



Объединенный институт ядерных исследований

Степаненко Юрий Юрьевич

Методы увеличения эффективности  
регистрации редкого распада  $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \tilde{\nu}$   
в эксперименте E391a

По материалам диссертации на соискание ученой степени  
Кандидата физико-математических наук  
Специальность: 01.04.16 – Физика ядра и элементарных частиц

Научный руководитель:  
д. ф.-м. н. Русакович Н. А.

# Распад $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$

- Доминирует механизм прямого CP-нарушения
  - Вклад косвенного CP-нарушения  $\approx 10^{-3}$
- Вероятность распада связана с параметром  $\eta$  матрицы ККМ

$$Br(K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) \propto \eta^2$$

$$V_{CKM} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \lambda^2/2 & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \lambda^2/2 & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix} + O(\lambda^4)$$

- Теоретическая неопределенность ( $\approx 1-2\%$ )
  - Проверка параметров Стандартной Модели
  - Поиск проявлений Новой Физики

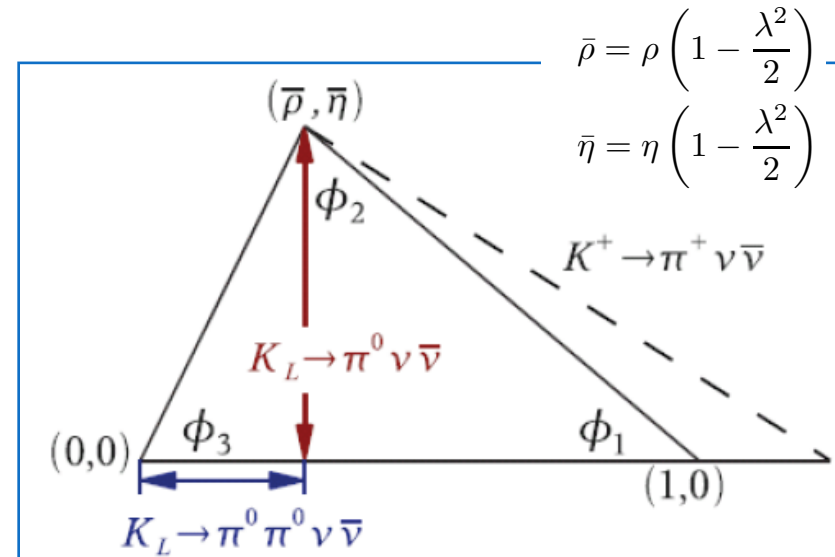
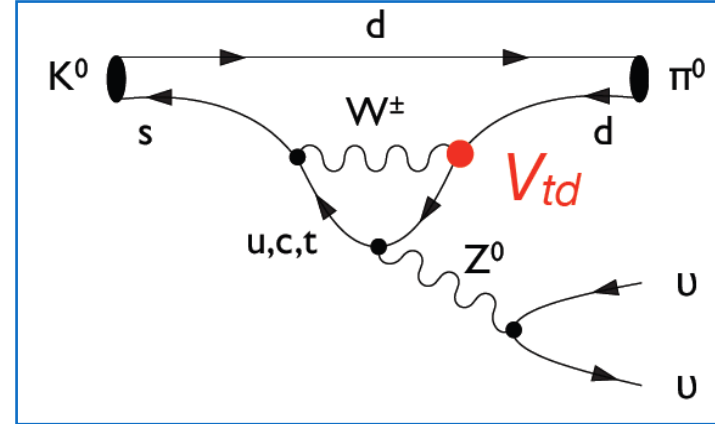
- Ультраредкий распад в СМ:

$$Br(K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) = (3.00 \pm 0.30) \times 10^{-11}$$

- Экспериментальное ограничение:

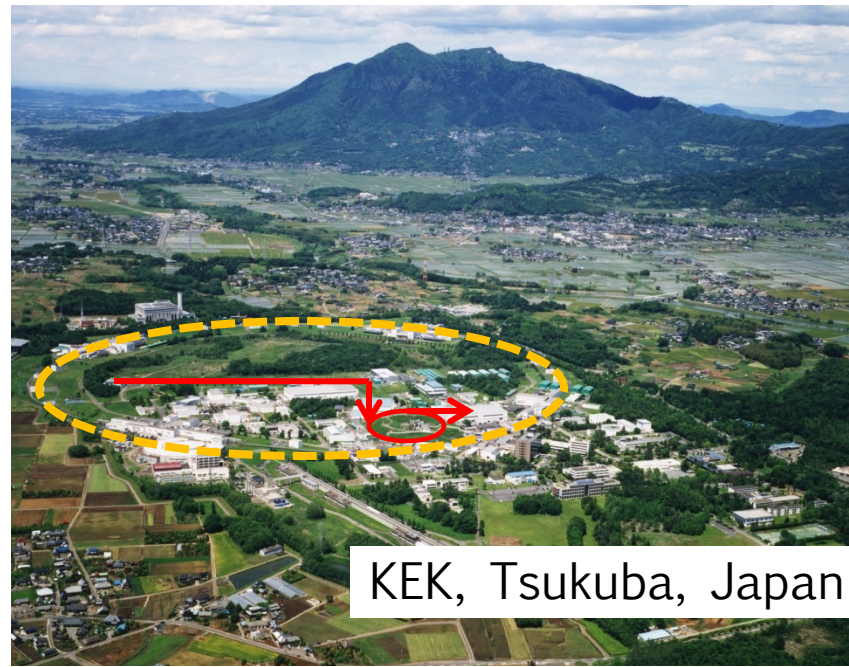
$$Br(K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) < 3 \times 10^{-9} \text{ (90\% C.L.)}$$

(J-PARC, KOTO, January 2019)

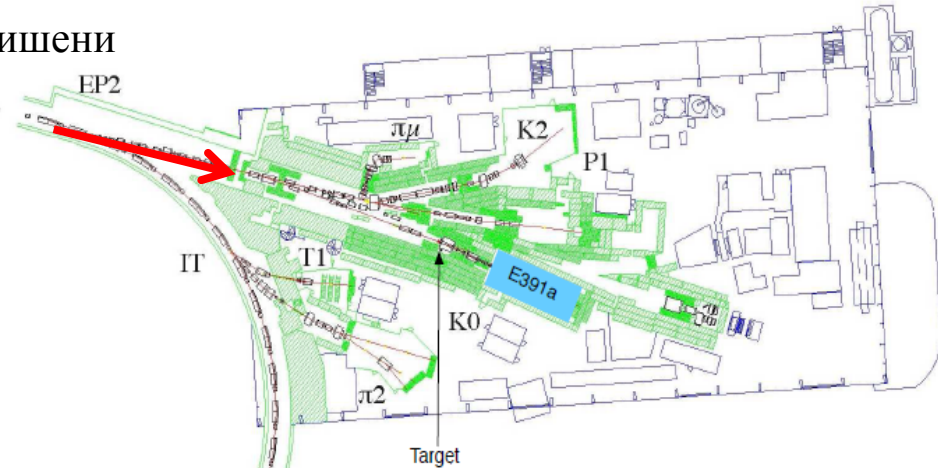


# Эксперимент E391a (КЕК)

- Первый в мире эксперимент посвященный определению  $Br(K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu})$ 
  - Пилотный эксперимент для КОТО (J-PARC)
- КЕК 12GeV Протонный синхротрон
  - Платиновая мишень (Pt) длиной 60мм,  $\varnothing$  8мм
  - $2.5 \times 10^{12}$  протонов на мишень (POT) 2 с/spill 4 с. цикл. (медленный сброс)
  - Система коллимации вторичного пучка (10 м)
  - Узкоколлимированный пучок  $K_L^0$  (~18 м от мишени  $\sigma = 40$  мм)
  - Максимальная интенсивность  $K_L^0$  в области импульса 2 ГэВ/с ( $n/K_L^0 \sim 40$ )



КЕК, Tsukuba, Japan



## Сеансы набора данных

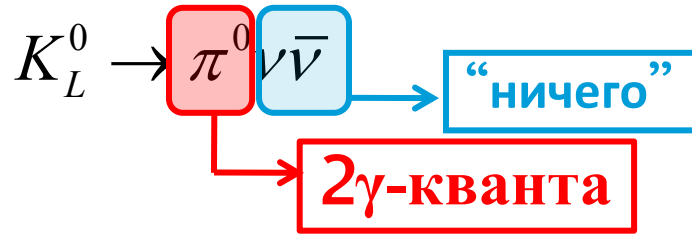
Run-I	Period Total protons Remarks	Feb. 2004 to June. 2004 $2.1 \times 10^{18}$ Membrane problem
Run-II	Period Total protons Remarks	Feb. 2005 to Apr. 2005 $1.4 \times 10^{18}$ Be absorber
Run-III	Period Total protons Remarks	Oct. 2005 to Dec. 2005 $1.2 \times 10^{18}$ New BA, Additional photon counter

$$Br(K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) < 2.6 \times 10^{-8} \text{ (90\% C.L.)}$$

Финальный результат E391a (2010)

# Метод регистрации $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ в эксперименте

- Идентификация



- “2γ-кванта + ничего”

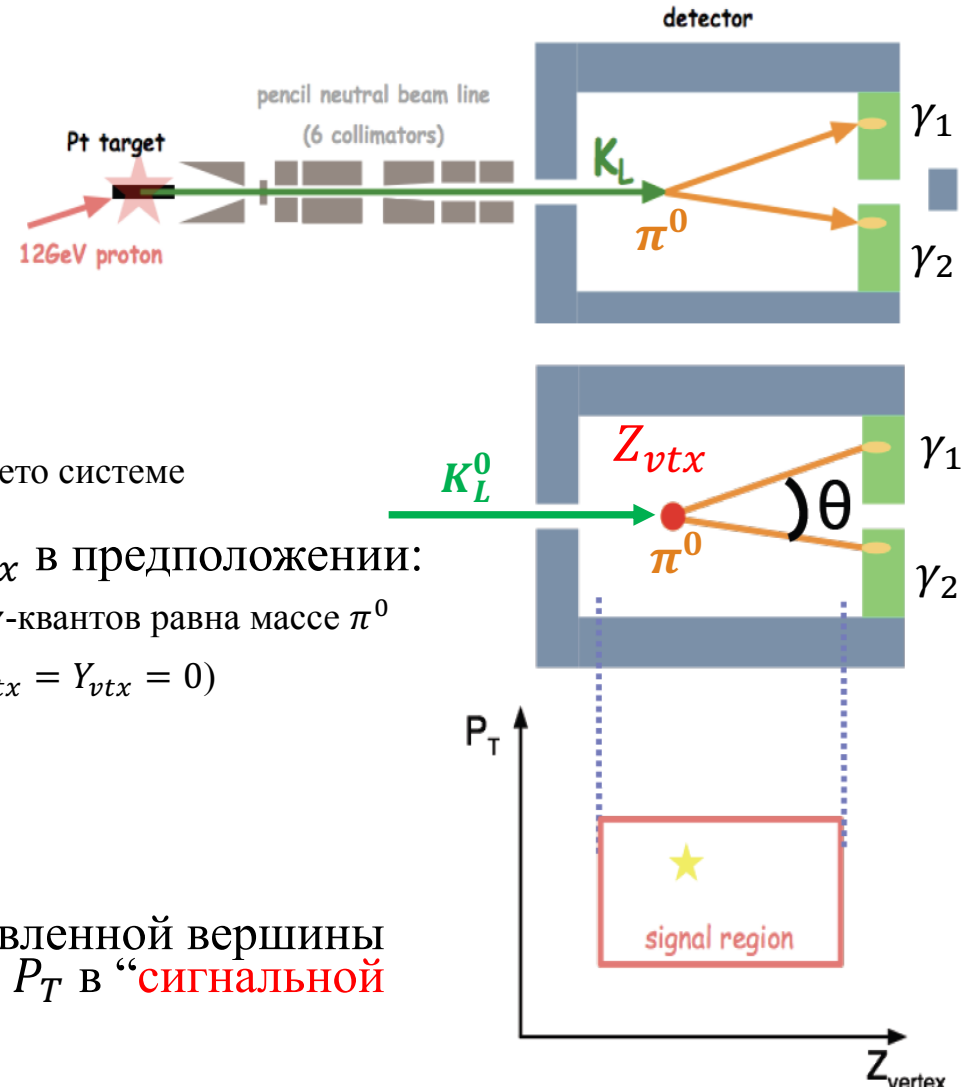
- 2γ – регистрируются CsI калориметром (E, x, y)
- “ничего” – отсутствие сигнала в герметичной вето системе

- Восстановление вершины распада  $Z_{vtx}$  в предположении:

- инвариантная масса двух зарегистрированных γ-квантов равна массе  $\pi^0$
- вершина распада расположена на оси пучка ( $X_{vtx} = Y_{vtx} = 0$ )

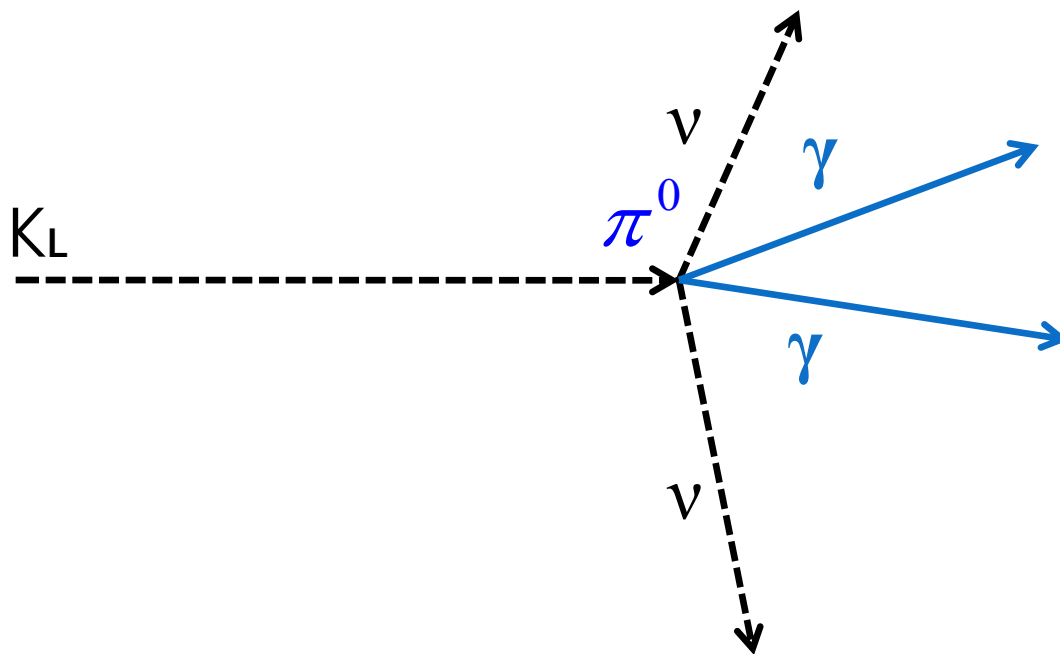
$$\cos \theta = 1 - \frac{M_{\pi^0}^2}{2E_1 E_2}$$

- Отбор событий по наличию восстановленной вершины распада  $Z_{vtx}$  и поперечного импульса  $P_T$  в “сигнальной области”



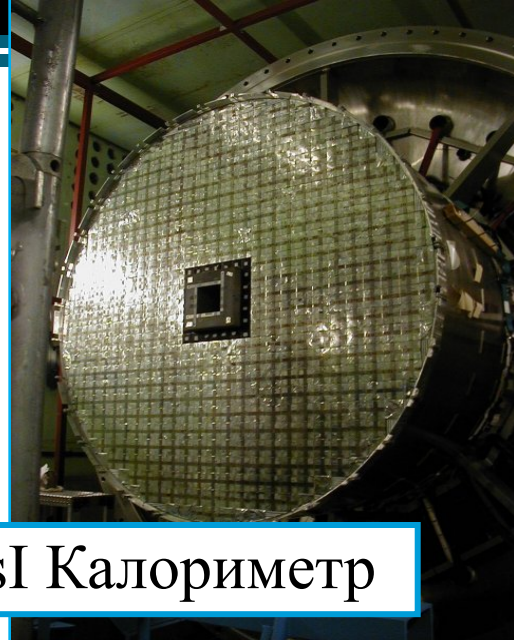


# Установка E391a

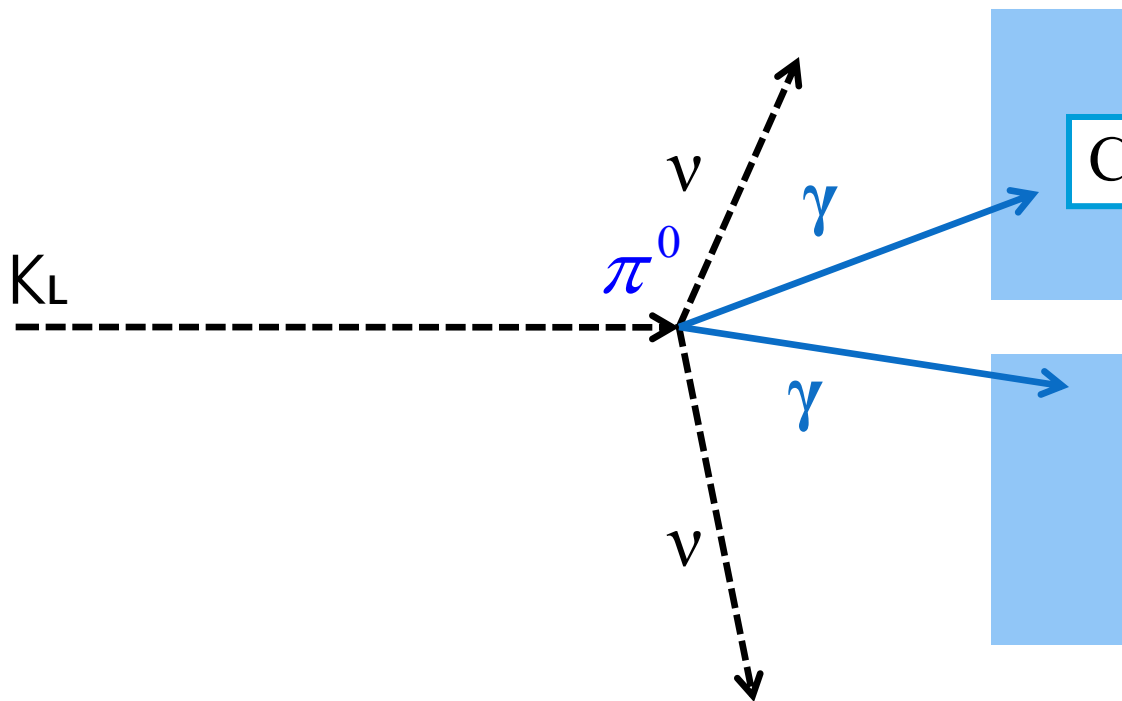


# Установка E391a

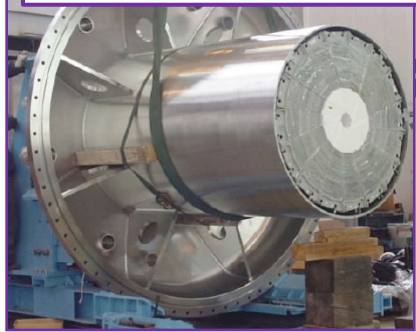
576 кристаллов CsI  
7x7x30cm  
(5x5x50cm)



CsI Калориметр



Передний Баррель



а E391а

576 кристаллов CsI  
7x7x30см  
(5x5x50см)

Главный Баррель

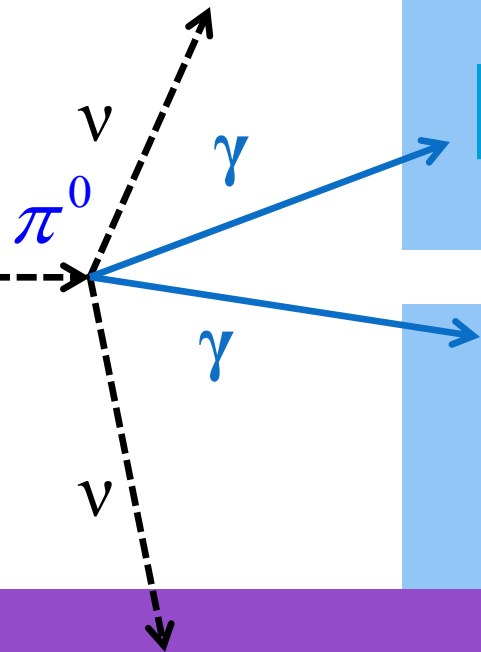
Передний баррель

$K_L$

CsI Калориметр

Beam  
Anti

Фотонная вето система



Главный Баррель

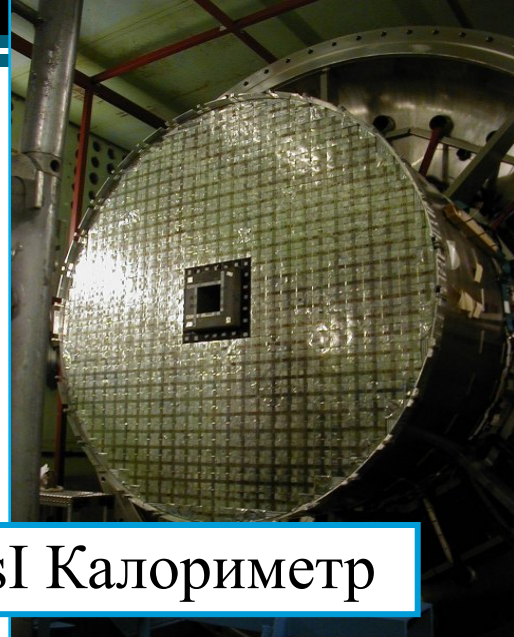
Передний Баррель



а E391а

576 кристаллов CsI  
7x7x30см  
(5x5x50см)

Главный Баррель



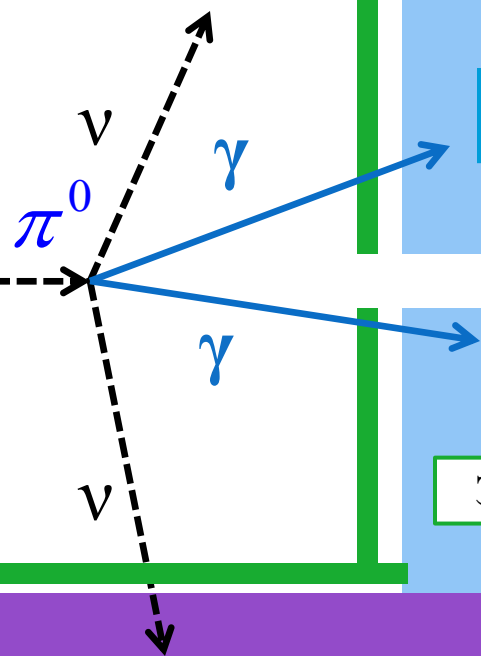
CsI Калориметр

Передний баррель

$K_L$

Beam  
Anti

Фотонная вето система

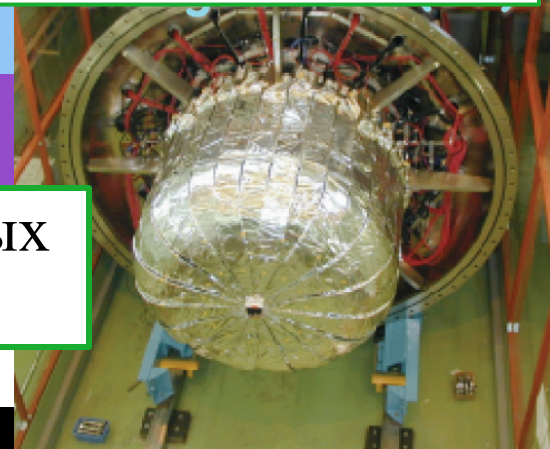


Заряженное вето калориметра

Вето заряженных  
частиц



Главный Баррель



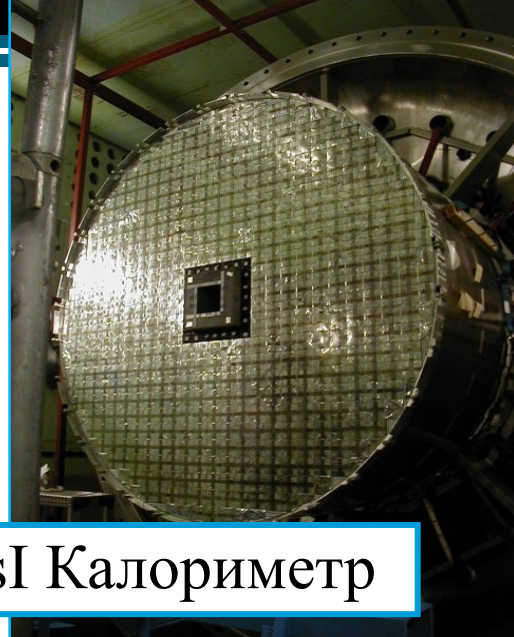


Передний Баррель



а E391а

576 кристаллов CsI  
7x7x30cm  
(5x5x50cm)



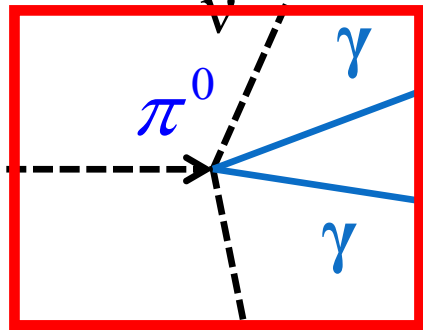
CsI Калориметр

Beam  
Anti

Сигнальная область  
в плоскости  $(Z_{vtx}, P_T)$

Передний баррель

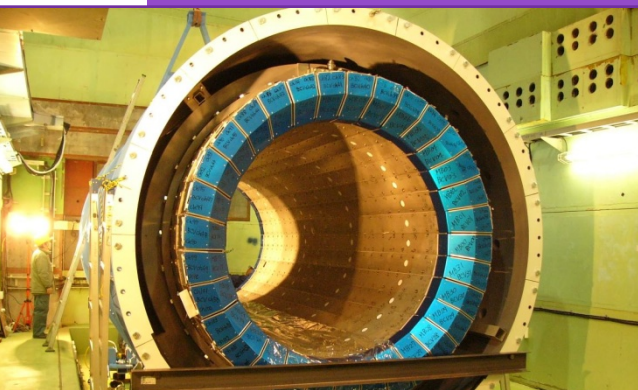
$K_L$



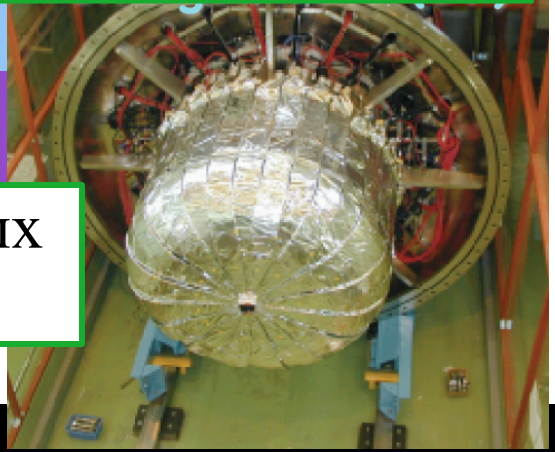
Заряженное вето калориметра

Вето заряженных  
частиц

Фотонная вето система

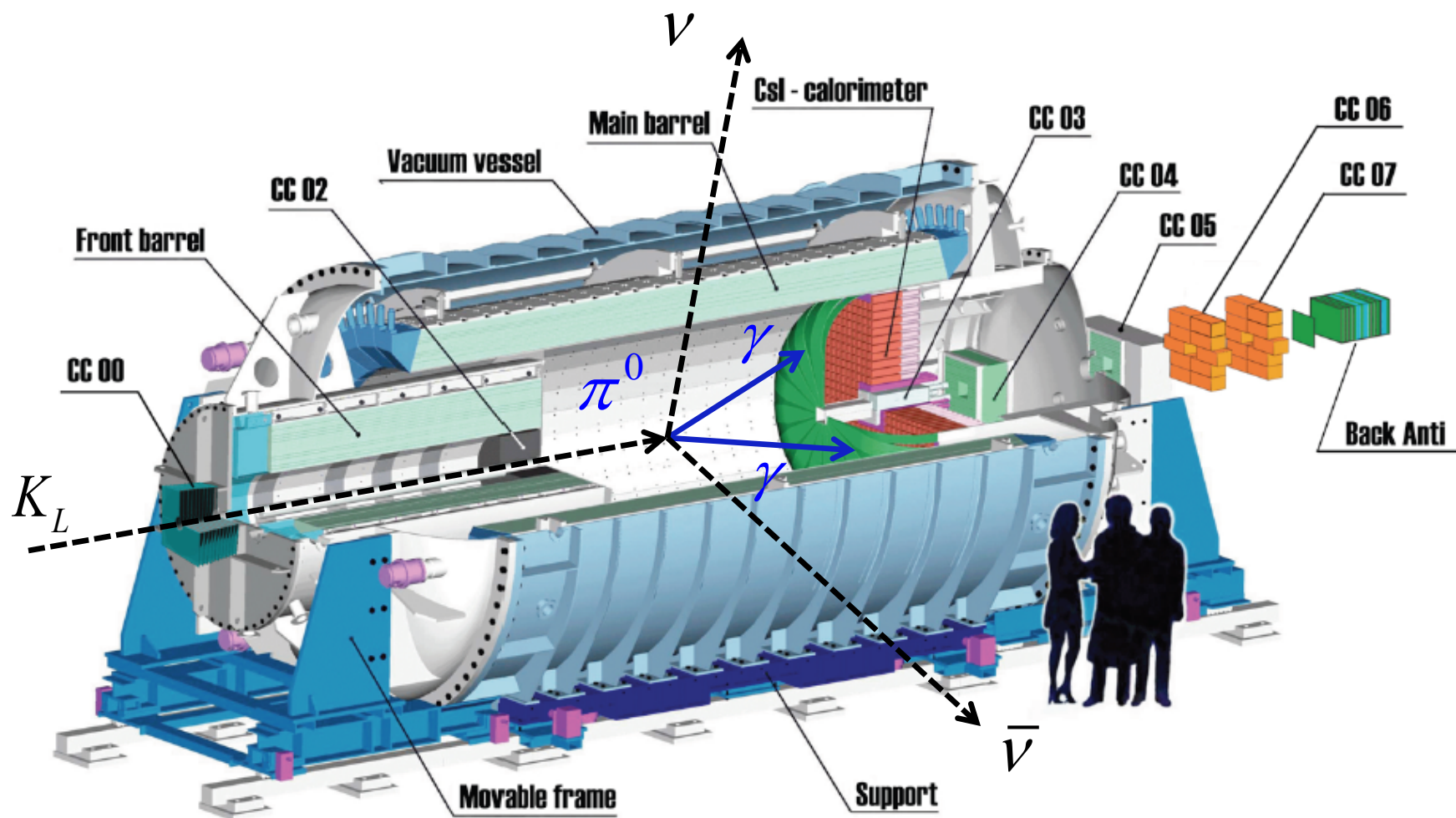


Главный Баррель



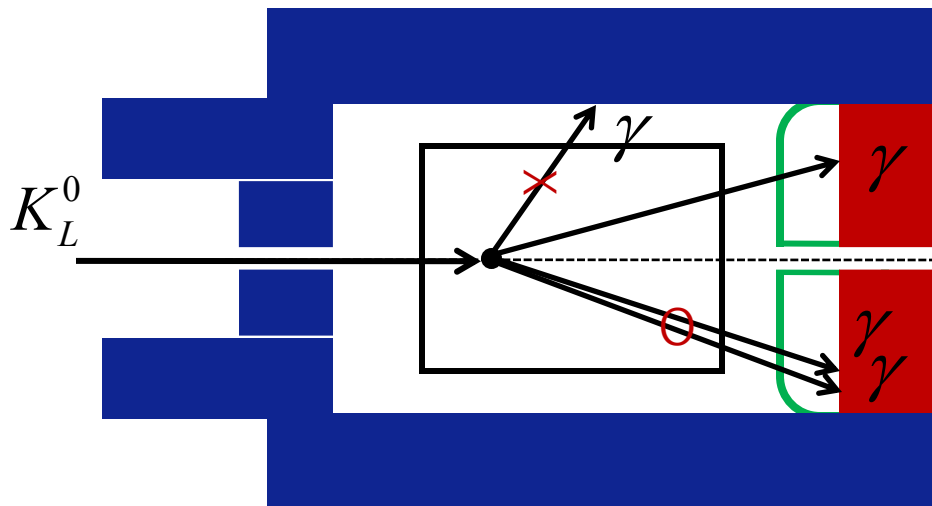
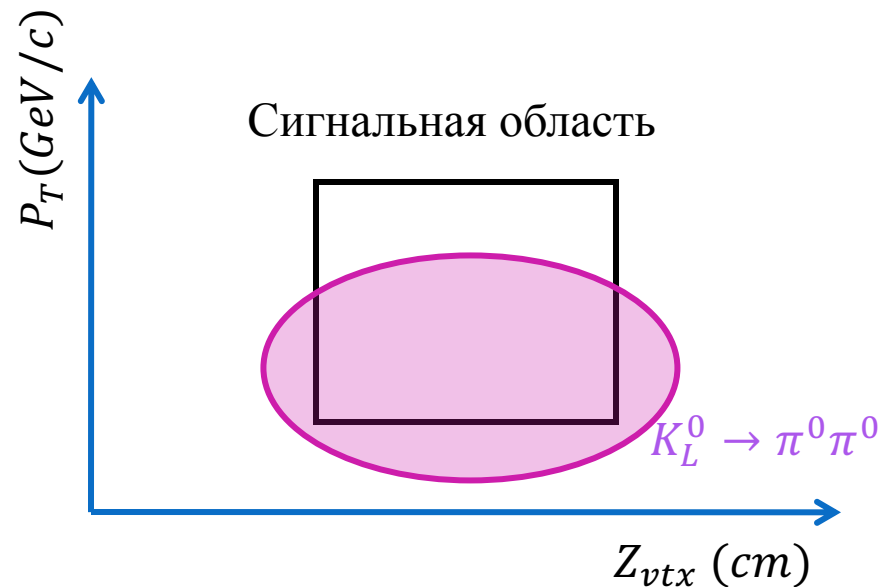


# Установка E391a



# Основные источники фоновых событий

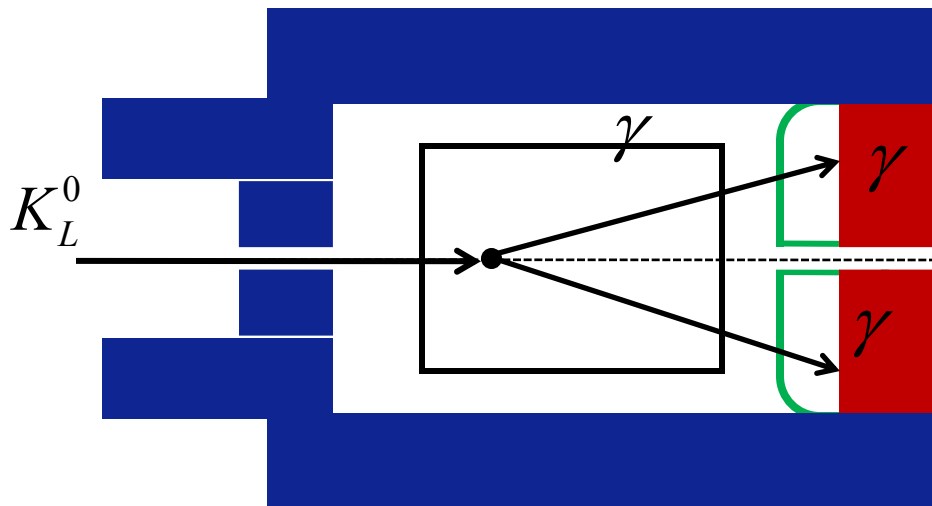
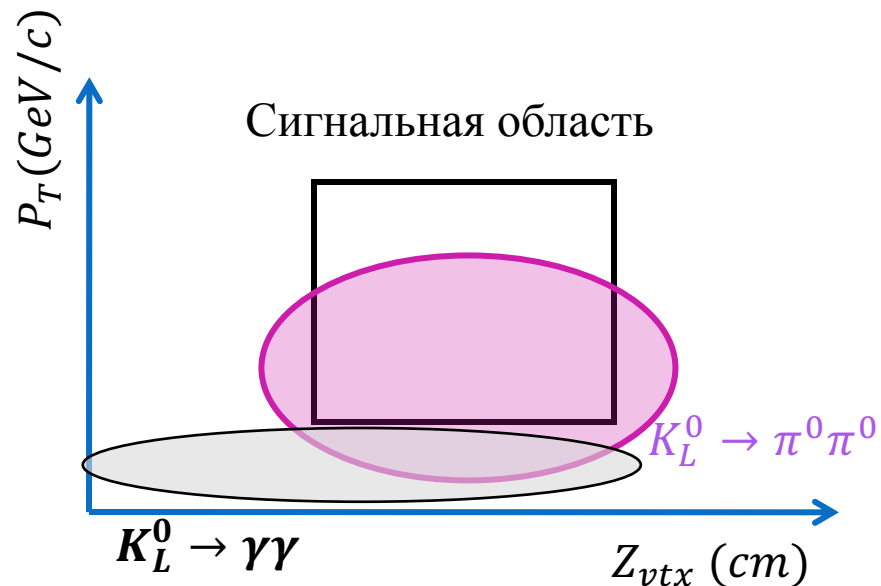
- Распады  $K_L^0$ 
  - $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0$ 
    - $2\gamma$  не зарегистрированы



$$\cos \theta = 1 - \frac{M(\pi^0)^2}{2E_1 E_2}$$

# Основные источники фоновых событий

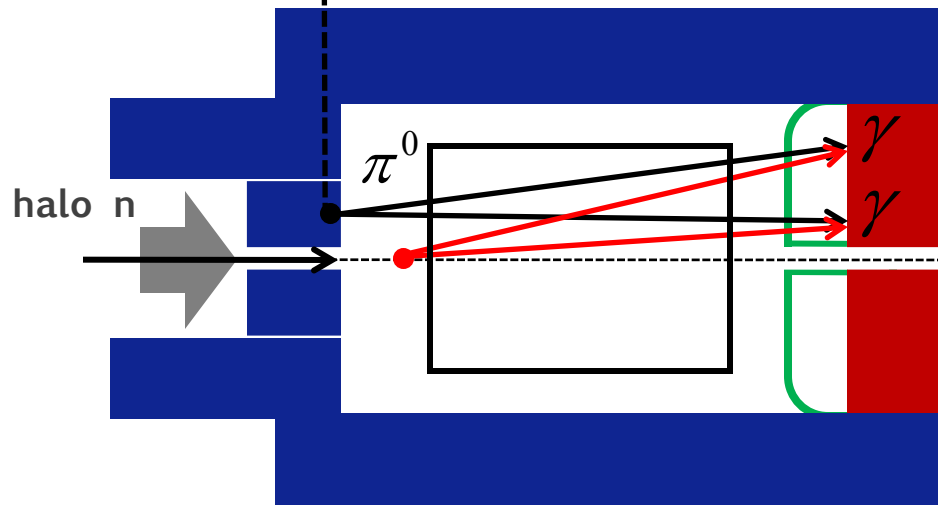
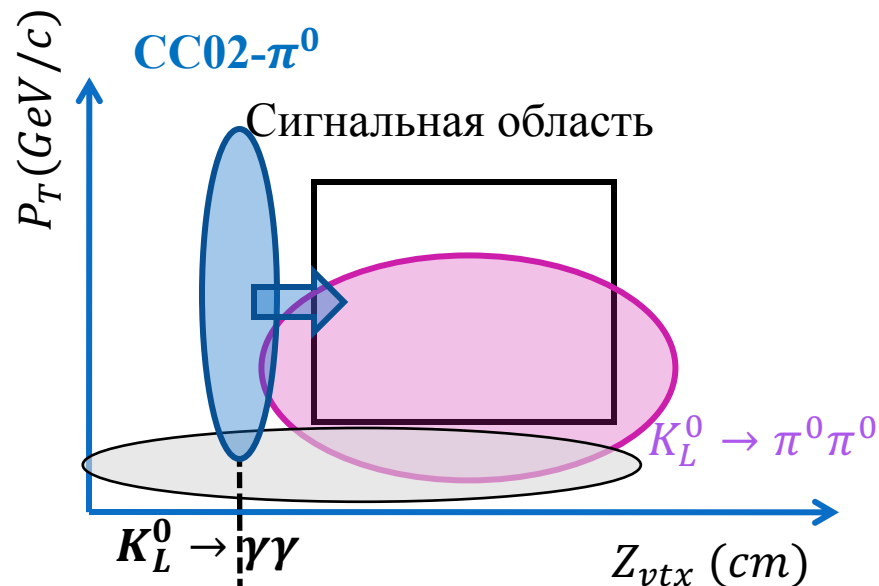
- Распады  $K_L^0$ 
  - $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0$ 
    - $2\gamma$  не зарегистрированы
  - $K_L^0 \rightarrow \gamma\gamma$



$$\cos \theta = 1 - \frac{M(\pi^0)^2}{2E_1 E_2}$$

# Основные источники фоновых событий

- Распады  $K_L^0$ 
  - $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0$ 
    - $2\gamma$  не зарегистрированы
  - $K_L^0 \rightarrow \gamma\gamma$
- Взаимодействия нейтронов пучка
  - $CC02-\pi^0$ 
    - Ошибка в измерении энергии  $\gamma$  (утечки ливней из кристаллов, фотоядерные взаимодействия)
      - Измеренная энергия меньше  $\rightarrow$  угол  $\theta$  больше

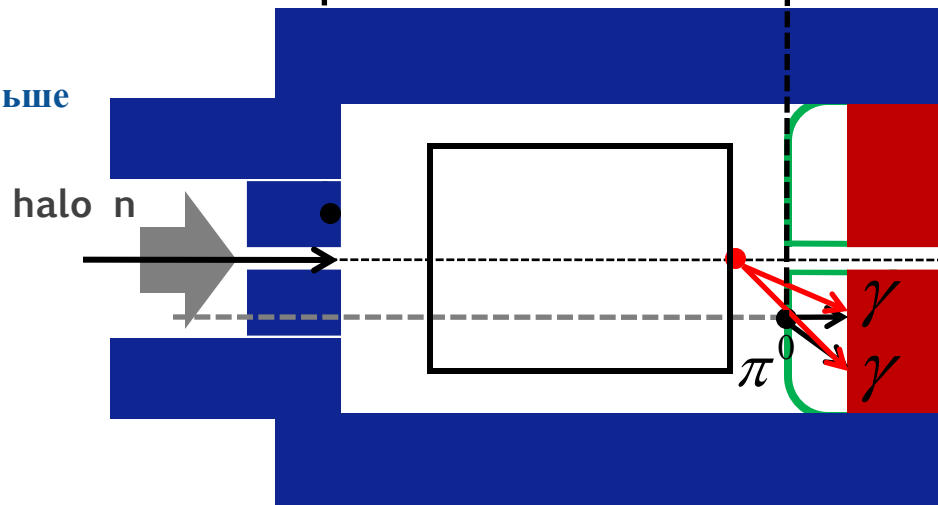
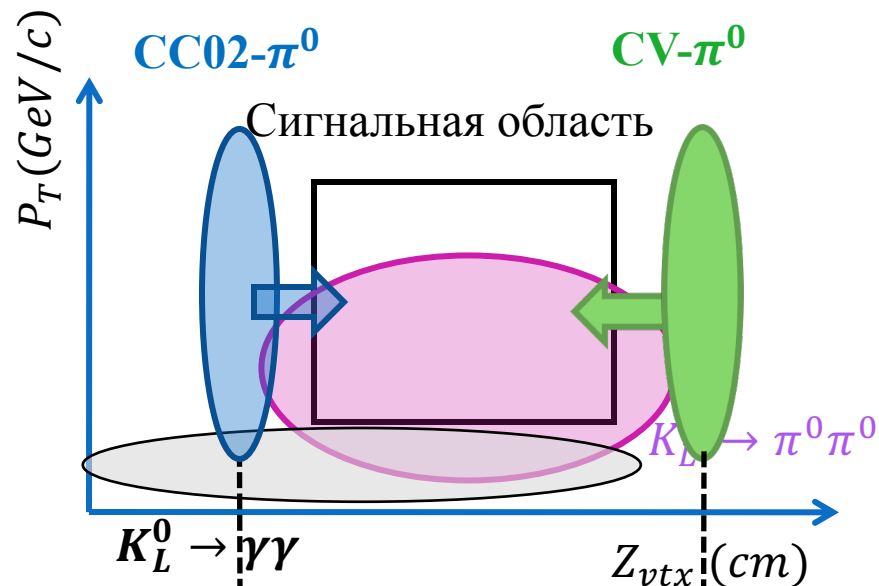


$$\cos \theta = 1 - \frac{M(\pi^0)^2}{2E_1 E_2}$$

# Основные источники фоновых событий

- Распады  $K_L^0$ 
  - $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0$ 
    - $2\gamma$  не зарегистрированы
  - $K_L^0 \rightarrow \gamma\gamma$
- Взаимодействия нейтронов пучка
  - $CC02-\pi^0$ 
    - Ошибка в измерении энергии  $\gamma$  (утечки ливней из кристаллов, фотоядерные взаимодействия)
      - Измеренная энергия меньше  $\rightarrow$  угол  $\theta$  больше
  - $CV-\pi^0$ 
    - Ошибка в измерении энергии  $\gamma$  (слипшиеся кластеры от  $2\gamma$ , наложение  $\gamma$ -кластера со случайным событием)
      - Измеренная энергия больше  $\rightarrow$  угол  $\theta$  меньше

$$\cos \theta = 1 - \frac{M(\pi^0)^2}{2E_1 E_2}$$

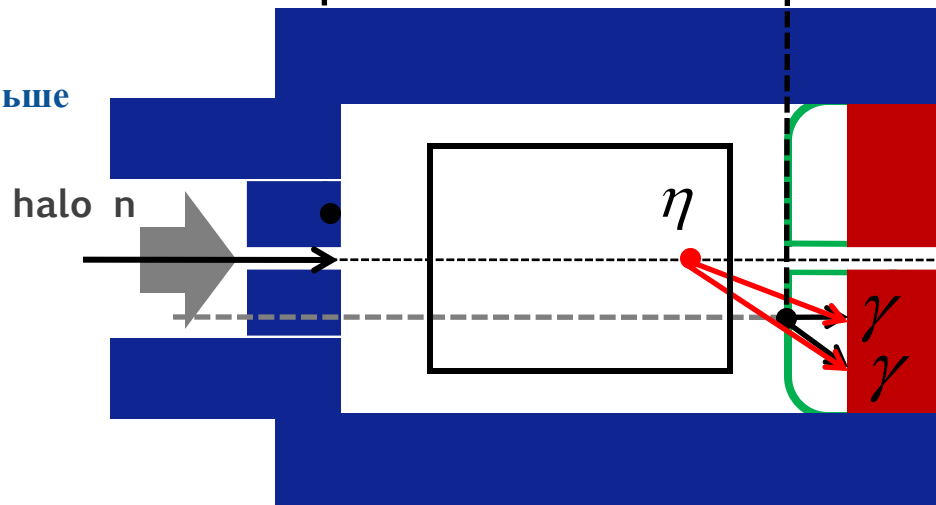
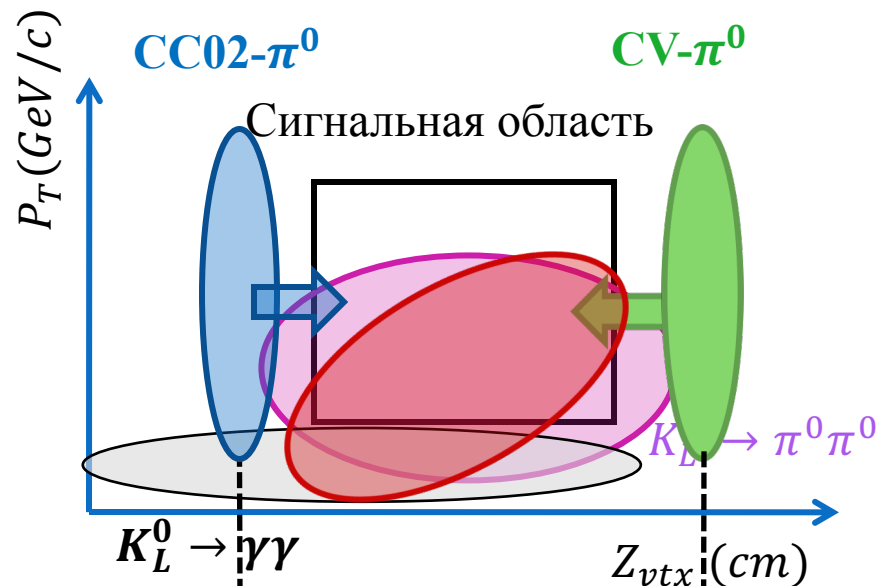




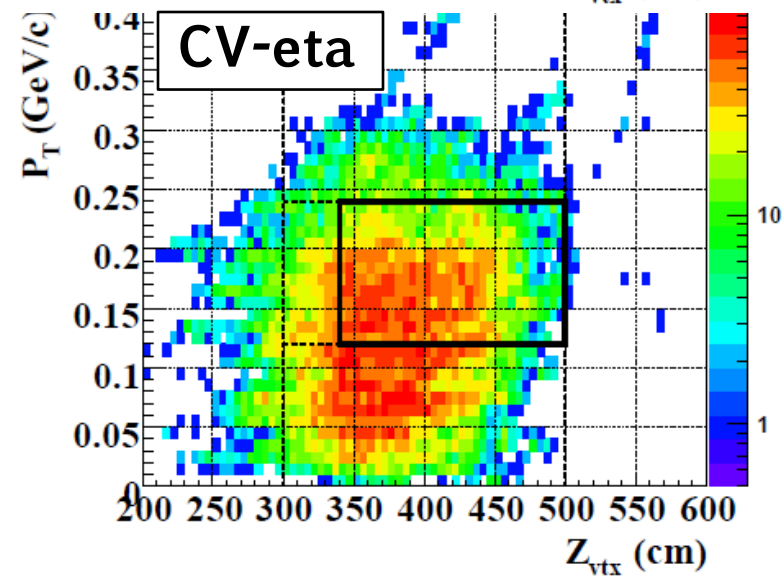
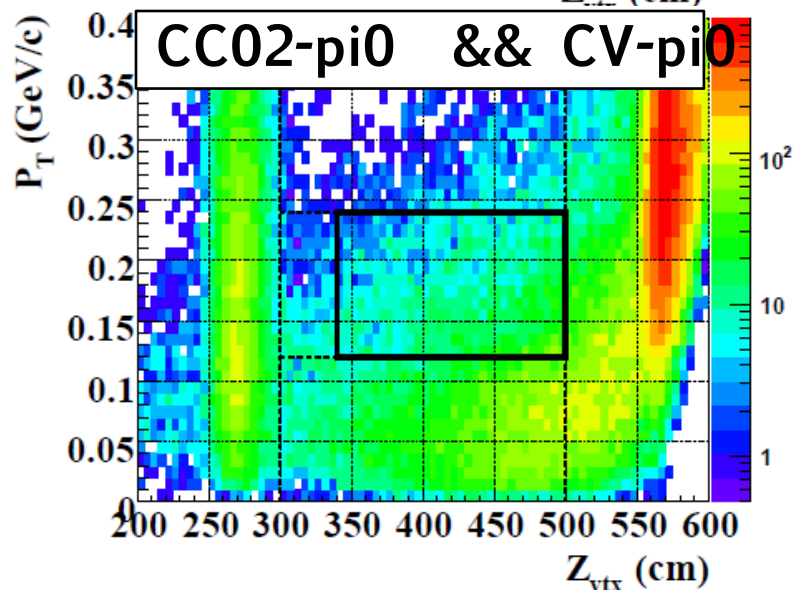
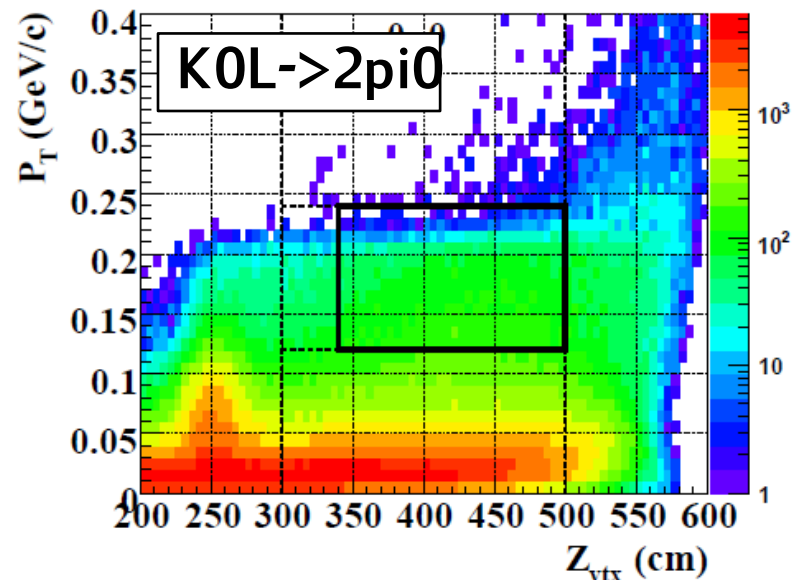
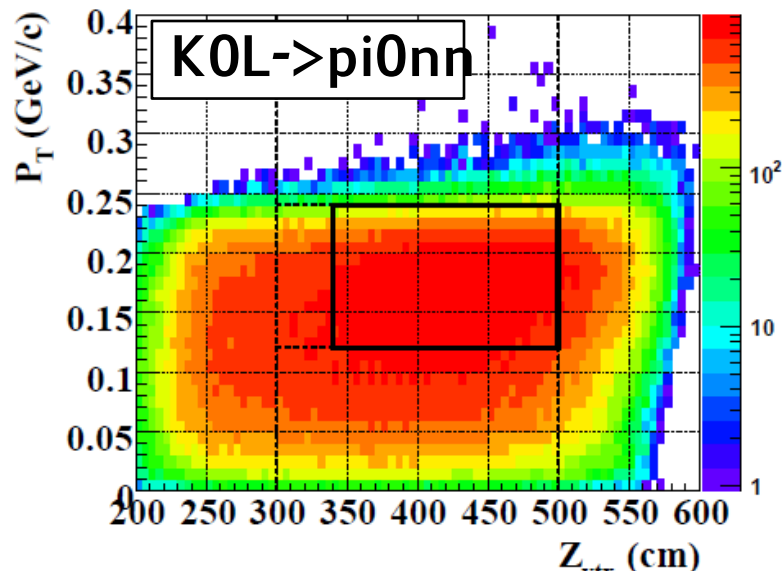
# Основные источники фоновых событий

- Распады  $K_L^0$ 
  - $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0$ 
    - $2\gamma$  не зарегистрированы
  - $K_L^0 \rightarrow \gamma\gamma$
- Взаимодействия нейтронов пучка
  - **CC02- $\pi^0$** 
    - Ошибка в измерении энергии  $\gamma$  (утечки ливней из кристаллов, фотоядерные взаимодействия)
      - Измеренная энергия меньше  $\rightarrow$  угол  $\theta$  больше
  - **CV- $\pi^0$** 
    - Ошибка в измерении энергии  $\gamma$  (слипшиеся кластеры от  $2\gamma$ , наложение  $\gamma$ -кластера со случайным событием)
      - Измеренная энергия больше  $\rightarrow$  угол  $\theta$  меньше
  - **CV- $\eta$** 
    - Разница в значении масс  $M_\eta$  и  $M_{\pi^0}$ 
      - угол  $\theta$  меньше

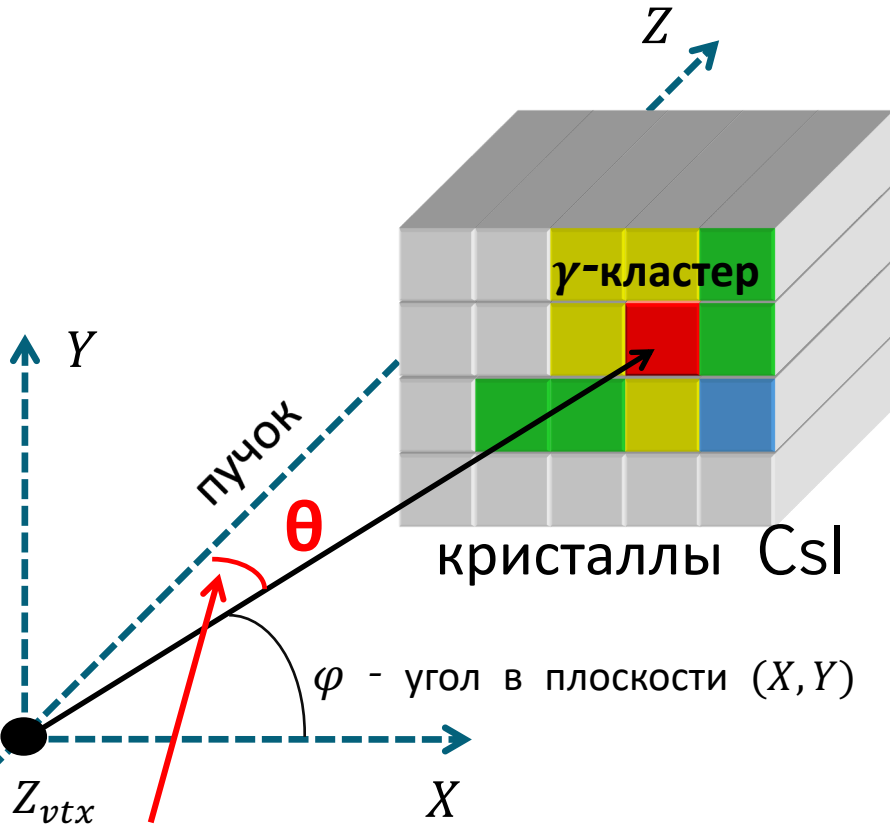
$$\cos \theta = 1 - \frac{M(\pi^0)^2}{2E_1 E_2}$$



# Монте-Карло моделирование фоновых и сигнальных событий

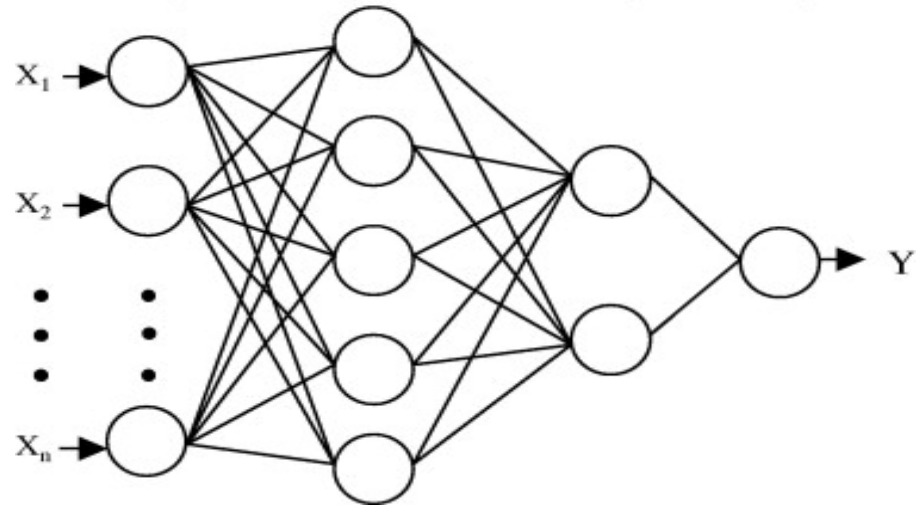


# Метод измерения угла попадания $\gamma$ -квантов в CsI калориметр



восстанавливаемый угол

Обобщенно-регрессионная нейронная сеть (GRNN) с радиально базисными передаточными функциями



**Входные параметры:**

- $E$   $\gamma$ -кванта
- $E$  в каждом кристалле кластера

**Выходные параметры:**

Угол  $\theta$

**Обучающие примеры:**

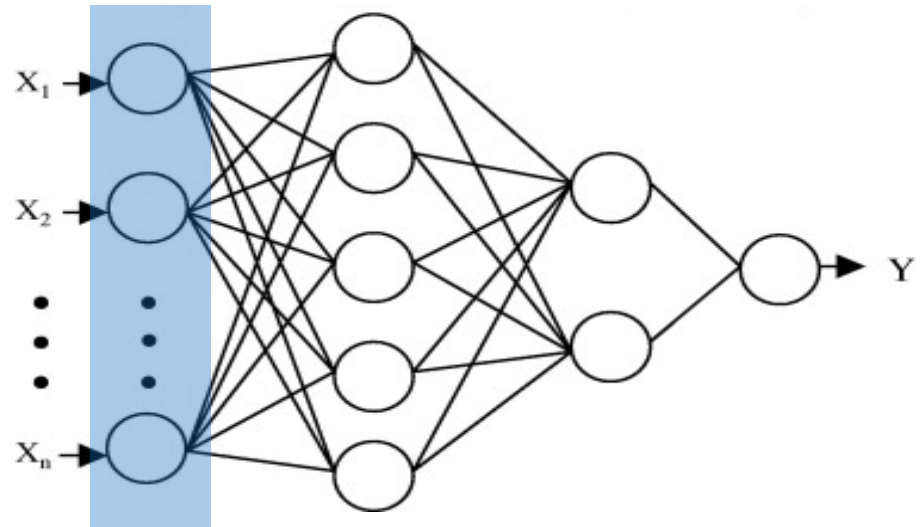
- $7 \times 7$  матрица кристаллов  $7.0 \times 7.0$  см
- $x, y = [-3.5; 3.5]$  см шаг=0.35 см
- $E = [200; 2500]$  МэВ шаг=50 МэВ
- $\Phi = [0; 45]$  deg. шаг=3 deg.
- $\Theta = [0; 50]$  deg. шаг=0.5 deg.

# Метод измерения угла попадания $\gamma$ -квантов в CsI калориметр

## Входной слой:

- Энерговыделение в каждом кристалле  $\gamma$ -кластера
- Энергия  $\gamma$ -кванта,  $(x, y)$ ,  $\varphi$

Обобщенно-регрессионная нейронная сеть (GRNN) с радиально базисными передаточными функциями



## Входные параметры:

- $E$   $\gamma$  - кванта
- $E$  в каждом кристалле кластера

## Выходные параметры:

Угол  $\theta$

## Обучающие примеры:

- $7 \times 7$  матрица кристаллов  $7.0 \times 7.0$  см
- $x, y = [-3.5; 3.5]$  см шаг=0.35 см
- $E = [200; 2500]$  МэВ шаг=50 МэВ
- $\Phi = [0; 45]$  deg. шаг=3 deg.
- $\Theta = [0; 50]$  deg. шаг=0.5 deg.

# Метод измерения угла попадания $\gamma$ -квантов в CsI калориметр

## Входной слой:

- Энерговыделение в каждом кристалле  $\gamma$ -кластера
- Энергия  $\gamma$ -кванта,  $(x, y), \varphi$

## Первый скрытый слой:

- Слой из N радиальных нейронов
- Количество нейронов соответствует количеству обучающих примеров
- Разность между энергиями (нормированными на полную энергию кластера) в соответствующих кристаллах обучающего и восстанавливаемого события кластера

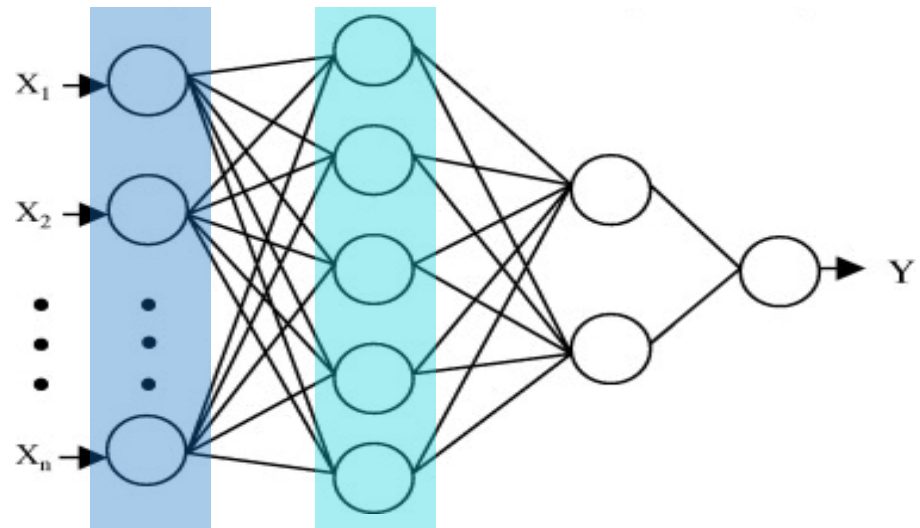
$$D_i = \sum_{k=1}^{49} \left( \frac{E_k}{\sum_{l=1}^{49} E_l} - \frac{T_{i,k}}{\sum_{l=1}^{49} T_{i,l}} \right)^2$$

k- кол-во кристаллов  
i – номер обучающего примера  
E – энергия в кристалле восст. события  
T – энергия в кристалле обучающего. события

- Вычисляется вес каждого события из обучающей выборки

$$W_i = \text{gaus}(D_i, \sigma_i)$$

## Обобщенно-регрессионная нейронная сеть (GRNN) с радиально базисными передаточными функциями



### Входные параметры:

- E  $\gamma$  - кванта
- E в каждом кристалле кластера

### Выходные параметры:

Угол  $\theta$

### Обучающие примеры:

- 7x7 матрица кристаллов 7.0x7.0cm
- $x, y = [-3.5; 3.5]$  cm шаг=0.35cm
- E = [200; 2500] МэВ шаг=50 МэВ
- Phi = [0;45] deg. шаг=3 deg.
- Theta = [0; 50] deg. шаг=0.5 deg



# Метод измерения угла попадания $\gamma$ -квантов в CsI калориметр

## Входной слой:

- Энерговыделение в каждом кристалле  $\gamma$ -кластера
- Энергия  $\gamma$ -кванта,  $(x, y), \varphi$

## Первый скрытый слой:

- Слой из N радиальных нейронов
- Количество нейронов соответствует количеству обучающих примеров
- Разность между энергиями (нормированными на полную энергию кластера) в соответствующих кристаллах обучающего и восстанавливаемого события кластера

$$D_i = \sum_{k=1}^{49} \left( \frac{E_k}{\sum_{l=1}^{49} E_l} - \frac{T_{i,k}}{\sum_{l=1}^{49} T_{i,l}} \right)^2$$

k- кол-во кристаллов  
i – номер обучающего примера  
E – энергия в кристалле восст. события  
T – энергия в кристалле обучающего. события

- Вычисляется вес каждого события из обучающей выборки

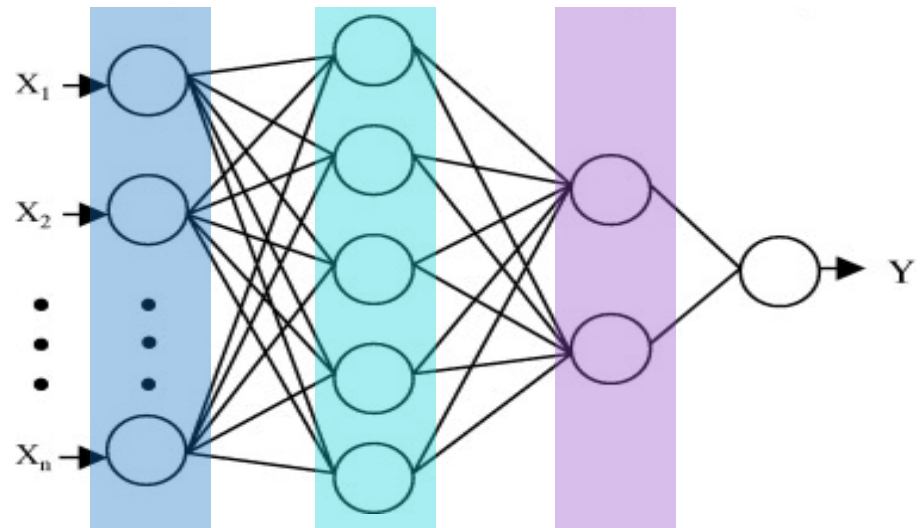
$$W_i = \text{gaus}(D_i, \sigma_i)$$

## Суммирующий слой:

- формирование взвешенной суммы и суммы всех весов

$$\sum_i^n w_i \theta_i, \sum_i^n w_i$$

## Обобщенно-регрессионная нейронная сеть (GRNN) с радиально базисными передаточными функциями



### Входные параметры:

- E  $\gamma$  - кванта
- E в каждом кристалле кластера

### Выходные параметры:

Угол  $\theta$

### Обучающие примеры:

- 7x7 матрица кристаллов 7.0x7.0cm
- $x, y = [-3.5; 3.5]$  cm шаг=0.35cm
- $E = [200; 2500]$  МэВ шаг=50 МэВ
- $\Phi = [0; 45]$  deg. шаг=3 deg.
- $\Theta = [0; 50]$  deg. шаг=0.5 deg

# Метод измерения угла попадания $\gamma$ -квантов в CsI калориметр

## Входной слой:

- Энерговыделение в каждом кристалле  $\gamma$ -кластера
- Энергия  $\gamma$ -кванта, (x,y),  $\varphi$

## Первый скрытый слой:

- Слой из N радиальных нейронов
- Количество нейронов соответствует количеству обучающих примеров
- Разность между энергиями (нормированными на полную энергию кластера) в соответствующих кристаллах обучающего и восстанавливаемого события кластера

$$D_i = \sum_{k=1}^{49} \left( \frac{E_k}{\sum_{l=1}^{49} E_l} - \frac{T_{i,k}}{\sum_{l=1}^{49} T_{i,l}} \right)^2$$

k- кол-во кристаллов  
i – номер обучающего примера  
E – энергия в кристалле восст. события  
T – энергия в кристалле обучающего. события

- Вычисляется вес каждого события из обучающей выборки

$$W_i = \text{gaus}(D_i, \sigma_i)$$

## Суммирующий слой:

- формирование взвешенной суммы и суммы всех весов

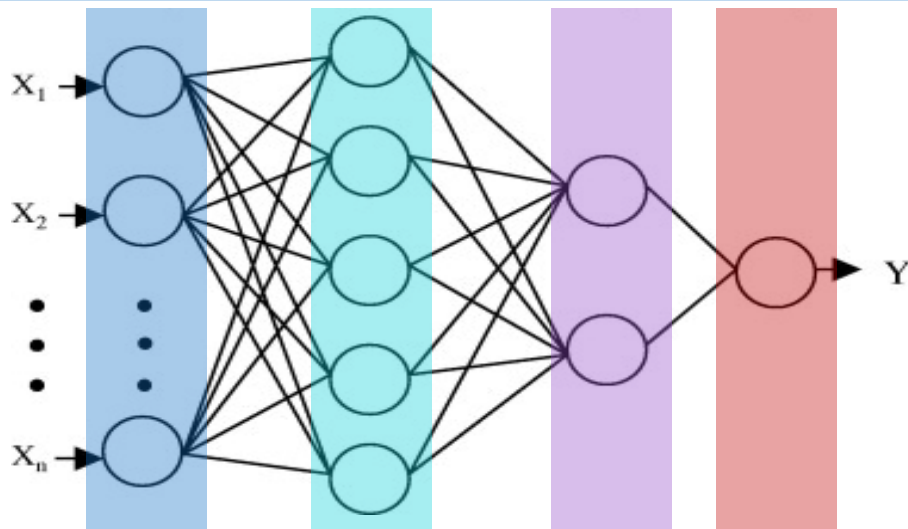
$$\sum_i^n W_i \theta_i, \sum_i^n W_i$$

## Выходной слой:

- Оценка взвешенного среднего

$$\theta = \frac{\sum_{i=1}^n W_i \cdot \theta_i}{\sum_{i=1}^n W_i}$$

## Обобщенно-регрессионная нейронная сеть (GRNN) с радиально базисными передаточными функциями



### Входные параметры:

- E  $\gamma$  - кванта
- E в каждом кристалле кластера

### Выходные параметры:

Угол  $\theta$

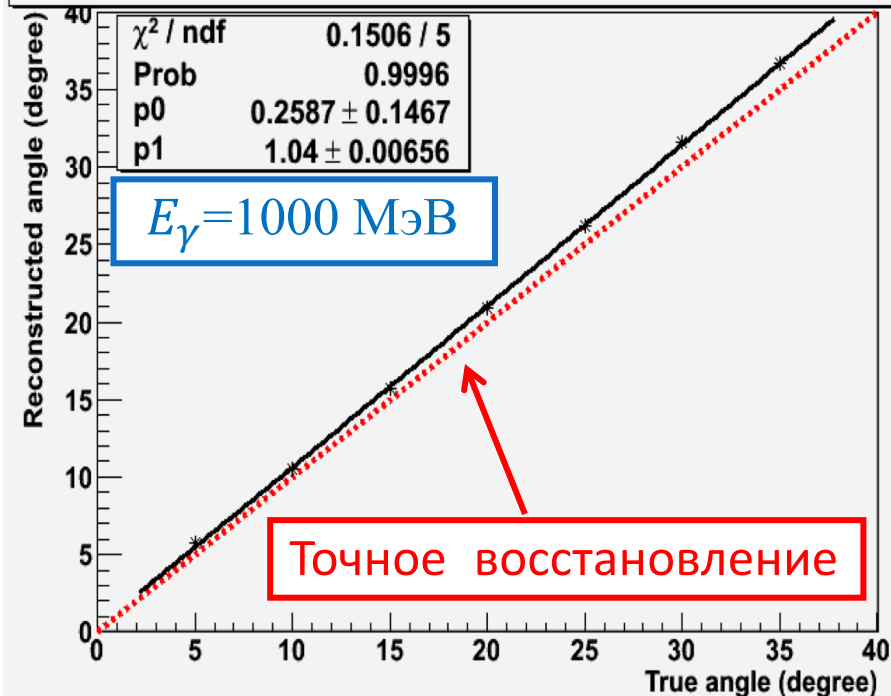
### Обучающие примеры:

- 7x7 матрица кристаллов 7.0x7.0cm
- x, y = [-3.5; 3.5] cm шаг=0.35cm
- E = [200; 2500] МэВ шаг=50 МэВ
- Phi = [0;45] deg. шаг=3 deg.
- Theta = [0; 50] deg. шаг=0.5 deg

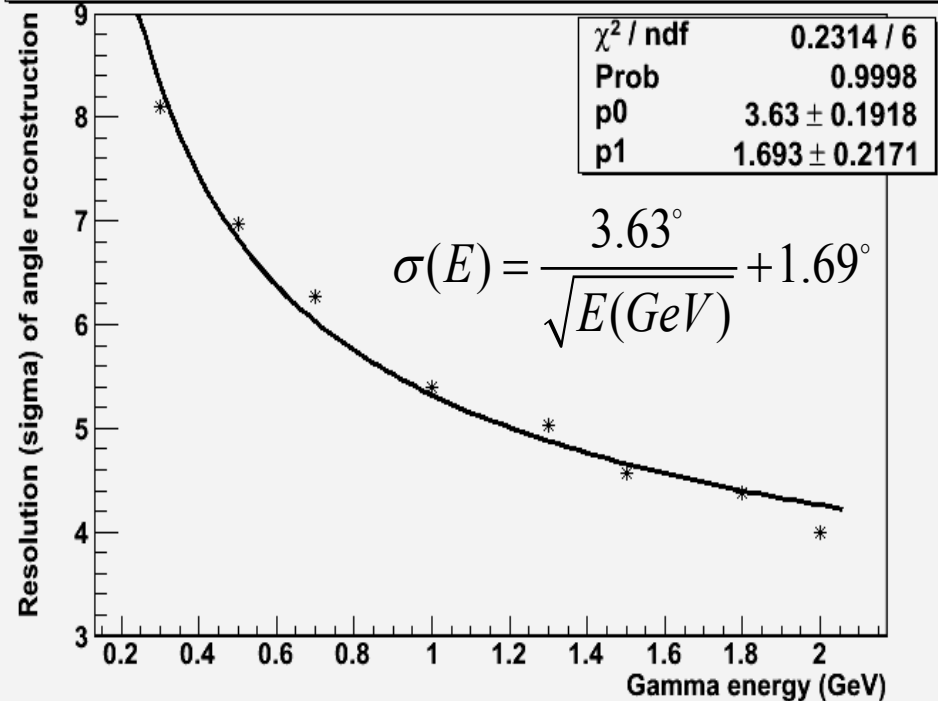
# Характеристики восстановления нейронной сети

Линейность восстановления угла (слева) и зависимость углового разрешения от энергии  $\gamma$ -квантов. Распределения получены для равномерного Монте-Карло по параметрам передаваемым на вход НС

Reconstructed angle vs. true anle dependency

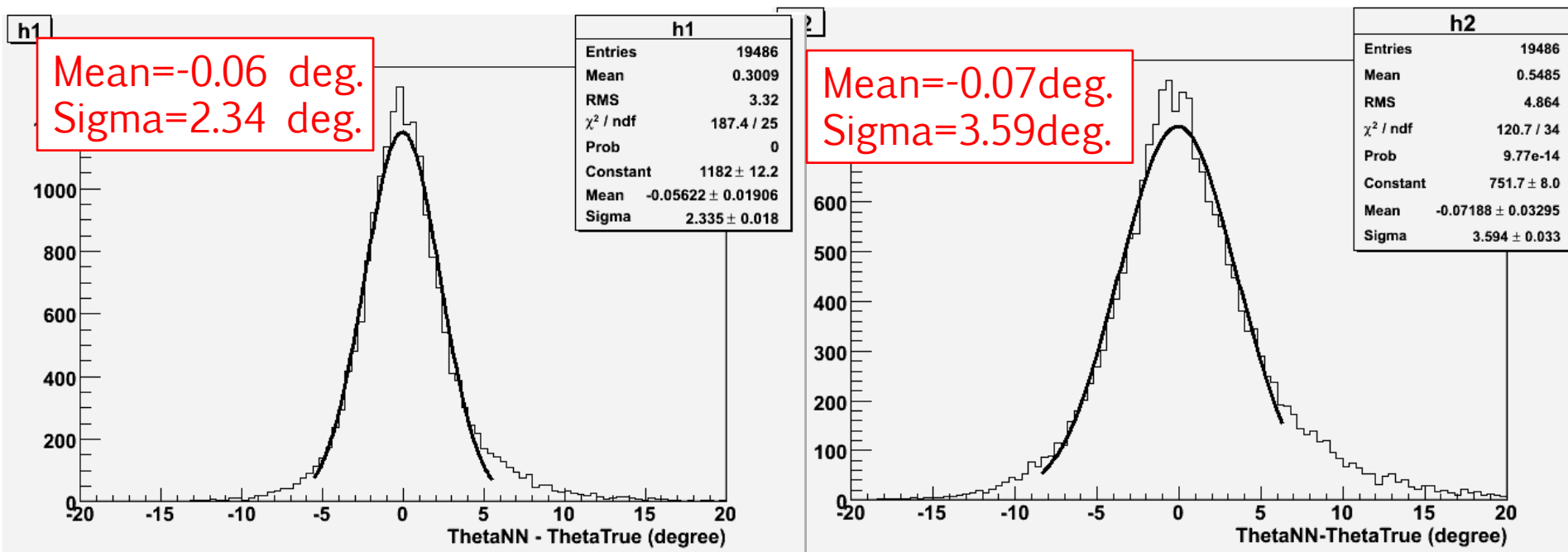


Angle reconstruction presicion on the gamma energy dependency



# Характеристики восстановления нейронной сети

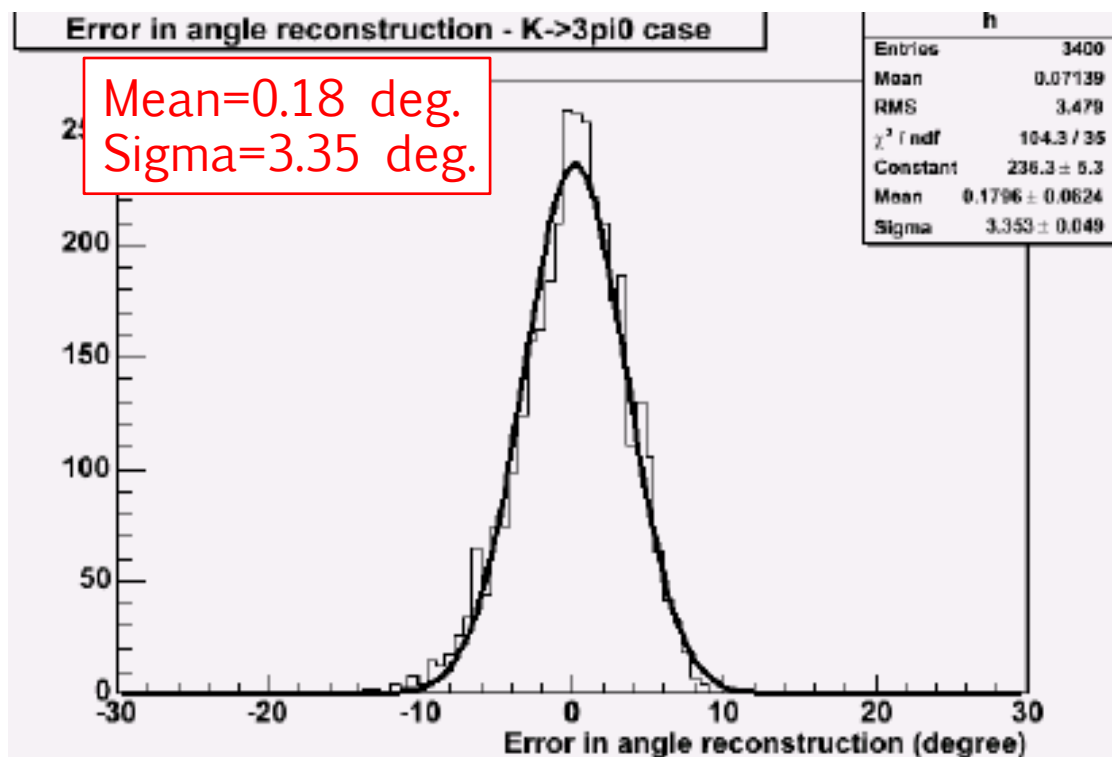
Распределение абсолютной ошибки восстановления угла для высокоэнергетического (слева) и низкоэнергетического (справа)  $\gamma$ -кванта событий  $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \tilde{\nu}$



$K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \tilde{\nu}$  Монте-Карло

# Характеристики восстановления нейронной сети

Распределение абсолютной ошибки восстановления угла  $\gamma$ -квантов

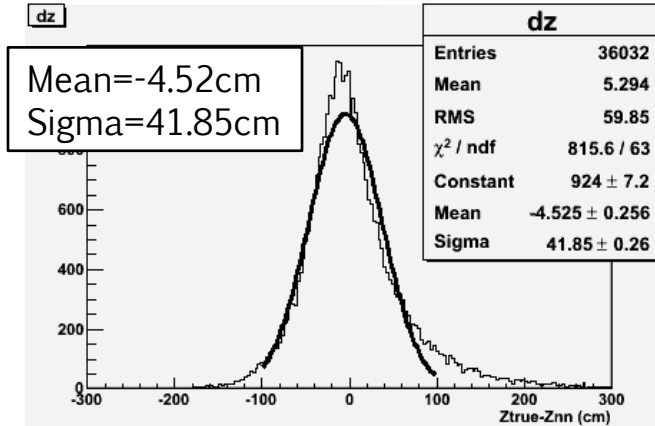


Данные  $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0$

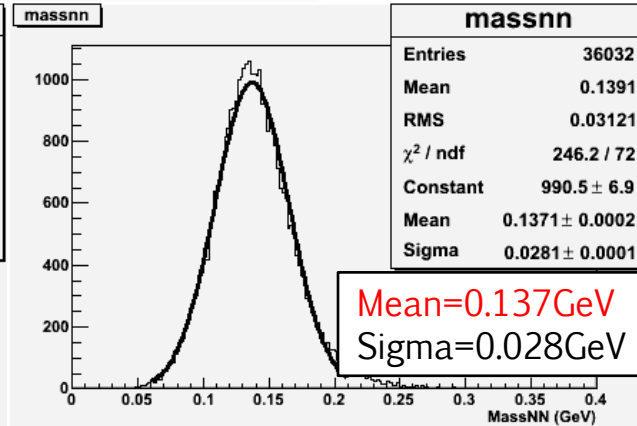


# Восстановление $Z_{vtx}$ и $M_X$ событий $X \rightarrow \gamma\gamma$

Монте-Карло  $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \tilde{\nu}$

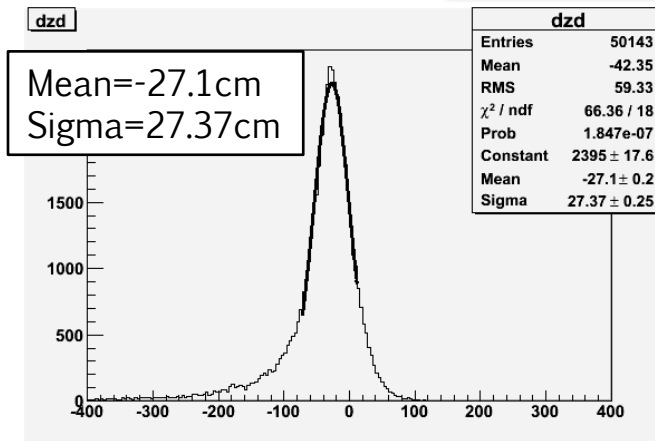


Znn-Zkine (cm)

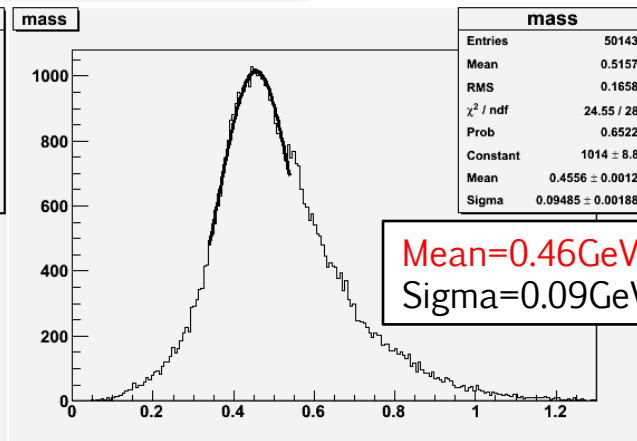


MassNN (GeV)

Монте-Карло  $K_L^0 \rightarrow \gamma\gamma$



Znn-Zkine (cm)



MassNN (GeV)

Используем процедуру кинематического фитирования, полагая что два гамма имеют общую вершину рождения:

$$z_{g1} - z_{g2} = \frac{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}}{\text{tg}(\theta_1)} - \frac{\sqrt{x_2^2 + y_2^2}}{\text{tg}(\theta_2)} \equiv 0$$

Используя метод неопределенных множителей Лагранжа получаем

$$\chi^2 = \frac{(\theta_1 - \theta_1^0)^2}{\sigma_{\theta_1}^2} + \frac{(\theta_2 - \theta_2^0)^2}{\sigma_{\theta_2}^2} + 2\lambda \left( \frac{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}}{\text{tg}(\theta_1)} - \frac{\sqrt{x_2^2 + y_2^2}}{\text{tg}(\theta_2)} \right)$$

Где  $\theta_1^0, \theta_2^0$  начальные измерения углов  $\theta_1, \theta_2$

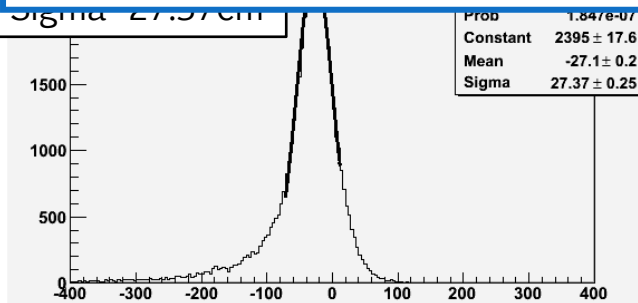
# Восстановление $Z_{vtx}$ и $M_X$ событий $X \rightarrow \gamma\gamma$

Монте-Карло  $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \tilde{\nu}$

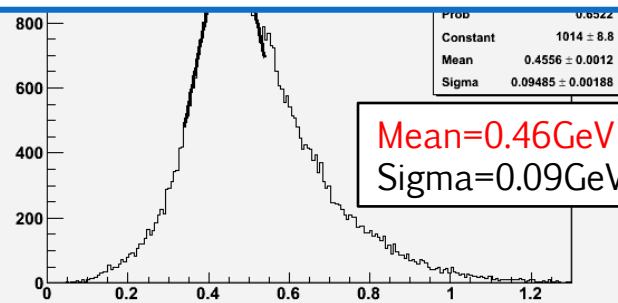
Используем процедуру кинематического

Используя восстановленные значения углов, были получены новые кинематические переменные, которые существенно расширили возможности анализа данных эксперимента:  $\Delta\theta_1, \Delta\theta_2$  – разность между углом, восстановленным нейронной сетью и углом, полученным в предположении того, что инвариантная масса двух  $\gamma$ -квантов равна массе  $\pi^0$ , а так же масса ( $MassNN$ ) распавшейся частицы  $X \rightarrow \gamma\gamma$ .

Применение их в анализе второго сеанса набора данных (Run-II) позволило увеличить чувствительность установки к регистрации распада  $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \tilde{\nu}$  на 35%.



Znn-Zkine (cm)

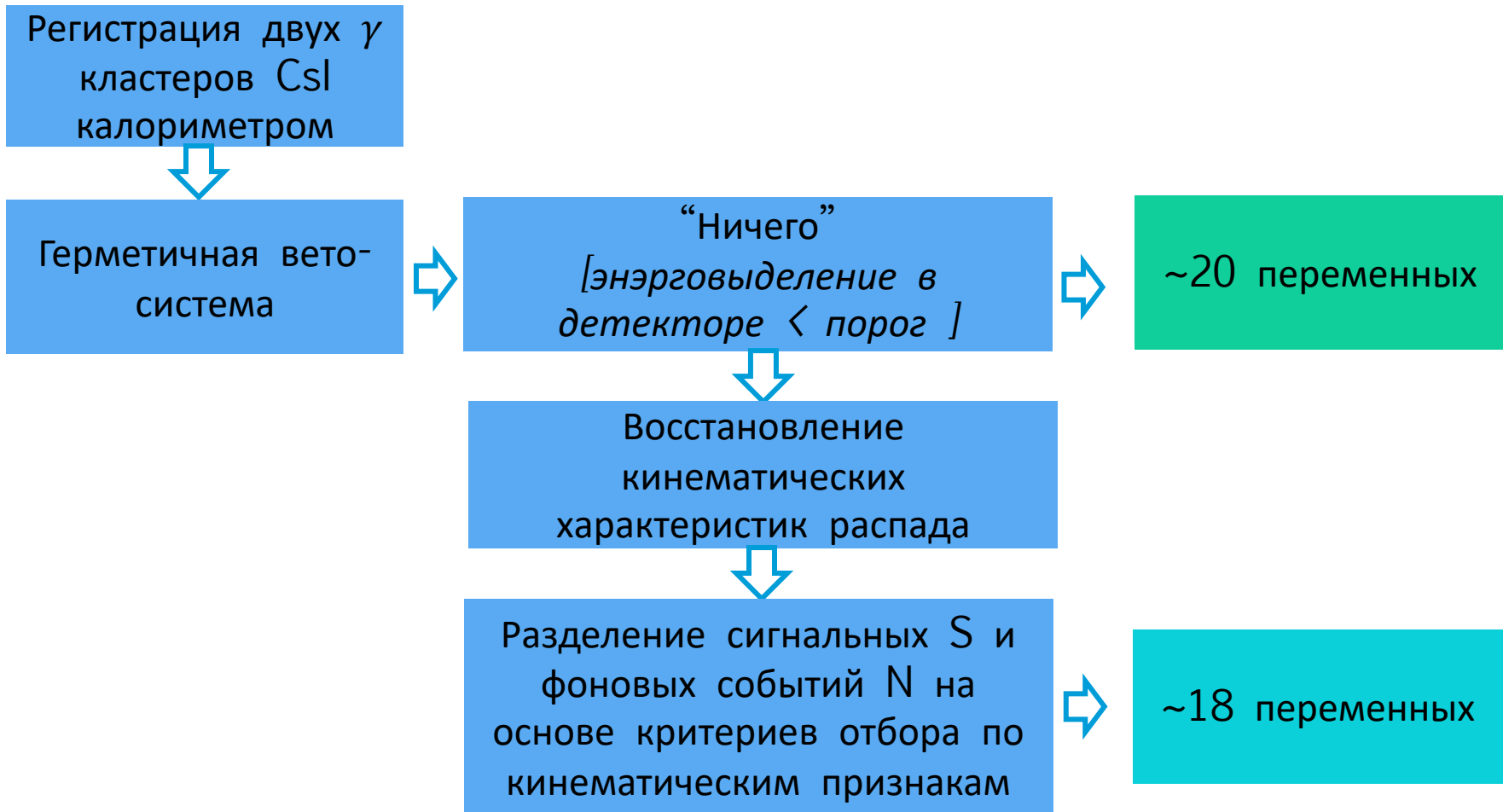


MassNN (GeV)

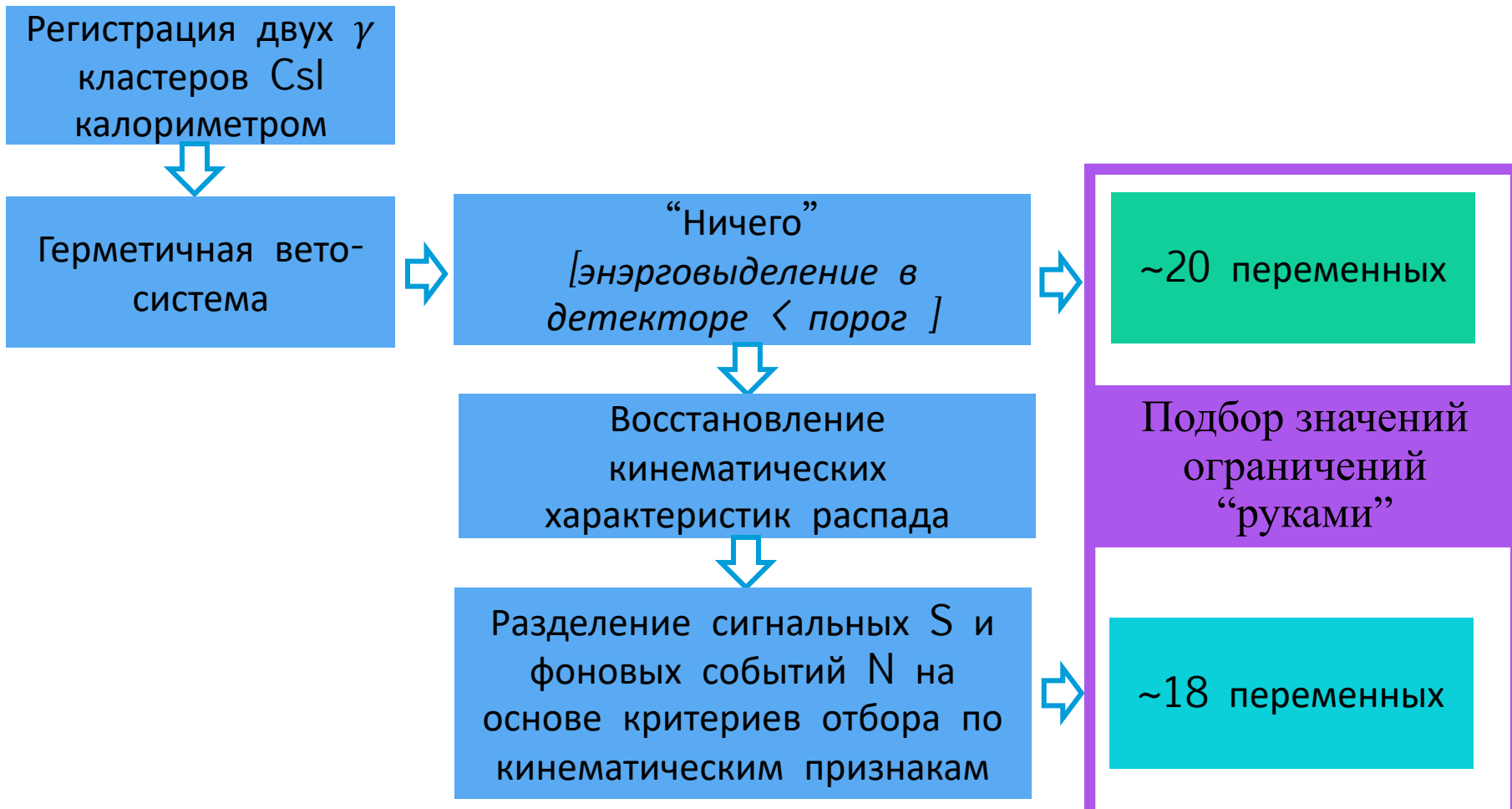
$$+2\lambda \left( \frac{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}}{\text{tg}(\theta_1)} - \frac{\sqrt{x_2^2 + y_2^2}}{\text{tg}(\theta_2)} \right)$$

Где  $\theta_1^0, \theta_2^0$  начальные измерения углов  $\theta_1, \theta_2$

# Отбор событий в эксперименте E391a



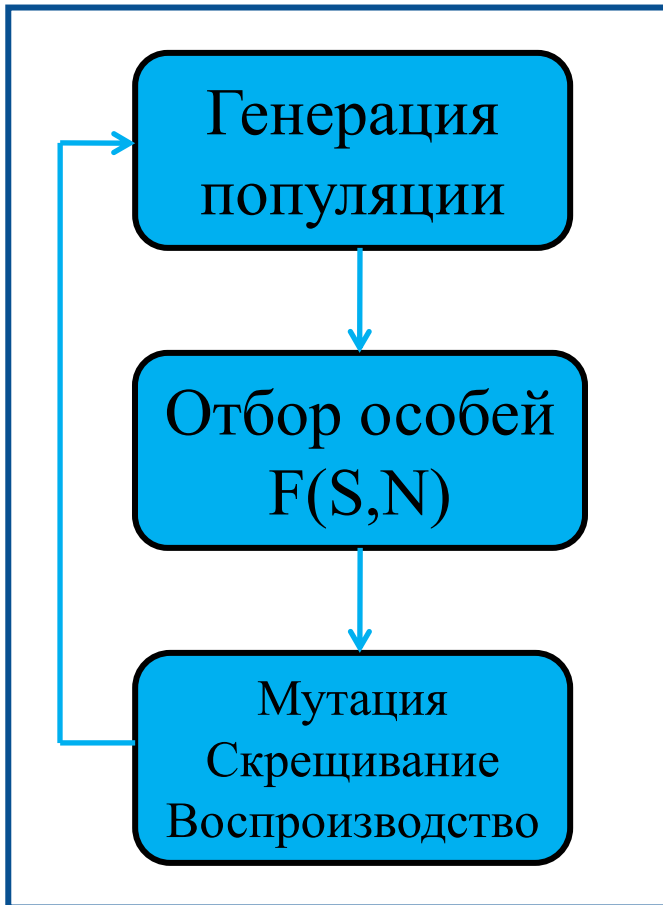
# Отбор событий в эксперименте E391a



## Недостатки метода:

1. Трудоемкий процесс, требует больших затрат времени
2. Нет явных признаков и гарантии что значение S/N улучшится
3. Невозможно учесть корреляции между параметрами отбора

# Метод автоматической оптимизации критериев отбора событий на основе генетических алгоритмов



## • Алгоритм оптимизации:

- 1) Генерация начальной популяции особей
- 2) Для каждой особи из популяции (набора критериев отбора):
  - вычисление величины  $S$
  - вычисление величины  $N$
  - оценка функцией пригодности  $F(S,N)$
- 3) Отбор наиболее пригодных особей для генерации нового поколения
- 4) Генерация нового поколения путем применения генетических операторов
- 5) повтор 2-4 заданное количество раз

**Особенность функции пригодности  $F(S,N)$ :** используя различные виды определения функции можно менять концепцию направления оптимизации – максимизировать значение  $S$  или уменьшать значение  $N$ , или сохранять значение  $S/N$  на заданном уровне.

# Метод автоматической оптимизации критериев отбора событий на основе генетических алгоритмов

Генерация

- **Алгоритм оптимизации:**

- 1) Генерация начальной популяции особей
- 2) Для каждой особи из популяции (набора

В результате применения разработанной процедуры автоматической оптимизации были получены новые значения критериев отбора величин для анализа данных второго сеанса набора данных Run-II, с помощью которых чувствительность установки удалось увеличить на 10%

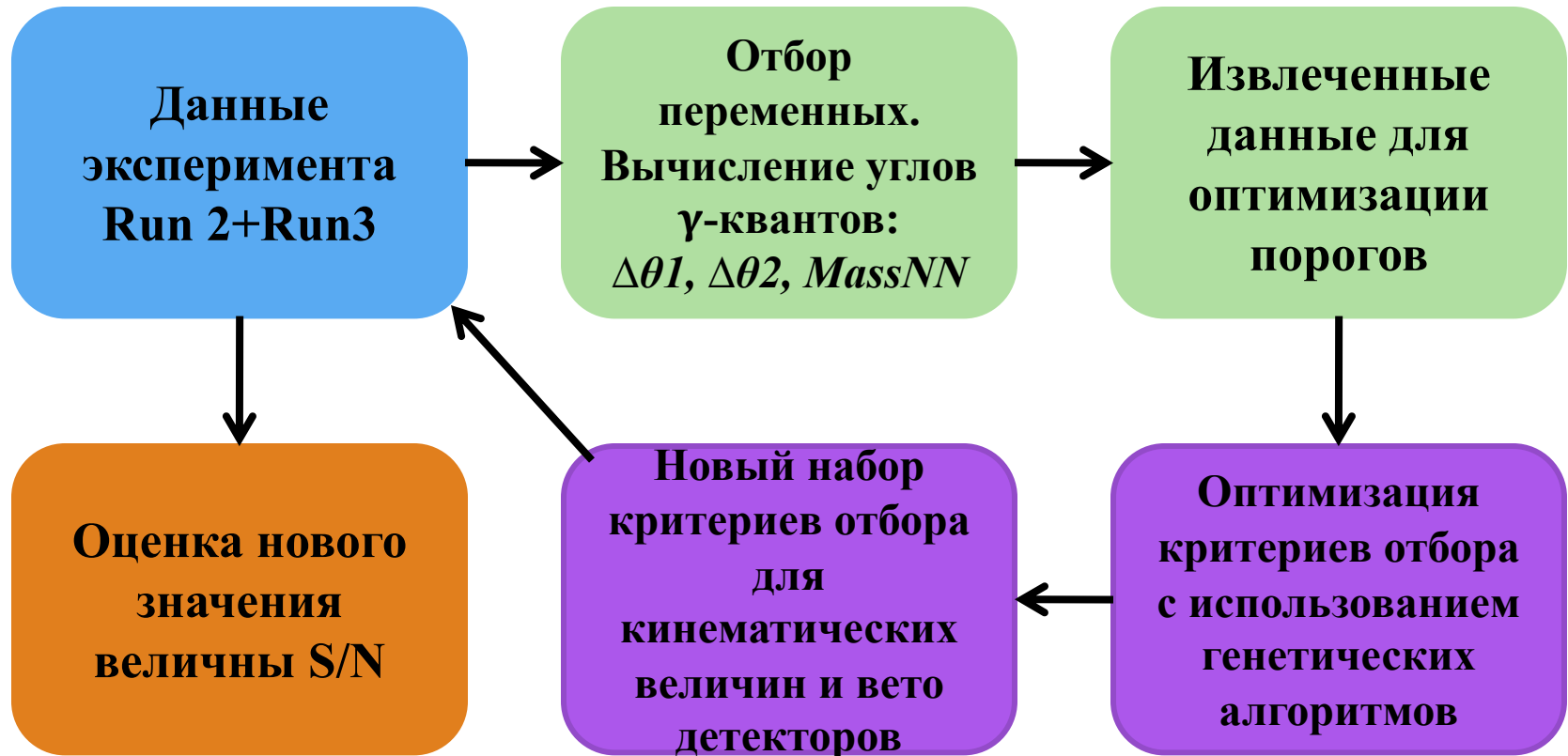
Мутация  
Скрещивание  
Воспроизводство

- 3) применение генетических операторов
- 4) повтор 2-4 заданное количество раз

**Особенность функции пригодности  $F(S,N)$ :** используя различные виды определения функции можно менять концепцию направления оптимизации – максимизировать значение  $S$  или уменьшать значение  $N$ , или сохранять значение  $S/N$  на заданном уровне.

Free source code: <http://garage.cse.msu.edu/software/lil-gp/>

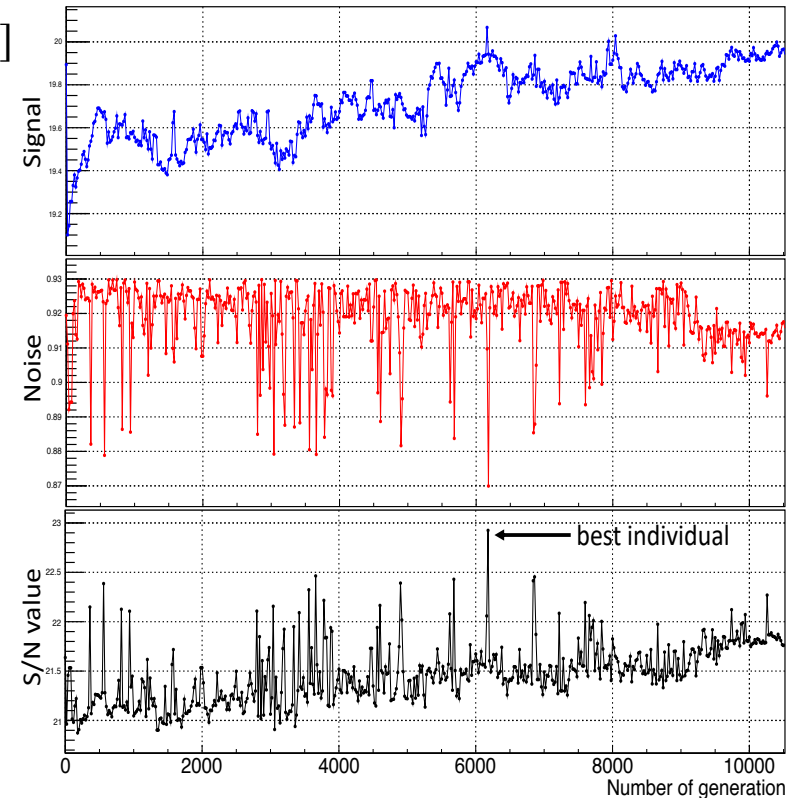
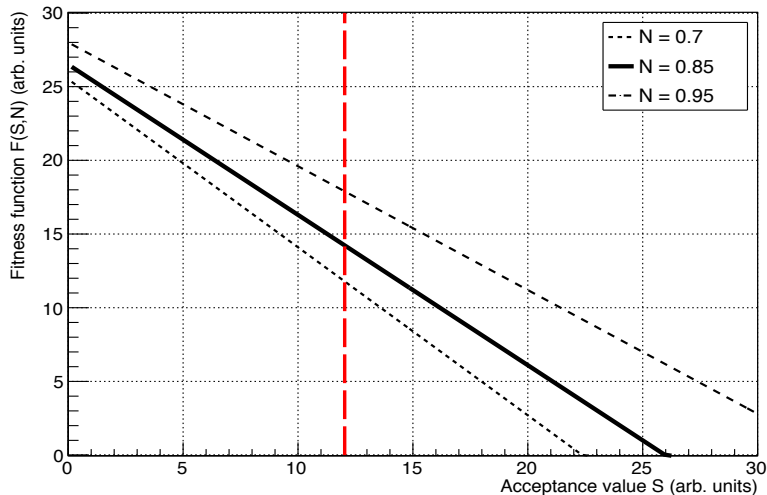
# Повторный анализ данных эксперимента E391a





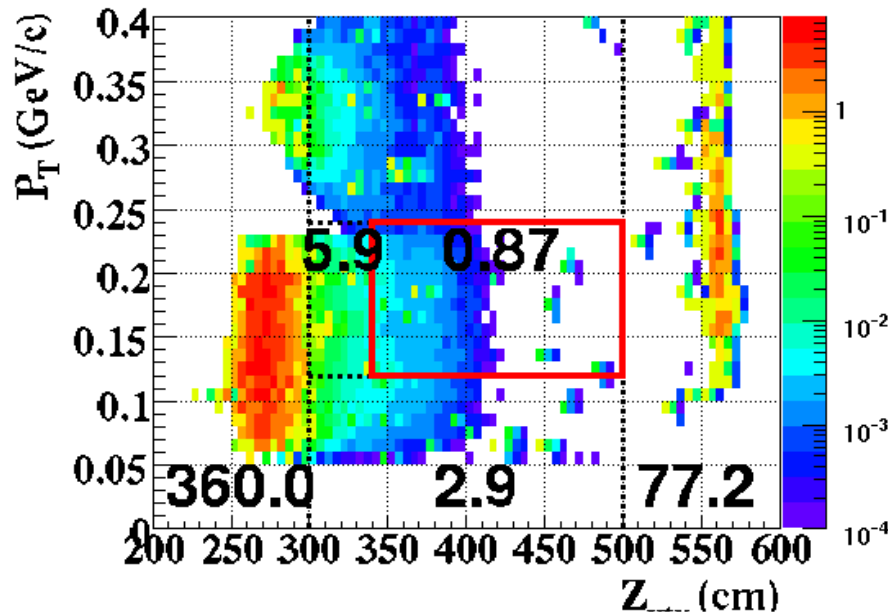
# Повторный анализ данных эксперимента E391a

- Порядка 40 величин использовались при оптимизации
- Направление поиска решения: поиск такого набора значений ограничений при котором значение  $N$  будет сохраняться на уровне величины анализа эксперимента E391a, а значение  $S$ , при этом будет максимально возможным
- Функция пригодности:  $F(S, N) = 35 - (1.2 \times S + 10) \times N$ 
  - Значение  $N$  зафиксировано в интервале  $[0.7, 0.95]$
- ~2 месяца, 46 CPU ЦИВК ОИЯИ
  - ~11000 генераций поколений

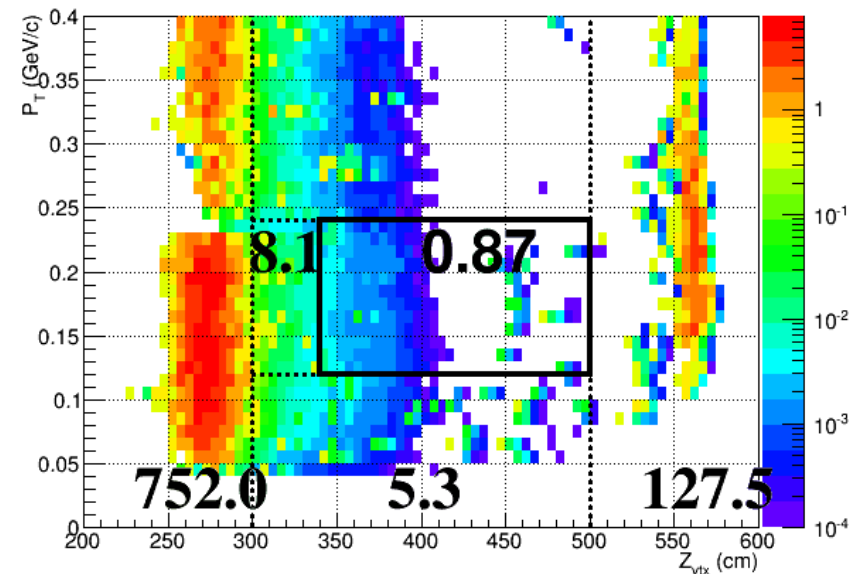


# Результаты: оценка вклада фоновых событий

Результат E391a



Повторный анализ E391a

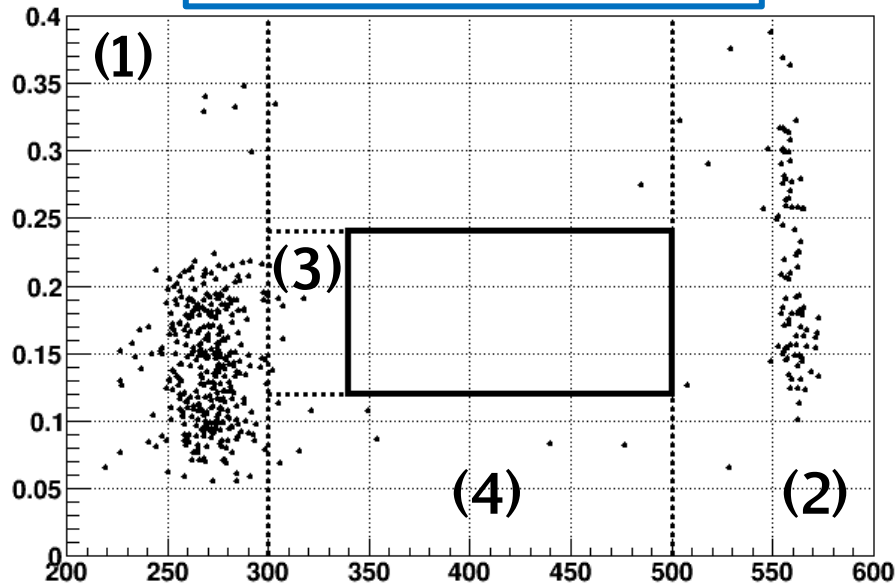


	K->2pi0	CC02-pi0	CV-pi0	CV-eta	Signal Box
E391 анализ	0.02	0.66	negligible	0.19	0.87
Новый анализ	0.03	0.29	0.34	0.25	0.87

Вклад фоновых событий: на уровне E391a

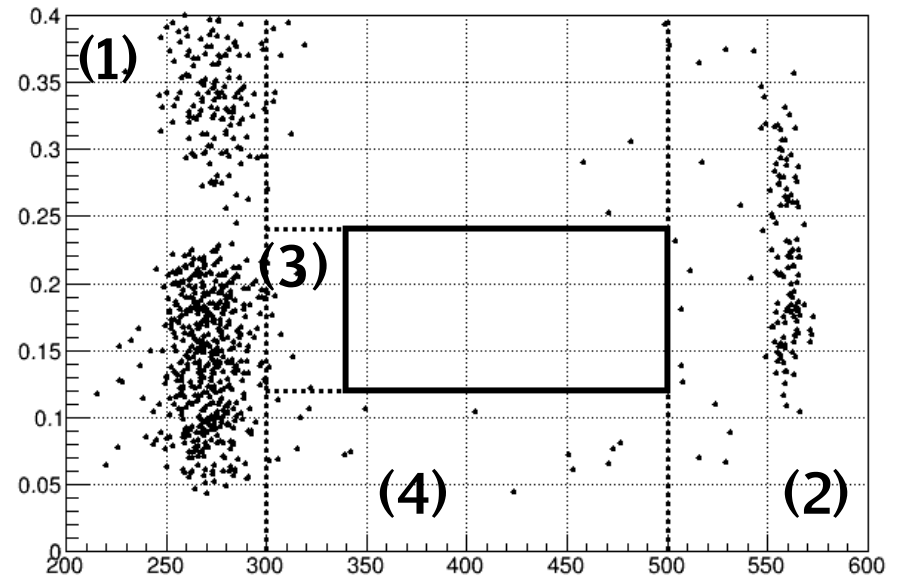
# Результаты: экспериментальные данные

Результат E391a



События в сигнальной области отсутствуют

Повторный анализ E391a

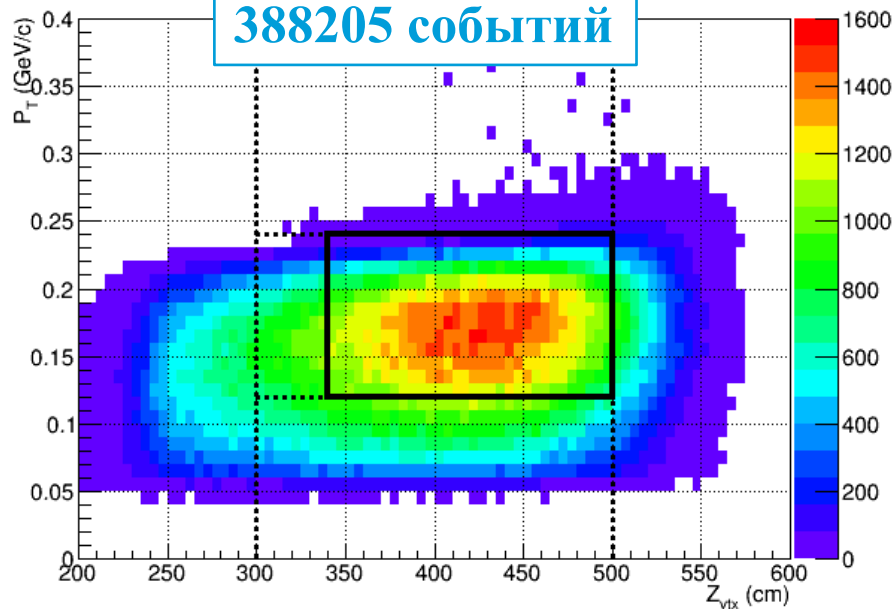


	Область-1	Область-2	Область-3	Область-4	Сигн. обл.
Данные	752 (360)	151 (101)	9 (8)	16 (8)	0 (0)
МК фона	752 (360)	127.5 (77.2)	8.1 (5.9)	5.3 (2.9)	0.87 (0.87)

# Результаты: оценка сигнальных событий

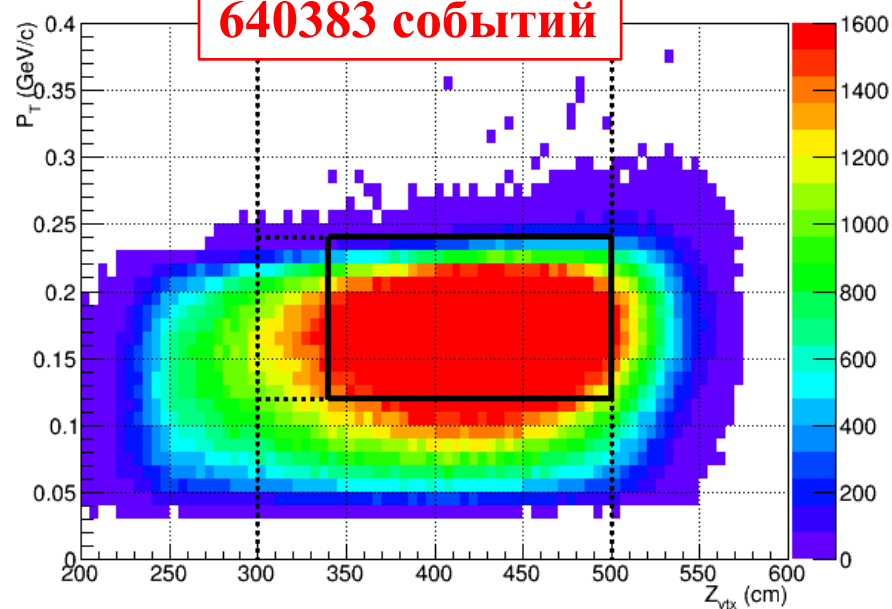
Результат E391a

388205 событий



Повторный анализ E391a

640383 событий



Вклад фоновых событий: на уровне E391a  
События в сигнальной области отсутствуют  
Чувствительность установки: увеличение на 65%

# Заключение

**Целью данной работы** является разработка новых методов для анализа данных эксперимента E391a, которые позволяют увеличить чувствительность установки к регистрации редкого распада  $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ .

Были получены следующие **результаты**:

1. Проведена модернизация и доработка метода восстановления угла попадания  $\gamma$ -квантов в главный CsI-калориметр установки E391a, в результате чего удалось улучшить линейность восстановления угла нейронной сетью, а также уменьшить ошибки в определении величины углов. На основе полученного метода были получены новые переменные для анализа:  $\Delta\theta_1, \Delta\theta_2$  – разность между углом, восстановленным нейронной сетью и углом, полученным в предположении того, что инвариантная масса двух  $\gamma$ -квантов равна массе  $\pi^0$ . В дополнение к этому, впервые в эксперименте были получены распределения по эффективной массе для распавшейся частицы  $X \rightarrow \gamma\gamma$ . Применение данного метода и полученных новых переменных в анализе данных второго сеанса набора данных (Run-II) эксперимента E391a позволило увеличить чувствительность установки к регистрации распада  $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  на 35%.
2. На основе метода генетического программирования, для эксперимента E391a был разработан метод оптимизации критериев отбора событий, позволяющий в автоматическом режиме находить наиболее “приспособленные” решения (ограничения на значения величин), удовлетворяющие заданному направлению оптимизации на основе значений величины  $S/N$ . В результате применения разработанной процедуры автоматической оптимизации в анализе второго сеанса набора данных (Run-II) были получены новые значения ограничений величин, в результате использования которых чувствительность установки увеличилась на 10%.
3. Была предложена и реализована схема повторного анализа полной статистики эксперимента E391a, которая представляет собой интеграцию разработанных независимо друг от друга методов. В результате вычислений был получен новый оптимизированный набор ограничений величин для отбора событий, применение которого позволило увеличить чувствительность установки к распаду на 65%, при этом общий вклад фоновых событий в сигнальную область остался на том же уровне что и в результате финального анализа данных.

# Список публикаций по теме диссертации

1. Method for selection cut optimization for the E391 Experiment veto system / Podolsky S.V., Kurilin A.S., Stepanenko Y.Y. // The 11th Small Triangle Meeting, (Kysak, September 20-23, 2009) – Kosice, 2010. – 120 P.
2. Восстановление массы  $\rho^0$  в событиях  $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  эксперимента E391 / Степаненко Ю. Ю., Подольский С.В., Курилин А. С. // Труды XIV научной конференции молодых ученых и специалистов ОИЯИ (Дубна, 1-6 февраля 2010) – Дубна, 2010. – P. 118-121.
3. Search for  $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  decay (experiments E391, KLOD, E14) / Kurilin A., Podolsky S., Stepanenko Y. et al. // Proceedings of International School-Seminar: Actual problems of microworld physics (Gomel, Belarus, July 15-26, 2009) – Dubna, 2011.- Vol. 1. – P. 45-48.
4. Некоторые особенности методики повторного анализа данных эксперимента E391 / Степаненко Ю. Ю., Курилин А. С., Подольский С.В. и др. // «Гомельский научный семинар по теоретической физике, посвященный 100-летию со дня рождения Ф. И. Федорова» (20–22 июня 2011 г.): [материалы] / редкол.: А. В. Рогачев (гл. ред.) [и др.]. – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2011. – С. 193-197.
5. New method for the cuts threshold optimization in the E391 experiment: conception and current implementation / N. V. Maksimenko et. al. // Проблемы физики, математики и техники. – 2010. - №3. - P. 22–24.
6. Experimental study of the decay  $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  / J.K. Ahn et al. (E391a collaboration) // Phys. Rev. D. – 2010. - Vol. 81. – P. 072004.
7. Method for reconstructing of direction of gamma quanta registered by the CsI calorimeter in E391 experiment / Kurilin A. S., Podolsky S. V., Stepanenko Yu. Yu. // Physics of Particles and Nuclei Letters. – 2011. - Vol. 8., No.1 - P. 46–49.
8. Новые методы анализа данных в эксперименте E391 // Подольский С. В., Курилин А. С., Степаненко Ю. Ю. // Письма в ЭЧАЯ. - 2011. - Т. 8, №5(168) - С. 833-836.
9. Increase in the detection efficiency for the  $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  decay in the E391 experiment / Stepanenko Yu. Yu., Podolsky S.V., Kurilin A. S. // Physics of Particles and Nuclei Letters. - 2017. - Vol. 14, No. 6 - P. 168–174.

**Спасибо за внимание!**



# Основные положения, выносимые на защиту

- Модернизация и доработка метода восстановления угла попадания  $\gamma$ -квантов в главный CsI-калориметр установки E391a с использованием обобщённо-регрессионной нейронной сети (GRNN - Generalized Regression Neural Network).
- Процедура восстановления вершины распада и эффективной массы распавшейся частицы  $X \rightarrow \gamma\gamma$  на основе информации о восстановленных углах попадания  $\gamma$ -квантов в калориметр установки.
- Метод автоматической оптимизации критериев отбора событий в эксперименте E391a, основанный на применении генетического программирования.
- Повторный анализ данных эксперимента E391a с использованием методов восстановления угла попадания  $\gamma$ -кванта в калориметр при помощи нейронной сети и автоматической оптимизации критериев отбора событий на основе генетических алгоритмов.

# Восстановление кинематики распада

$$dz = Z_{CsI} - Z_{vtx}$$

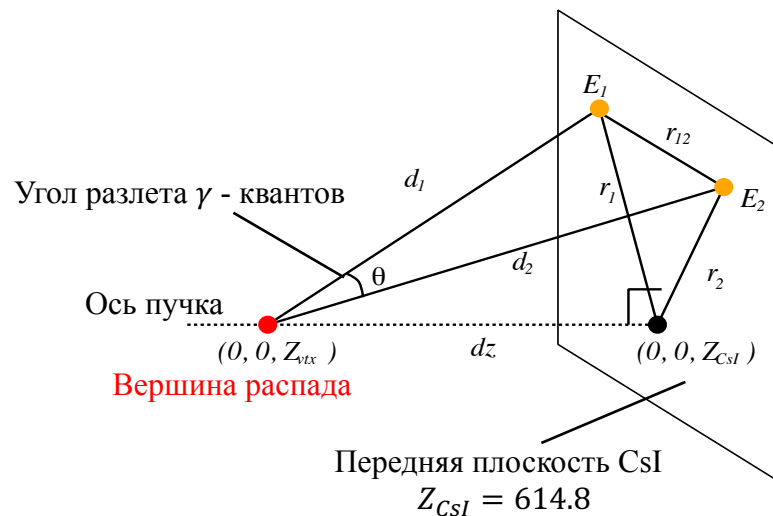
$$r_{12}^2 = d_1^2 + d_2^2 - 2d_1d_2\cos\theta,$$

$$d_1 = \sqrt{r_1^2 + (dz)^2}$$

$$d_2 = \sqrt{r_2^2 + (dz)^2}$$

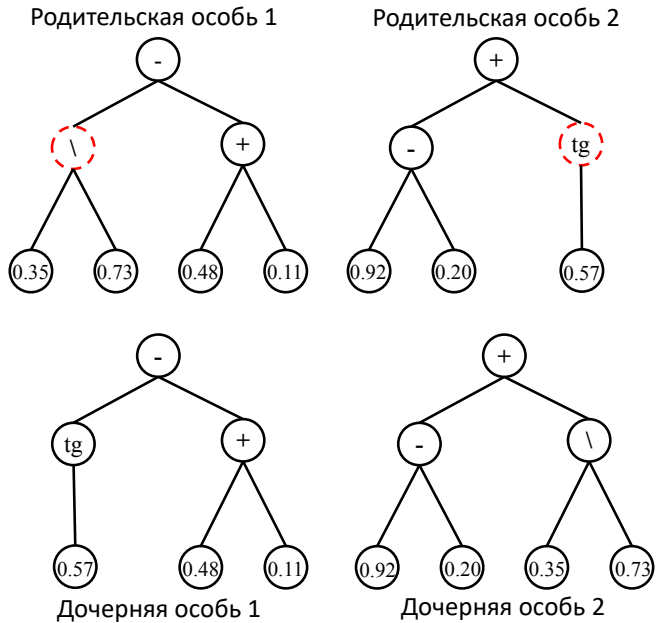
$$\cos\theta = 1 - \frac{M_{\pi^0}^2}{2E_1E_2}$$

$$P_T = \sqrt{(P_x^{\pi^0})^2 + (P_y^{\pi^0})^2}$$



# Генетические операторы

## Скрещивание



## Мутация

