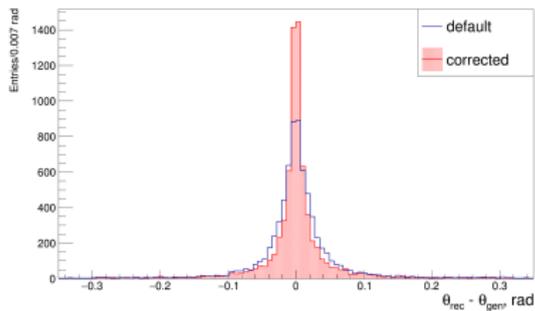


Эффективность регистрации  $K_L$   
от угла



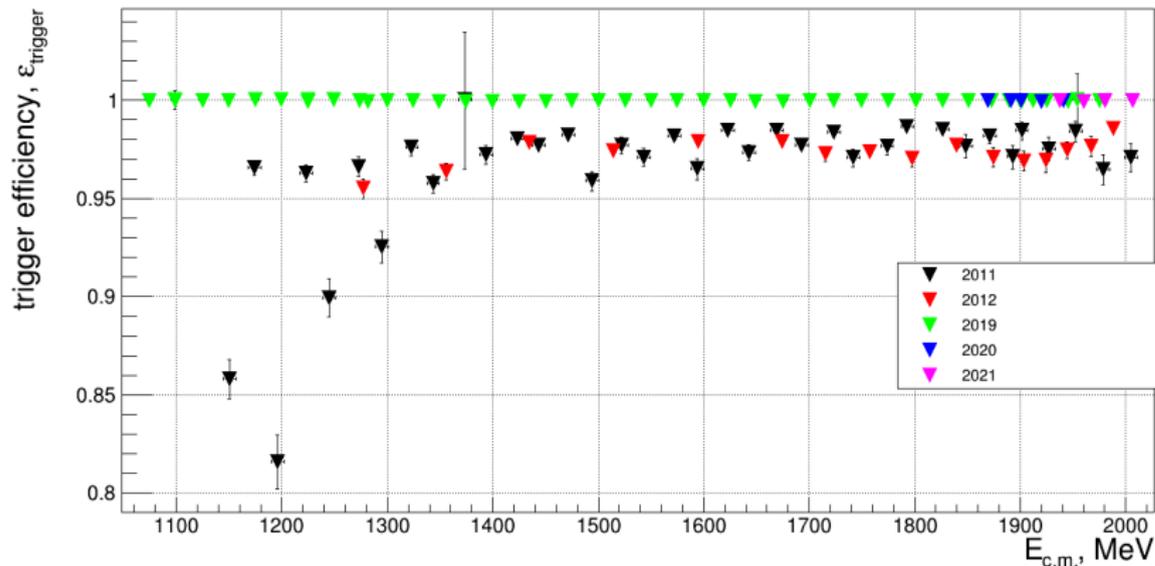
# Критерии отбора

## Поправка углов фотонов



Эксперимент при  $E_{c.m.} = 1680$  MeV

# Эффективность триггера

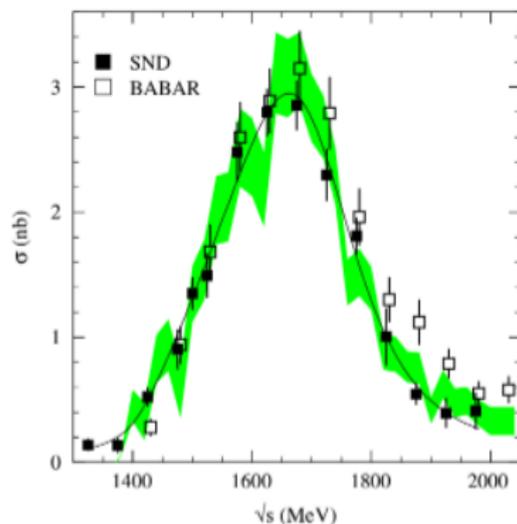


$$\epsilon_{\text{trig}} = 1 - (1 - \epsilon_{CT})(1 - \epsilon_{NT})$$

$$\epsilon_{CT} = \frac{N_{\text{both}}}{N_{\text{both}} + N_{\text{neutral}}}; \quad \epsilon_{NT} = \frac{N_{\text{both}}}{N_{\text{both}} + N_{\text{charge}}}$$

# Результаты SND и BaBar

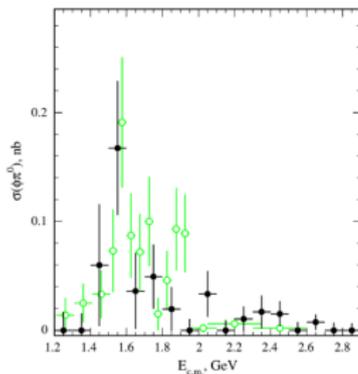
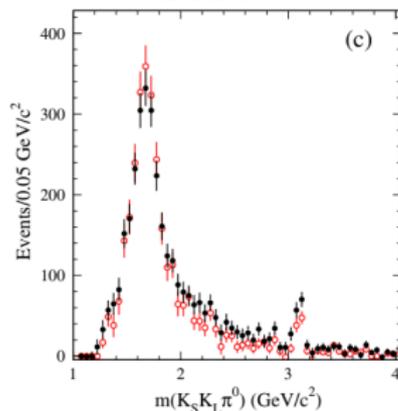
## SND



Isotopic ratio:

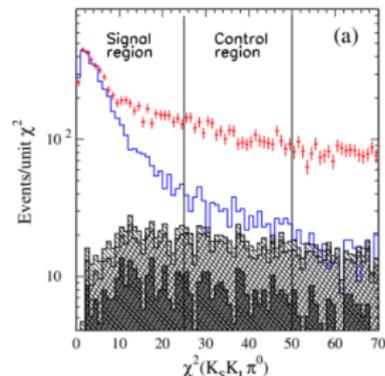
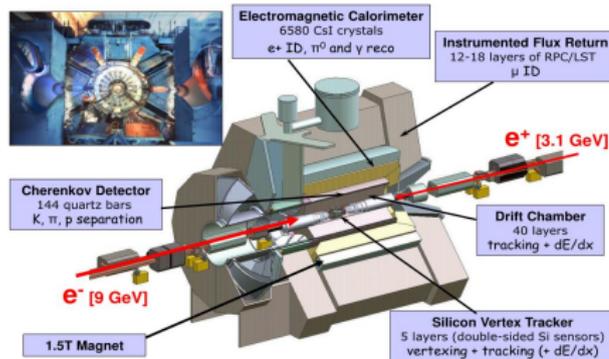
$$\sigma_{K_S K_L \pi^0} = \sigma_{K_S K^\pm \pi^\mp} - \sigma_{K^+ K^- \pi^0} + Br(\phi \rightarrow K \bar{K}) \cdot \sigma_{\phi \pi^0}$$

## BaBar



# Study of $e^+ e^- \rightarrow K_S K_L \pi^0$ with BaBar

## The BaBar Detector



Approach:

- Kinematic fit  $4C \chi^2$
- Background subtraction (shape from simulation)

Results:

- Cross section
- Contributions  $K^* K$  и  $\phi \pi^0$  are obtained

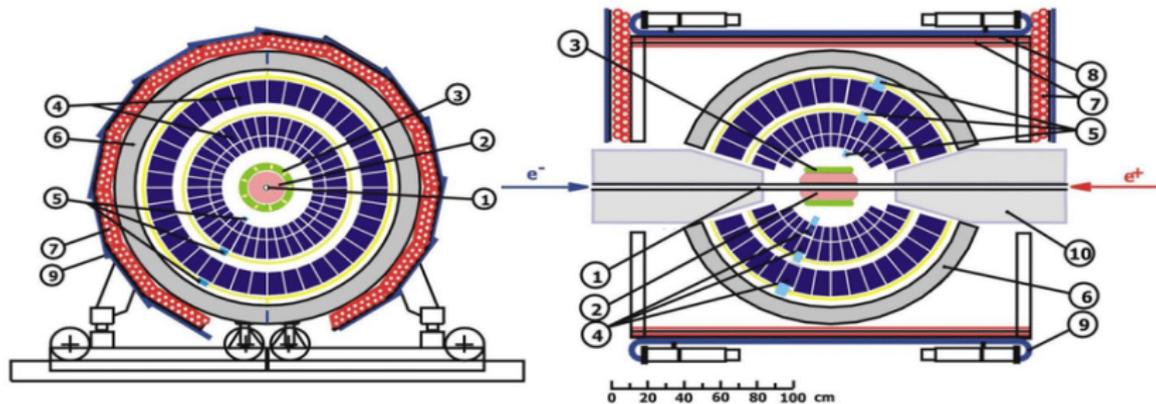
Disadvantages:

- Systematic from ISR
- Systematic from registration of  $K_L$
- Systematic from background subtraction  $\approx 10\%$
- Big systematic of efficiency below 1.5 GeV
- Efficiency  $\approx 3\%$

Selection criteria:

- At least two tracks
- At least four photons
- Cluster with ISR photon ( $> 3 \text{ GeV}$ )
- Good  $K_S$  candidate
- Photons from  $\pi^0$  decay with energy more than 0.1 GeV
- Cluster or  $K_L$  candidate with energy more than 0.2 GeV

# Study of $e^+ e^- \rightarrow K_S K_L \pi^0$ with SND



## Selection criteria:

- No track
- No parallel clusters
- At least 6 photons with energy more than 20 MeV
- Three good  $\pi^0$  candidates
- Two  $\pi^0$  with invariant mass of  $K_S$

## Approach:

- Kinematic fit  $3\pi^0 + 1K_S \chi^2$
- Fit of  $M_{recoil} = M_{K_L}$
- Background shape from simulation

## Results:

- Cross section

## Disadvantages:

- Efficiency from 6% to 2%
- Systematic from shape of  $M_{recoil}$
- Systematic from registration of  $K_L$
- Summary systematic  $\approx 12\%$