



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
**«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»**

Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова  
Национального исследовательского центра  
«Курчатовский институт»

**Исследование образования  $K_s^0$  –мезонов на ядрах при  
энергии 26 ГэВ**

**Эксперимент СПАСЧАРМ**

Докладчик: Калугин Н.

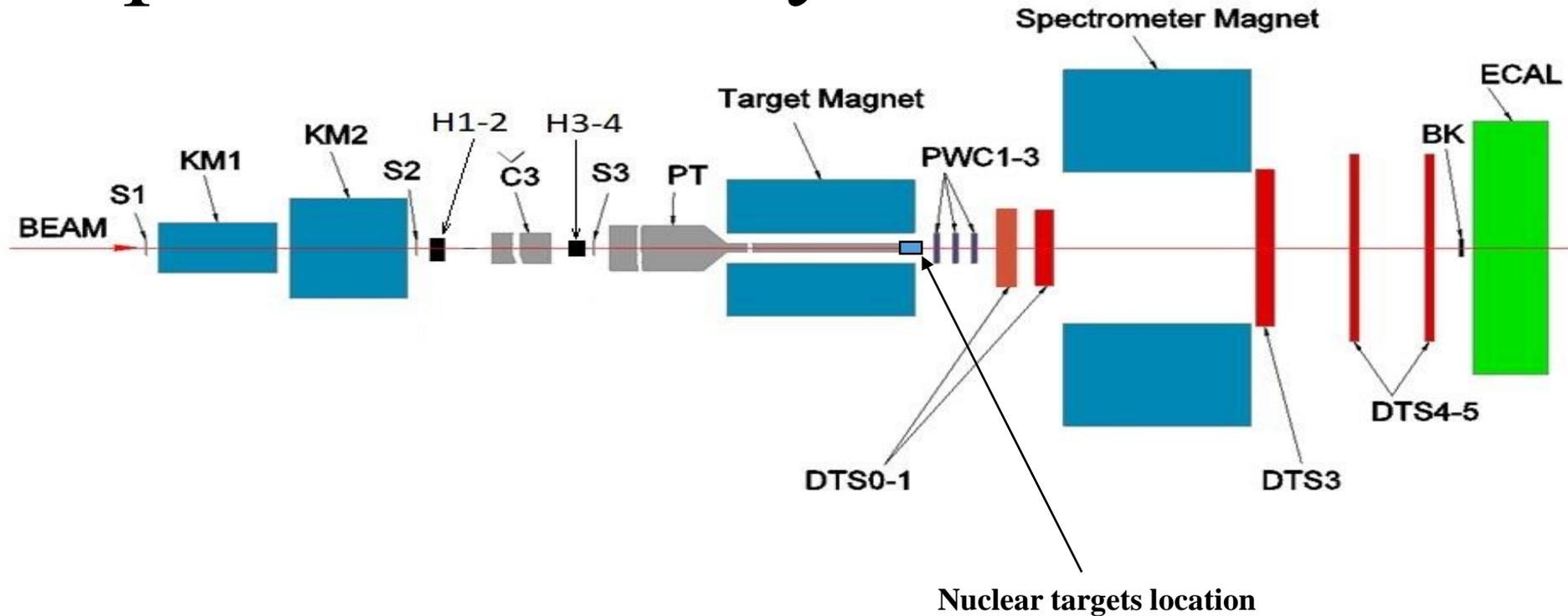
# Введение

$A$ -зависимость является традиционным фундаментальным исследованием. Например, измеренный параметр  $\alpha$   $A$ -зависимости, для частиц, состоящих из легких кварков  $\sim 2/3$ , тогда как для чармония  $\sim 1$ .

На текущий момент накоплены экспериментальные результаты по  $A$ -зависимости инклюзивного образования  $K_S^0$  – мезона (в моде распада на  $\pi^+ \pi^-$ ) в  $pA$ -взаимодействиях (HERA-B, СВД-2, Fermilab),  $K^+A$ -взаимодействиях (EHS, Гиперон),  $\pi^+A$ (EHS) при различных энергиях и различных кинематических диапазонах.

Какие-либо экспериментальные результаты по  $A$ -зависимости  $K_S^0$  – мезонов (в моде распада на  $\pi^+ \pi^-$ ) в  $\pi A$ -взаимодействиях  $K^-A$ -взаимодействиях отсутствуют. В данной работе эти результаты получены впервые.

# Экспериментальная установка СПАСЧАРМ



Проведен анализ данных, набранных в сеансах 2021 и 2022 гг. на ядерных мишенях

# Список участников сеанса 2021

## **ИФВЭ**

Абрамов В.А., Васильев А.Н., Гончаренко Ю.М., Деревщиков А.А.,  
Калугин Н.К., Минаев Н.Г., Мельник Ю.М., Моисеев В.В., Морозов Д.А.  
Мочалов В.В., Новиков К.Д., Узунян А.В., Рыжиков С.В., Рязанцев А.В.,  
Семенов П.А., Якутин А.Е.

## **НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ**

Алексеев И.Г., Самигуллин Э.И., Свирида Д.Н., Нестеров В.В.

## **НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ**

Козленко Н.Г., Гриднев А.Б. Новинский Д.В., Темирбулатов В.С.

## **МИФИ**

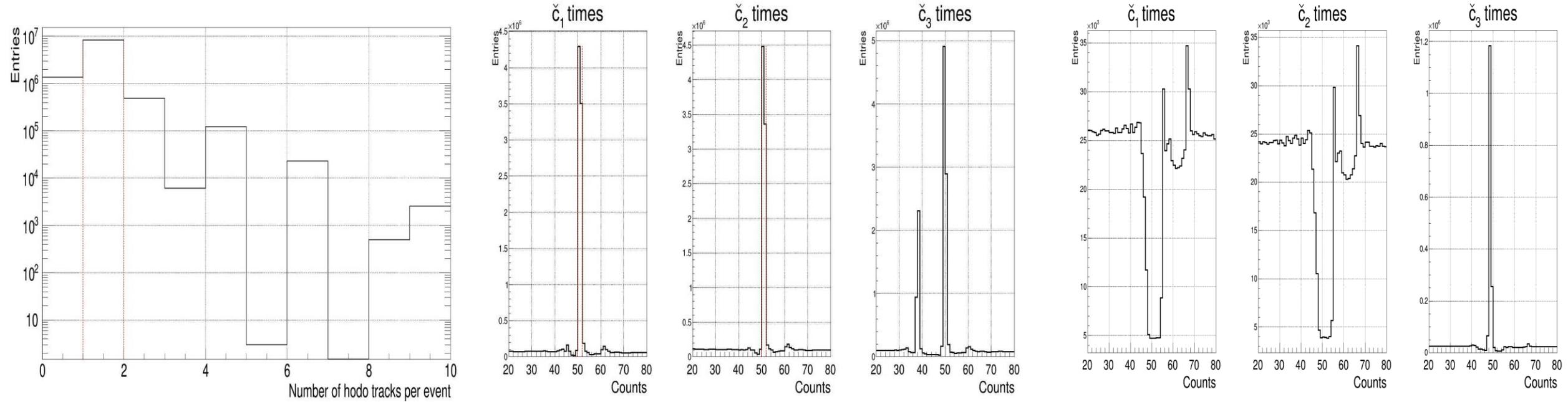
Нурушева М.Б., Рыков В.Л.

# Отбор событий

1. Множественность пучковых треков на событие, равная единице; идентифицированный пучковой  $\pi^-$  ( $K^-$ )- мезон; наличие в событии минимум одной  $h^+ h^-$  - пары.
2. Выделение многовершинных событий
3. Z-координата вершины распада
4. Расстояние между  $h^+ h^-$  - парами
5. Критерий Арментероса-Подольянского
6. Общая вершина между пучковым  $\pi^-$  ( $K^-$ ) - мезоном и  $V^0$  - частицей

# Отбор событий

1. Множественность пучковых треков на событие, равная единице; идентифицированный пучковой  $\pi^-$  - мезон (для данных 2021 года) и пучковой  $K^-$  мезон (для данных 2022 года); наличие в событии минимум одной  $h^+ h^-$  - пары.



$$M_{inv} = \sqrt{(E_{h^+} + E_{h^-})^2 - (p_{h^+}^x + p_{h^-}^x)^2 - (p_{h^+}^y + p_{h^-}^y)^2 - (p_{h^+}^z + p_{h^-}^z)^2}$$

$$E_{h^\mp} = \sqrt{m_{\pi^\mp}^2 + (p_{h^\mp}^x)^2 + (p_{h^\mp}^y)^2 + (p_{h^\mp}^z)^2} \quad m_{\pi^\mp} \approx 0.139 \text{ ГэВ}$$

# Отбор событий

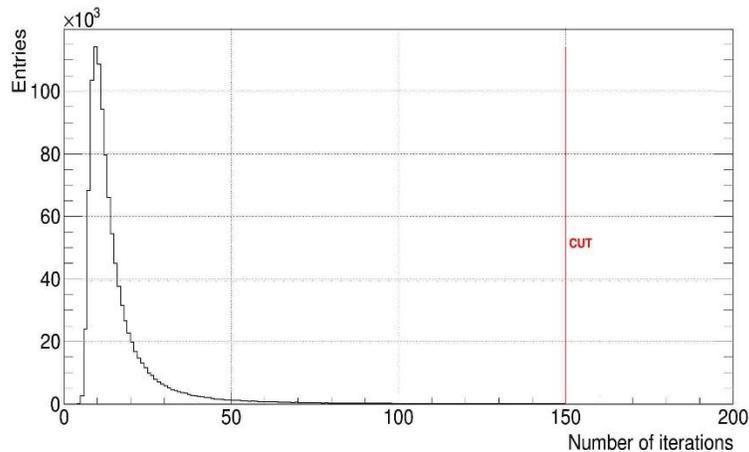
## 2. Разделение событий на одновершинные и многовершинные

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{B_{x_i} + Z_V \cdot A_{x_i} - X_V}{\sigma_{X_i}} \right]^2 + \sum_{i=1}^n \left[ \frac{B_{y_i} + Z_V \cdot A_{y_i} - Y_V}{\sigma_{Y_i}} \right]^2$$

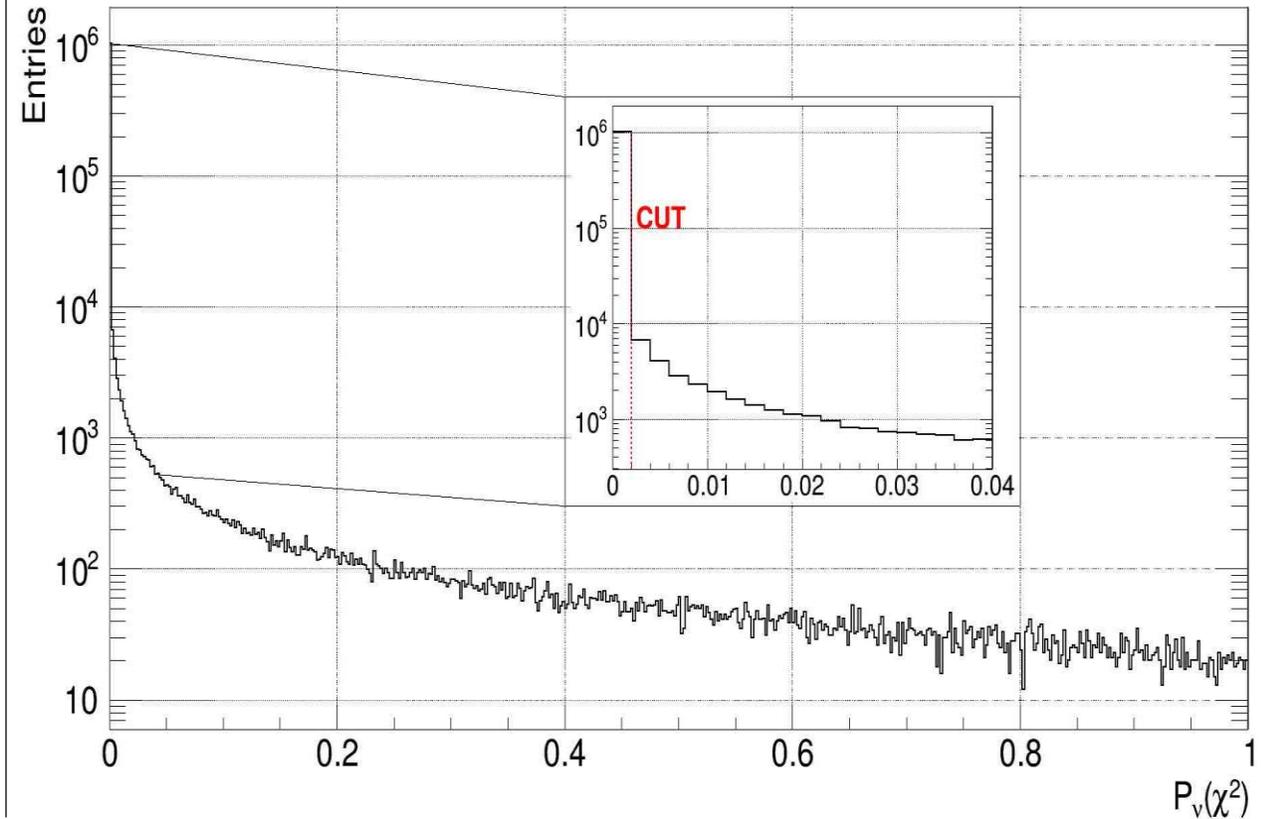
$$\sigma_{X_i}^2(Z_V) = \sigma_{A_{X_i}}^2 \cdot Z_V^2 + \sigma_{B_{X_i}}^2$$

$$\sigma_{Y_i}^2(Z_V) = \sigma_{A_{Y_i}}^2 \cdot Z_V^2 + \sigma_{B_{Y_i}}^2$$

Условие сходимости итерационного процесса:  $\chi_i^2 = \chi_{i+1}^2$



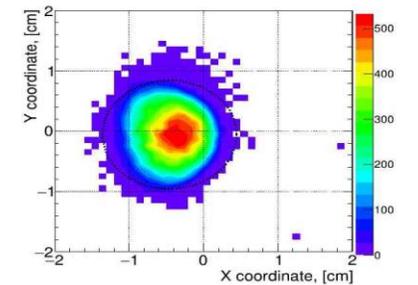
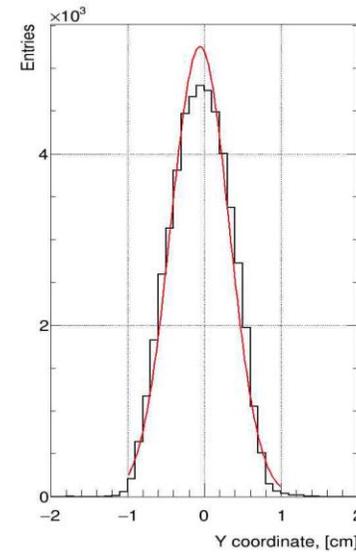
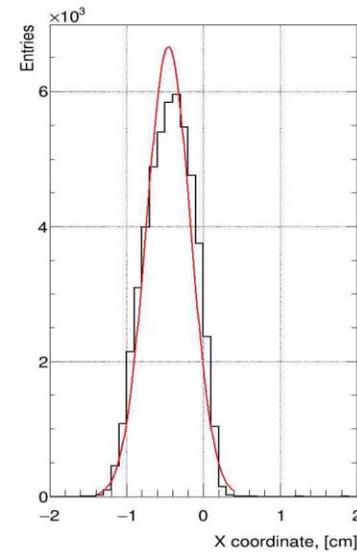
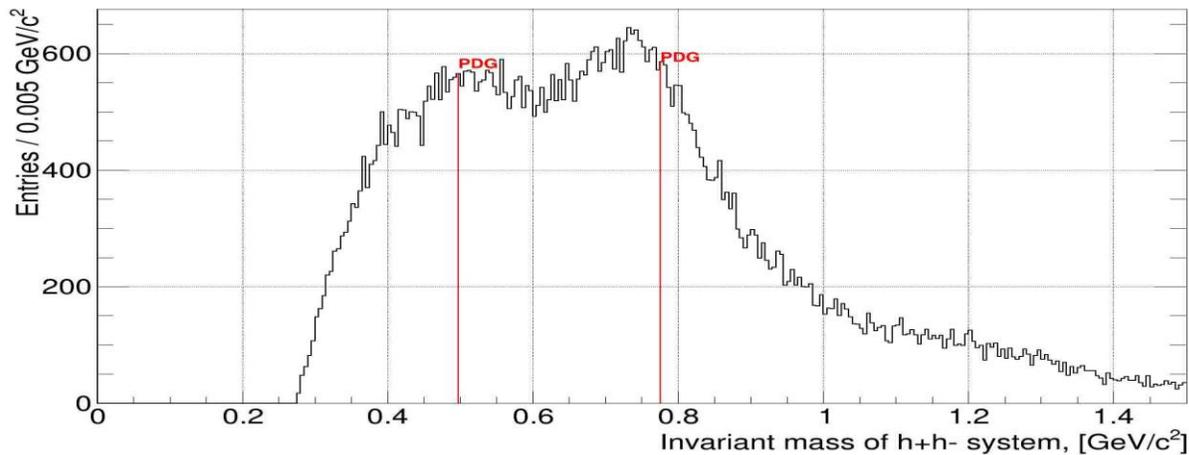
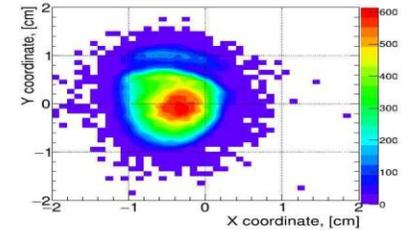
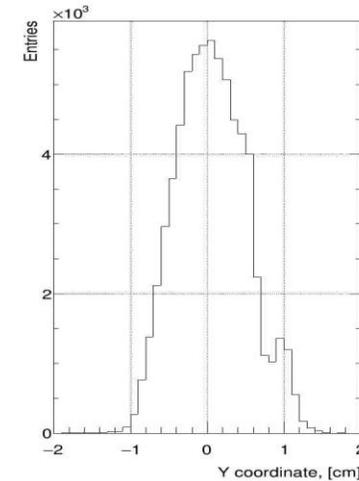
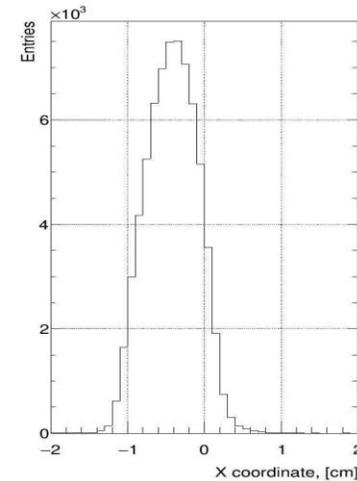
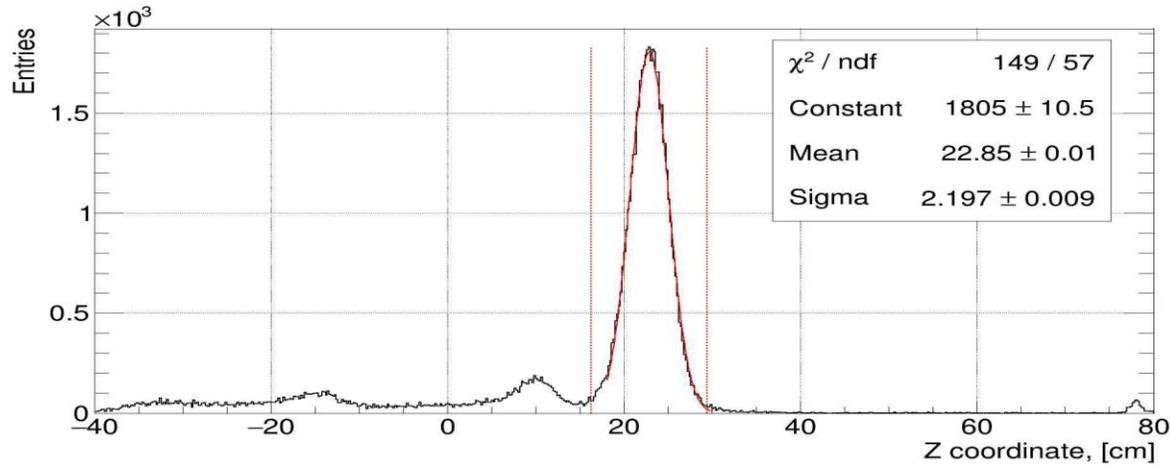
$$P_\nu(\chi^2) = \int_{\chi^2}^{\infty} f_\nu(\chi'^2) d\chi'^2 \quad \nu = 2 \cdot n - 3$$



# Отбор событий

## 2. Разделение событий на одновершинные и многовершинные

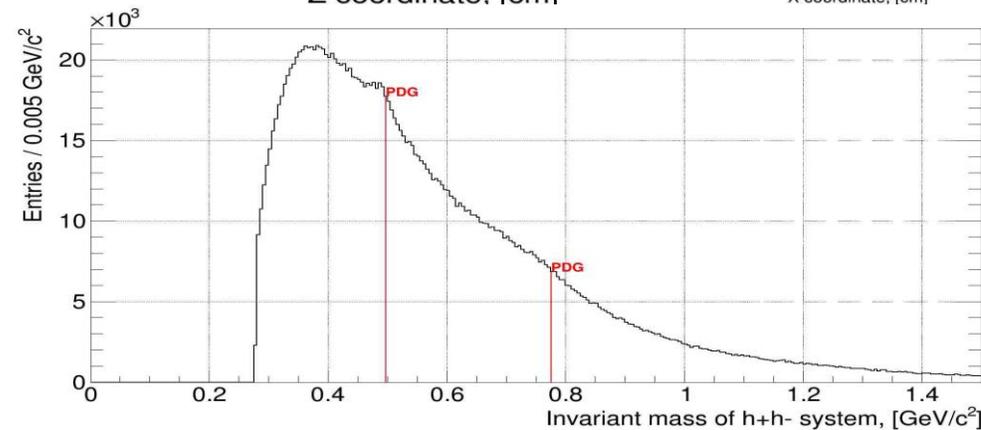
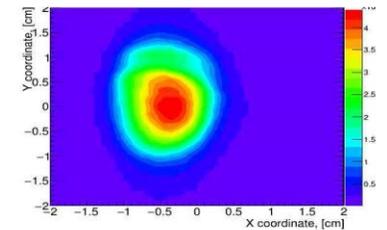
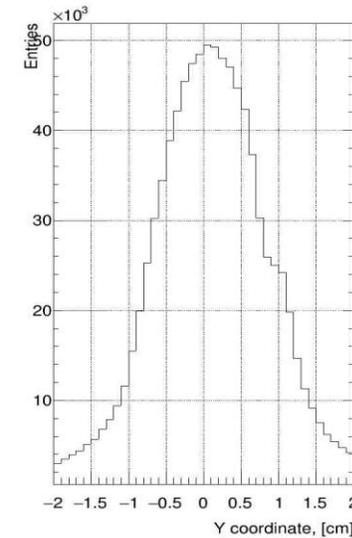
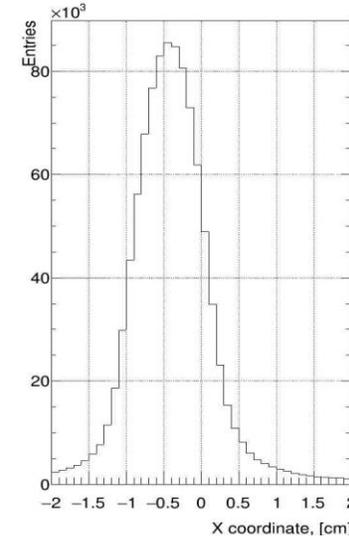
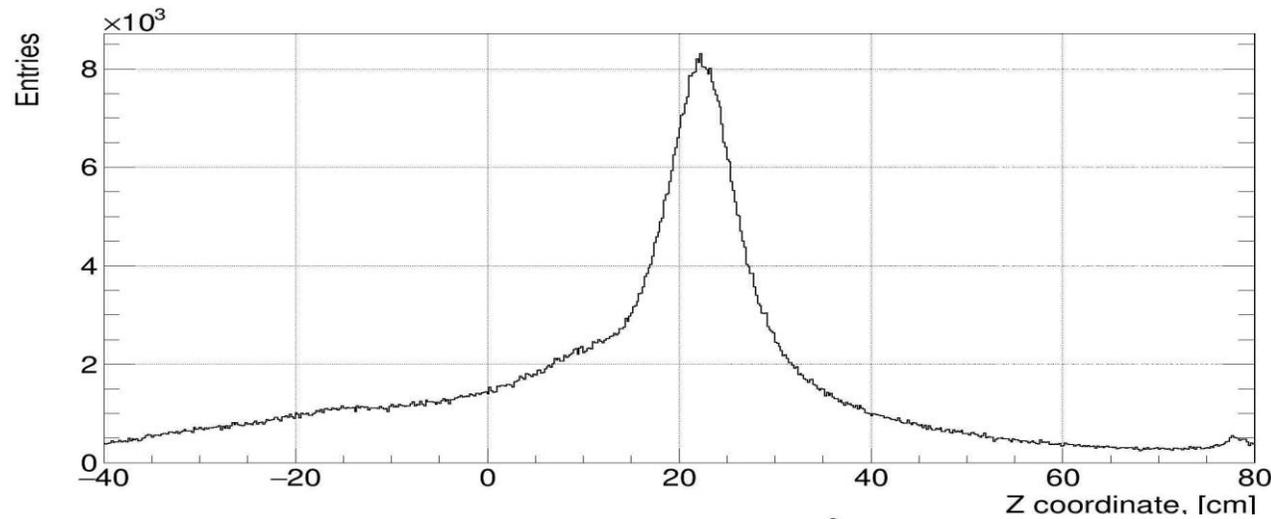
Одновершинные события:  $P_v(\chi^2) > 0.002$



# Отбор событий

## 2. Разделение событий на одновершинные и многовершинные

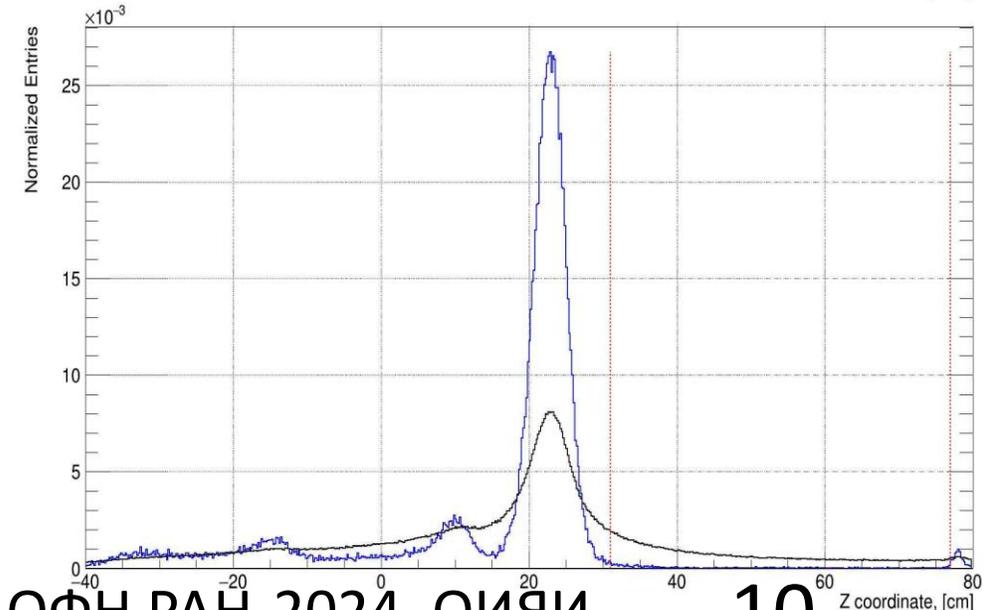
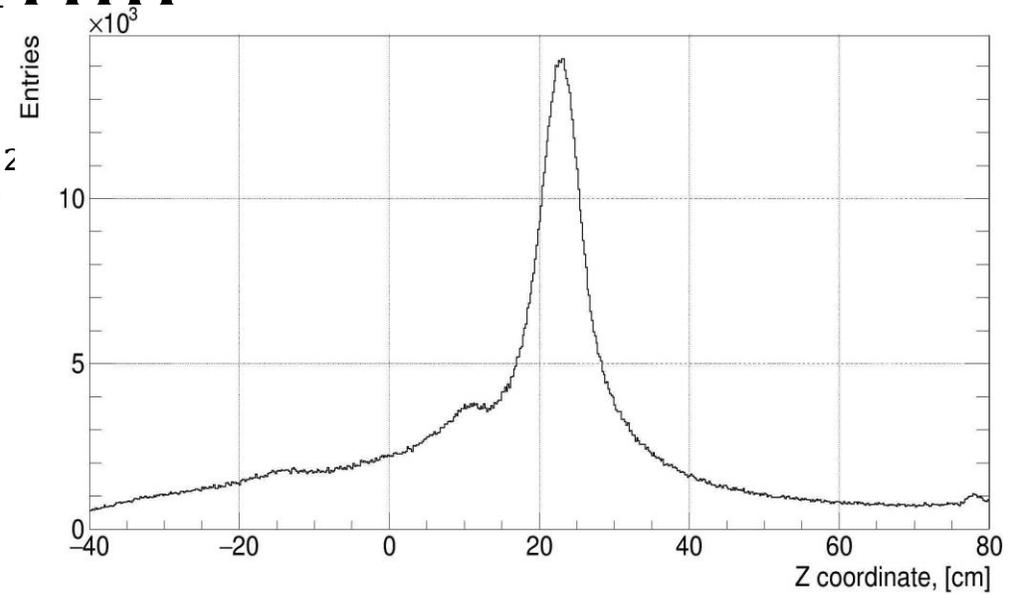
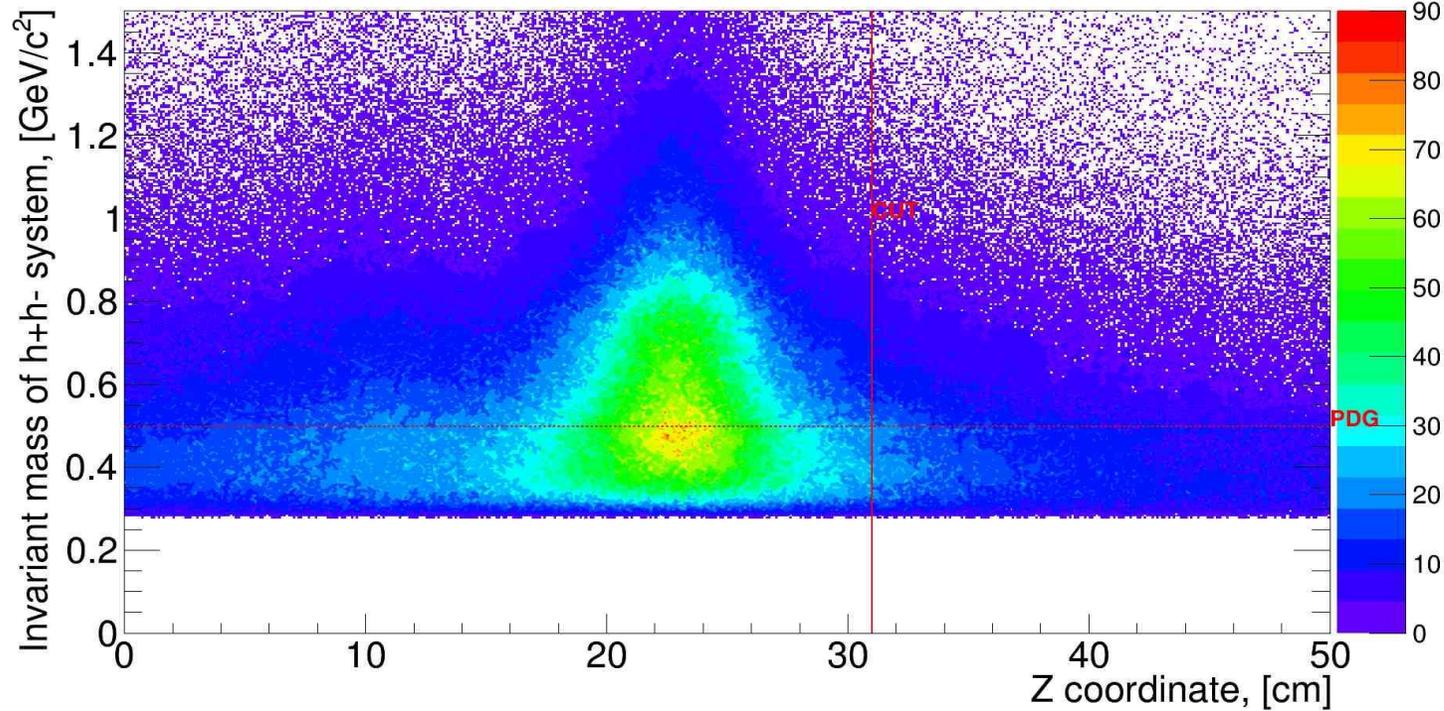
Многовершинные события:  $P_v(\chi^2) < 0.002$



# Отбор событий

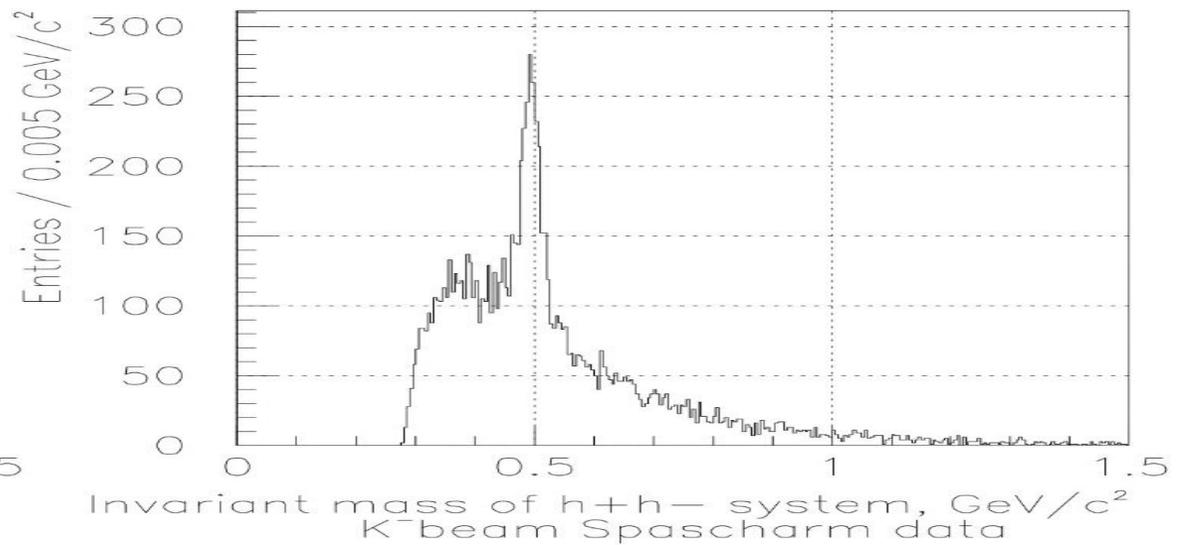
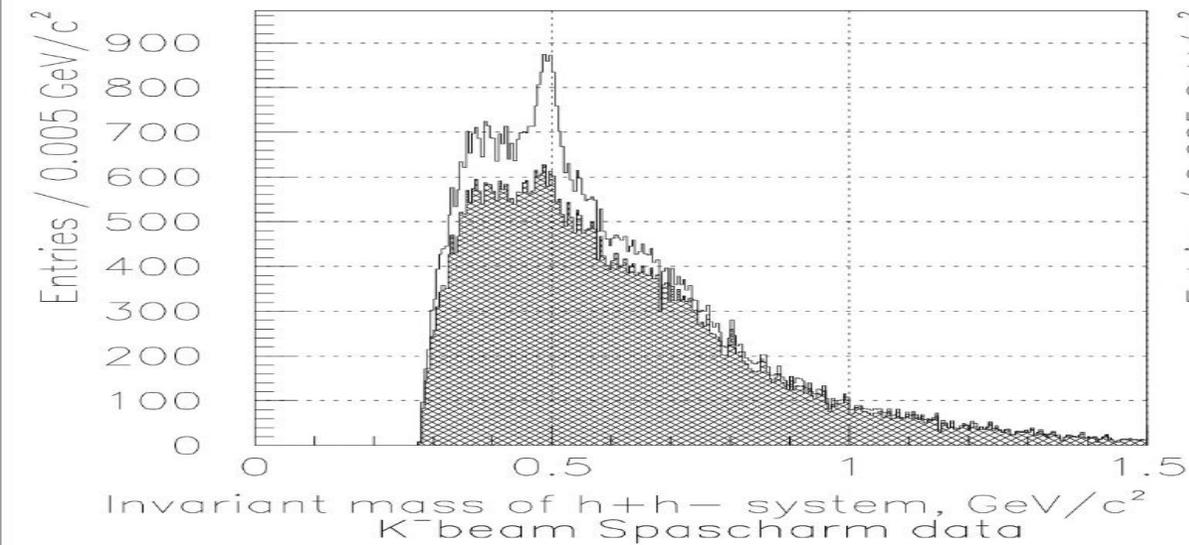
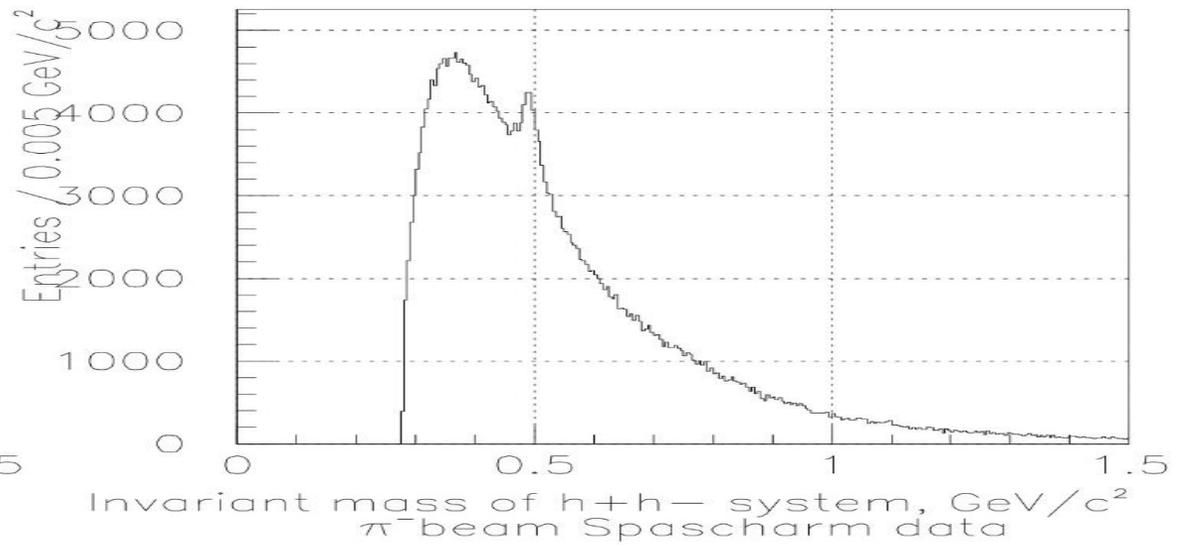
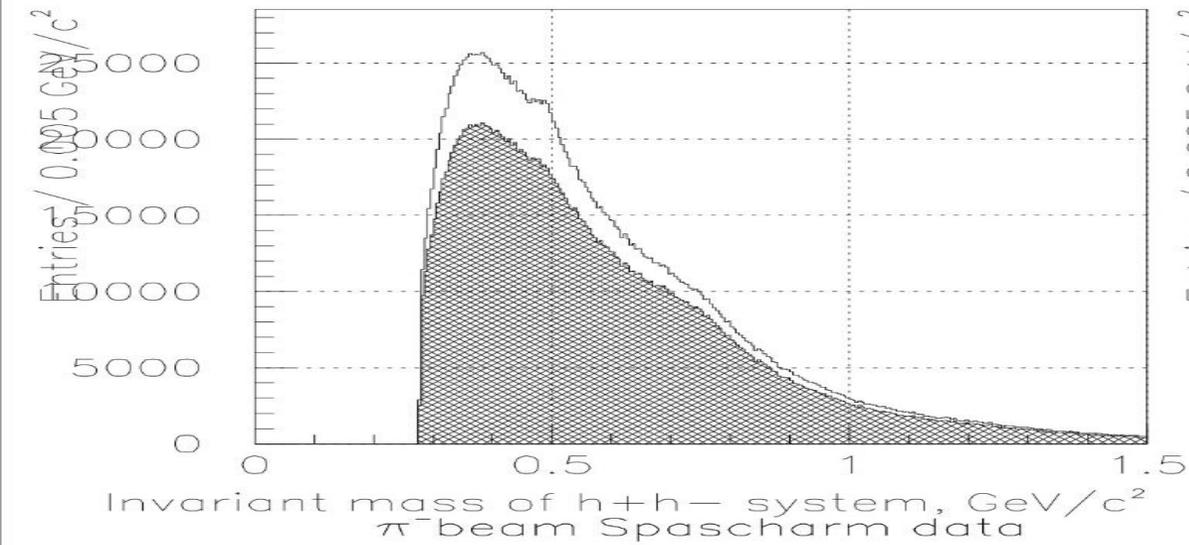
## 3. Z-координата вершины распада

$$L = \sum_{i=1}^{n=2} (B_{X_i} + Z_V^{decay} \cdot A_{X_i} - X_V^{decay})^2 + \sum_{i=1}^{n=2} (B_{Y_i} + Z_V^{decay} \cdot A_{Y_i} - Y_V^{decay})^2$$



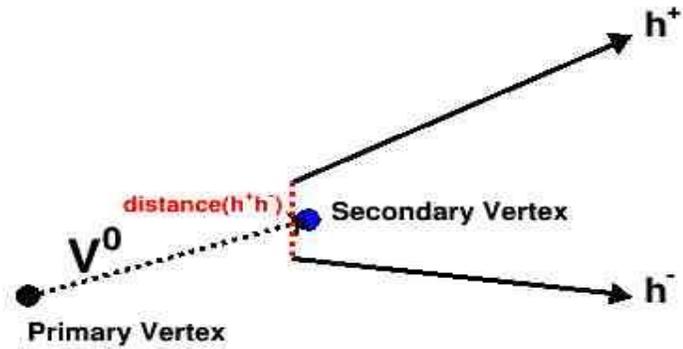
Поиск в т.н. распадной длине  $31\text{ cm} < Z < 77\text{ cm}$

# Отбор событий. Z-координата вершины распада



# Отбор событий

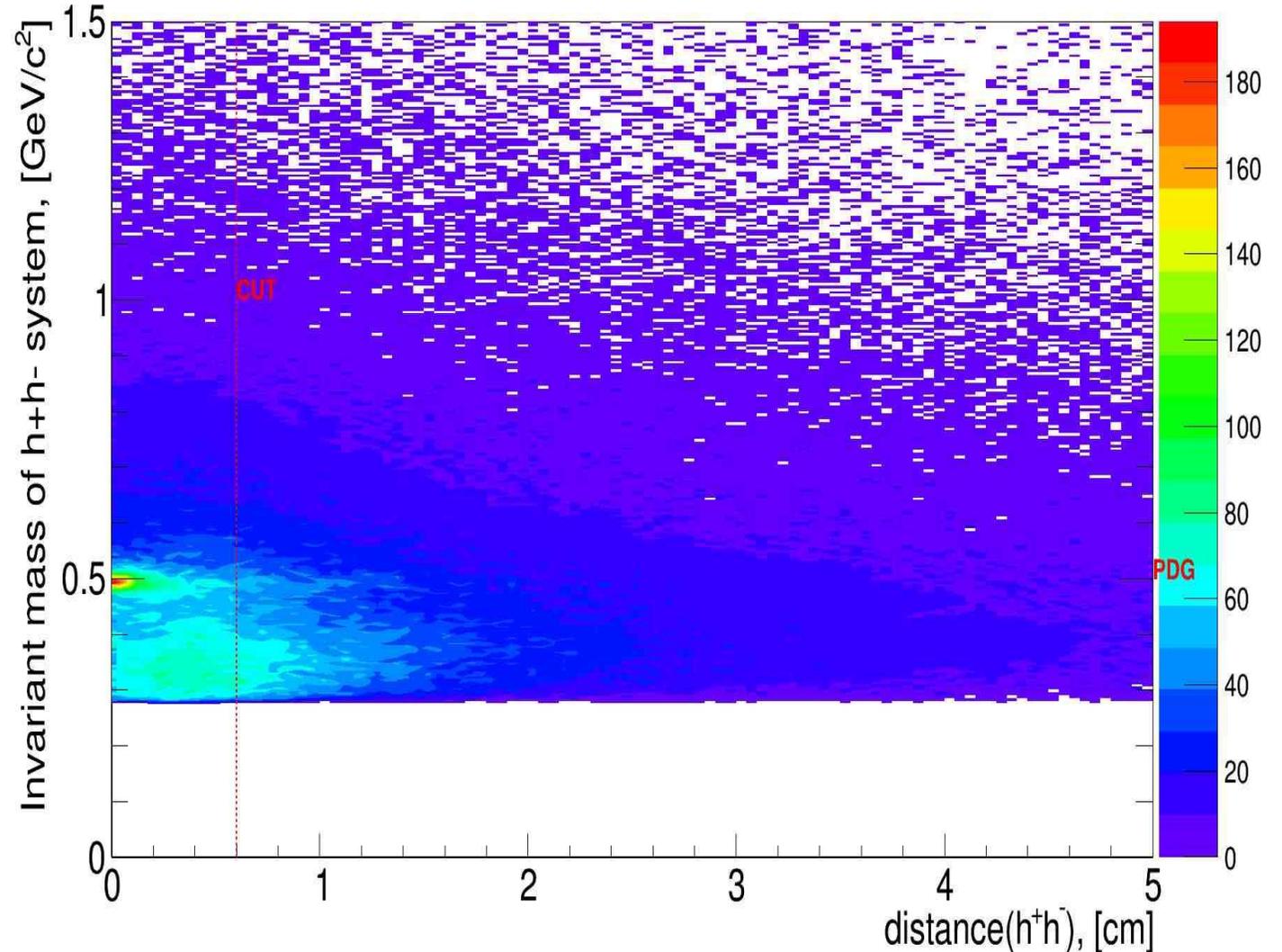
## 4. Расстояние между $h^+ h^-$ - парами



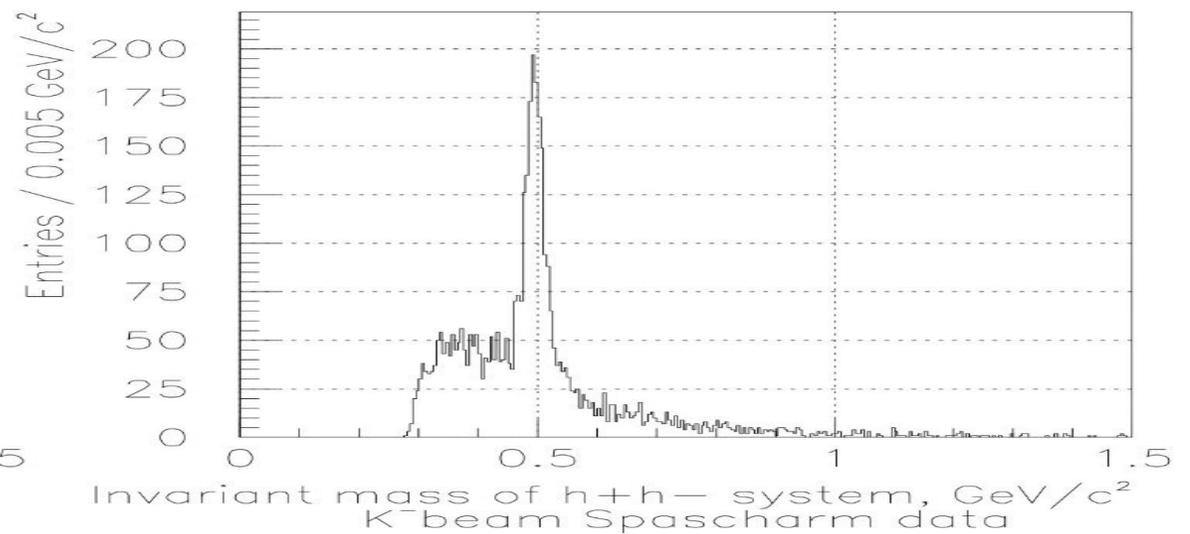
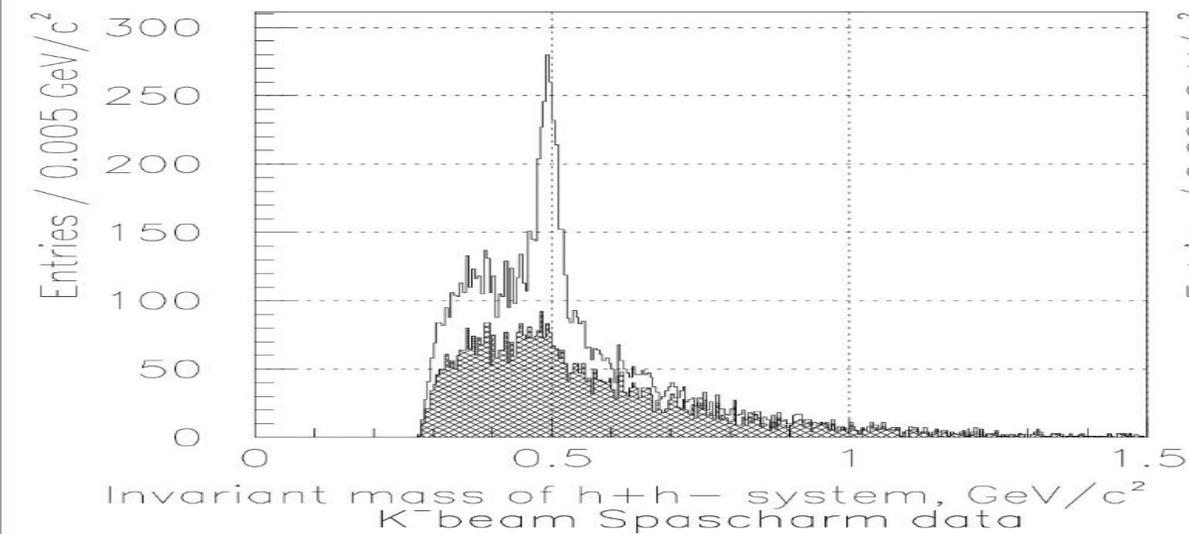
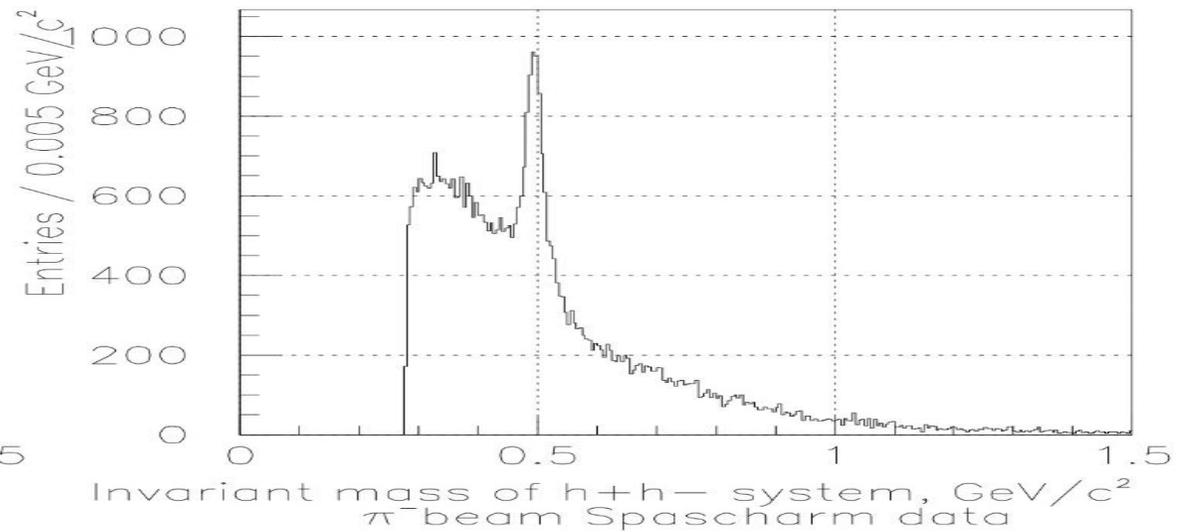
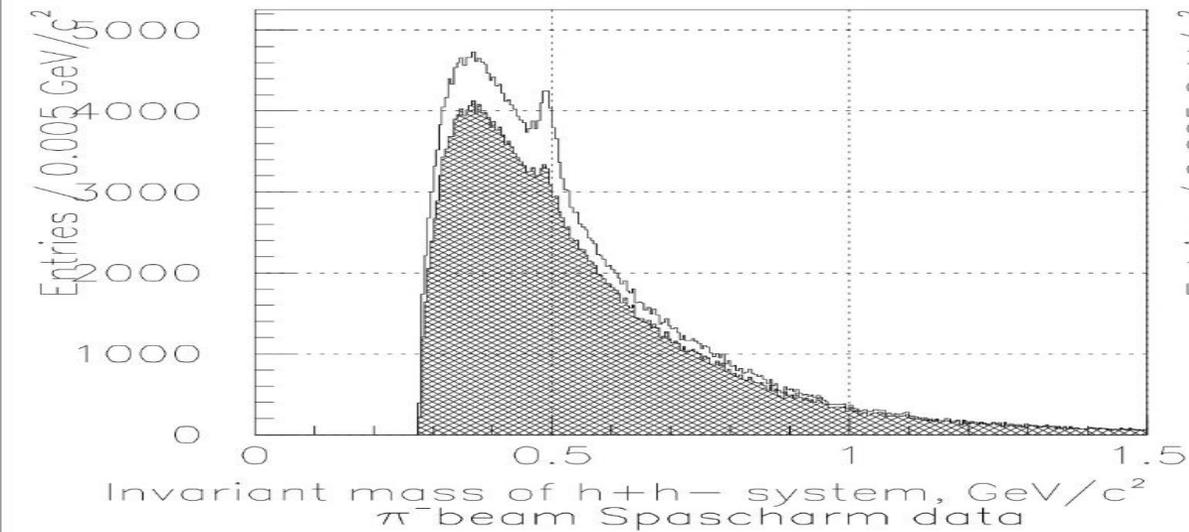
$$distance(h^+h^-) = \frac{\left| \begin{array}{ccc} p_{h^+}^x & p_{h^+}^y & p_{h^+}^z \\ p_{h^-}^x & p_{h^-}^y & p_{h^-}^z \\ x_{h^-} - x_{h^+} & y_{h^-} - y_{h^+} & z_{h^-} - z_{h^+} \end{array} \right|}{\sqrt{\left| \begin{array}{cc} p_{h^+}^y & p_{h^+}^z \\ p_{h^-}^y & p_{h^-}^z \end{array} \right|^2 + \left| \begin{array}{cc} p_{h^+}^x & p_{h^+}^z \\ p_{h^-}^x & p_{h^-}^z \end{array} \right|^2 + \left| \begin{array}{cc} p_{h^+}^x & p_{h^+}^y \\ p_{h^-}^x & p_{h^-}^y \end{array} \right|^2}}$$

$$h^-: \frac{x - x_{h^-}}{p_{h^-}^x} = \frac{y - y_{h^-}}{p_{h^-}^y} = \frac{z - z_{h^-}}{p_{h^-}^z}$$

$$h^+: \frac{x - x_{h^+}}{p_{h^+}^x} = \frac{y - y_{h^+}}{p_{h^+}^y} = \frac{z - z_{h^+}}{p_{h^+}^z}$$

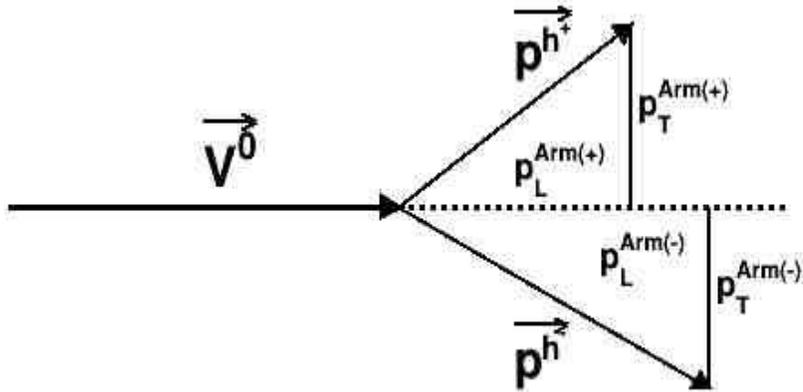


# Отбор событий. Расстояние между $h^+ h^-$ - парами

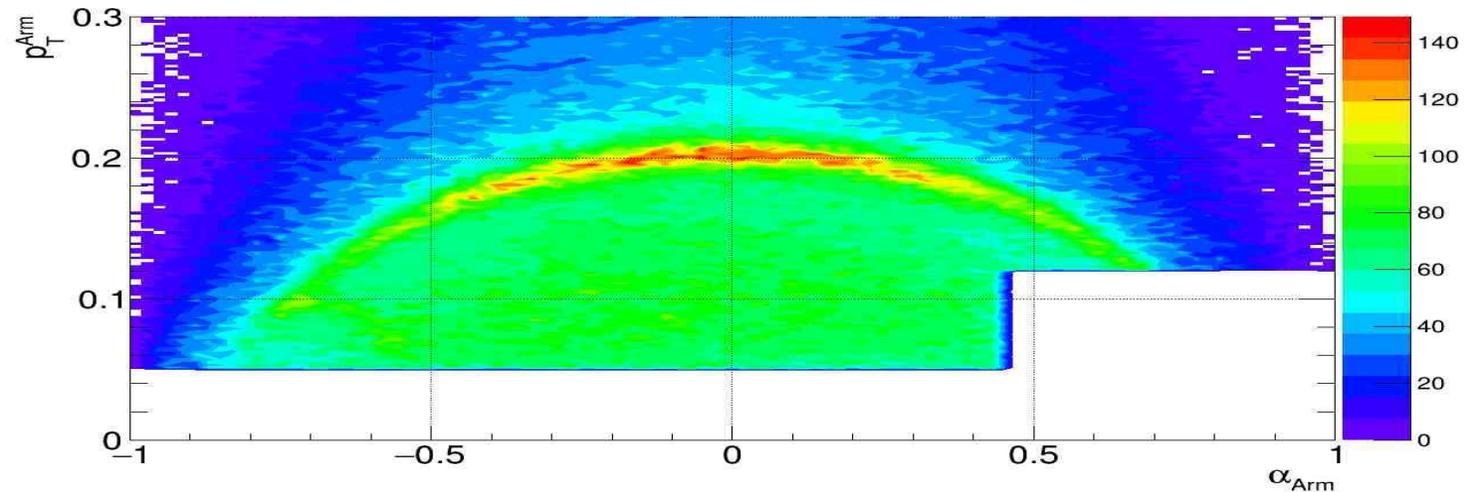
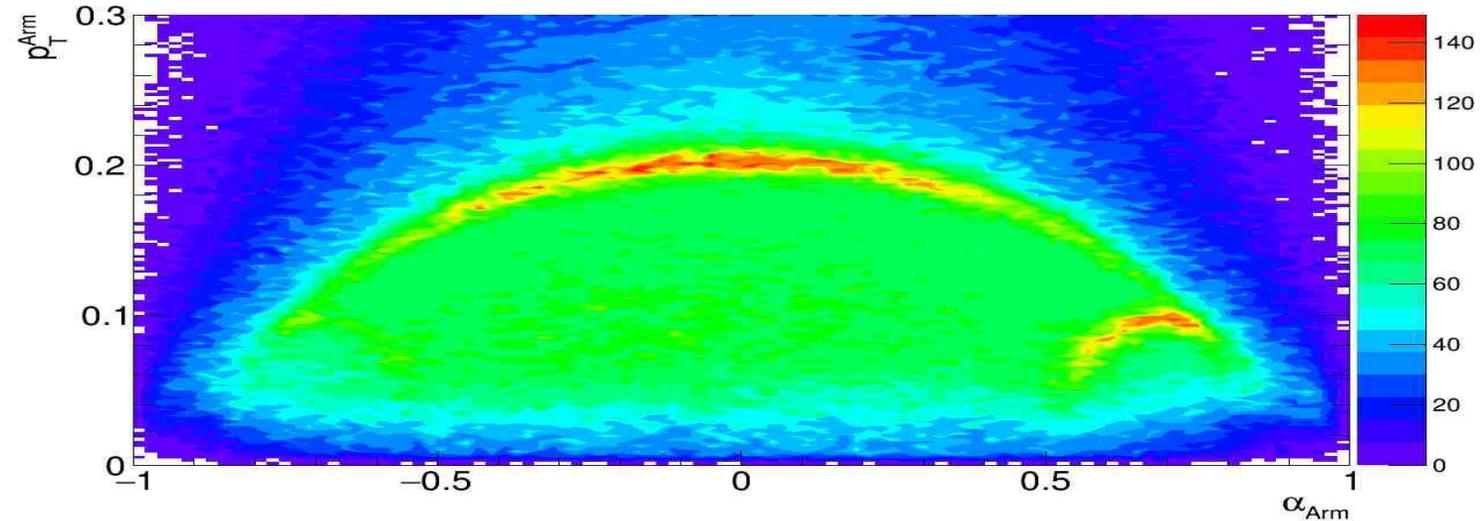


# Отбор событий

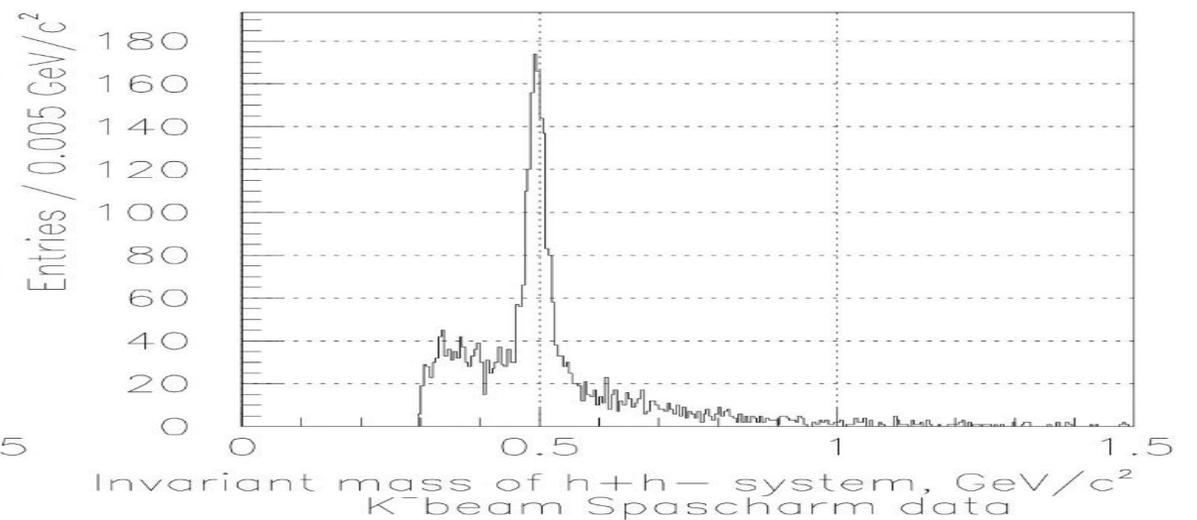
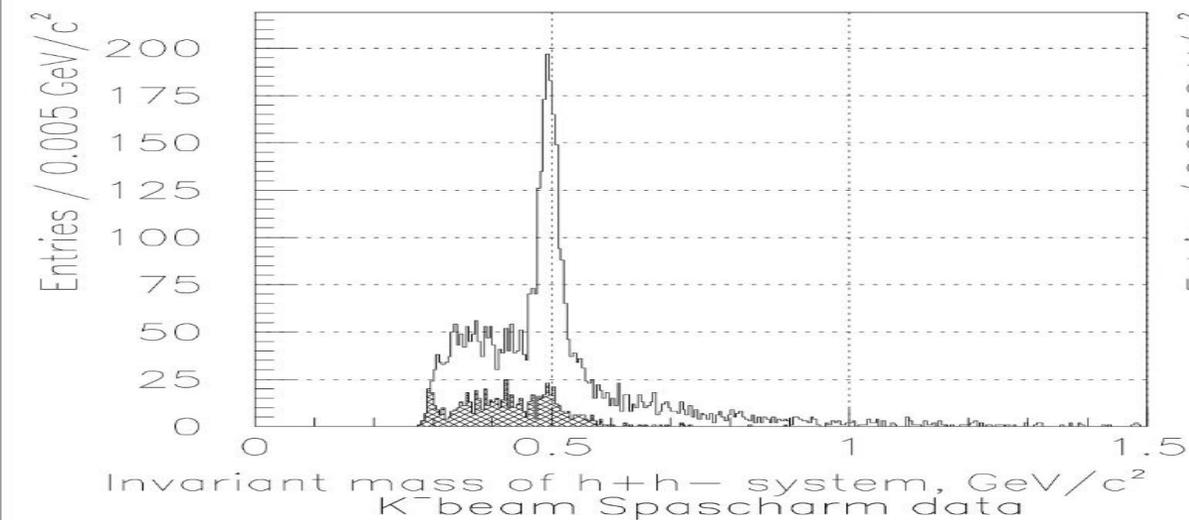
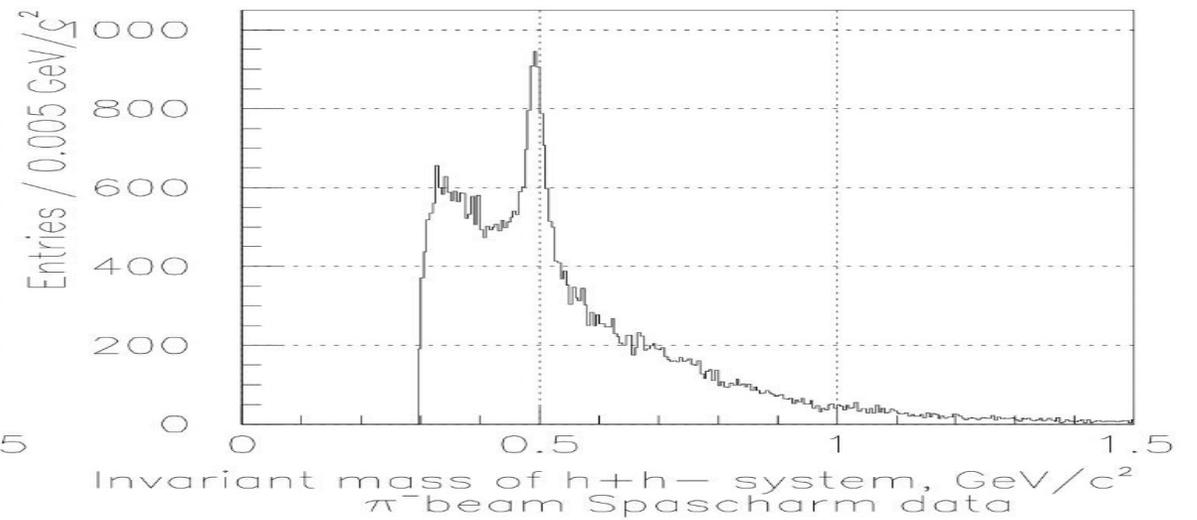
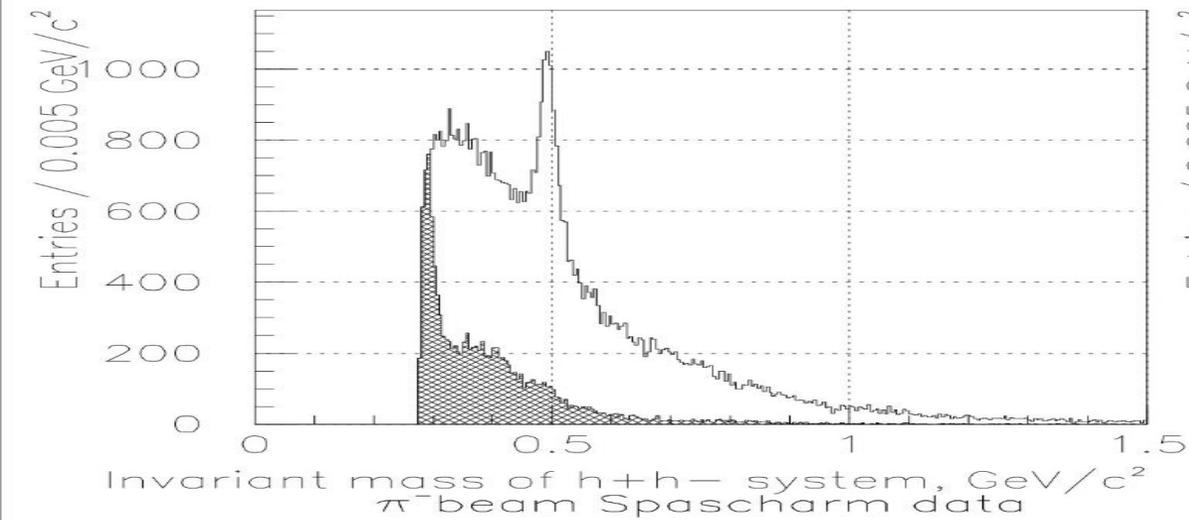
## 5. Критерий Армента-Подольского



$$\alpha_{Arm} = \frac{p_L^{Arm(+)} - p_L^{Arm(-)}}{p_L^{Arm(+)} + p_L^{Arm(-)}}$$

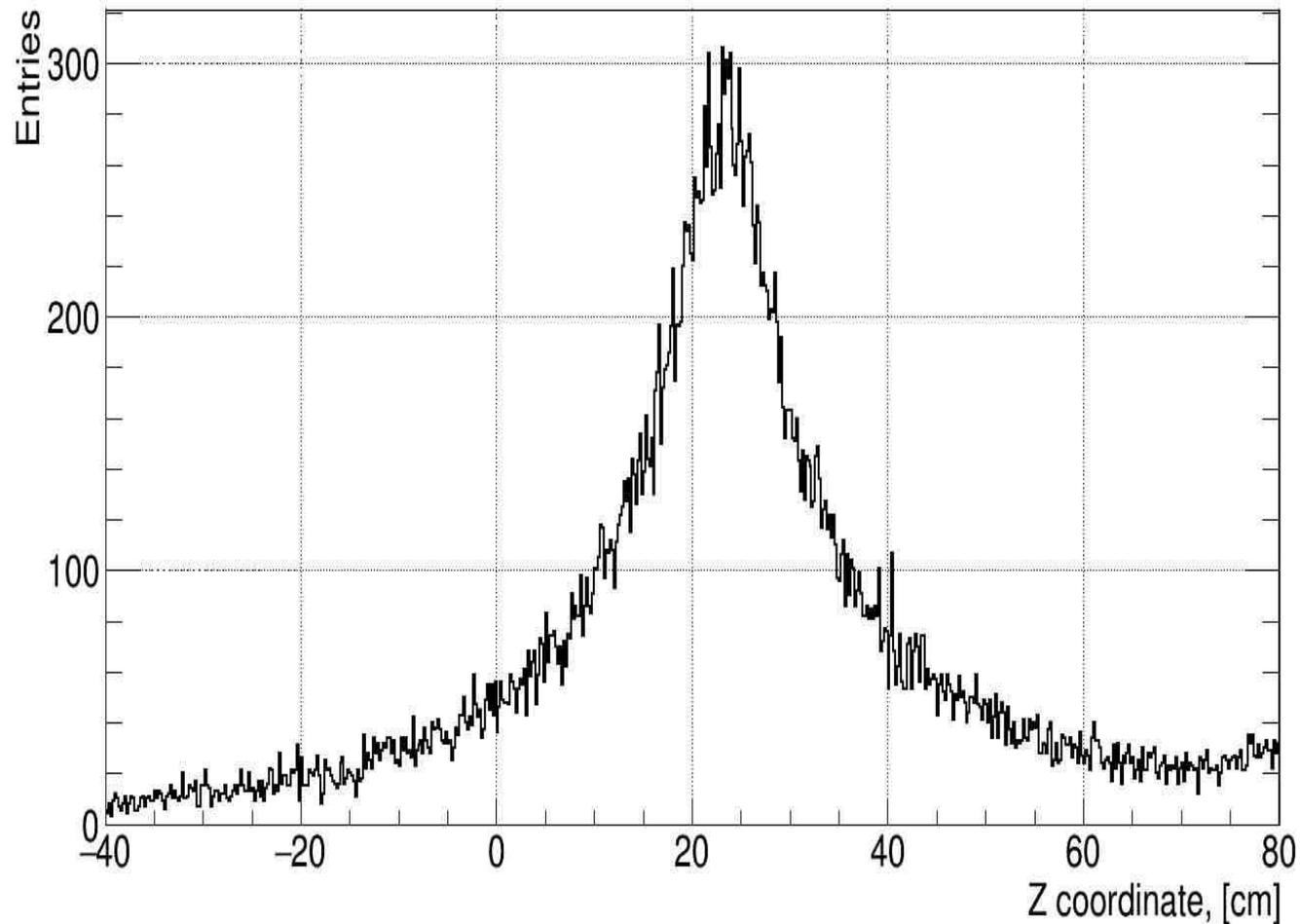
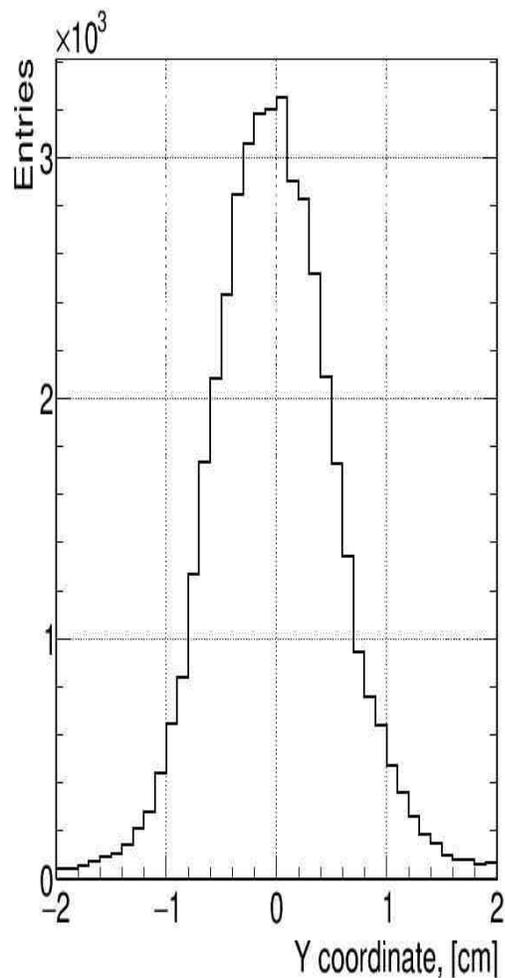
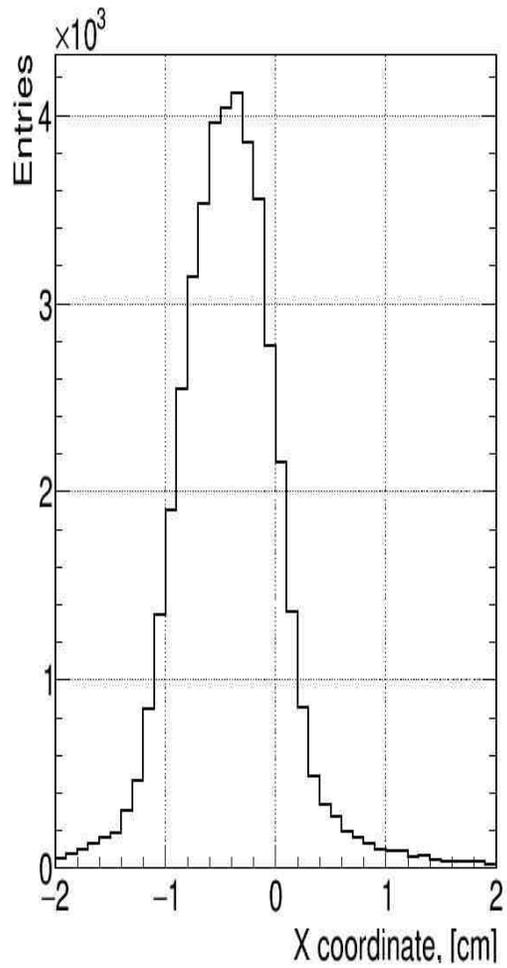


# Отбор событий. Критерий Арментероса-Подольянского



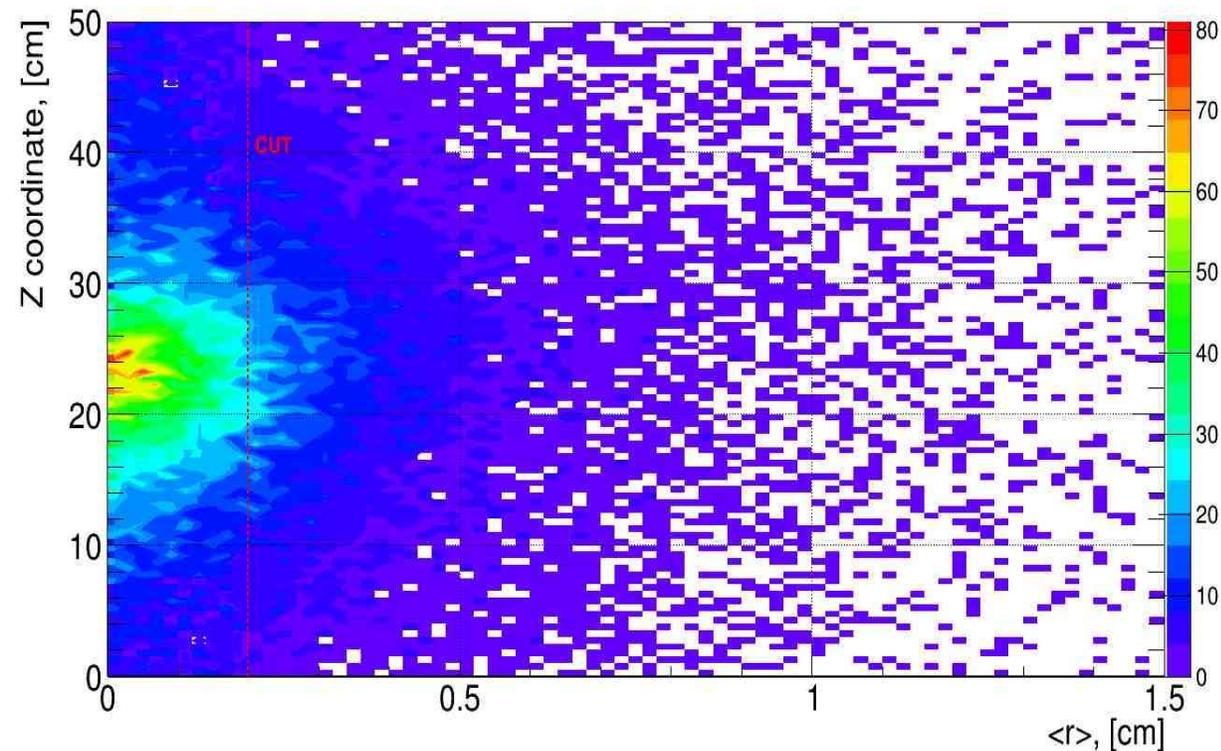
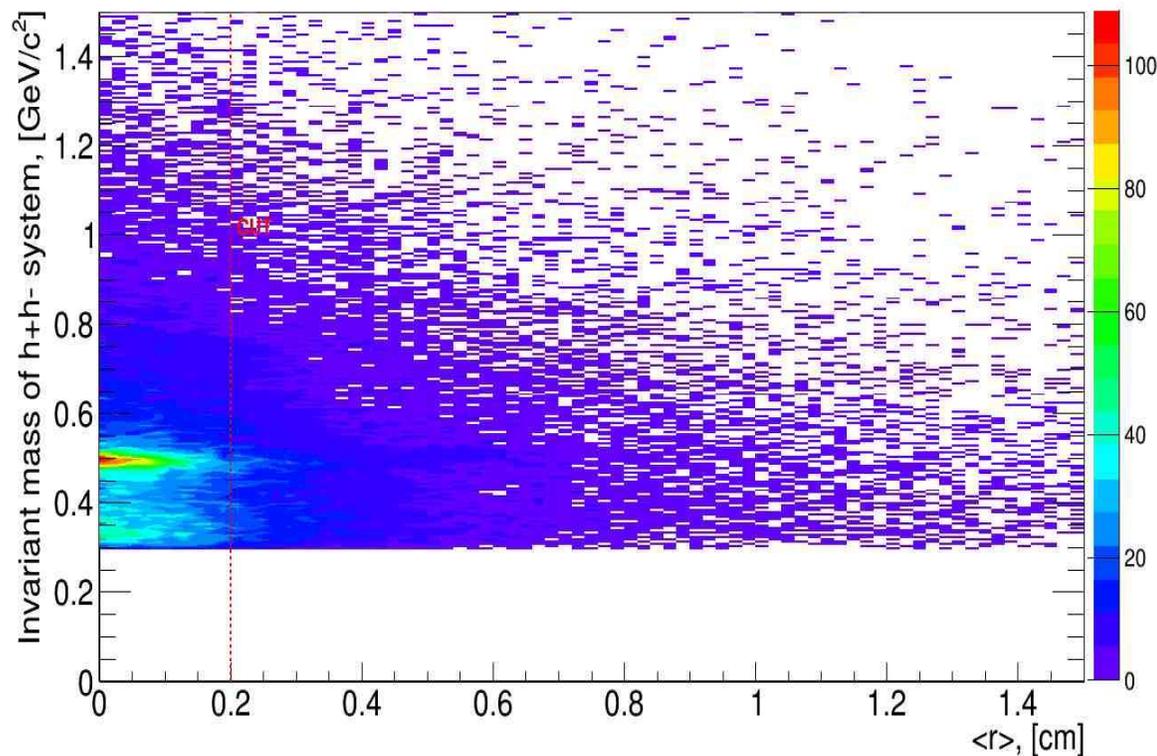
# Отбор событий

## 5. Общая вершина между пучковым $\pi^-$ ( $K^-$ )- мезоном и $V^0$ -частицей



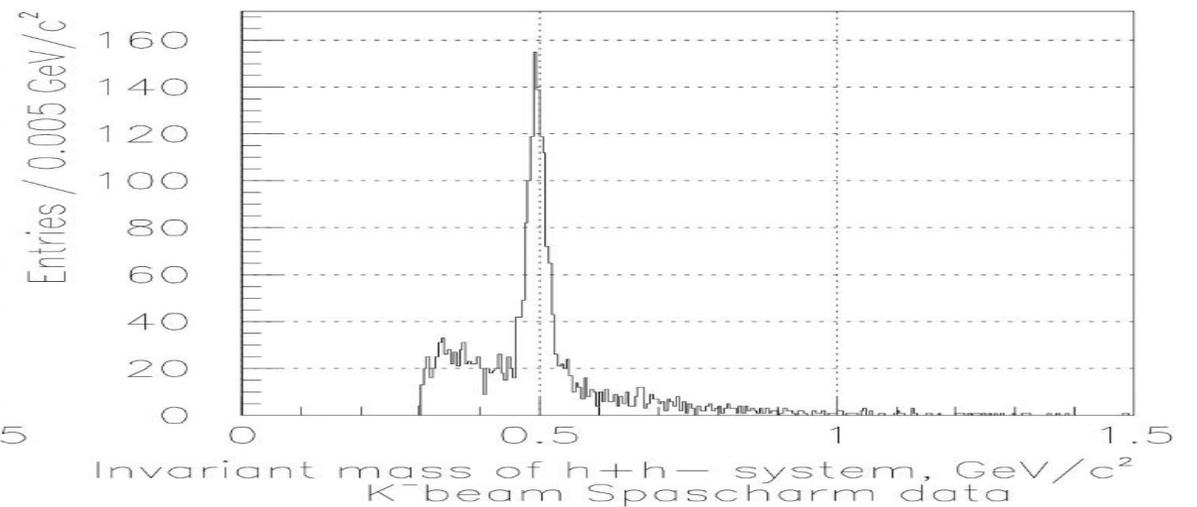
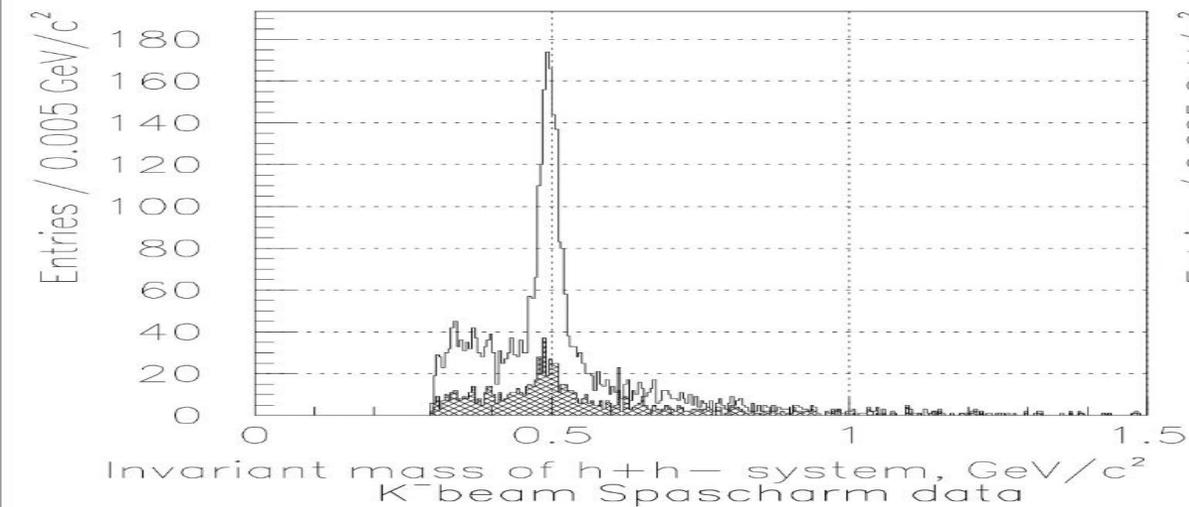
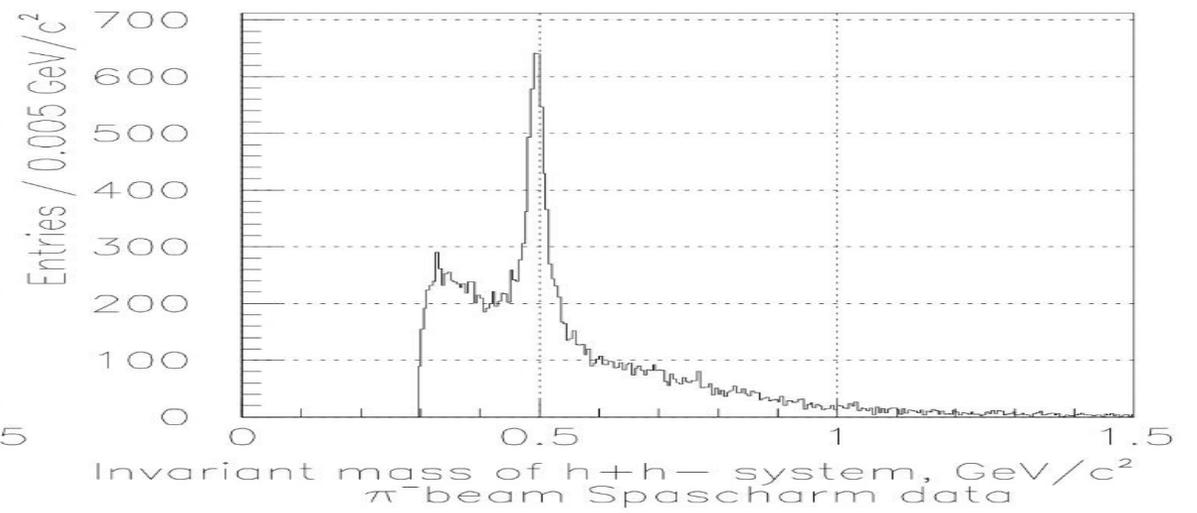
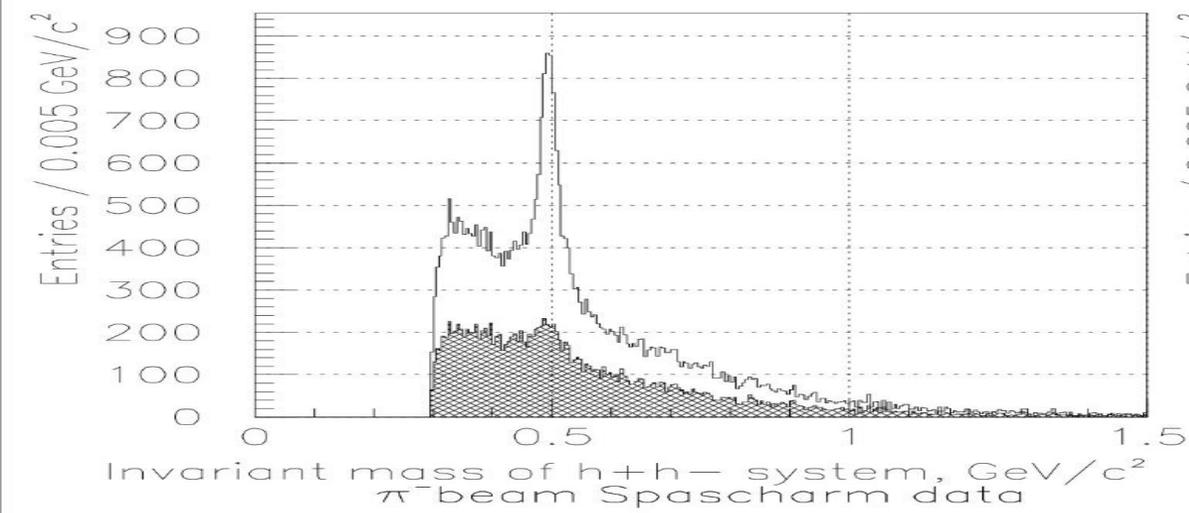
# Отбор событий

## 5. Общая вершина между пучковым $\pi^-$ ( $K^-$ )- мезоном и $V^0$ -частицей



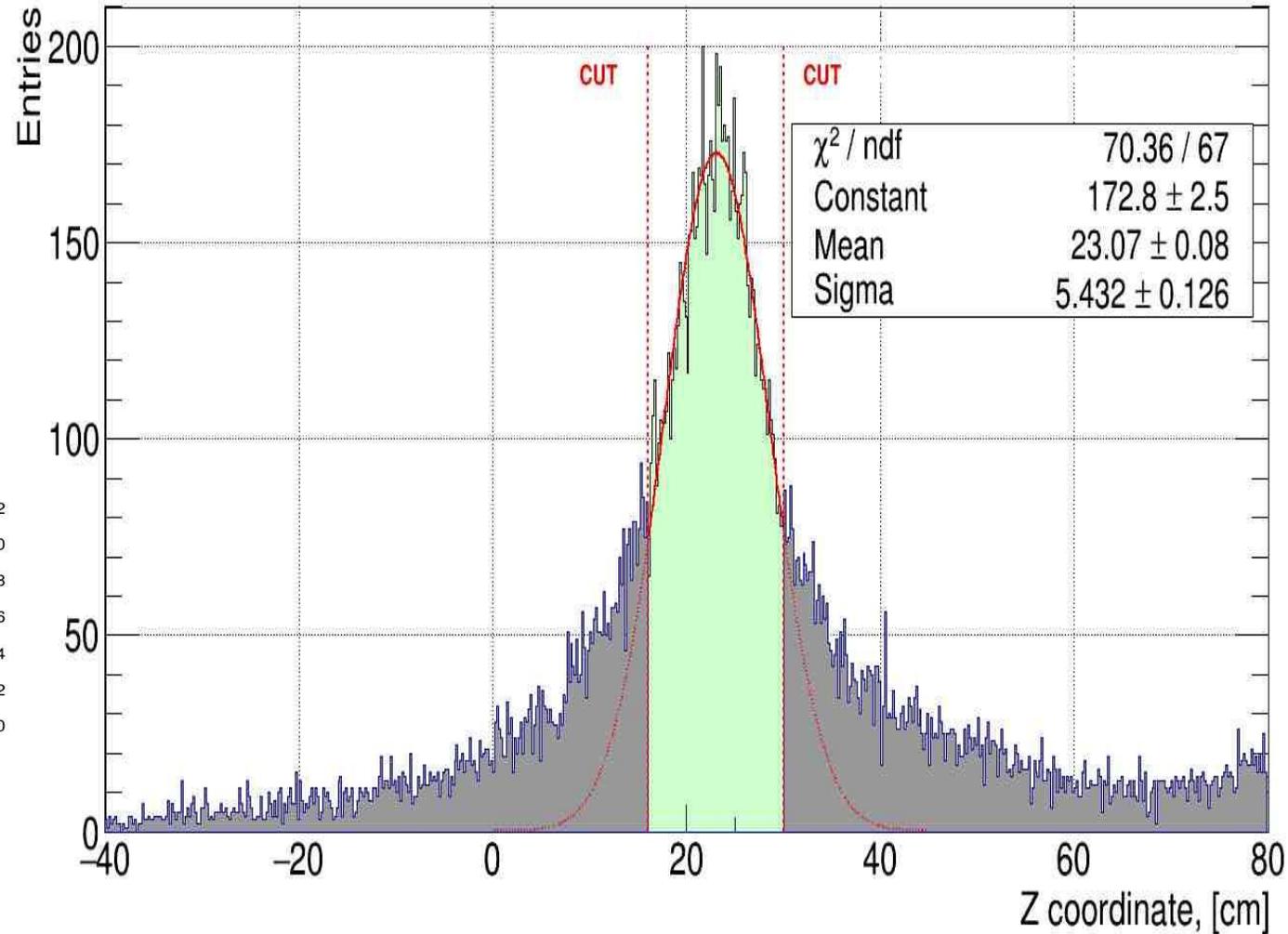
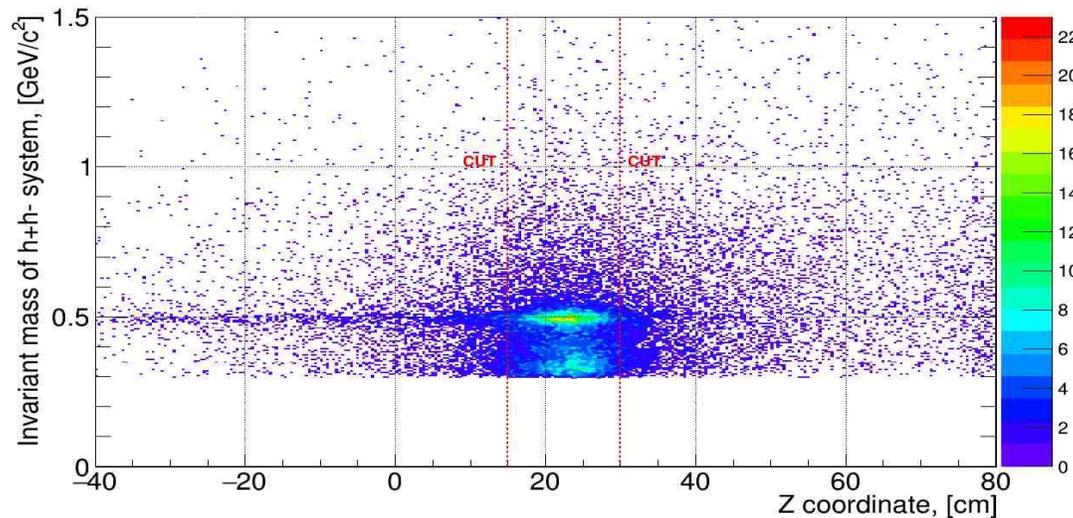
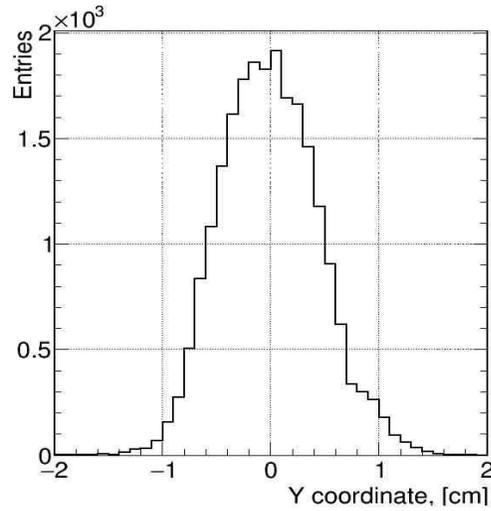
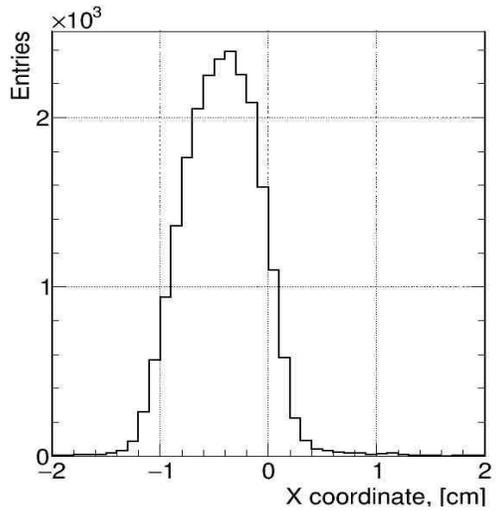
$$\langle r \rangle = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n=2} (B_{X_i} + Z_V \cdot A_{X_i} - X_V)^2 + \sum_{i=1}^{n=2} (B_{Y_i} + Z_V \cdot A_{Y_i} - Y_V)^2}{n}}$$

# Отбор событий. Общая вершина между пучковым $\pi^-$ ( $K^-$ )- мезоном и $V^0$ -частицей

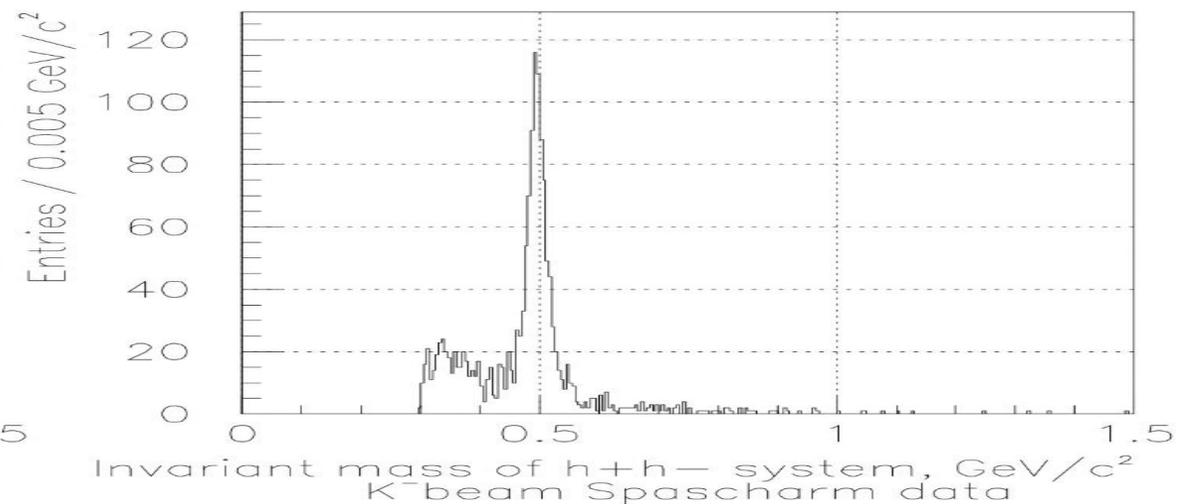
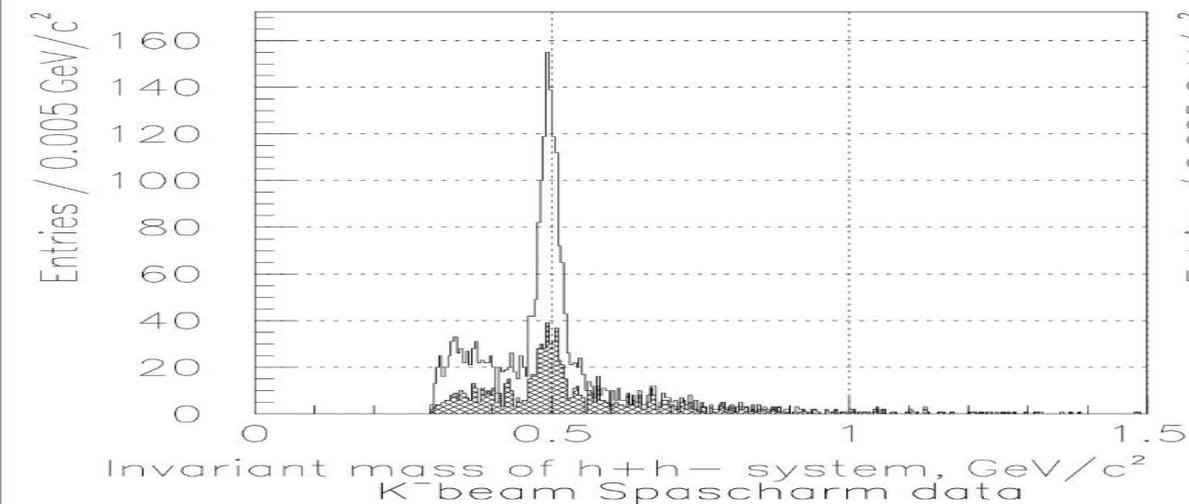
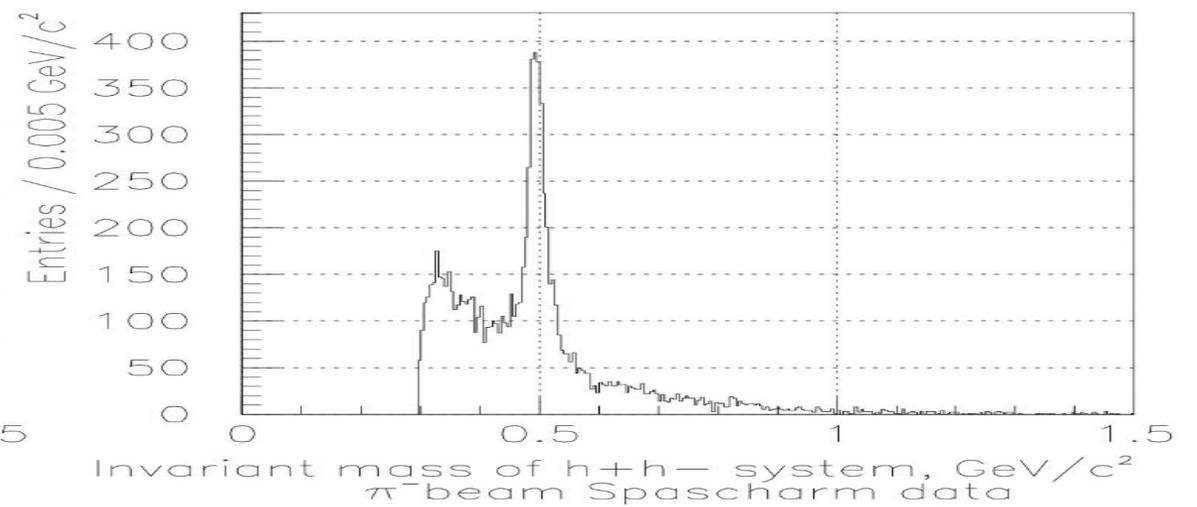
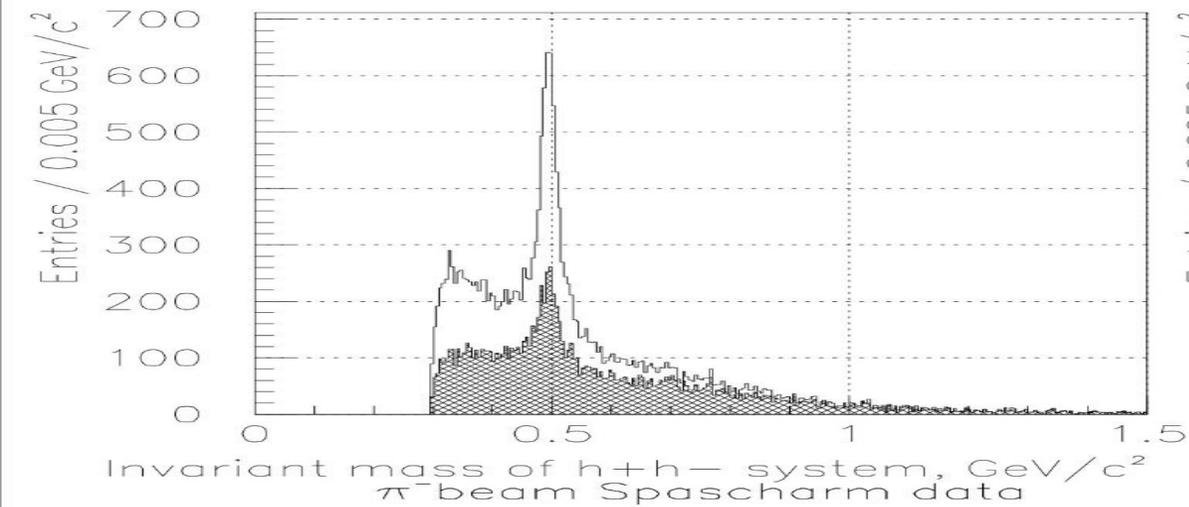


# Отбор событий

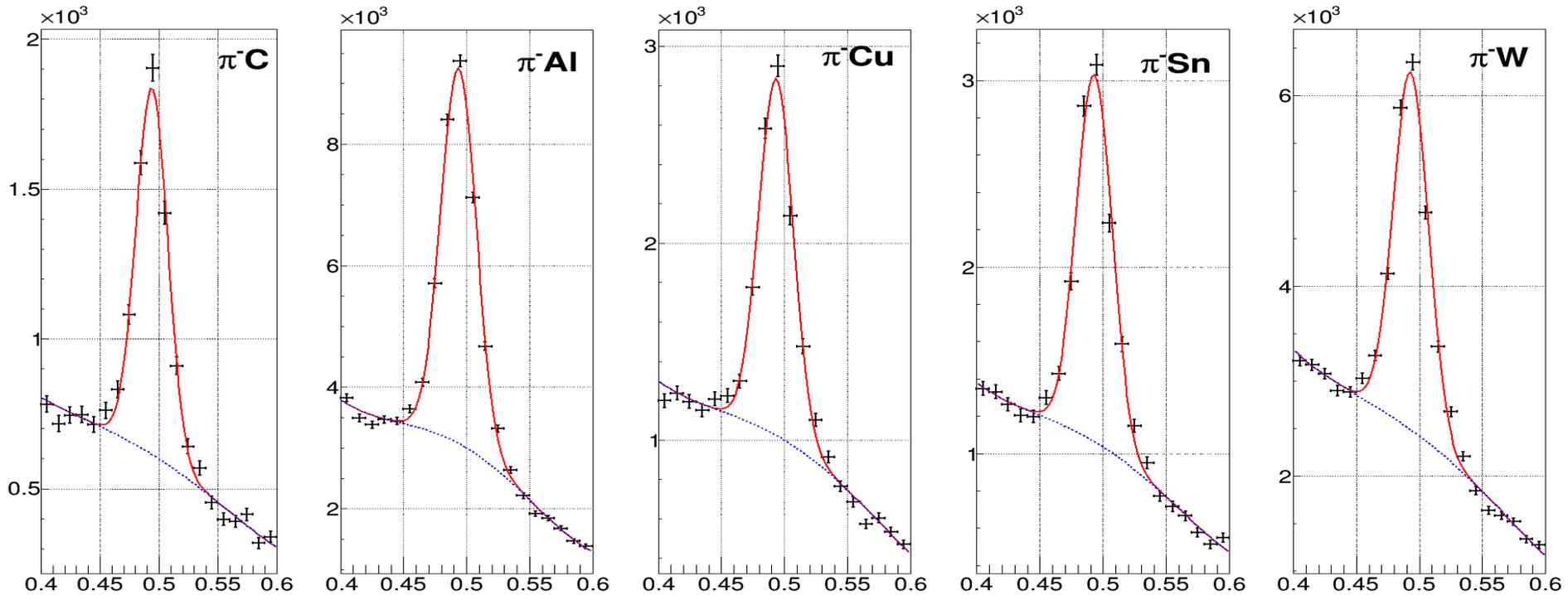
## 5. Общая вершина между пучковым $\pi^-$ - мезоном и $V^0$ - частицей



# Отбор событий. Общая вершина между пучковым $\pi^-$ ( $K^-$ )- мезоном и $V^0$ -частицей

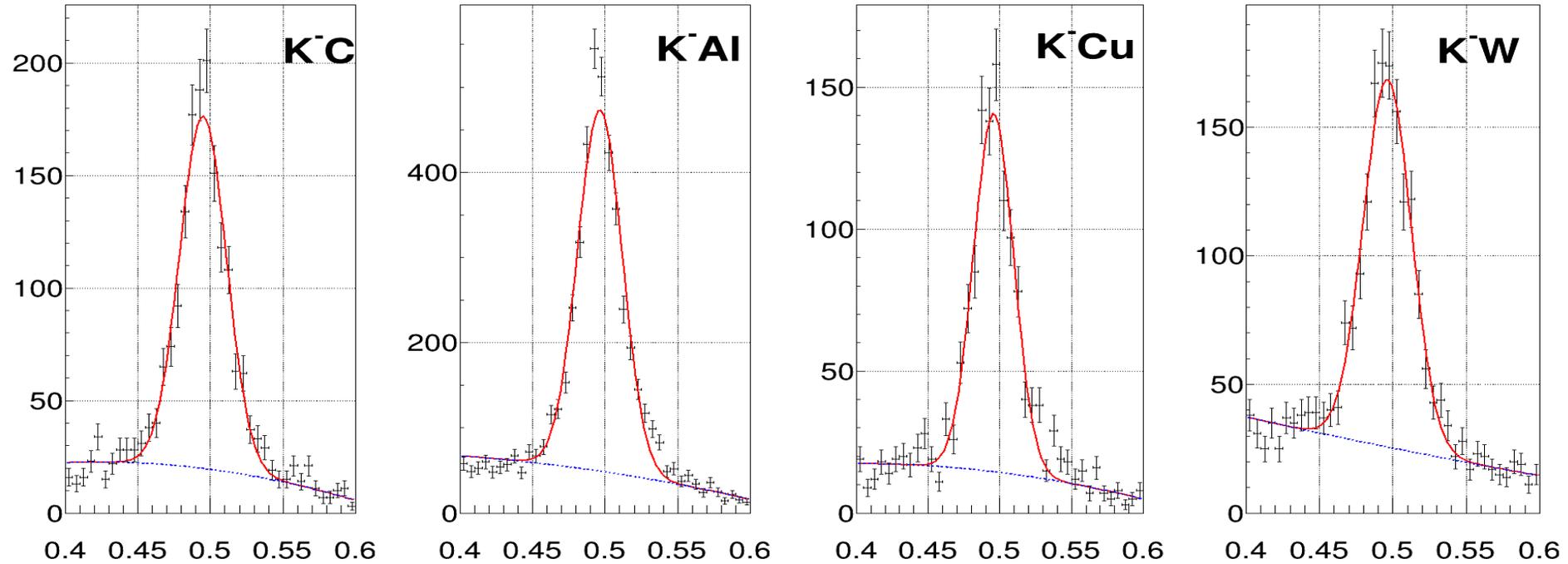


# Общая статистика по зарегистрированным $K_S^0$ - мезонам



Реакция	Масса, [ГэВ]	$\sigma_M$ , [ГэВ]	Число $K_S^0$
$\pi^- C \rightarrow K_S^0 + X$	$0.494 \pm 0.003$	$0.0134 \pm 0.0004$	$4109 \pm 64$
$\pi^- Al \rightarrow K_S^0 + X$	$0.4934 \pm 0.0002$	$0.0140 \pm 0.0002$	$21536 \pm 146$
$\pi^- Cu \rightarrow K_S^0 + X$	$0.4934 \pm 0.0003$	$0.0137 \pm 0.0003$	$6202 \pm 78$
$\pi^- Sn \rightarrow K_S^0 + X$	$0.4929 \pm 0.0001$	$0.0141 \pm 0.0003$	$6926 \pm 83$
$\pi^- W \rightarrow K_S^0 + X$	$0.4930 \pm 0.0002$	$0.0140 \pm 0.0002$	$13230 \pm 115$

# Общая статистика по зарегистрированным $K_S^0$ - мезонам



Реакция	Масса, [ГэВ]	$\sigma_M$ , [ГэВ]	Число $K_S^0$
$K^-C \rightarrow K_S^0 + X$	$0.4949 \pm 0.0006$	$0.0161 \pm 0.0007$	$1235 \pm 35$
$K^-Al \rightarrow K_S^0 + X$	$0.4964 \pm 0.0003$	$0.0153 \pm 0.0004$	$3165 \pm 56$
$K^-Cu \rightarrow K_S^0 + X$	$0.4956 \pm 0.0006$	$0.0138 \pm 0.0006$	$863 \pm 29$
$\pi^-W \rightarrow K_S^0 + X$	$0.4963 \pm 0.0006$	$0.0164 \pm 0.0007$	$1137 \pm 38$

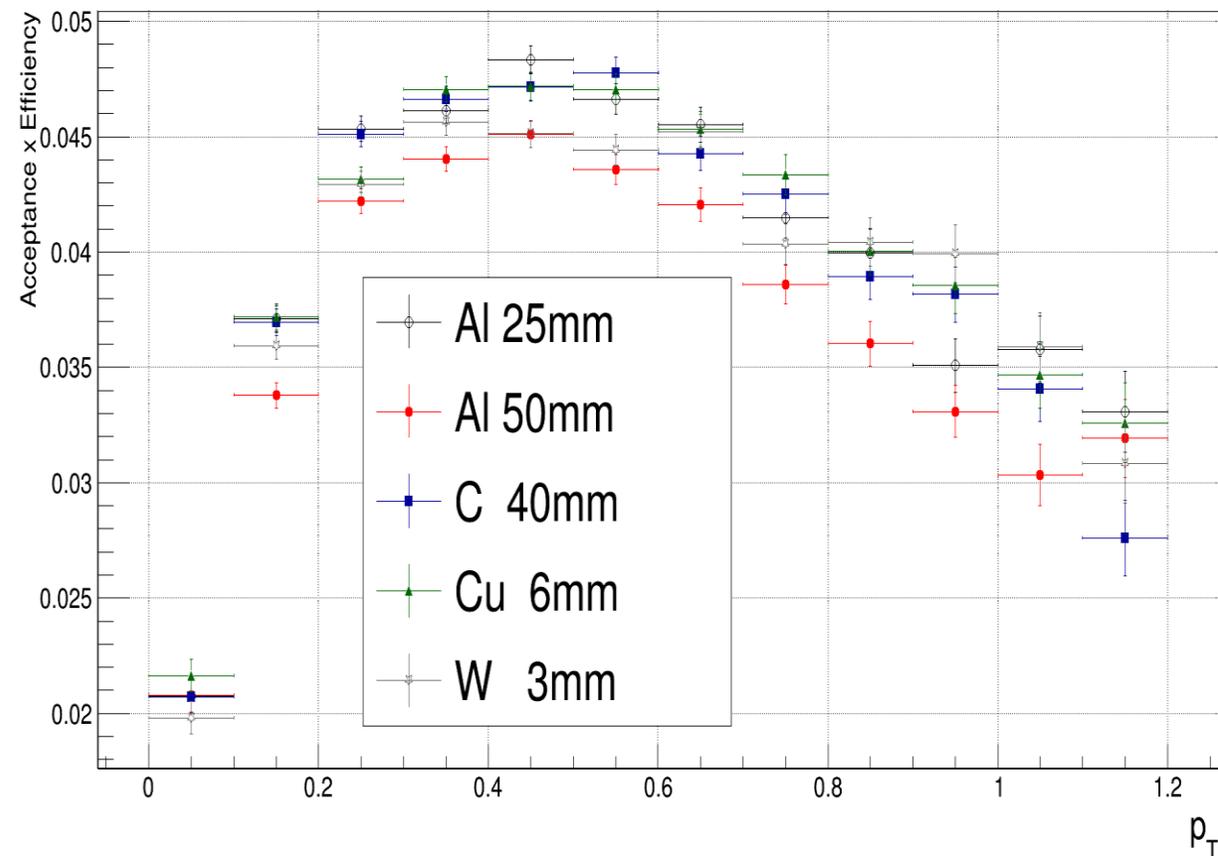
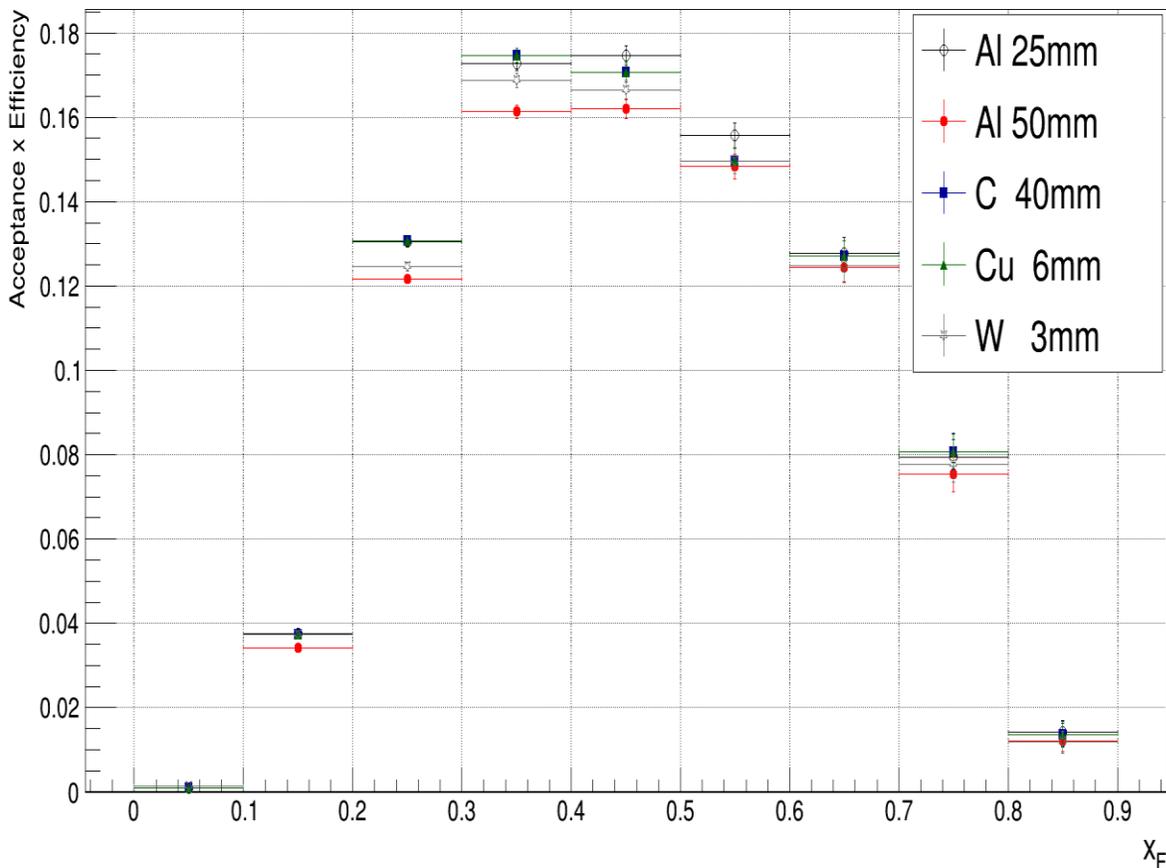
# Вычисление отношений инклюзивных дифференциальных сечений и $\Lambda$ -зависимость

$$R_{\frac{A}{Al}}(x_F) = \frac{\varepsilon_A \cdot (Acc \times Eff)_{x_F}^{Al} \cdot \left( \frac{N(x_F)^A}{J^A} - \frac{N(x_F)^{empty}}{J^{empty}} \right) \cdot A \cdot \rho_{Al} \cdot L_{Al}}{\varepsilon_{Al} \cdot (Acc \times Eff)_{x_F}^A \cdot \left( \frac{N(x_F)^{Al}}{J^{Al}} - \frac{N(x_F)^{empty}}{J^{empty}} \right) \cdot A_{Al} \cdot \rho_A \cdot L_A} \quad x_F = \frac{2p_{||}^*}{\sqrt{s}}$$

$$R_{\frac{A}{Al}}(p_t) = \frac{\varepsilon_A \cdot (Acc \times Eff)_{p_t}^{Al} \left( \frac{N(p_t)^A}{J^A} - \frac{N(p_t)^{empty}}{J^{empty}} \right) \cdot A \cdot \rho_{Al} \cdot L_{Al}}{\varepsilon_{Al} \cdot (Acc \times Eff)_{p_t}^A \left( \frac{N(p_t)^{Al}}{J^A} - \frac{N(p_t)^{empty}}{J^{empty}} \right) \cdot J_A \cdot A_{Al} \cdot \rho_A \cdot L_A}$$

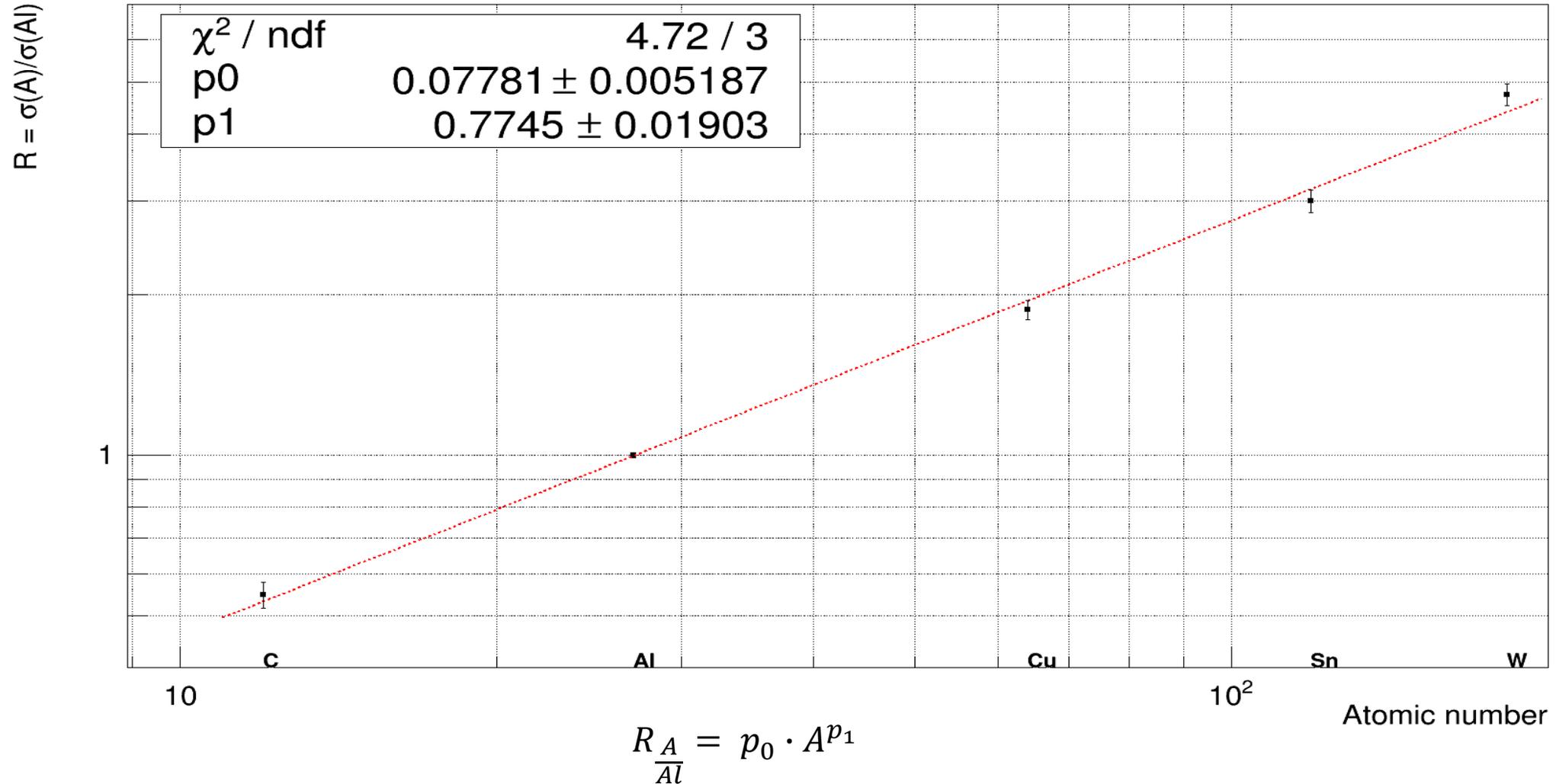
$$\sigma_{R_{\frac{A}{Al}}} = \sqrt{\left( \frac{\partial R_{\frac{A}{Al}}}{\partial N^A} \right)^2 \cdot (\Delta N^A)^2 + \left( \frac{\partial R_{\frac{A}{Al}}}{\partial N^{Al}} \right)^2 \cdot (\Delta N^{Al})^2 + \left( \frac{\partial R_{\frac{A}{Al}}}{\partial N^{Empty}} \right)^2 \cdot (\Delta N^{Empty})^2}$$

# Acceptance x Efficiency

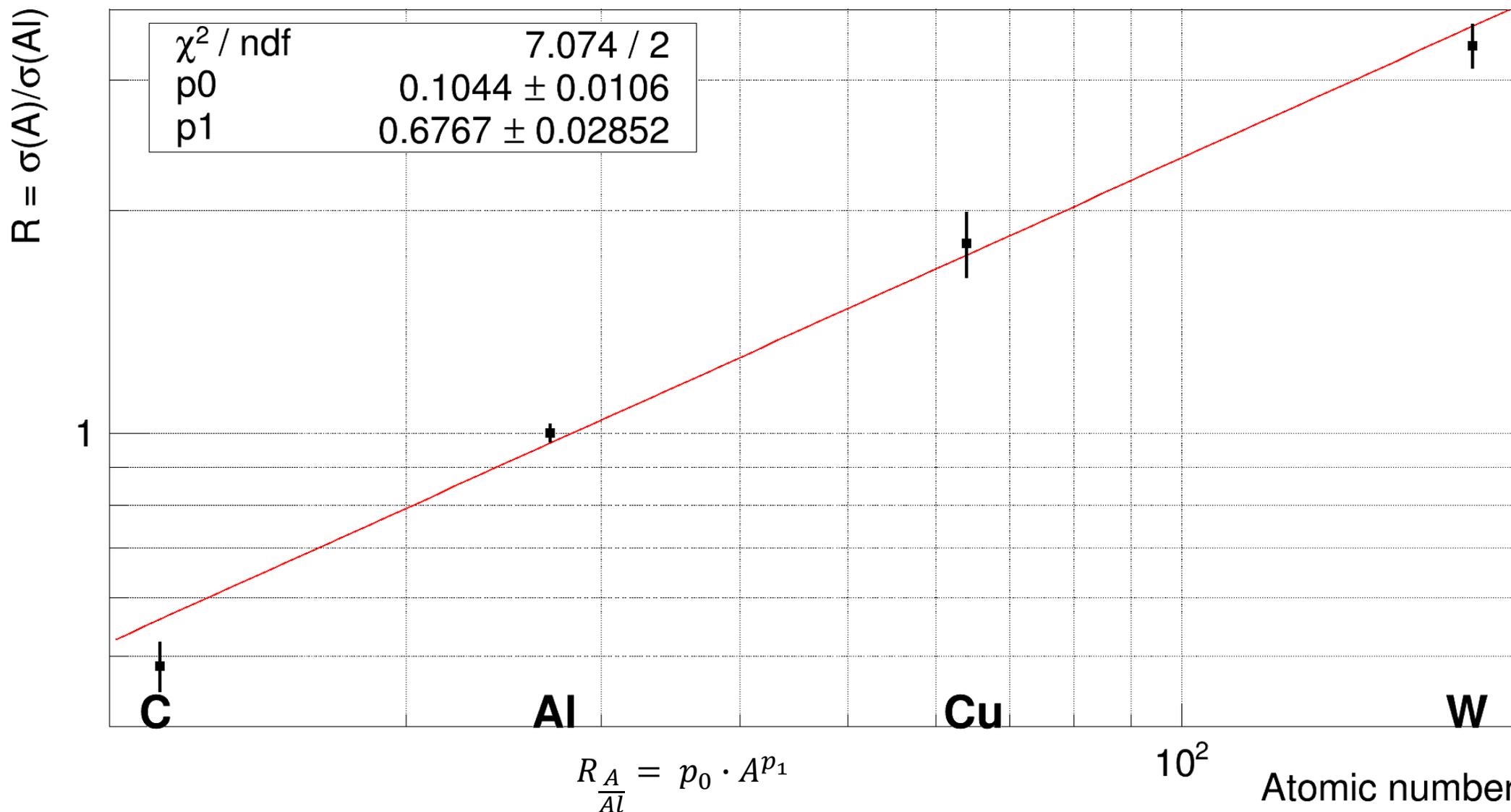


	Al 25mm	Al 50mm	C 40mm	Cu 6mm	W 3mm
Acc x Eff	0.0428±0.0002	0.0399±0.0002	0.0427±0.0002	0.0427±0.0002	0.0414±0.0002

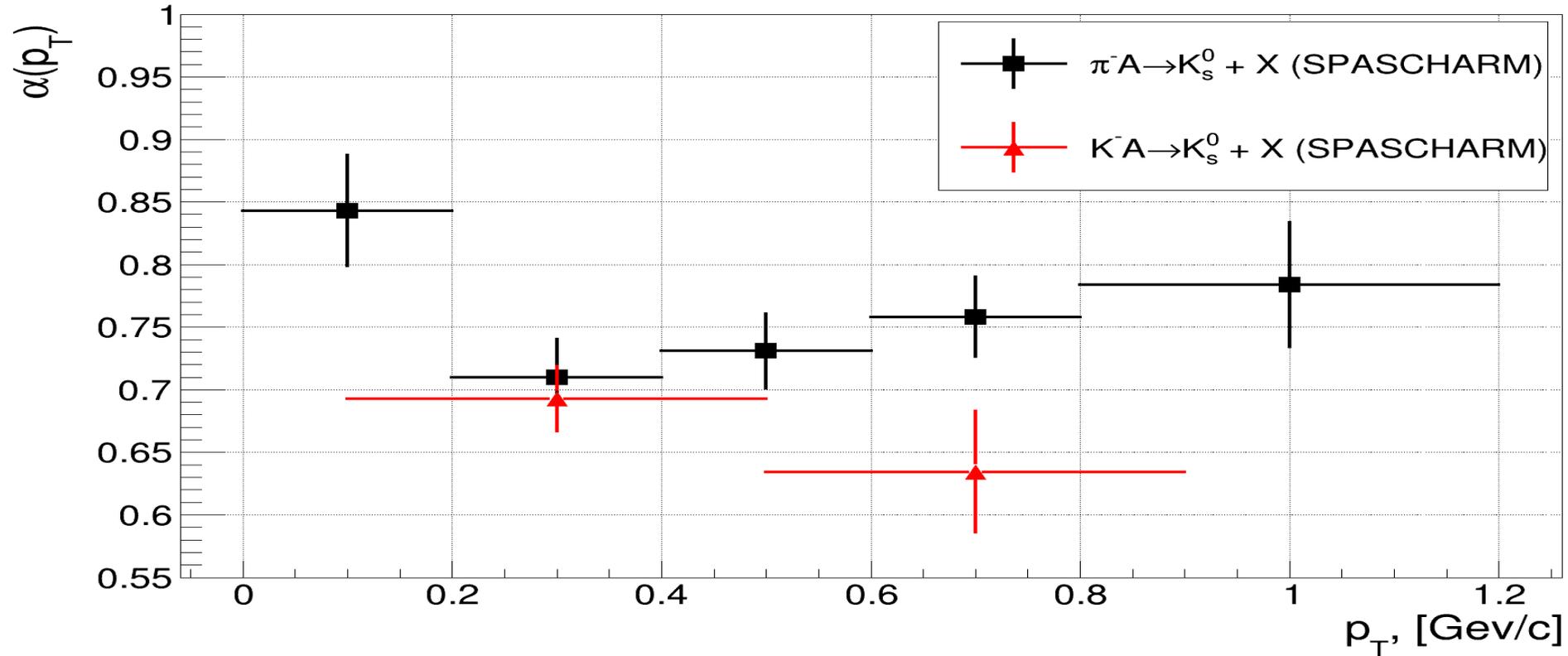
# A-зависимость. $\pi^-A$ - взаимодействия



# A-зависимость. К-А - взаимодействия



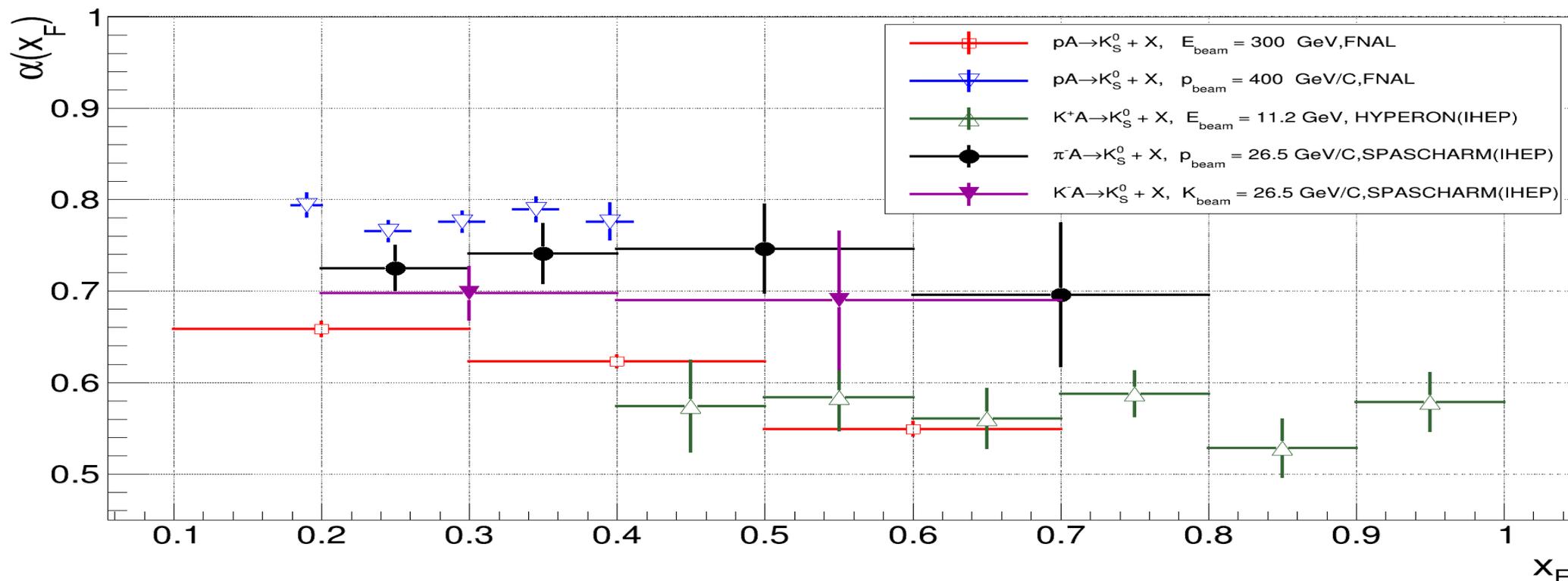
# Вычисление отношений инклюзивных дифференциальных сечений и $A$ -зависимость



$\pi^- A$	$0 < p_T \leq 0.2,$ ГэВ/с	$0.2 < p_T \leq 0.4,$ ГэВ/с	$0.4 < p_T \leq 0.6,$ ГэВ/с	$0.6 < p_T \leq 0.8,$ ГэВ/с	$0.8 < p_T \leq 1.2,$ ГэВ/с
$\alpha(p_T)$	$0.843 \pm 0.044$	$0.709 \pm 0.030$	$0.730 \pm 0.029$	$0.758 \pm 0.031$	$0.783 \pm 0.049$
$\chi^2/\text{ndf}$	3.365/3	1.85/3	4.583/3	1.939/3	3.218/3

$K^- A$	$0.1 < p_T \leq 0.5,$ ГэВ/с	$0.5 < p_T \leq 0.9,$ ГэВ/с
$\alpha(p_T)$	$0.695 \pm 0.026$	$0.642 \pm 0.048$
$\chi^2/\text{ndf}$	4.655/3	4.791/2

# Вычисление отношений инклюзивных дифференциальных сечений и $A$ -зависимость



$\pi^-A$	$0.2 < x_F < 0.3$	$0.3 < x_F < 0.4$	$0.4 < x_F < 0.6$	$0.6 < x_F < 0.8$
$\alpha(x_F)$	$0.725 \pm 0.024$	$0.740 \pm 0.031$	$0.745 \pm 0.044$	$0.695 \pm 0.077$
$\chi^2/ndf$	6.052/3	0.265/3	1.494/3	2.297/3

$K^-A$	$0.2 < x_F < 0.4$	$0.4 < x_F < 0.7$
$\alpha(x_F)$	$0.697 \pm 0.028$	$0.689 \pm 0.074$
$\chi^2/ndf$	2.456/2	0.265/3

# Заключение

1. Измерены отношения дифференциальных сечений на четырех ядрах (C, Cu, Sn, W) к ядру Al для реакции  $\pi^- A \rightarrow K_S^0 + X$  в диапазонах  $0.2 < x_F < 0.8$  и  $0.0 \text{ ГэВ}/c < p_t < 1.2 \text{ ГэВ}/c$  и трех ядрах (C, Cu, W) к ядру Al для реакции  $K^- A \rightarrow K_S^0 + X$  в диапазонах  $0.2 < x_F < 0.7$  и  $0.1 \text{ ГэВ}/c < p_t < 0.9 \text{ ГэВ}/c$  при энергии 26 ГэВ
2. Для этих двух реакций определен параметр  $\alpha$  в зависимости  $R_{\frac{A}{Al}}(A) \sim A^\alpha$ :  $\alpha = 0.77 \pm 0.02$  для  $\pi^- A$  – взаимодействий и  $\alpha = 0.67 \pm 0.03$  для  $K^- A$  – взаимодействий. Значение параметра  $\alpha$  в трех других экспериментах в диапазоне по энергиям 11 ГэВ – 400 ГэВ составляет 0.57 – 0.78
3. Зависимость параметра  $\alpha$  от  $x_F$  или  $p_t$  не обнаружена для  $\pi^- A$  – взаимодействий и  $K^- A$  – взаимодействий
4. Разработан алгоритм выделения сигнала  $K_S^0$ -мезона, что необходимо для исследования спиновой выстроенности векторного  $K^{*\pm}(892) \rightarrow K_S^0 \pi^\pm$  мезона, что является следующей нашей задачей.
5. Работа выполнена в НИЦ КИ-ИФВЭ при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (грант № 22-12-00164).