

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ  
 $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$  И  $e^+e^- \rightarrow K_S K_L$   
НА ДЕТЕКТОРЕ СНД

Константин Белобородов

по материалам апробации

Дубна 15.03.2017

# Введение

Цель изучения процессов  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$  и  $e^+e^- \rightarrow K_S K_L$  :

➤ Точное измерение сечений процессов:

- Исследование спектроскопия легких векторных мезонов  $\rho$ ,  $\omega$ ,  $\phi$  и их радиальных и орбитальных возбужденных состояний:

$\rho'$ ,  $\omega'$ ,  $\phi'$ ,  $\rho''$ ,  $\omega''$ ,  $\phi''$ , ... ;

- Дает вклад в полное сечение  $e^+e^- \rightarrow hadrons$ , которое используется для вычисления величин:

$(g-2)_\mu$  – аномального магнитного момента мюона;

$\alpha_{em}(M_Z)$  – электромагнитная константа связи на массе Z-бозона.

- Совместный анализ  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$  и  $e^+e^- \rightarrow K_S K_L$  позволяет:

- Разделить изоскалярную  $A(I=0)$  и изовекторную  $A(I=1)$  амплитуды процесса:  $\gamma^* \rightarrow K\bar{K}$
- Тест CVC ( $\tau^- \rightarrow K^- K^0 \nu_\tau$ )

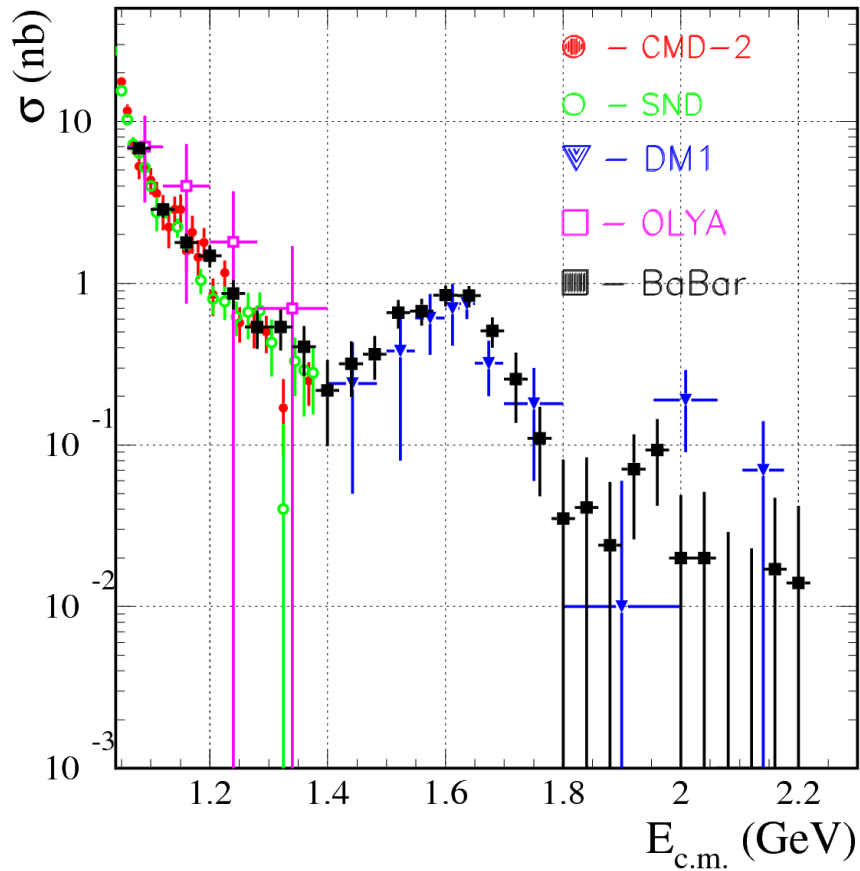
➤ Проверка новых аэрогелевых счетчиков на каонах

- Исследование других процессов с каонами

➤ Процесс  $e^+e^- \rightarrow K_S K_L$  используется как источник  $K_L$ :

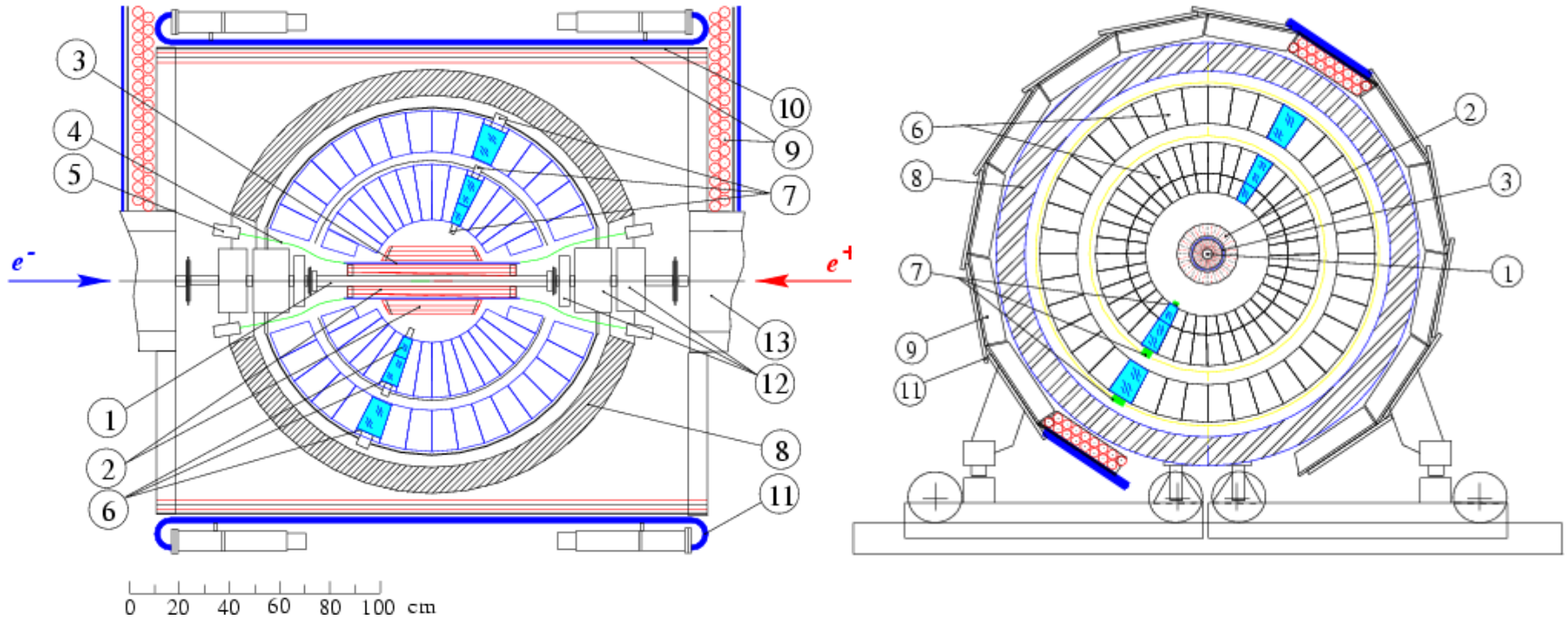
- Измерение ядерной неупругой длины в NaI
- Проверка программ моделирования (UNIMOD, GEANT и т.д.)
- Коррекция моделей для ядерного взаимодействия при малых импульсах  $K_L$

# Экспериментальное изучение процесса $e^+e^- \rightarrow K_S K_L$ с детектором СНД в интервале энергии $2E_0 = 1.04 \div 1.38$ ГэВ



Эксперимент	год	$2E$ , GeV	$L$ , nb $^{-1}$
ОЛЯ (ВЭПП-2М)	1982	1,06÷1,40	0,7
DM1 (DCI)	1981	1,40÷2,18	1,4
КМД2 (ВЭПП-2М)	2003	1,05÷1,4	9,0
BABAR (PEPII)	2014	1,08÷2,16	

# Детектор СНД

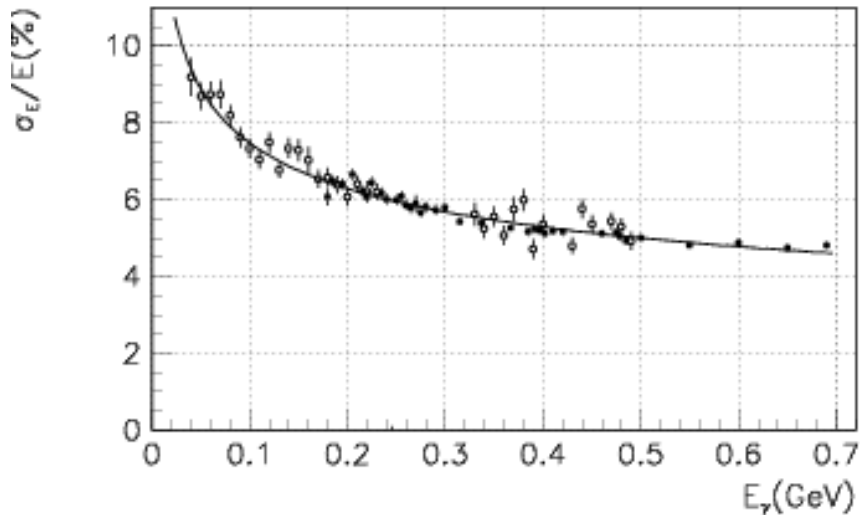


1 --- вакуумная камера ВЭПП-2М, 2 --- трековая система, 3-5 --- внутренний сцинтилляционный счетчик, 6 --- кристаллы NaI(Tl), 7 --- вакуумные фототриоды, 8 --- железный поглотитель, 9-11 --- мюонная система, 12-13 --- элементы ВЭПП-2М

# Калориметр Снд

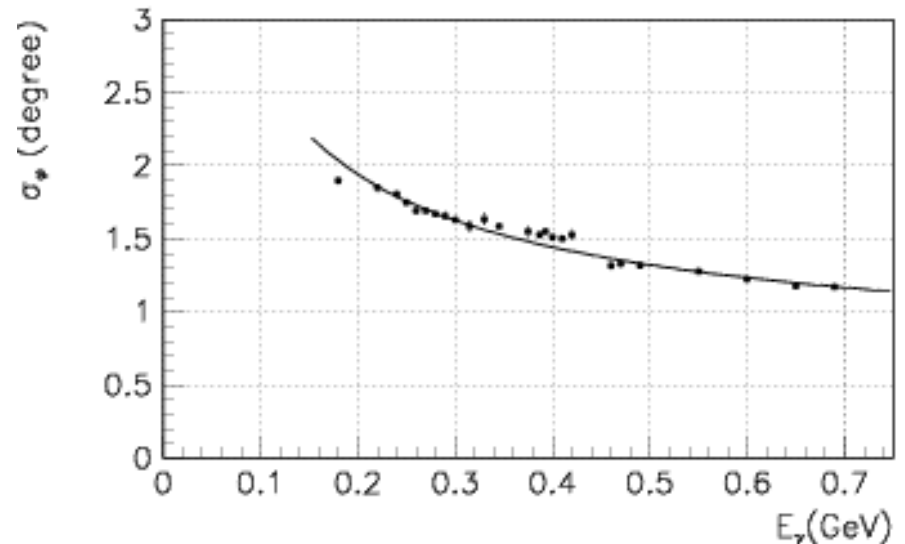
- Телесный угол 90 % от 4л
- толщина 13,4  $X_0$
- большая гранулированность 1632 кристалла
- хорошее угловое и энергетическое разрешение

Энергетическое разрешение



$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{4.2\%}{\sqrt[4]{E(\text{GeV})}}$$

Угловое разрешение



$$\sigma_{\varphi,\theta} = \frac{0.82^\circ}{\sqrt{E(\text{GeV})}} \oplus 0.63^\circ$$

# Эксперименты МНАД

МНАД9701:

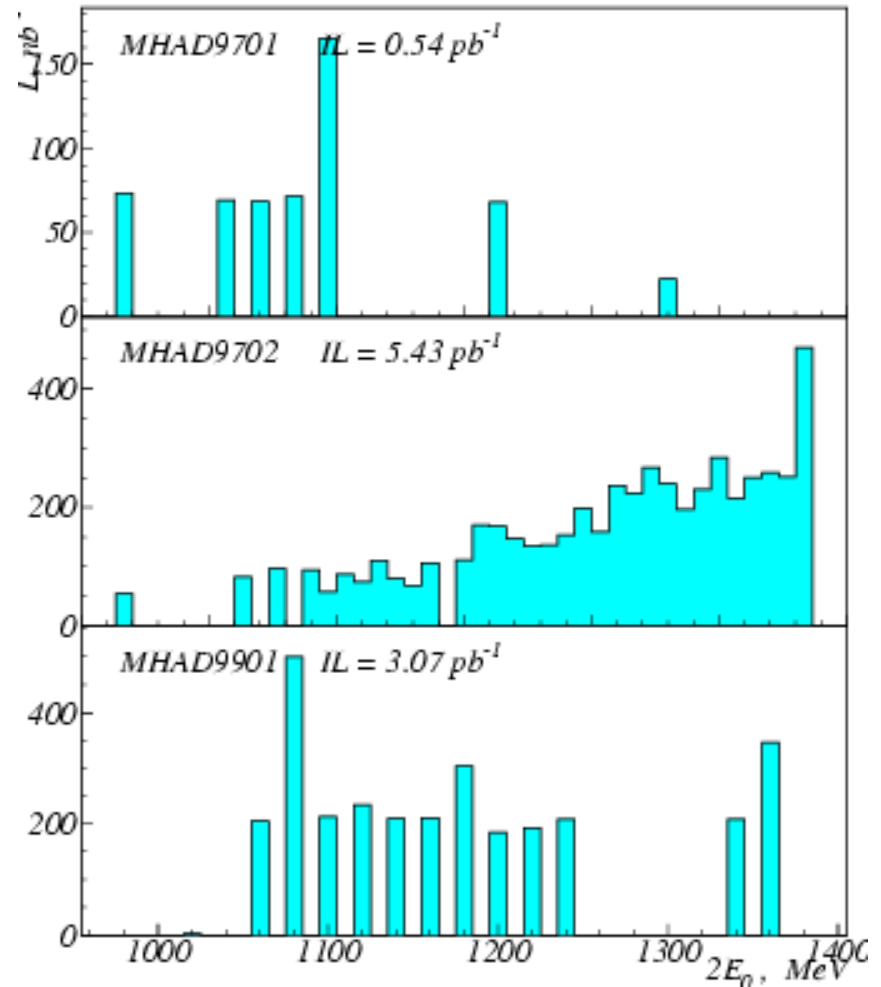
- январь–февраль 1997
- 7 точек по энергии
- $L=0,54 \text{ пб}^{-1}$

МНАД9702:

- февраль–июнь 1997
- 32 точек по энергии
- $L=5,43 \text{ пб}^{-1}$

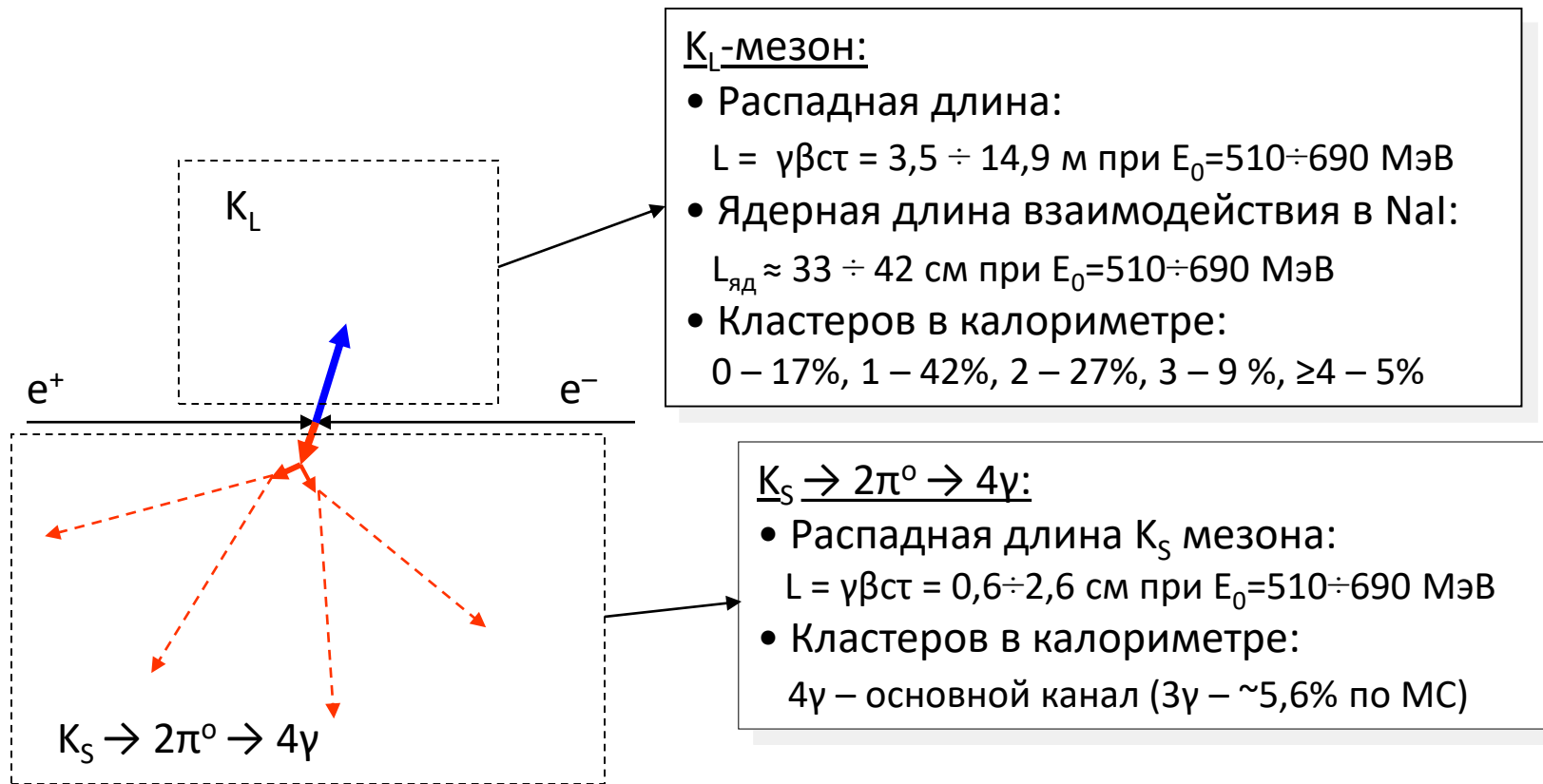
МНАД9901:

- декабрь 1998 – апрель 1999
- 14 точек по энергии
- $L=3,07 \text{ пб}^{-1}$



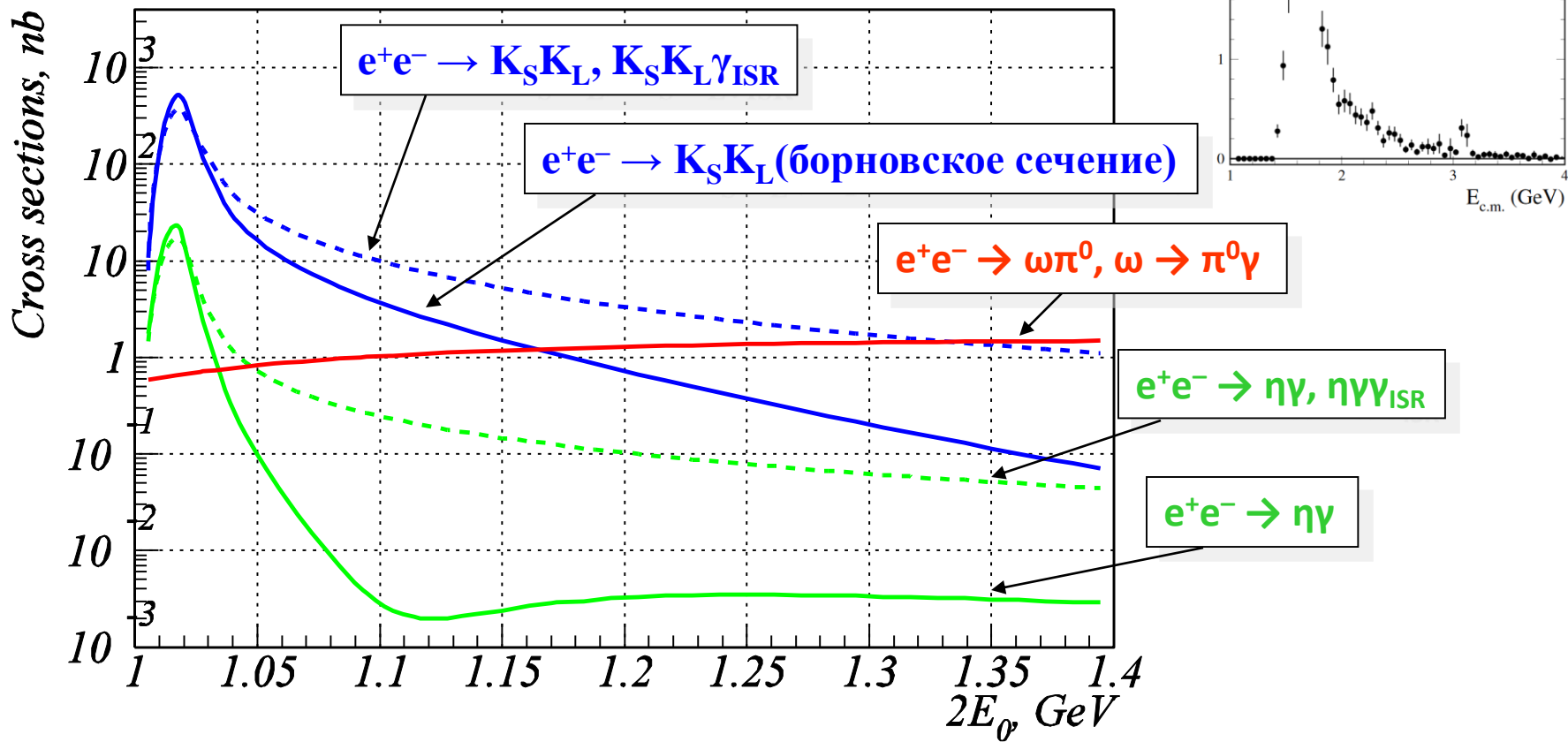
\* В обработке использовались данные с энергией  $2E_0 \geq 1,04 \text{ ГэВ}$

# Некоторые особенности процесса $e^+e^- \rightarrow K_S K_L$



1. Основная часть событий содержит 4 кластера от распада  $K_S$ -мезона + кластеры от ядерного взаимодействия  $K_L$ -мезона в калориметре
2. Практически не содержит заряженных частиц
3. Возможны большие величины недостающей энергии и импульса в событии

# Фоновые процессы



«Нефизический фон»:

1. пучковый фон
2. космический фон



# Условия отбора

1. Нейтральный триггер
2.  $N_{NP} \geq 4$
3.  $N_{CP} = 0$
4. Исключались события с найденным в калориметре космическим треком

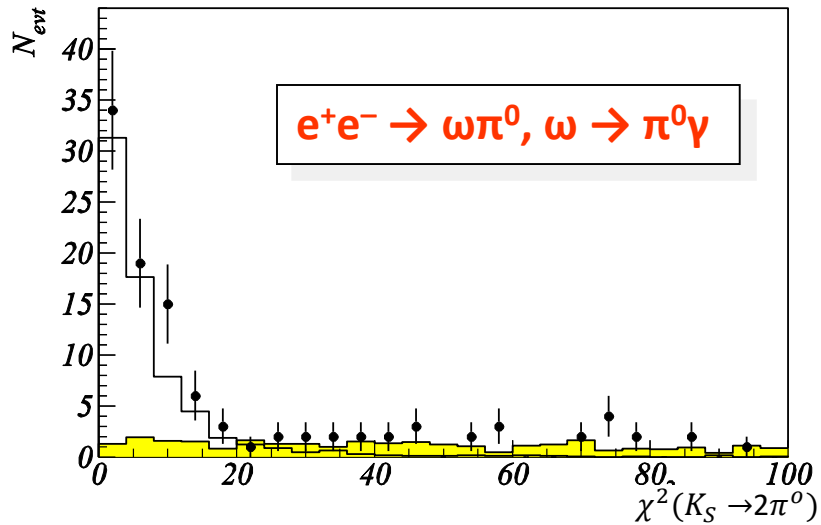
- 
- $\chi_1^2 < 25$  в гипотезе  $K_S \rightarrow 2\pi^0 \rightarrow 4\gamma$
  - \*  $\zeta_\gamma < 0$
  - \*  $36^\circ < \theta_\gamma < 144^\circ$
  - \*  $400 < M_{REC} < 550$  – масса отдачи  $K_S$
  - $\chi_2^2 > 60$  в гипотезе  $e^+e^- \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$

---

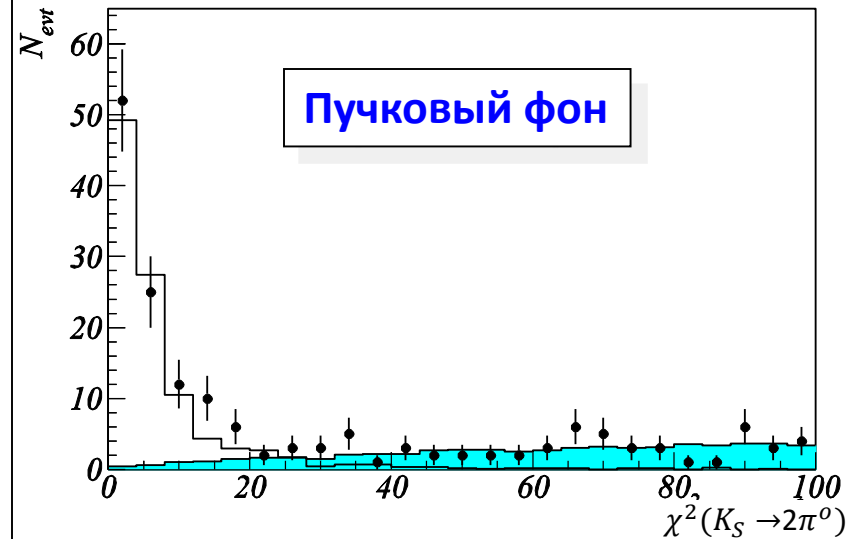
\* – только для фотонов вошедших в реконструированный  $K_S$ -мезон

- $\zeta$  – параметр «качества» фотона. Используется для подавления вклада кластеров от распадов или ядерного взаимодействия  $K_L$ -мезона
- $\theta$  – полярный угол фотона. Используется для подавления вклада пучкового фона.
- $M_{REC}$  – масса отдачи  $K_S$ . Используется для подавления вклада процесса  $e^+e^- \rightarrow K_S K_L \gamma_{ISR}$
- $\chi_2^2$  – позволяет подавить вклад процесса  $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0$ ,  $\omega \rightarrow \pi^0\gamma$  и  $e^+e^- \rightarrow \eta\gamma$ ,  $\eta\gamma\gamma_{ISR}$

# Оценка вклада фонов



- Дополнительные условия:
  - $\sqrt{s} > 1,2$  ГэВ
  - $N_{NP} < 7$
  - $E_{tot} \geq 0.5 \sqrt{s}$
- Точность определения фона: **~5%** (сист.)

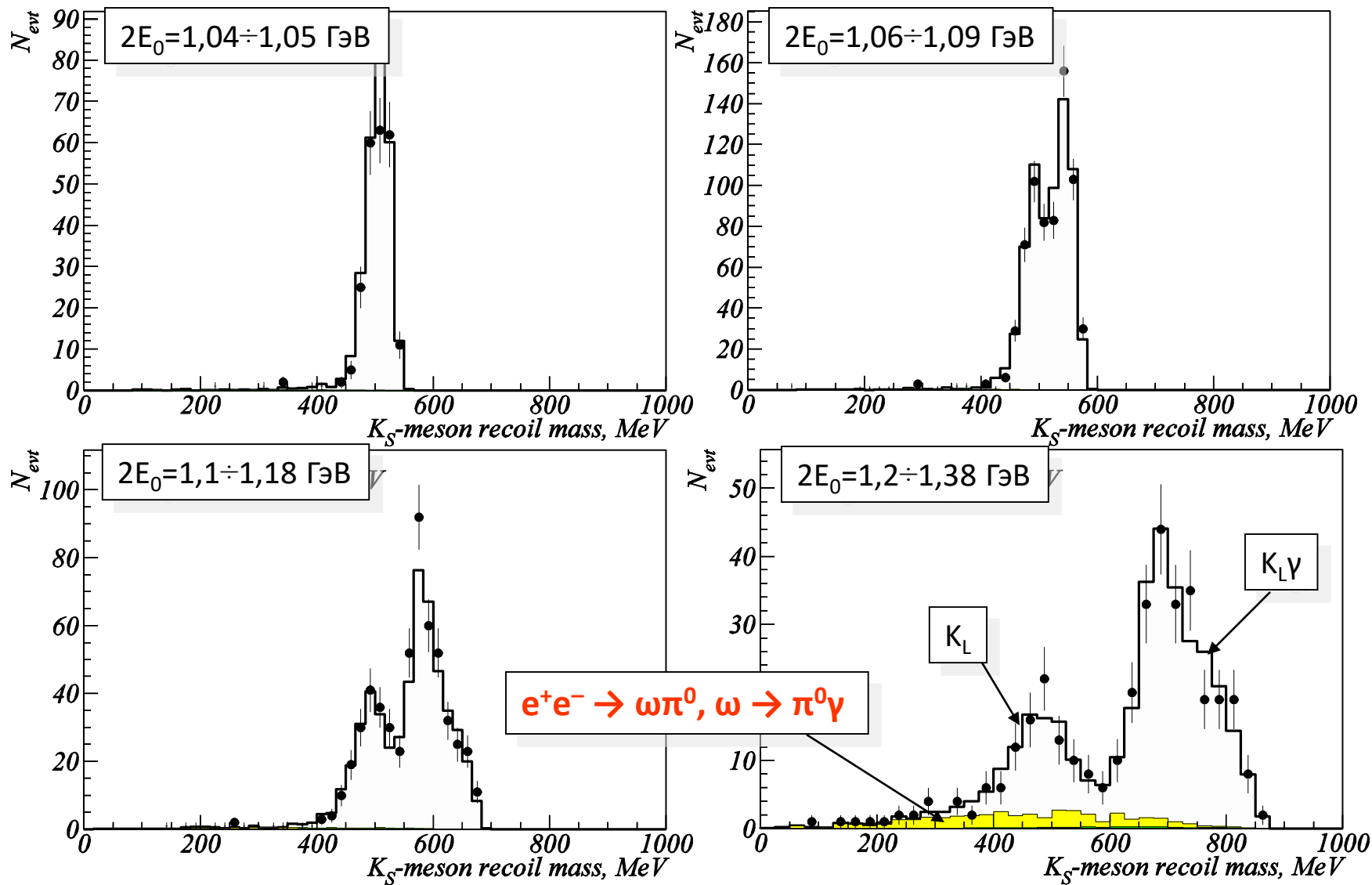


- Дополнительные условия:
  - $\sqrt{s} > 1,12$  ГэВ
  - $E_{tot} < 0.5 \sqrt{s}$
- Точность определения фона: **~20%** (сист.)

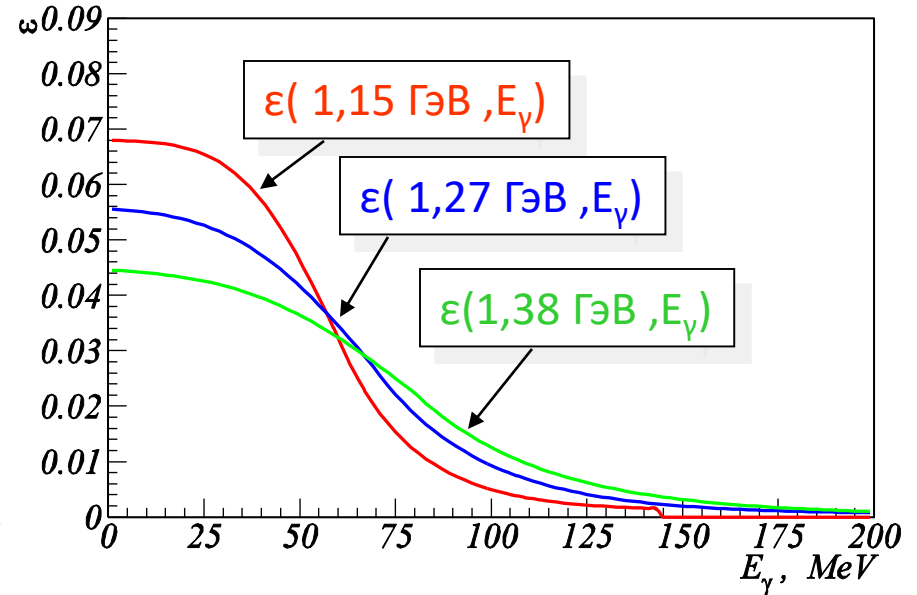
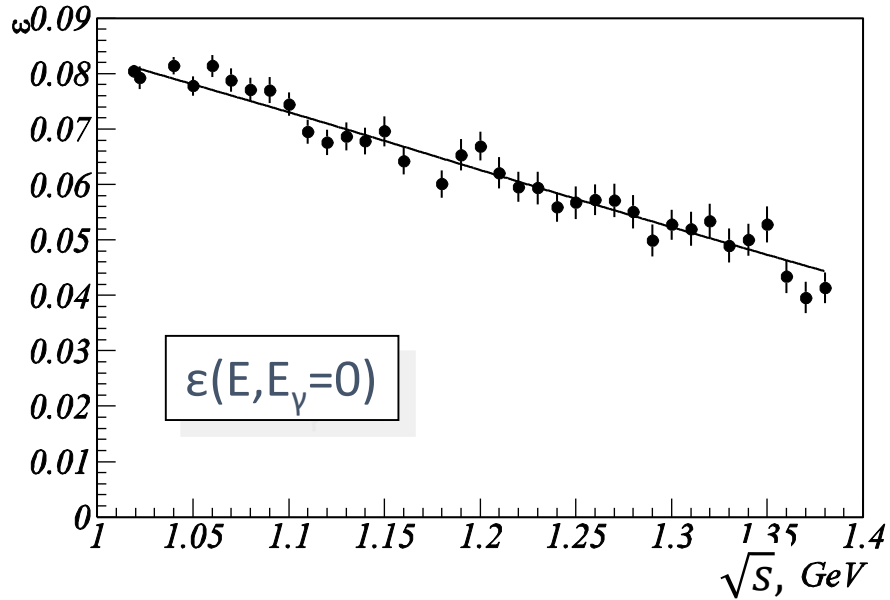
$e^+e^- \rightarrow \eta\gamma, \eta\gamma\gamma_{ISR}$

- вклад определялся по моделированию
- систематическая погрешность не более **3%** и определяется:
  - ✓ точностью определения сечения в области  $\phi$ -мезона – **~2%**
  - ✓ точностью вычисления радиоправки – **~1%**

# Масса отдачи $K_S$ -мезона



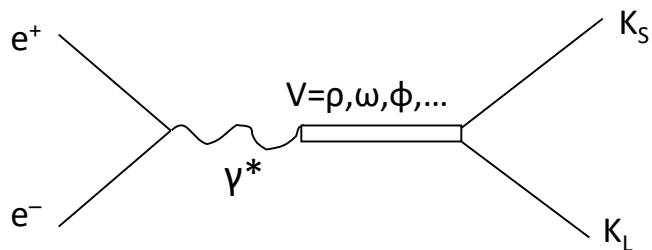
# Эффективность регистрации $\varepsilon(E, E_\gamma)$



$$\sigma_{vis}(E) = \sigma_0(E) \cdot \varepsilon(E) \cdot (1 + \delta(E)) \quad \Longrightarrow \quad \sigma_{vis}(E) = \int_0^1 dz \sigma_0(E(1-z)) F(E, z) \varepsilon(E, zE)$$

# Аппроксимация данных

## Модель векторной доминантности



$$\sigma_0(s) = \frac{12\pi}{s^{3/2}} \left| \sum_{V=\rho,\omega,\phi,\dots} \frac{\sqrt{\Gamma_{V \rightarrow K_S K_L}(s) \Gamma_{V \rightarrow e^+ e^-} m_V^3 e^{i\theta_V}}}{s - m_V^2 + im_V \Gamma_V(s)} \right|^2$$

$$\Gamma_\phi(s) = \Gamma_{\phi \rightarrow K^+ K^-}(s) + \Gamma_{\phi \rightarrow K_S K_L}(s) + \Gamma_{\phi \rightarrow 3\pi}(s) + \Gamma_{\phi \rightarrow \eta\gamma}(s) + \Gamma_{\phi \rightarrow \pi^0 \gamma}(s)$$

$$\Gamma_\omega(s) = \Gamma_{\omega \rightarrow 3\pi}(s) + \Gamma_{\omega \rightarrow \eta\gamma}(s) + \Gamma_{\omega \rightarrow \pi^0 \gamma}(s) + \Gamma_{\omega \rightarrow 2\pi}(s)$$

$$\Gamma_\rho(s) = \Gamma_{\rho \rightarrow 2\pi}(s)$$

SU(3)

$$\Gamma_{\rho \rightarrow K_S K_L}(s) = \Gamma_{\omega \rightarrow K_S K_L}(s) = 2\Gamma_{\phi \rightarrow K_S K_L}(s)$$

$$\theta_\rho = 0^\circ \quad \theta_\omega = 180^\circ \quad \theta_\phi = 180^\circ$$

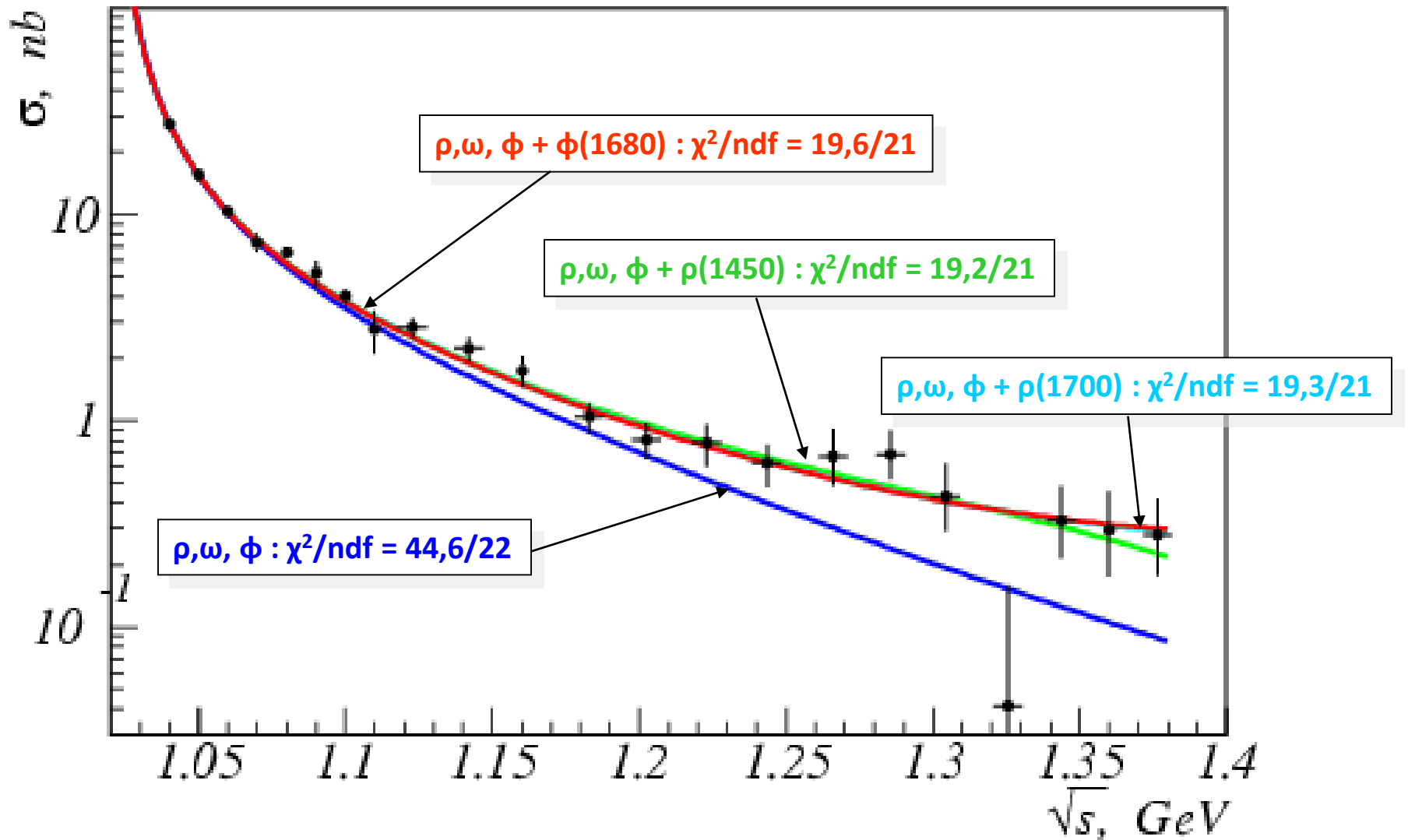
$J^{PC} = 1^{--}$

$n^{2S+1}J$	I=1	I=0	I=0
$1^3S_1$	$\rho(770)$	$\phi(1020)$	$\omega(783)$
$1^3D_1$	$\rho(1700)$	—	$\omega(1650)$
$2^3S_1$	$\rho(1450)$	$\phi(1680)$	$\omega(1420)$

Описание:

- Брейт-Вигнер
- $\Gamma_V(s) = \Gamma_{V \rightarrow K_S K_L}(s)$
- $\theta_V = 0^\circ$

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



# Систематические погрешности

Источники систематической ошибки:

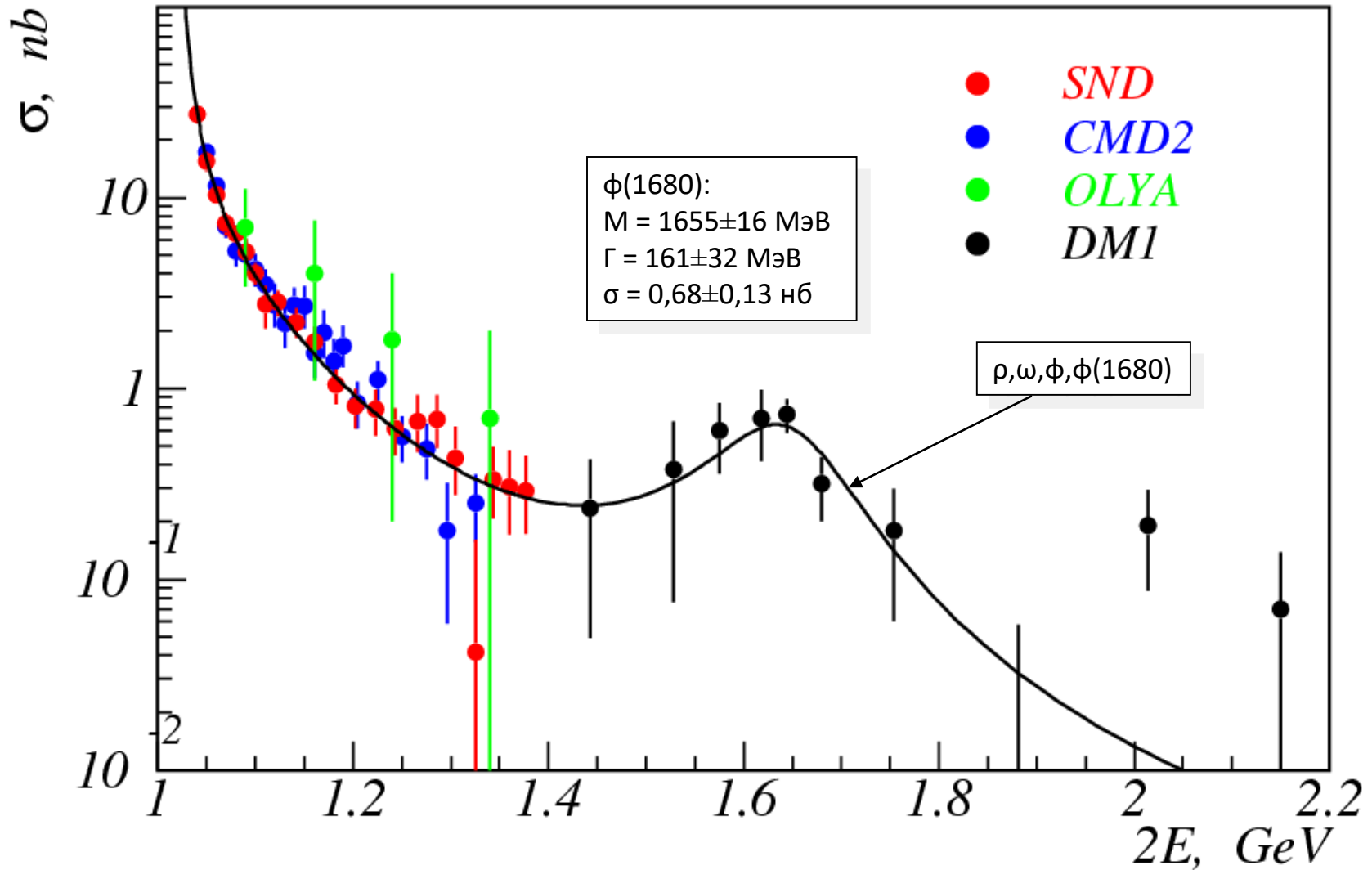
---

	$2E_0:$	$1,04 \div 1,38 \text{ ГэВ}$
➤ определение светимости		2 %
➤ эффективность регистрации		$2,1 \div 2,5 \%$
➤ определение фона		$0,4 \div 4,0 \%$
➤ модельная зависимость		$1,5 \div 2,5 \%$
Суммарная погрешность		$3,3 \div 5,7 \%$

---

\* Суммарная систематическая погрешность вычислялась как сумма независимых погрешностей

# Сечение процесса $e^+e^- \rightarrow K_S K_L$





# Заключение I

- Измерено сечение процесса  $e^+e^- \rightarrow K_S K_L$  в интервале энергии  $2E_0 = 1,04 \div 1,38$  ГэВ с детектором СНД
- Наблюдается значительное превышение измеренного сечения процесса  $e^+e^- \rightarrow K_S K_L$  над предсказанием Модели векторной доминантности, учитывающей только наличие легких векторных мезонов  $\rho(770)$ ,  $\omega(783)$  и  $\phi(1020)$
- Данное превышение может быть объяснено наличием возбужденных состояний  $\rho(770)$ ,  $\omega(783)$  и  $\phi(1020)$  мезонов

# Измерение длины неупругого ядерного взаимодействия $K_L$ -мезонов в калориметре на основе NaI(Tl)

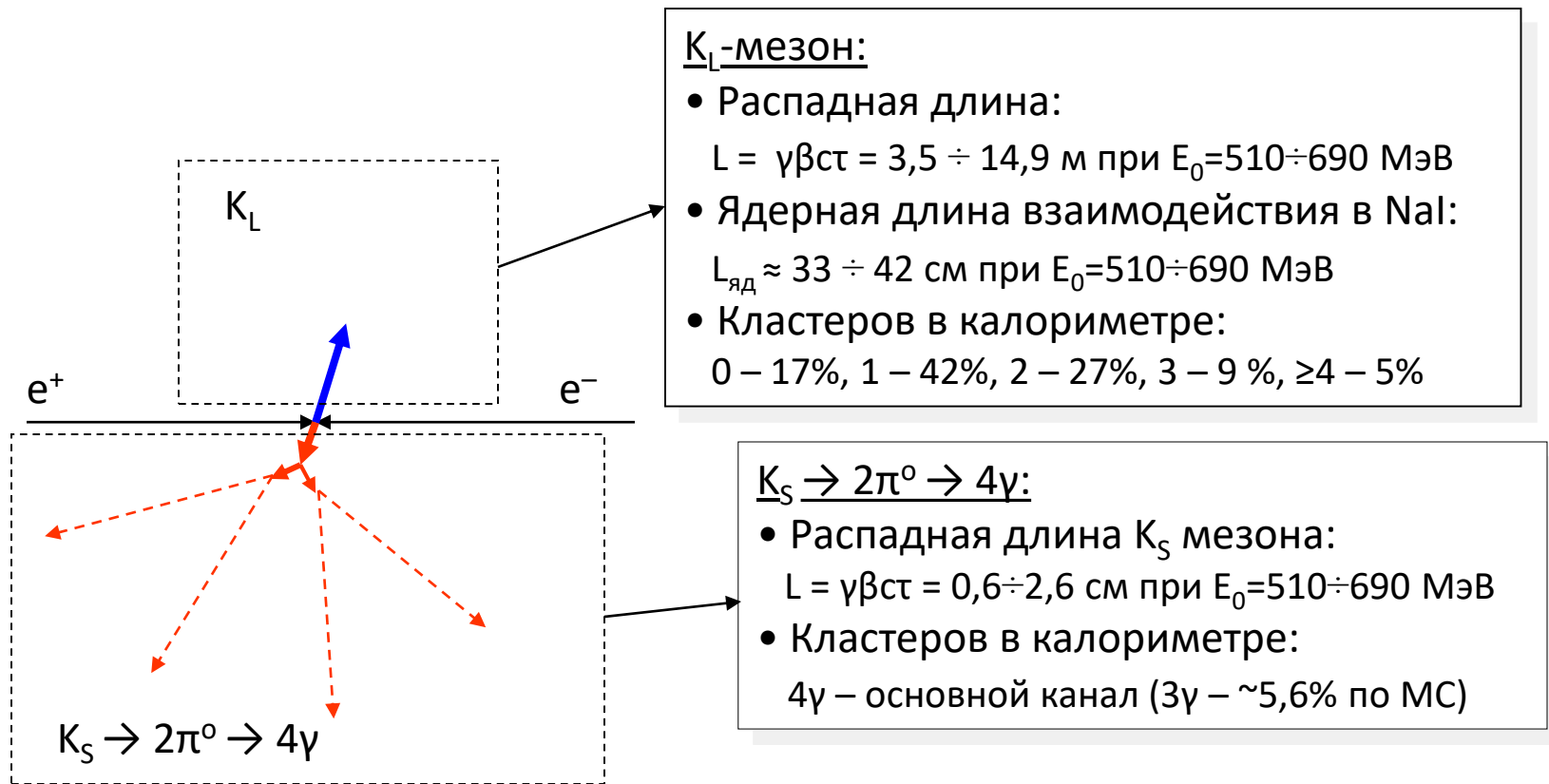
## Мотивация:

- Отсутствуют экспериментальные данные ( $K_L + \text{NaI}$ ) при низких импульсах
- Необходимость проверки программ моделирования (UNIMOD, GEANT4)
- Коррекция моделей

## Существующие измерения:

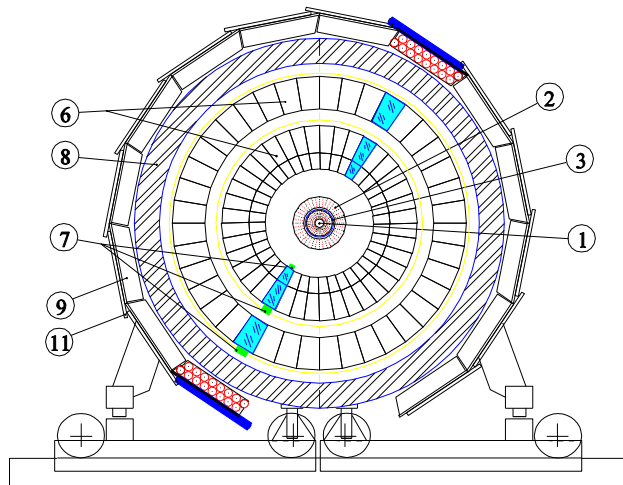
1. Принстон-Пенсильванский ускоритель (1967):  
измерение полного ядерного сечения  $K_L$  с Be, C, Al, Fe, Cu, Pb и U в диапазоне импульса каона от 0.168 до 0.343 ГэВ/с
2. КМД2 (1996):  
Полное ядерное сечение  $K_L$  с Be,  $p=0,114$  ГэВ/с

# Некоторые особенности процесса $e^+e^- \rightarrow K_S K_L$



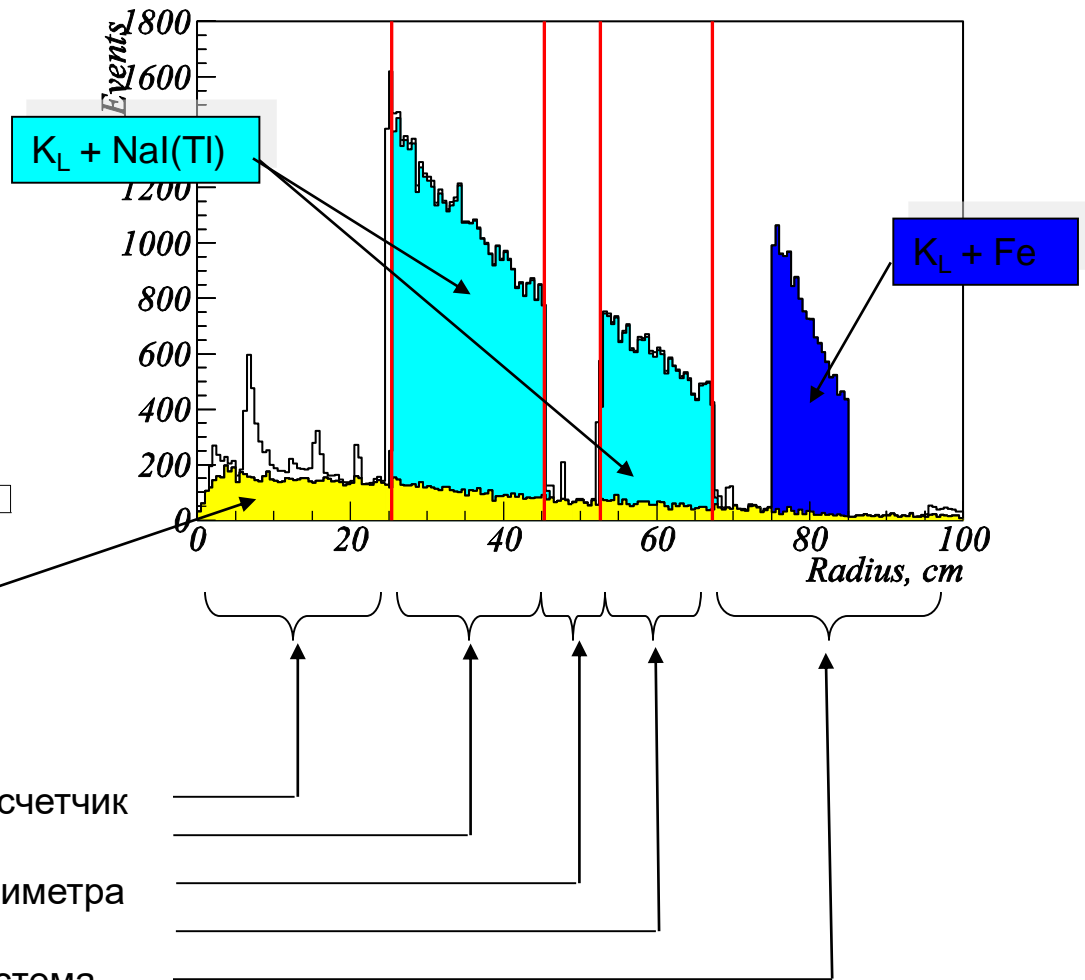
1. Основная часть событий содержит 4 кластера от распада  $K_S$ -мезона + кластеры от ядерного взаимодействия  $K_L$ -мезона в калориметре
2. Практически не содержит заряженных частиц
3. Возможны большие величины недостающей энергии и импульса в событии

# Взаимодействие $K_L$ мезона с детектором СНД. Моделирование.



Распады  $K_L$  мезонов

1. Дрейфовая камера, внутренний сч. счетчик
2. I и II слои калориметра
3. Область между II и III слоями калориметра
4. III слой калориметра
5. Железный поглотитель, внешняя система



# Метод восстановления длины неупругого взаимодействия $K_L$ с $NaI(Tl)$

1.  $N_0$  – общее число событий
2.  $n_1 = w_1 \cdot N_0, \quad N_1 = N_0 - n_1$
3.  $n_2 = w_2 \cdot N_1, \quad N_2 = N_1 - n_2, \quad w_2 = 1 - \exp(-L_2/\lambda), \quad 1/\lambda = 1/\lambda_d + 1/\lambda_{in}$
4.  $n_3 = w_3 \cdot N_2, \quad N_3 = N_2 - n_3$
5.  $n_4 = w_4 \cdot N_3, \quad N_4 = N_3 - n_4, \quad w_4 = 1 - \exp(-L_4/\lambda), \quad 1/\lambda = 1/\lambda_d + 1/\lambda_{in}$
6.  $n_5 = N_4$

$N_{i-1}$  – число событий на входе  $i$ -го слоя

$n_i$  – число событий с распадом или с неупругим взаимодействием в  $i$ -ом слое

$w_i$  – вероятность распада или неупругого взаимодействия в  $i$ -ом слое

$L_2, L_4$  – толщины I+II и III слоев калориметра ( $L_2=20,0$  см,  $L_4=14,7$  см)

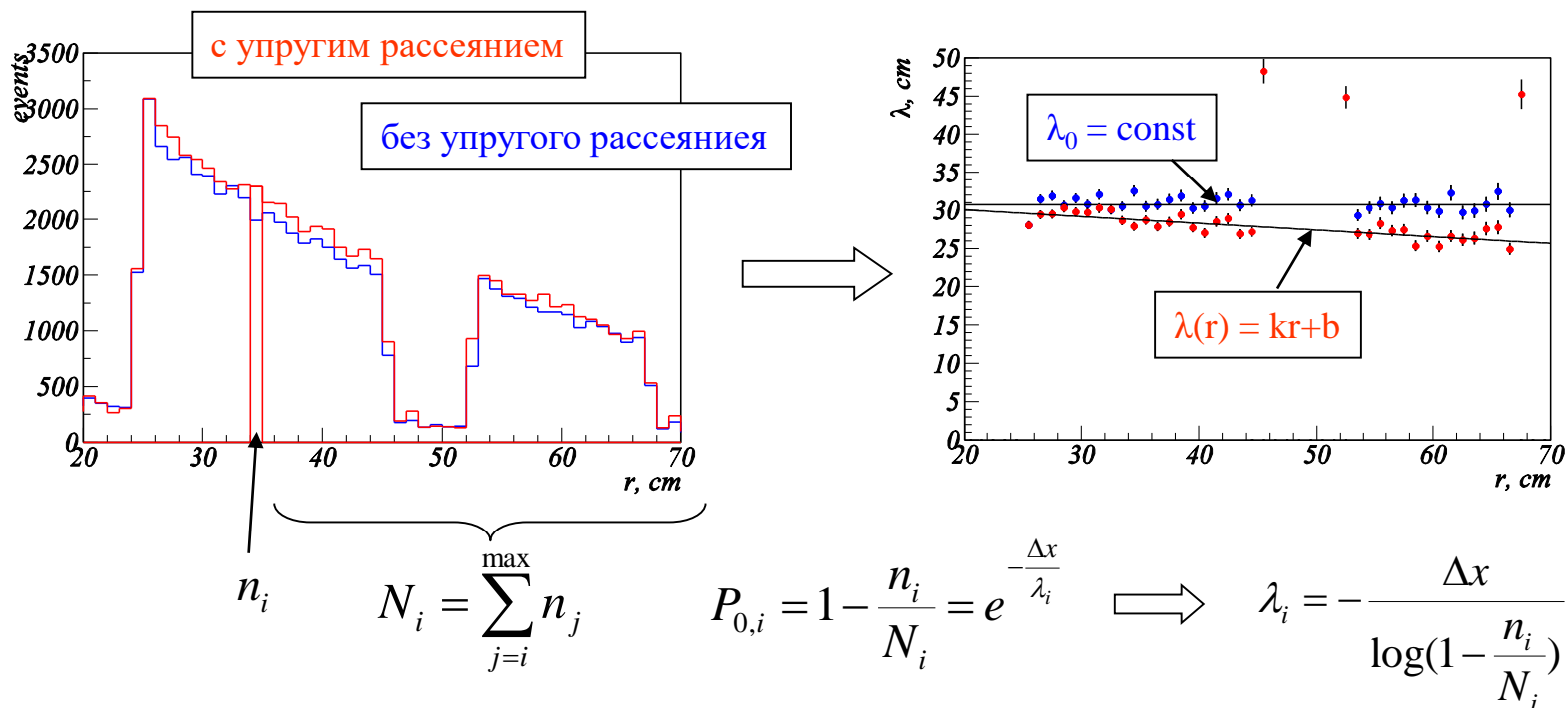
$\lambda_{in}$  – длина неупругого взаимодействия  $K_L$  мезона в  $NaI(Tl)$

$\lambda_d$  – распадная длина  $K_L$  мезона:  $\lambda_d = c\tau\gamma\beta, \quad c\tau = 15,33$  м

$$\left. \begin{aligned} n_{\gamma=4} &= \sum_{i=1}^5 \varepsilon_{i,\gamma=4} n_i \\ n_{\gamma>4} &= \sum_{i=1}^5 \varepsilon_{i,\gamma>4} n_i \end{aligned} \right\} \Rightarrow P_0(\lambda_{in}) = \frac{n_{\gamma=4}}{n_{\gamma=4} + n_{\gamma>4}} \Rightarrow \lambda_{in}$$

$\varepsilon_{i,\gamma=4}, \varepsilon_{i,\gamma>4}$  – эффективности регистрации событий  $e^+e^- \rightarrow K_S K_L$  для  $i$ -го слоя

# Учет упругого ядерного взаимодействия $K_L$ с NaI(Tl)



## Эффективная толщина calorimetра

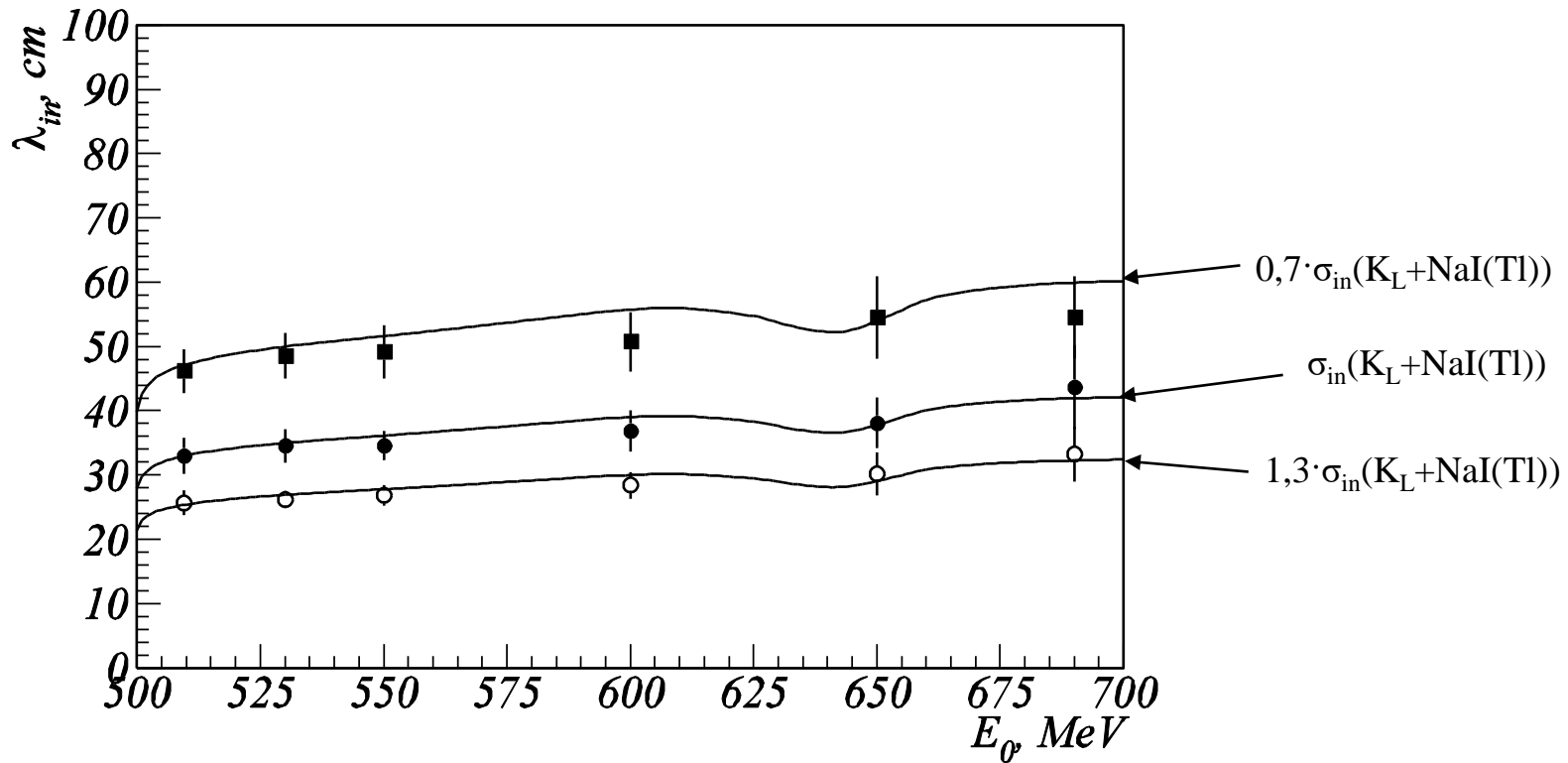
$$L_* = \int_{r_1}^{r_2} \frac{\lambda_0}{\lambda(r)} dr \quad \sigma_{L_*} \approx L_* - L$$

Слой	L, см	L*, см	$\sigma_{L_*}/L_*$ , %
I+II	20,00	20,71	3,5
III	14,70	16,45	11,2

## Восстановление длины неупр. яд.-ого взаим.-я $K_L$

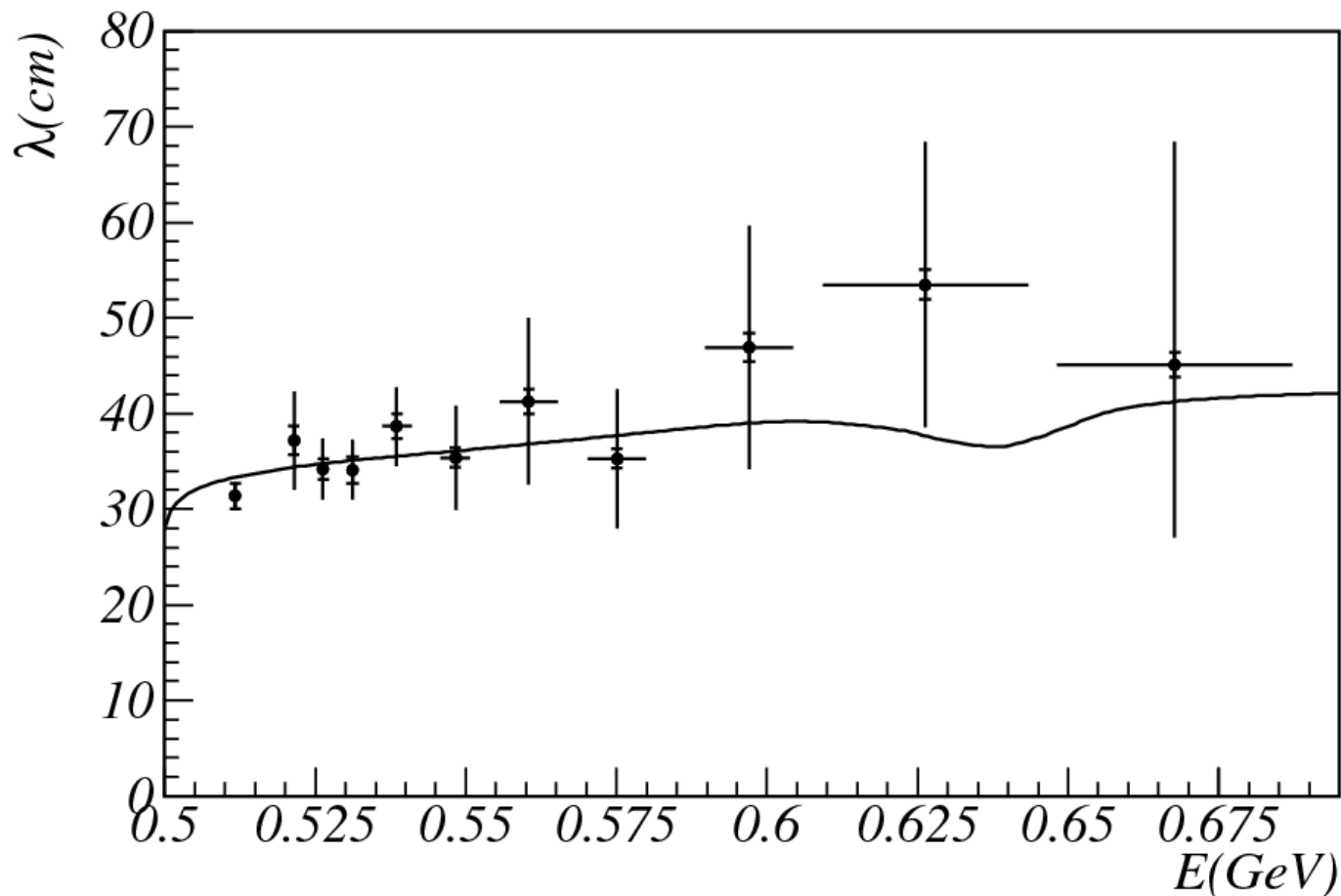
	$\lambda_{in, c}$ , см	$(\lambda_{in, c} - \lambda_{in})/\lambda_{in, c}$ , %
SCATTER ( $\lambda_{in, c}$ )	32,96	0,0
без поправки (L)	30,50	-7,5
с поправкой (L*)	32,86	-0,3

# Длина неупругого ядерного взаимодействия $K_L$ в NaI(Tl). Моделирование.



На рисунке линиями представлена расчетная длина ядерного неупругого взаимодействия  $K_L$  мезона в NaI(Tl) в зависимости от энергии  $K_L$  мезона. Расчет выполнялся для трех различных величин сечений. Точками представлены результаты восстановления длины из полученных данных. Видно хорошее согласие.

# Длина неупругого ядерного взаимодействия $K_L$ в NaI(Tl). Эксперимент.



На рисунке линией показана расчетная длина ядерного неупругого взаимодействия  $K_L$  мезона в NaI(Tl) в зависимости от энергии  $K_L$  мезона. Точками показаны полученные экспериментальные данные. Также показана полная ошибка (статистическая + систематическая) без риска. Систематическая ошибка показана с рисками. Видно хорошее согласие.



# Учет энергетического спектра $K_L$ мезонов.

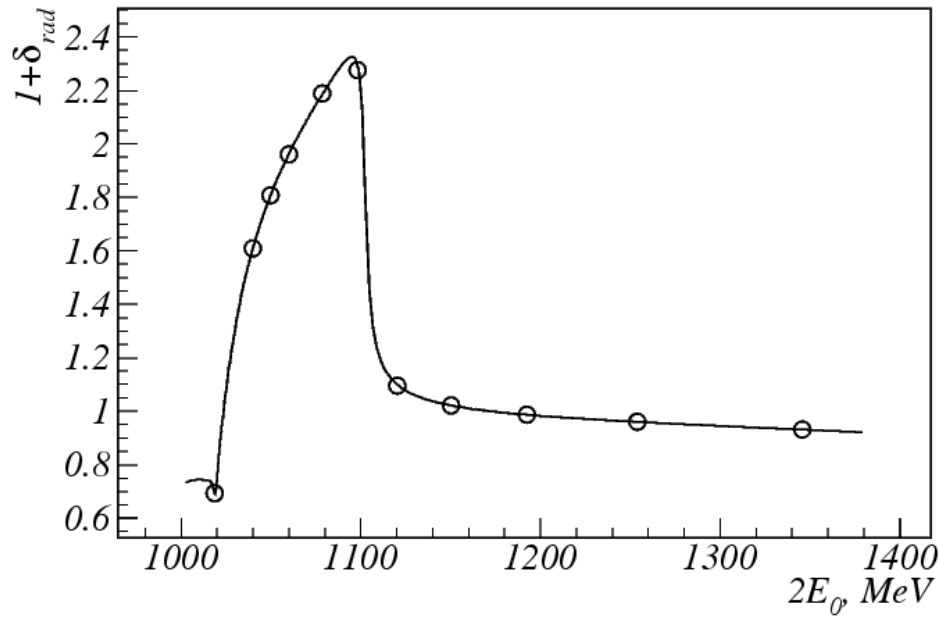


Рис. 8. Зависимость радиационной поправки к сечению процесса  $e^+e^- \rightarrow K_S K_L$  от энергии.

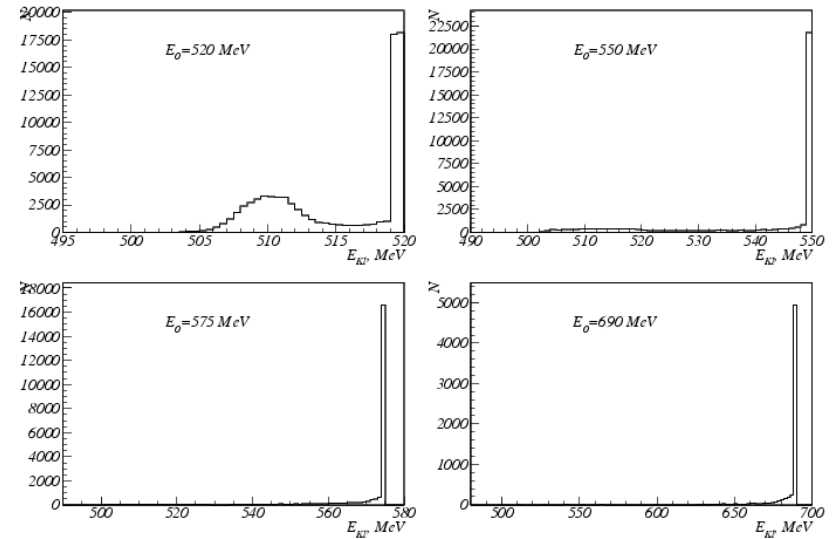


Рис. 9. Распределения событий по энергии зарегистрированного  $K_L$ -мезона для различной энергии пучка.

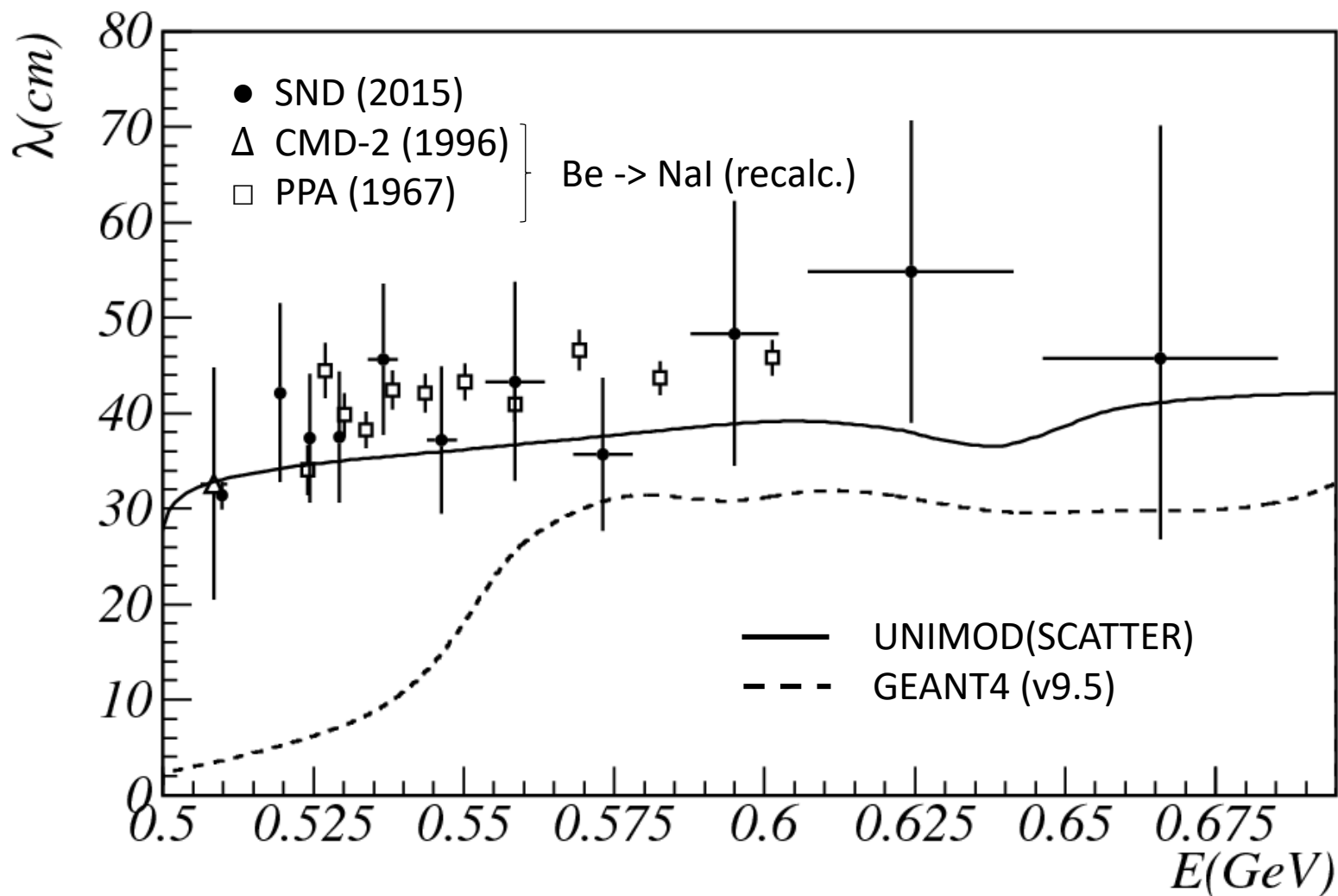
$$\langle \lambda_{in} \rangle = \int_{E_{min}}^{E_0} \lambda_{in}(E) w_K(E) dE, \quad \Longrightarrow \quad \langle \lambda_{in} \rangle_i = \sum_{j=1}^i P_{ij} \lambda_{in,j}$$

# Систематические ошибки

Таблица 4.4. Вклады в систематическую ошибку для трех значений энергии пучка.

Источник	$E_0 = 520$ МэВ	$E_0 = 640$ МэВ	$E_0 = 690$ МэВ
Вычитание фона	1.5	1.5	1.5
Эффективность	2.2	2.3	2.6
Немонохроматичность $K_L$ -мезона	1.0	3.0	1.0
Неупругое яд. взаимодействие вне NaI(Tl)	3.4	3.4	3.4
Упругое яд. взаимодействие в NaI(Tl)	2.0	2.0	2.0
Наложения	1.0	1.0	1.0
Сумма	5.0	5.8	5.2

# Длина неупругого ядерного взаимодействия $K_L$ в NaI(Tl).



## Сравнение эксперимента и UNIMOD

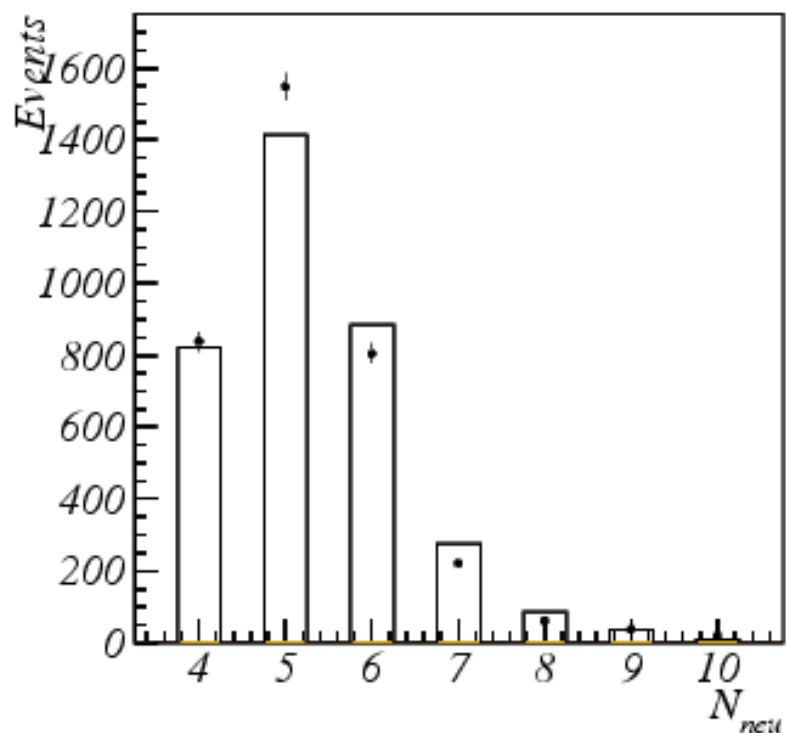


Рис. 13. Распределение событий по числу реконструированных фотонов.

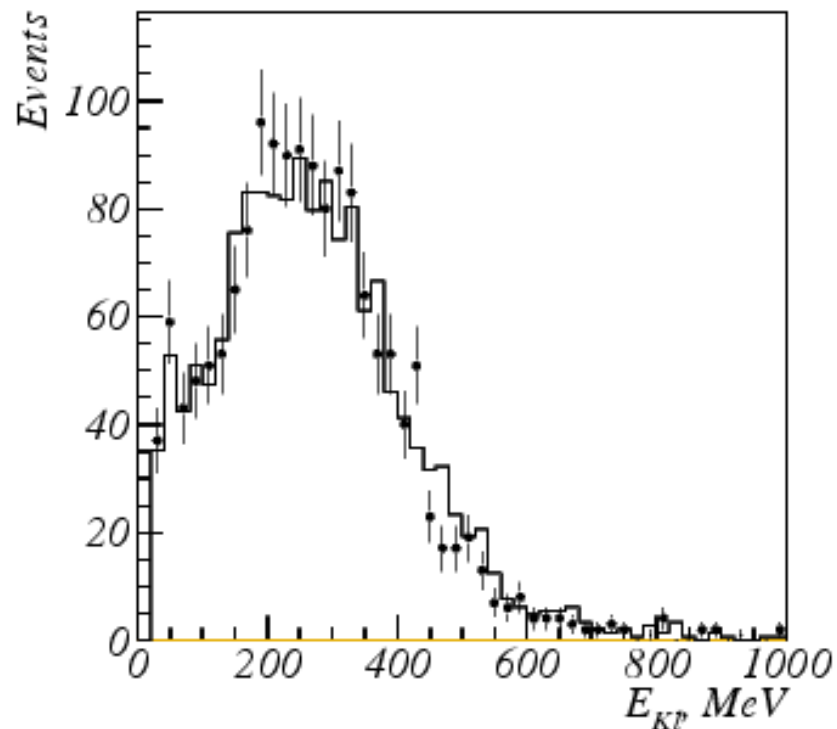


Рис. 14. Распределение энергосвечения  $K_L$  мезона в калориметре.

## Сравнение эксперимента и UNIMOD

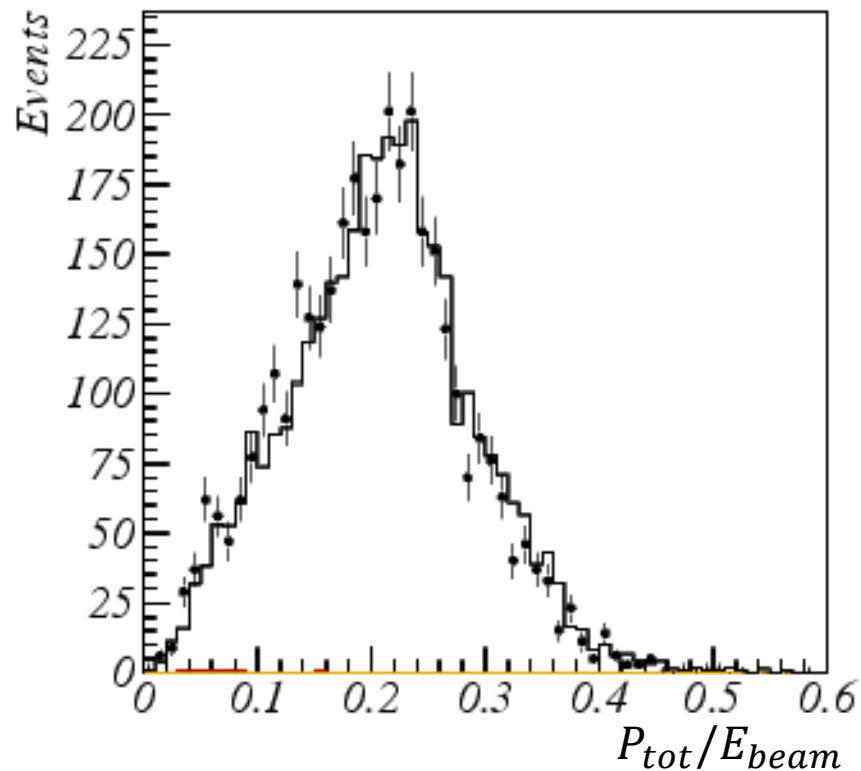
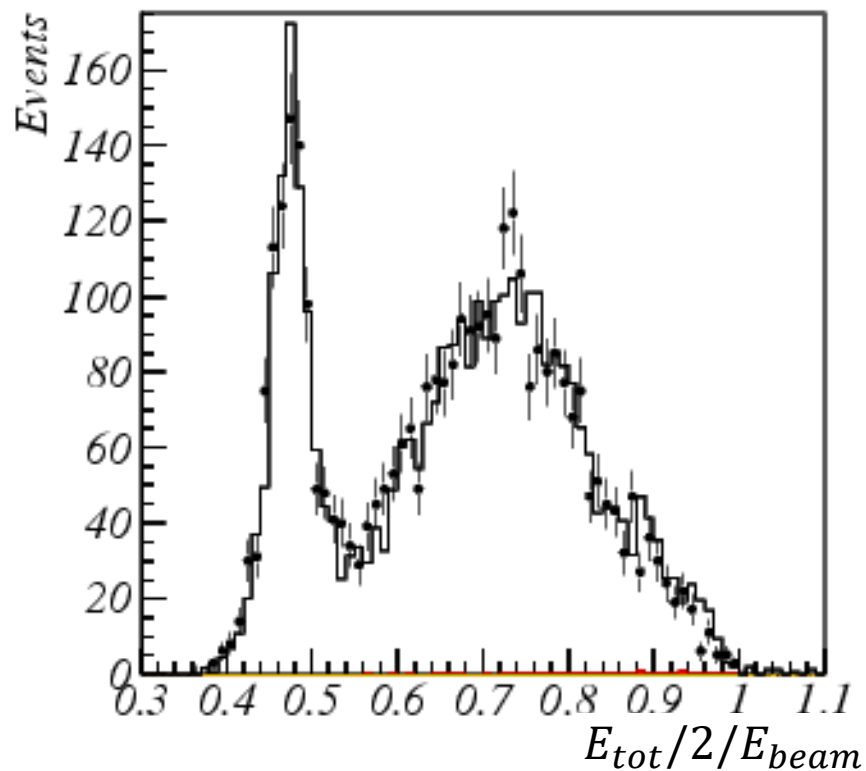


Рис. 15. Распределение событий по полному нормированному энерговыделению.

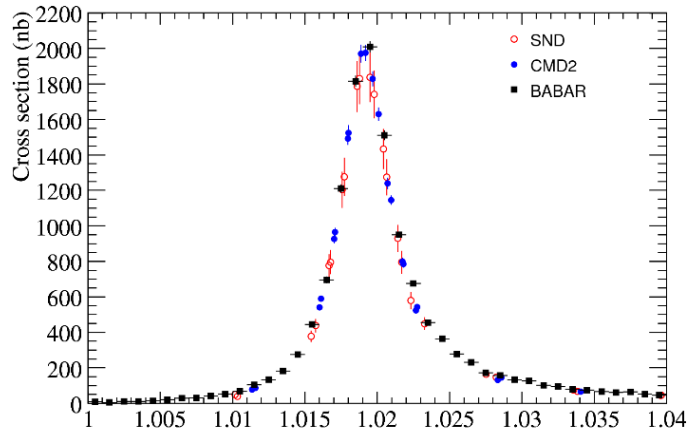
Рис. 16. распределение событий по полному нормированному импульсу.

## Заключение II

1. Измерена длина ядерного неупругого взаимодействия  $K_L$  мезона в NaI(Tl) области энергии  $K_L$  мезона от 510 до 690 МэВ
2. Полученные данные согласуются с расчетами выполненными программой расчета ядерных сечений SCATTER
3. Полученные данные не согласуются с расчетами программы GEANT4(v9.5)
4. Данные согласуются с расчетами основанными на результатах измерений на Ве детектора КМД-2 и Принстон-Пенсильванского ускорителя

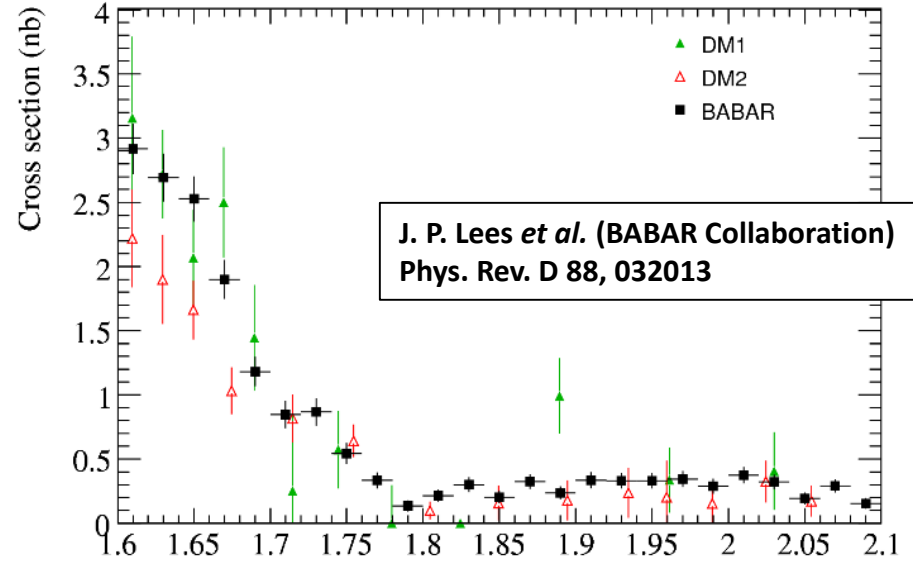
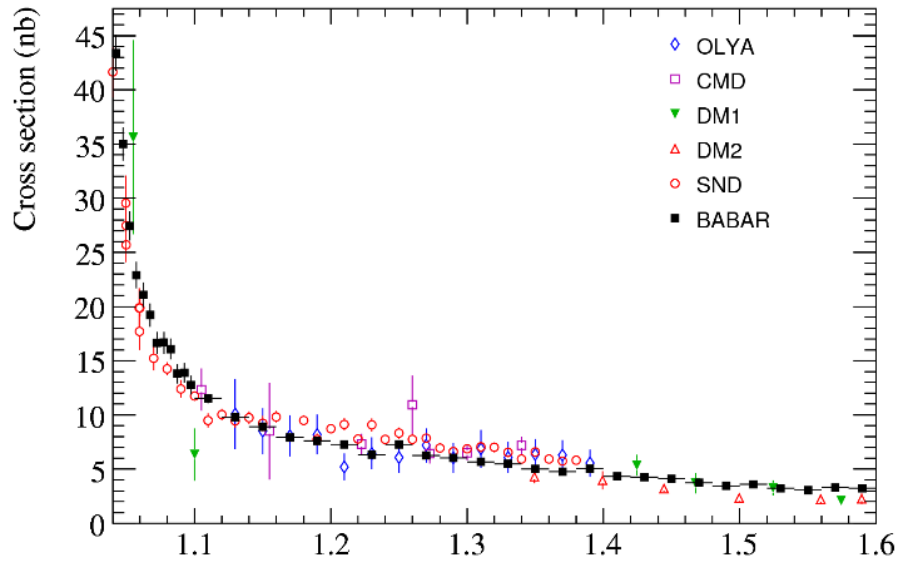
Измерение сечения процесса  
 $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$   
в диапазоне энергии от 1.05 до 2 ГэВ

# Цель измерения $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$ , предыдущие эксперименты



Цель измерения процесса  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$ :

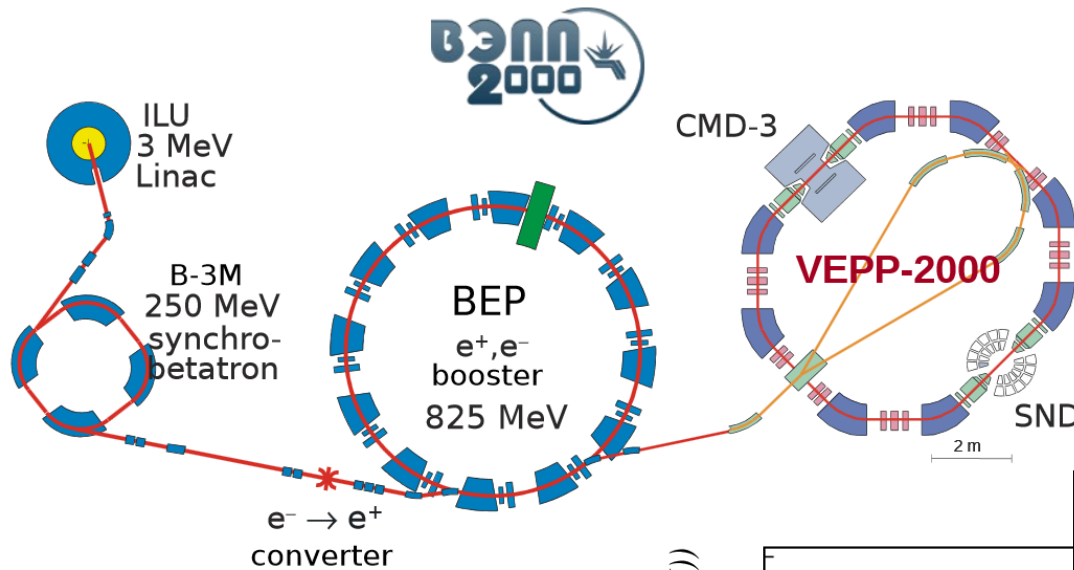
- Точное измерение сечения процесса:
  - Изучение возбужденных состояний  $\rho, \omega$  и  $\phi$
  - $(g-2)_\mu$  и  $\alpha_{em}$
  - Совместно с  $e^+e^- \rightarrow K_S K_L$ :
    - Тест CVC ( $\tau^- \rightarrow K^- K^0 \nu_\tau$ )
    - Разделение  $A(I=0)$  и  $A(I=1)$ :  $\gamma^* \rightarrow K \bar{K}$
- Проверка новых аэрогелевых счетчиков на каонах
  - Исследование других процессов с каонами



Диапазон по энергии



# ВЭПП-2000, эксперименты

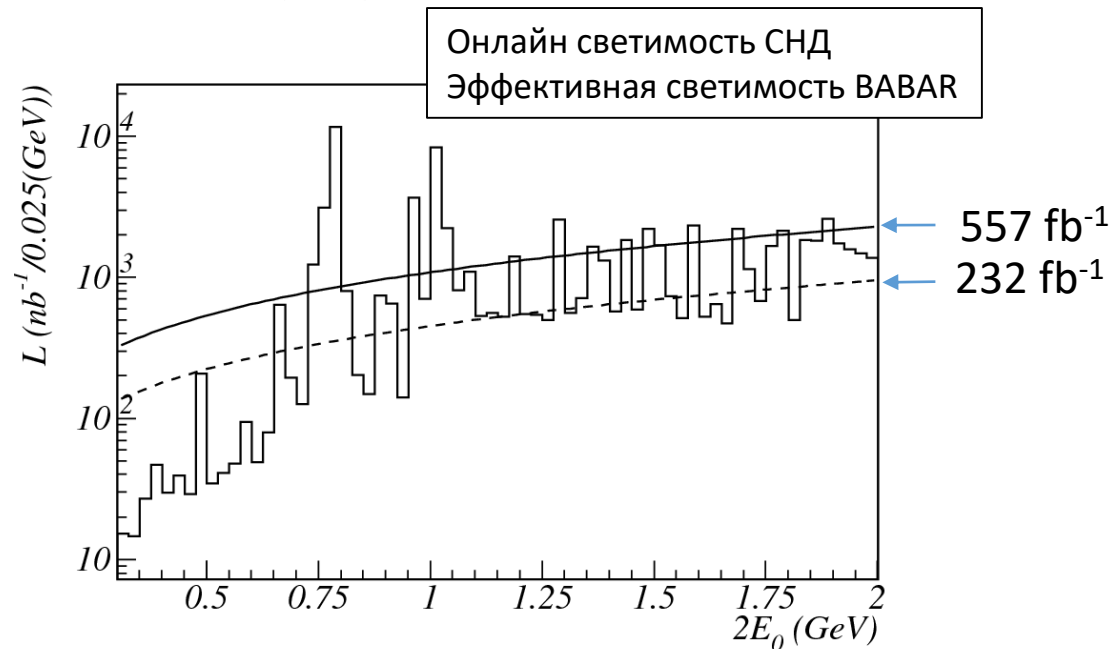


Максимальная энергия:  
 $\sqrt{s} = 2 \text{ ГэВ}$

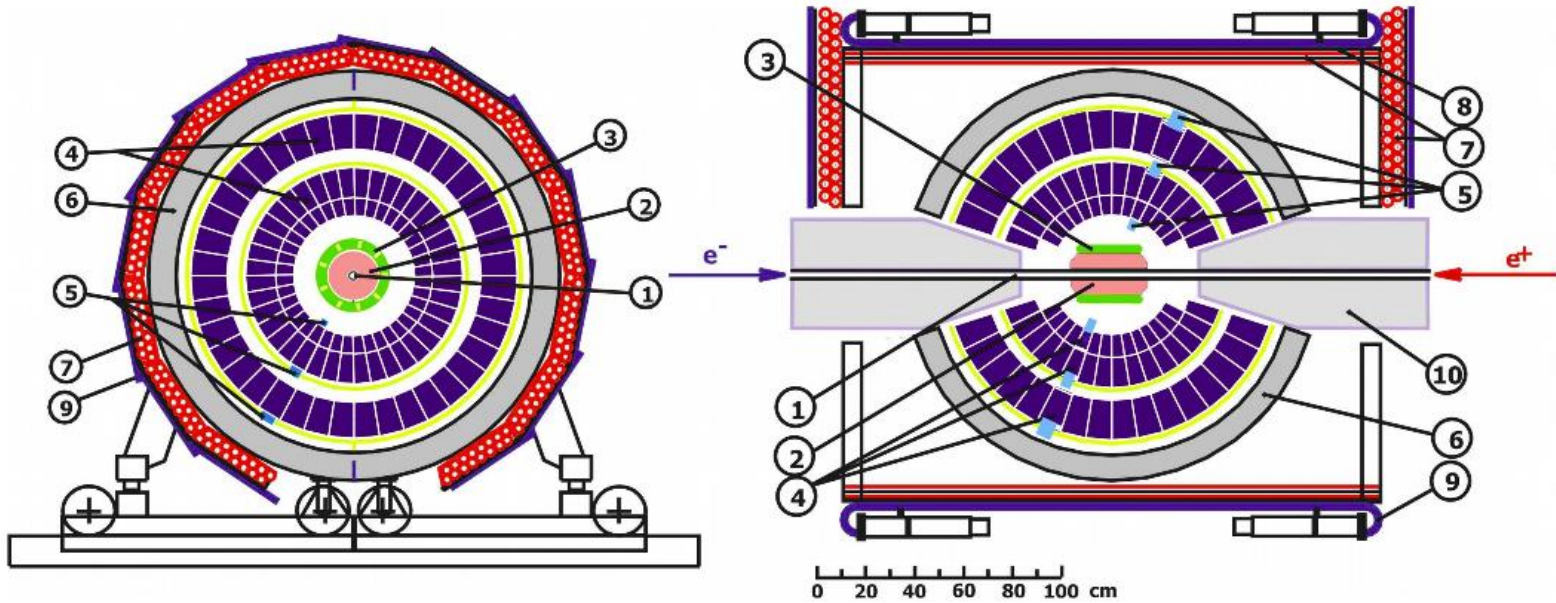
Достигнутая светимость:  
 $L = 2 \cdot 10^{31} \text{ 1/cm}^2\text{s}$  при  $\sqrt{s} = 2 \text{ ГэВ}$

Year	Energy(GeV)	L(pb <sup>-1</sup> ),SND
2010	1.05-2.0	5
2011	1.05-2.0	25
2012	1.05-2.0	17
2013	0.32-1.06	22
<b>Total</b>	<b>0.32-2.0</b>	<b>69</b>

$$IL \cong 35 \text{ пб}^{-1}$$



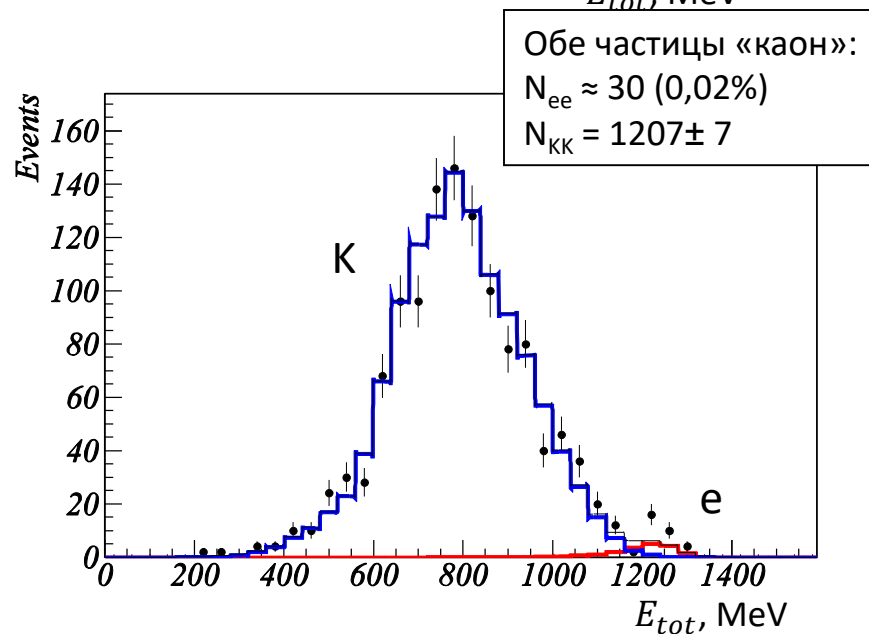
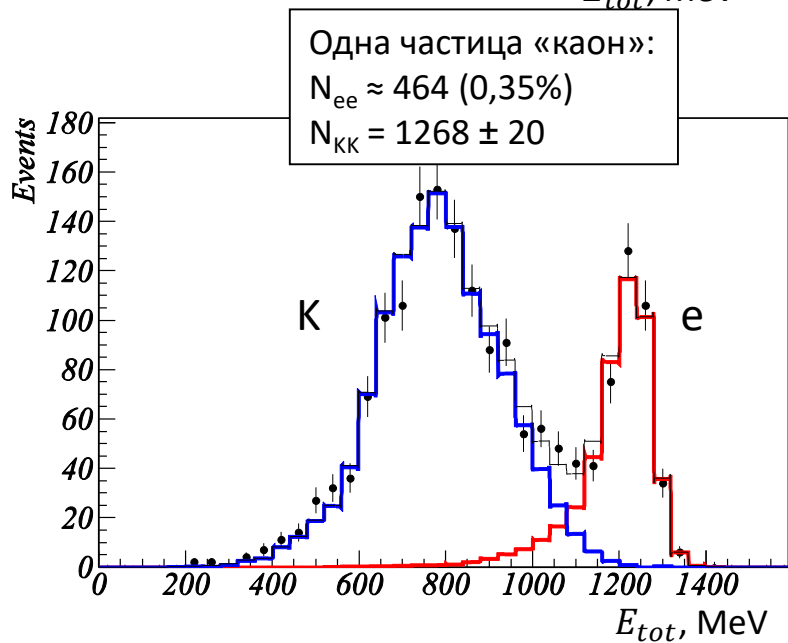
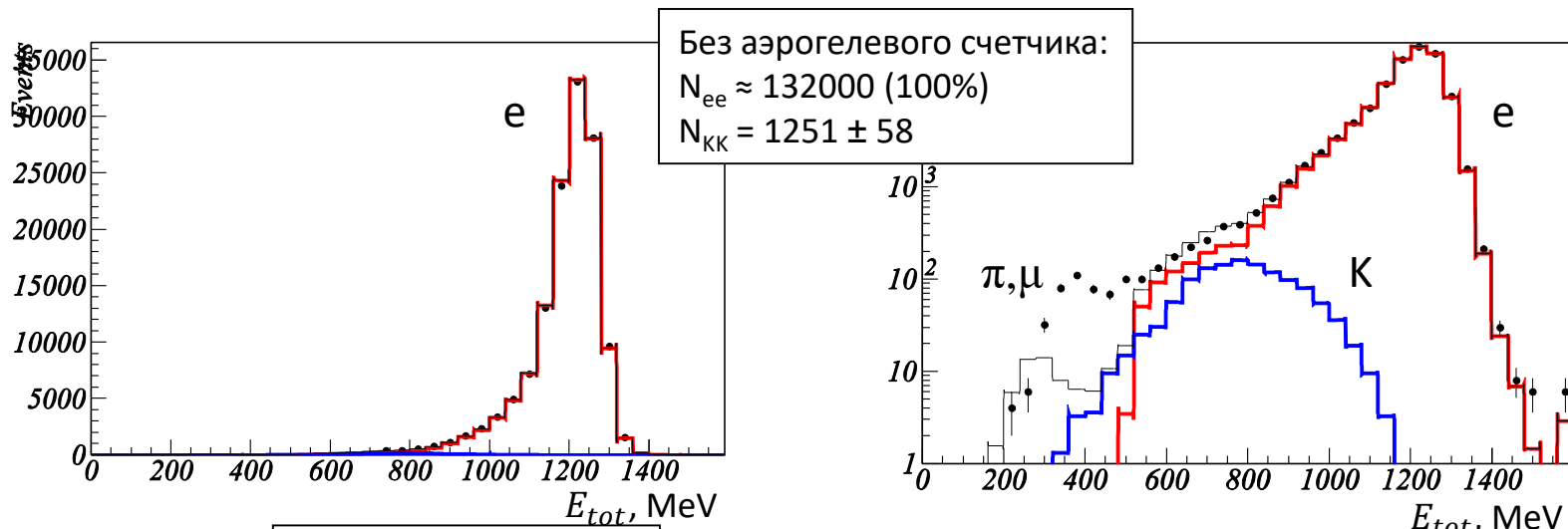
# СНД (обновленный)



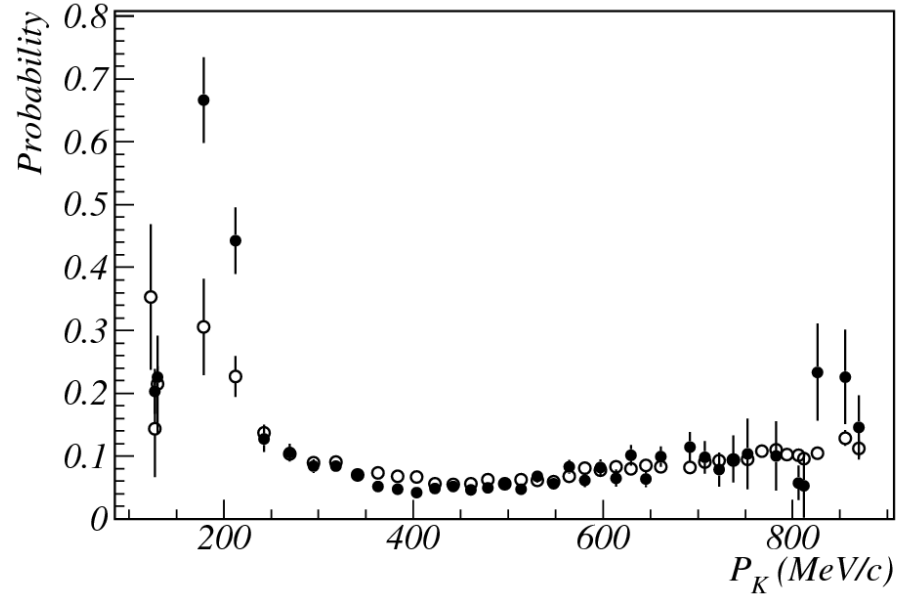
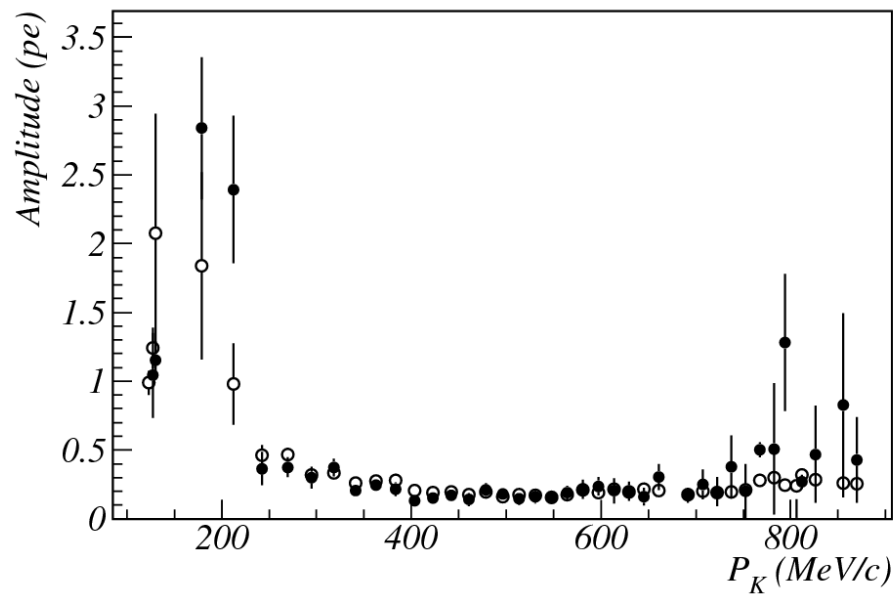
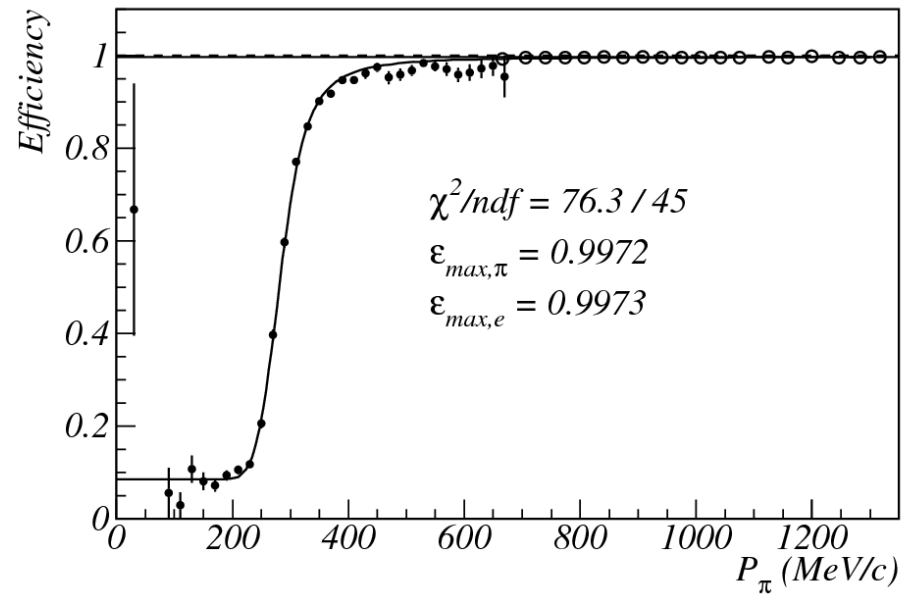
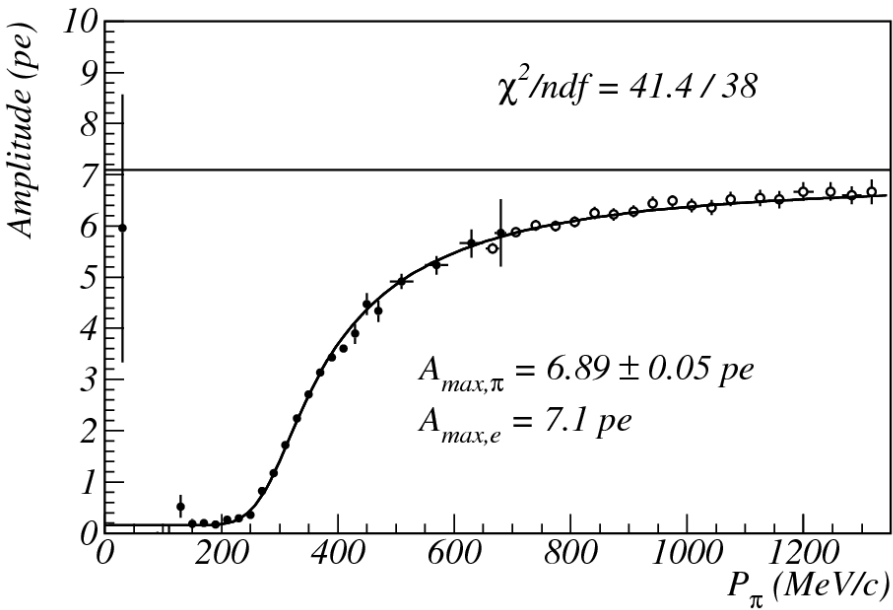
- 1 – вакуумная труба
- 2 – трековая система
- 3 – аэрогелевые счетчики
- 4 – кристаллы NaI(Tl)
- 5 – фототриоды
- 6 – мюонный поглотитель
- 7–9 – внешняя система
- 10 – фокусирующий соленоид

- Основные улучшения по сравнению с предыдущим СНД:
- новая система – черенковские счетчики ( $n=1.05, 1.13$ )  
 $e/\pi$  разделение  $E < 450$  MeV  
 $\pi/K$  разделение  $E < 1$  GeV
  - новая дрейфовая камера

# Тесты с аэрогелевым счетчиком (n=1.13) на экспериментальных событиях



# Регистрация $\pi$ и $K$



# Условия отбора

- число заряженных частиц:

$$n_c \geq 2$$

- пучковость:

$$|\Delta z_{12}| < 1 \text{ см}, |z_i| < 7 \text{ см}, |\rho_i| < 0.25 \text{ см}$$

- коллинеарность:

$$|\Delta\phi| < 10^\circ, |\Delta\theta| < 10^\circ \quad \text{для} \quad \sqrt{s} < 1,1 \text{ ГэВ}$$

$$|\Delta\phi| < 5^\circ, |\Delta\theta| < 7^\circ \quad \text{для} \quad \sqrt{s} \leq 1,2 \text{ ГэВ}$$

$$|\Delta\phi| < 3^\circ, |\Delta\theta| < 7^\circ \quad \text{для} \quad \sqrt{s} > 1,2 \text{ ГэВ}$$

Кинематические условия

- Одна из частиц «каон»

- Энерговыведение в камере:

$$(dE/dx)_1 + (dE/dx)_2 > 3 (dE/dx)_e \quad \text{для} \quad \sqrt{s} \leq 1,1 \text{ ГэВ}$$

$$(dE/dx)_1 + (dE/dx)_2 > 2,5 (dE/dx)_e \quad \text{для} \quad 1,1 < \sqrt{s} \leq 1,2 \text{ ГэВ}$$

$$(dE/dx)_{1||2} < 1,5 (dE/dx)_e \quad \text{для} \quad \sqrt{s} > 1,9 \text{ ГэВ}$$

Идентификационные условия

# Источники фонов

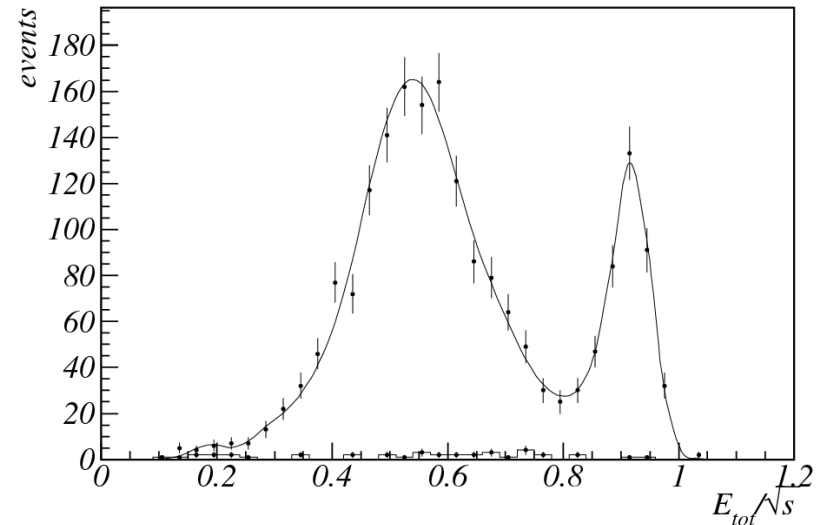
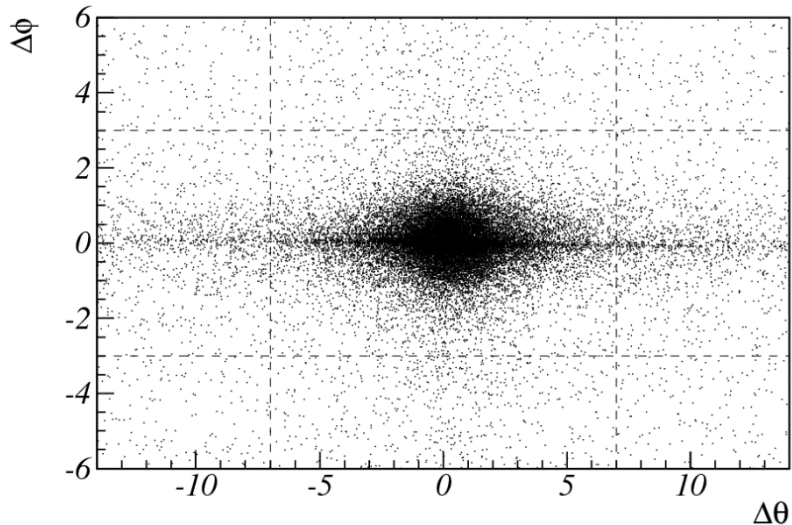
## 1. Коллинеарные фоны:

- Космические события
- Заряженные двух-частичные процессы ( $e^+e^-$ ,  $\mu^+\mu^-$ ,  $\pi^+\pi^-$ ,  $p^+p^-$ )

## 2. Неколлинеарные процессы:

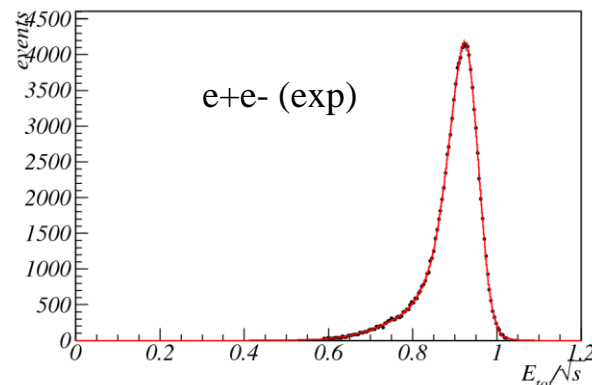
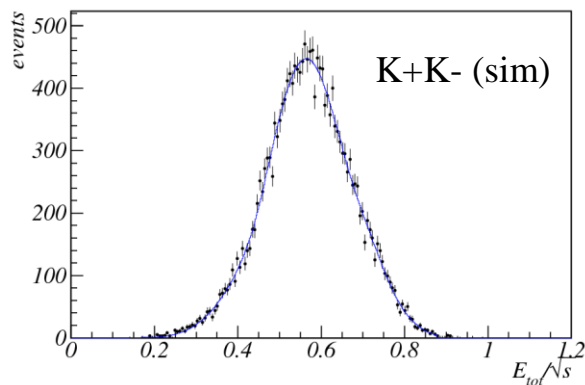
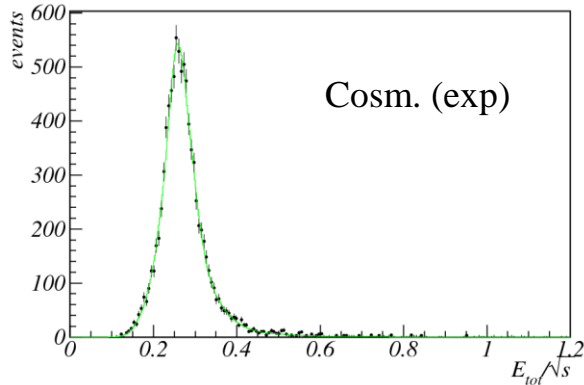
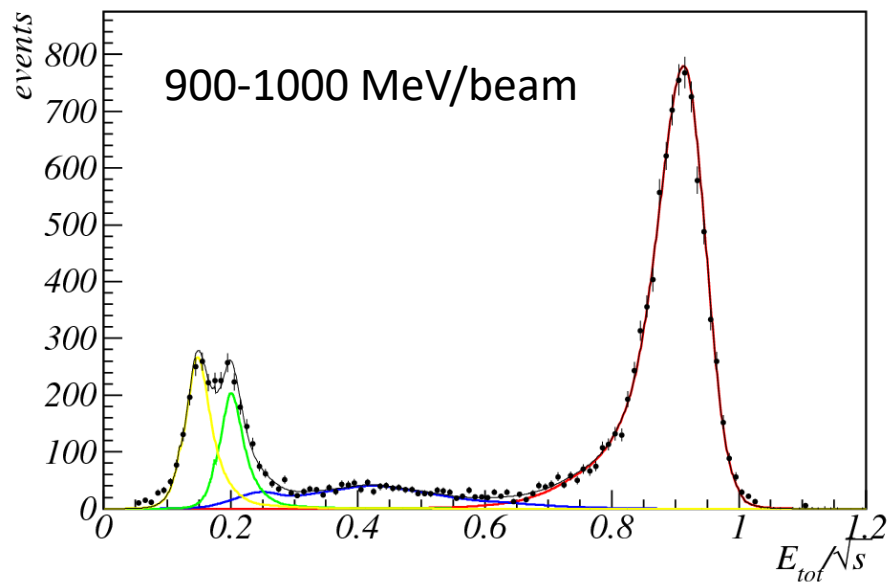
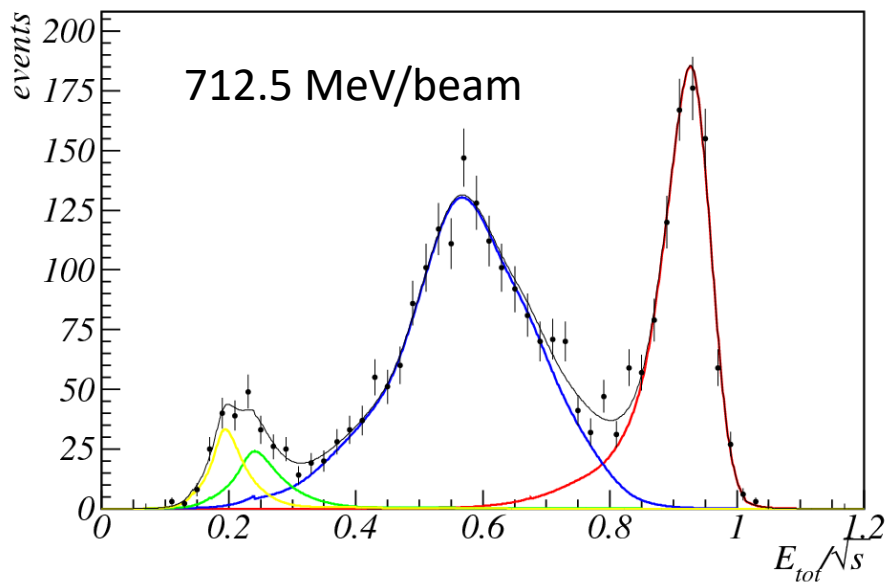
- Заряженные много-частичные процессы ( $\pi^+\pi^-\pi^0$ ,  $\pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ ,  $KK\pi$  etc.)
- Двух-фотонные процессы ( $e^+e^-$ ,  $\mu^+\mu^-$ ,  $\pi^+\pi^-$ )

# Вычитание неколлинеарного фона



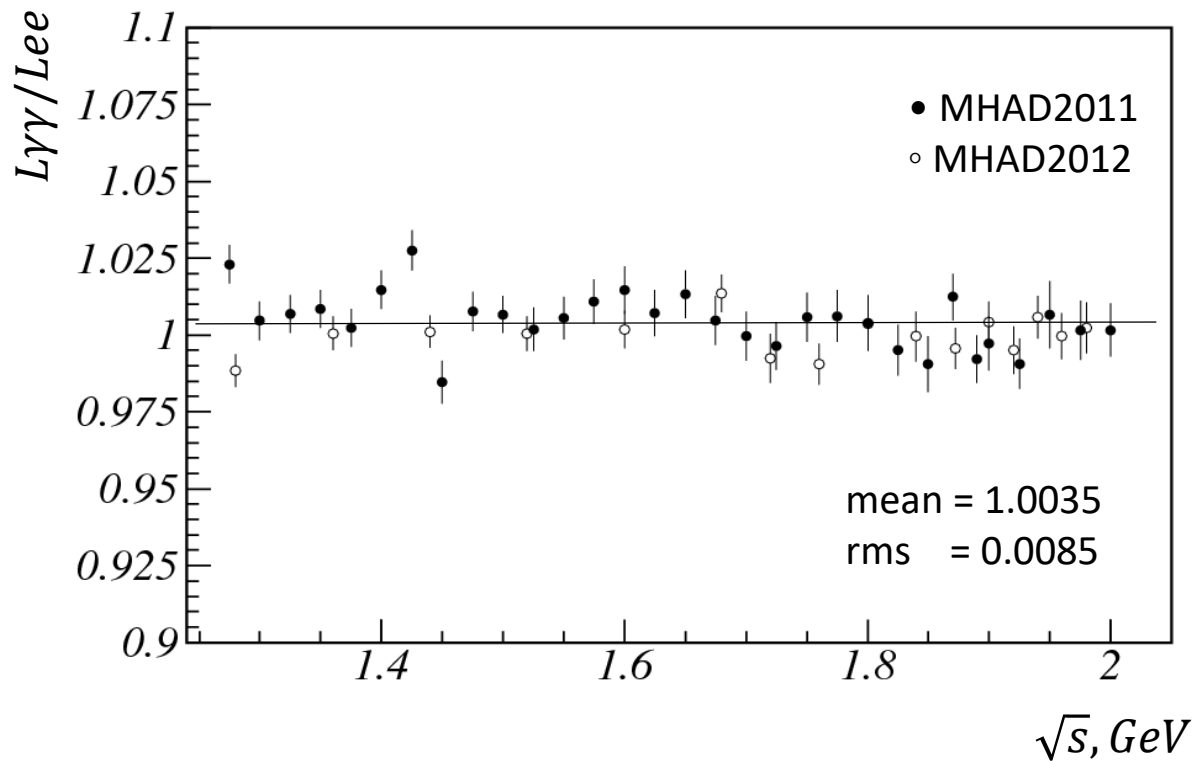
- Вклад неколлинеарного фона оценивался по угловым областям
- Коэффициент пересчета определялся по моделированию процессов  $e+e^- \rightarrow 3\pi, 4\pi, K+K-\pi^0, K+K-\eta$
- Коэффициент равен единице с точностью 10%
- Для дальнейших вычислений данный фон вычитался из распределения  $E_{tot}/\sqrt{s}$

# Вычитание коллинеарного фона





# Светимость



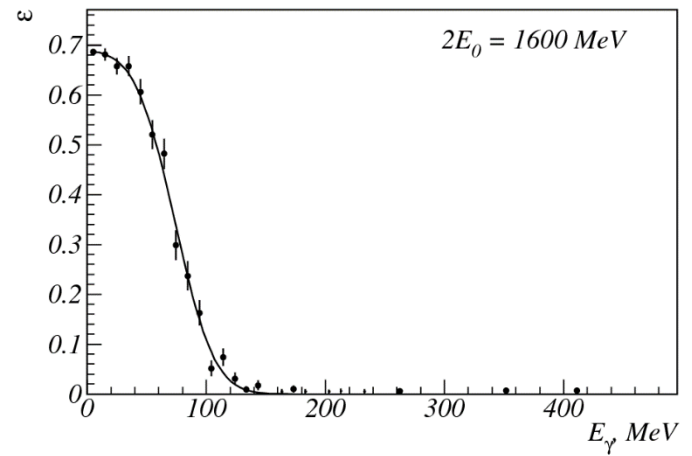
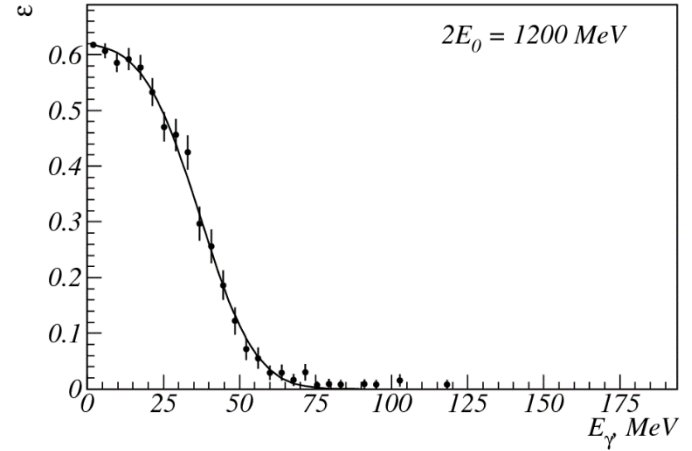
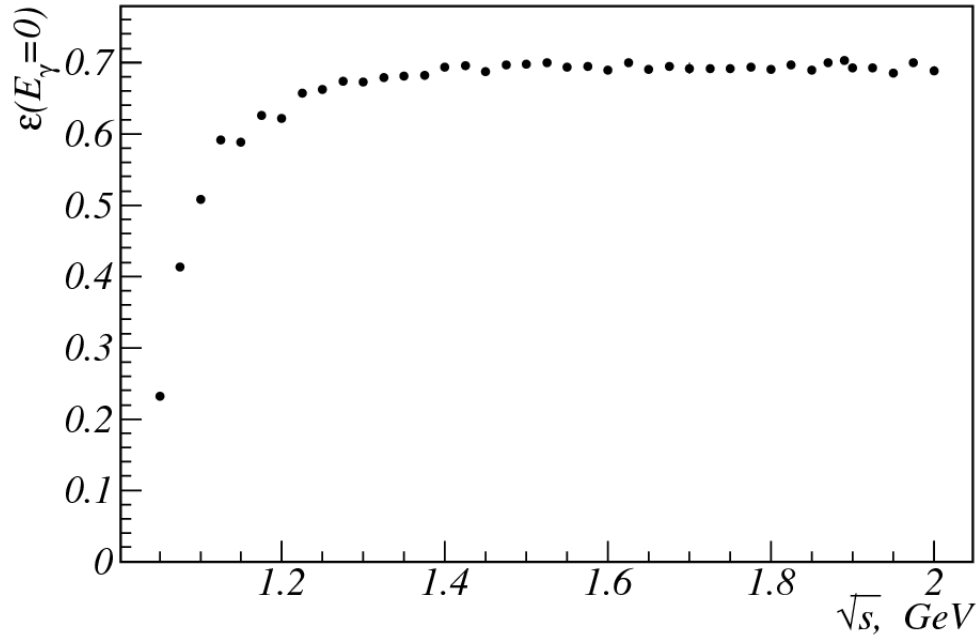
Светимость определялась по процессам:

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

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

Отношение близко к 1

# Эффективность отбора



# Поправки к эффективности

Кинематические условия

Идентификация каонов

Геометрические

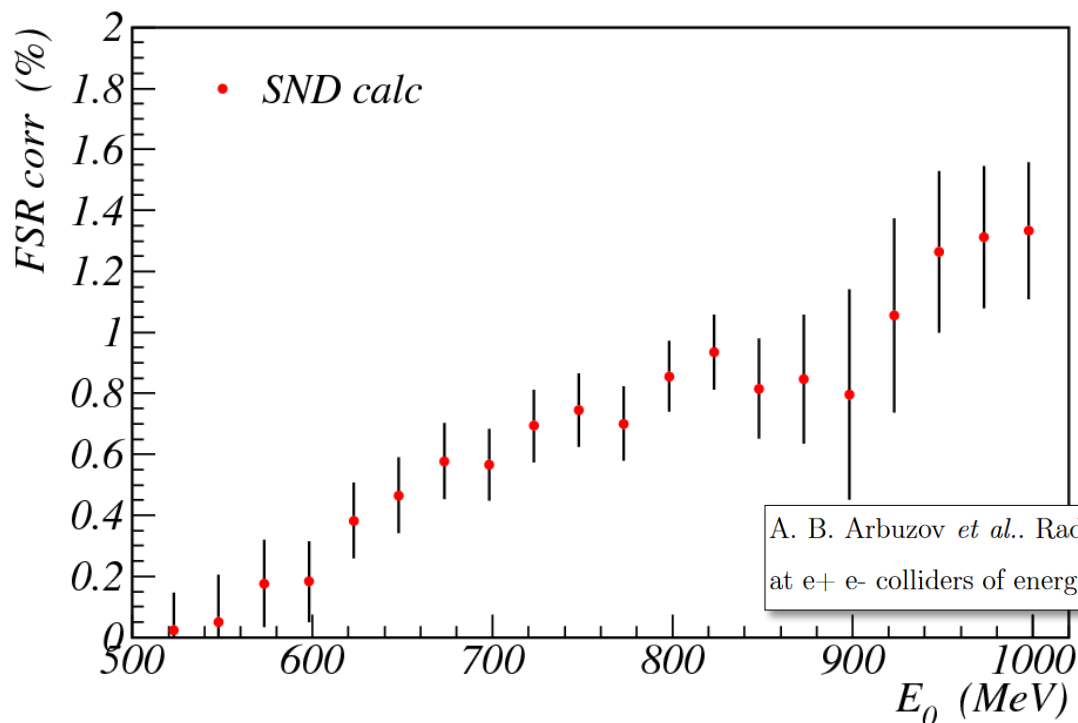
$$c_{kin} = 1.008 \pm 0.002$$

$$c_{id} = 1.003 \pm 0.007 \text{ (2011)}$$

$$c_{id} = 1.004 \pm 0.012 \text{ (2012)}$$

$$c_{geo} = 1.0017 \pm 0.0004 \text{ (2011)}$$

$$c_{geo} = 0.9974 \pm 0.0007 \text{ (2012)}$$

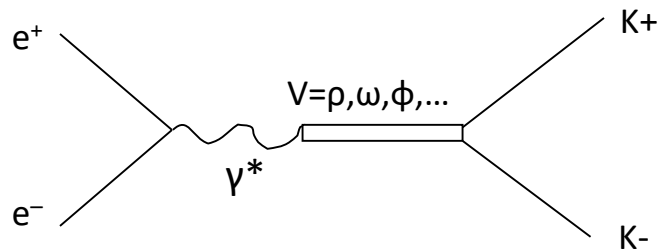


Излучение в  
конечном состоянии  
(FSR)

A. B. Arbuzov *et al.*. Radiative corrections for pion and kaon production at  $e^+ e^-$  colliders of energies below 2-GeV // JHEP **9710**, 006 (1997)

# Аппроксимация данных: модель

## Модель векторной доминантности



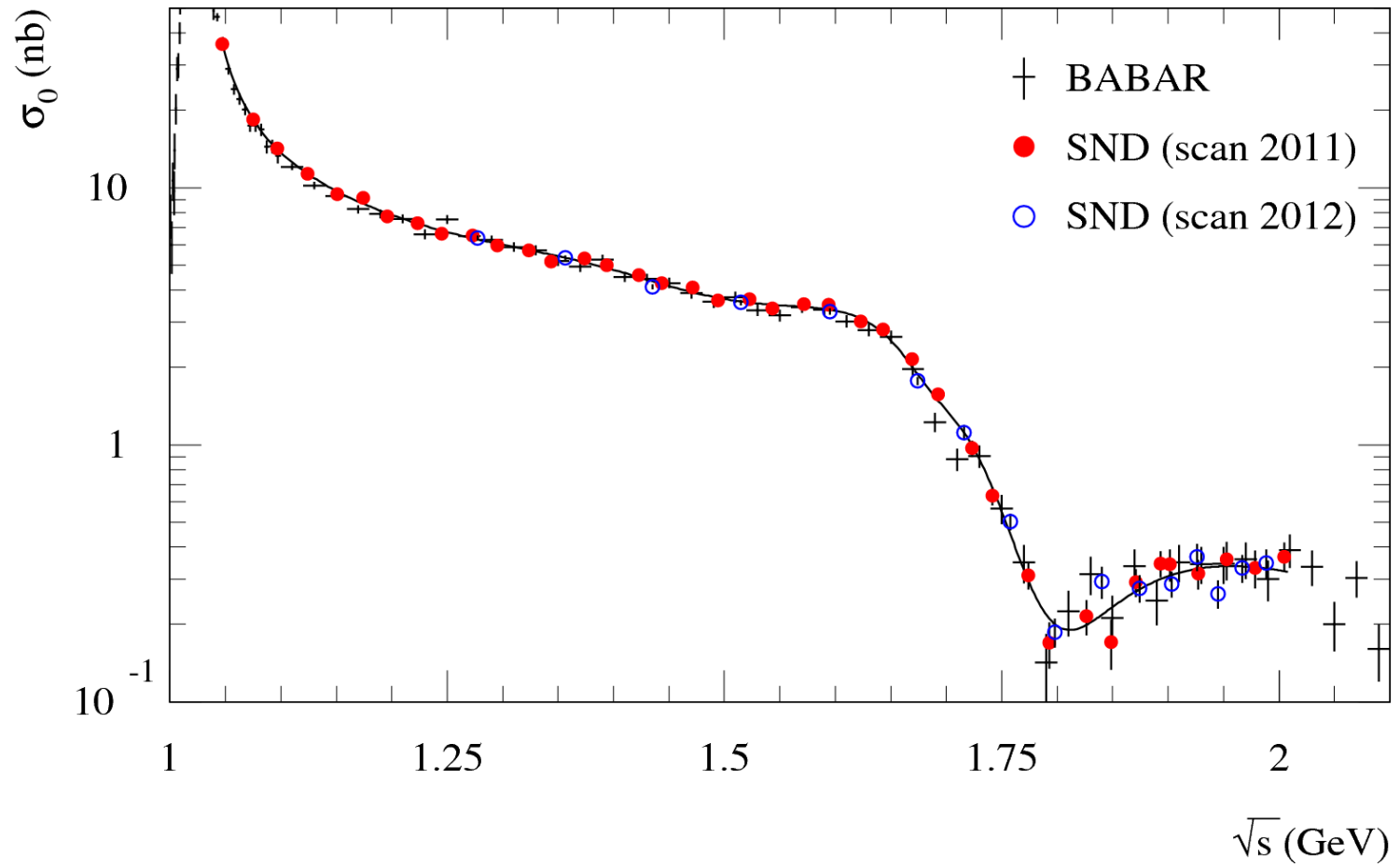
$$\sigma_0(s) = \frac{\pi\alpha^2\beta^3}{3s} |F_K(s)|^2 (1 + C_{FS})$$

$$J^{PC}=1^{--}$$

$n^{2S+1}l_J$	I=1	I=0	I=0
$1^3S_1$	$\rho(770)$	$\phi(1020)$	$\omega(783)$
$1^3D_1$	$\rho(1700)$	—	$\omega(1650)$
$2^3S_1$	$\rho(1450)$	$\phi(1680)$	$\omega(1420)$

$$\sigma_{vis}(\sqrt{s}) = \int_0^{z_{max}} dz \sigma_0(\sqrt{s(1-z)}) F(z, s) \varepsilon(\sqrt{s}, z)$$

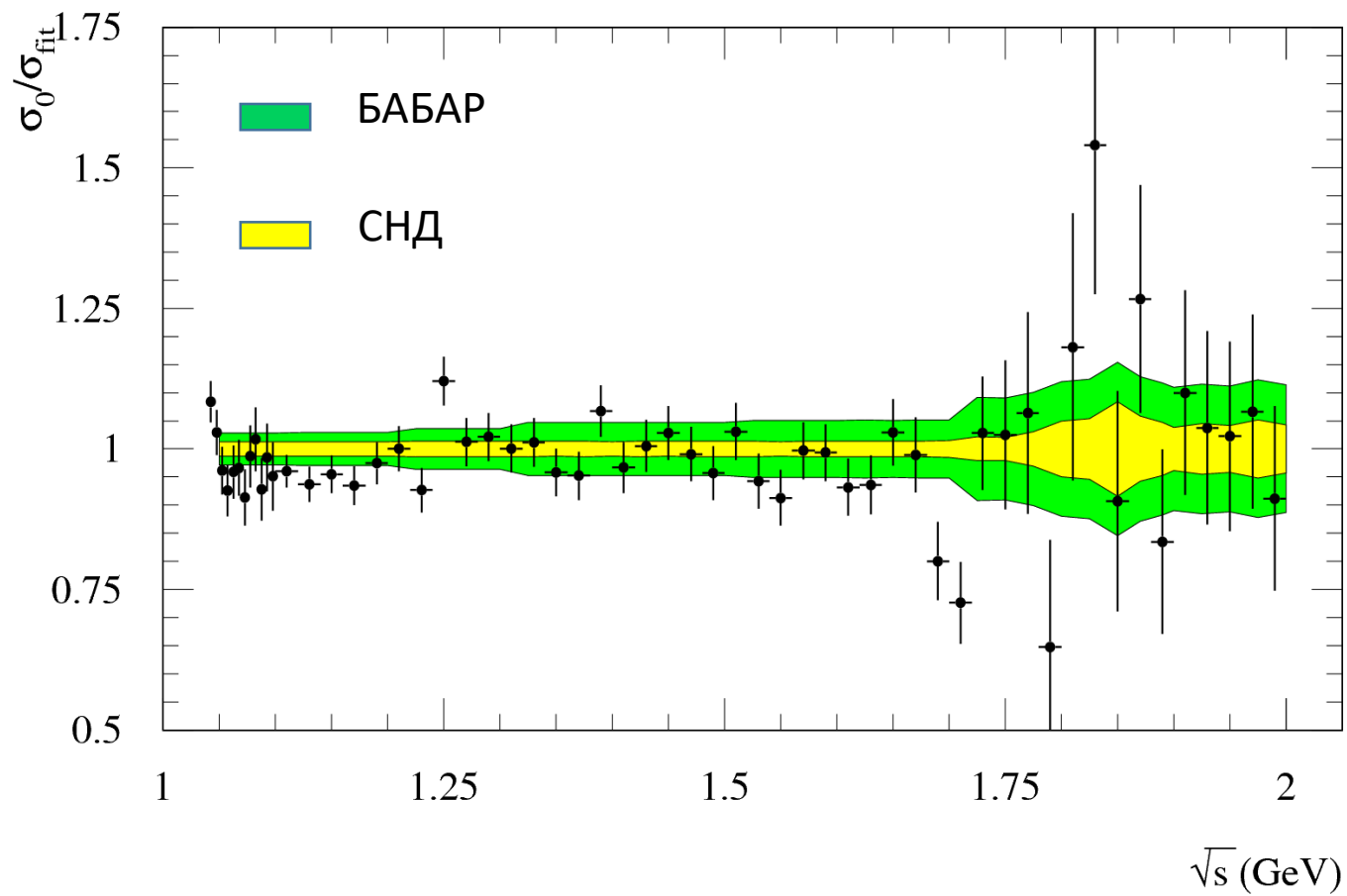
# Борновское сечение



# Систематика

Источник	2011		2012	
	2E < 1.8 GeV	2E > 1.8 GeV	2E < 1.8 GeV	2E > 1.8 GeV
Светимость	1 %	1 %	1 %	1 %
Условия отбора	0.7 %	0.7 %	1.2 %	1.2 %
Вычитание фона	0.7 %	4.1 %	0.7 %	4.1 %
Ядерное взаимодействие	0.1 %	0.1 %	0.1 %	0.1 %
Рад. поправка	0.1 %	0.1 %	0.1 %	0.1 %
Общая	1.4 %	4.3 %	1.7 %	4.4 %

# Систематика



# Заключение III

- ✓ Измерено сечение процесса  $e+e- \rightarrow K+K-$
- ✓ Сечение  $e+e- \rightarrow K+K-$  не противоречит прецизионному измерению на детекторе BABAR, имеет сравнимую или лучшую точность
- ✓ Система идентификации на основе аэрогелевых счетчиков готова к использованию в анализе данных
- ✓ Система идентификации используется для анализа других процессов, содержащих заряженные каоны



# Основные положения, выносимые на защиту

1. В эксперименте с детектором СНД на  $e^+e^-$  коллайдере ВЭПП-2М измерено сечение процесса  $e^+e^- \rightarrow K_S K_L$  в области энергий в системе центра масс от 1.04 ГэВ до 1.38 ГэВ. Несмотря на то, что измерение сделано 10 лет назад, оно не уступает по точности более поздним измерениям.
2. В эксперименте с детектором СНД на  $e^+e^-$  коллайдере ВЭПП-2000 измерено сечение процесса  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$  в области энергий в системе центра масс от 1.05 ГэВ до 2.0 ГэВ. На сегодняшний день это самое точное измерение сечения  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$  в указанной области энергий.
3. В эксперименте с детектором СНД на  $e^+e^-$  коллайдере ВЭПП-2М измерена длина неупругого ядерного взаимодействия  $K_L$  мезона в NaI(Tl) в диапазоне энергий  $K_L$  мезона от 510 МэВ до 690 МэВ. Это первое измерение энергетической зависимости неупругой ядерной длины  $K_L$  мезона при низких энергиях.

## Публикации по теме:

- 1) M.N. Achasov, ..., K.I. Beloborodov et al.  
Experimental Study of the Reaction  $e^+e^- \rightarrow K_S K_L$  in the Energy Range  $\sqrt{s} = 1.04$  GeV. J. Exp. Theor. Phys. **103** 720 (2006).
- 2) M.N. Achasov, ..., K.I. Beloborodov et al.  
Measurement of the  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$  cross section in the energy range  $\sqrt{s} = 1.05 - 2.0$  GeV. Phys. Rev. D **94**, 112006 (2016).
- 3) M.N. Achasov, ..., K.I. Beloborodov et al.  
Measurement of the  $K_L$  nuclear interaction length in the NaI(Tl) calorimeter. JINST **10**, P09006 (2015).
- 4) M.N. Achasov, ..., K.I. Beloborodov et al.  
Proc. of the Int. Workshop “ $e^+e^-$  Collisions from  $\phi$  to  $J/\psi$ ”. Novosibirsk, 1999, p. 196.
- 5) K.I. Beloborodov.  
Experimental study of the  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$  process cross section with the SND detector at the VEPP-2000  $e^+e^-$  collider. Journal of University of Science and Technology of China, **46**, 279 (2016).
- 6) K. I. Beloborodov et al.  
CVC test in  $e^+e^- \rightarrow K\bar{K}$  and  $\tau^- \rightarrow K^- K^0 \nu_\tau$  processes. Nucl. Phys. Proc. Suppl. **181-182**, 306 (2008).