

*Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Физический  
Факультет, кафедра Общей Ядерной Физики  
НИИ Ядерной физики им. Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова*

 **Jefferson Lab**

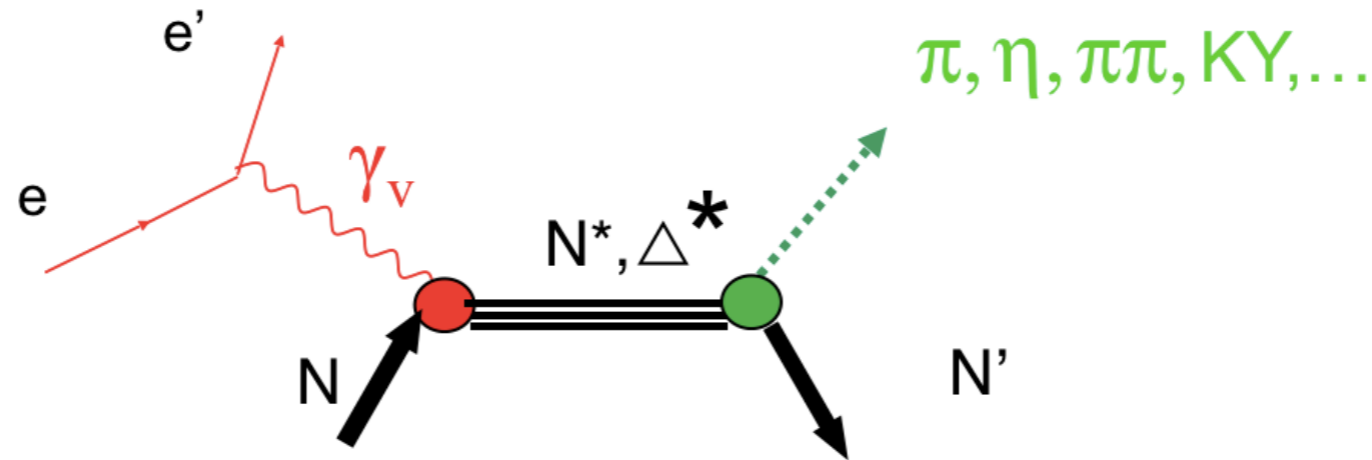


**Первые результаты экспериментов  
на детекторе CLAS12 по  
исследованию реакции  
эксклюзивного электророждения  
двух пионов на протоне**

Фролова Анна Сергеевна

Научный руководитель: к.ф.-м.н., с.н.с. Исупов Евгений Леонидович

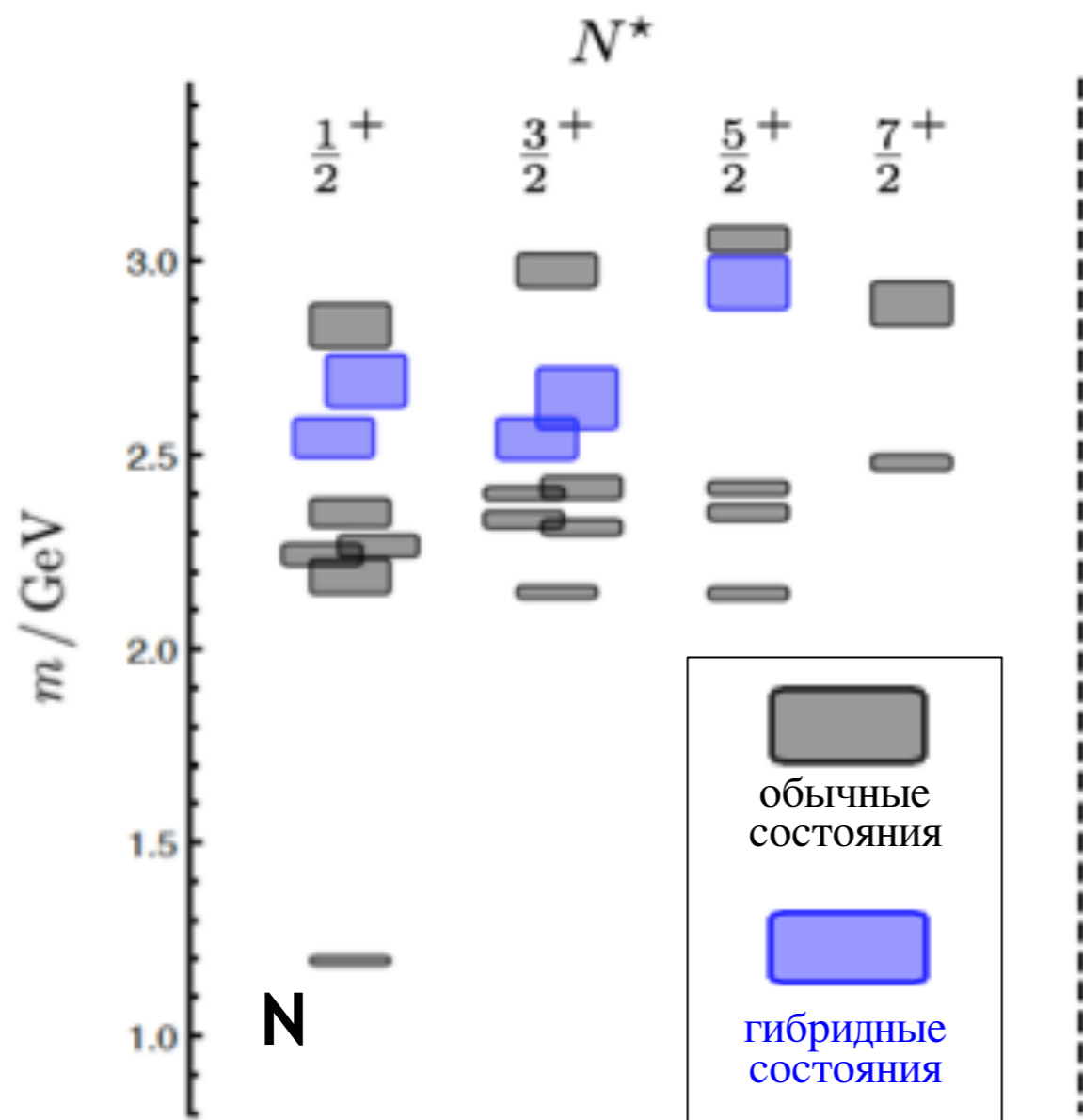
# Введение



Эксклюзивные каналы реакции	Возбужденные состояния протона	Диапазон квадратов переданных импульсов $Q^2$ в реакции электророждения $\gamma_v p N^*$ , ГэВ <sup>2</sup>
$\pi^+ n, \pi^0 p$	$\Delta(1232)3/2^+$ , $N(1440)1/2^+$ , $N(1520)3/2^-$ , $N(1535)1/2^-$	0.16—6.00 0.30—4.16
$\pi^+ n$	$N(1675)5/2^-$ , $N(1680)5/2^+$ , $N(1710)1/2^+$	1.60—4.50
$\eta p$	$N(1535)1/2^-$	0.20—2.90
$\pi^+ \pi^- p$	$N(1440)1/2^+$ , $N(1520)3/2^-$	0.25—1.50
	$\Delta(1620)1/2^-$ , $N(1650)1/2^-$ , $N(1680)5/2^+$ $\Delta(1700)3/2^-$ , $N(1720)3/2^+$ , $N'(1720)3/2^+$	0.50—1.50

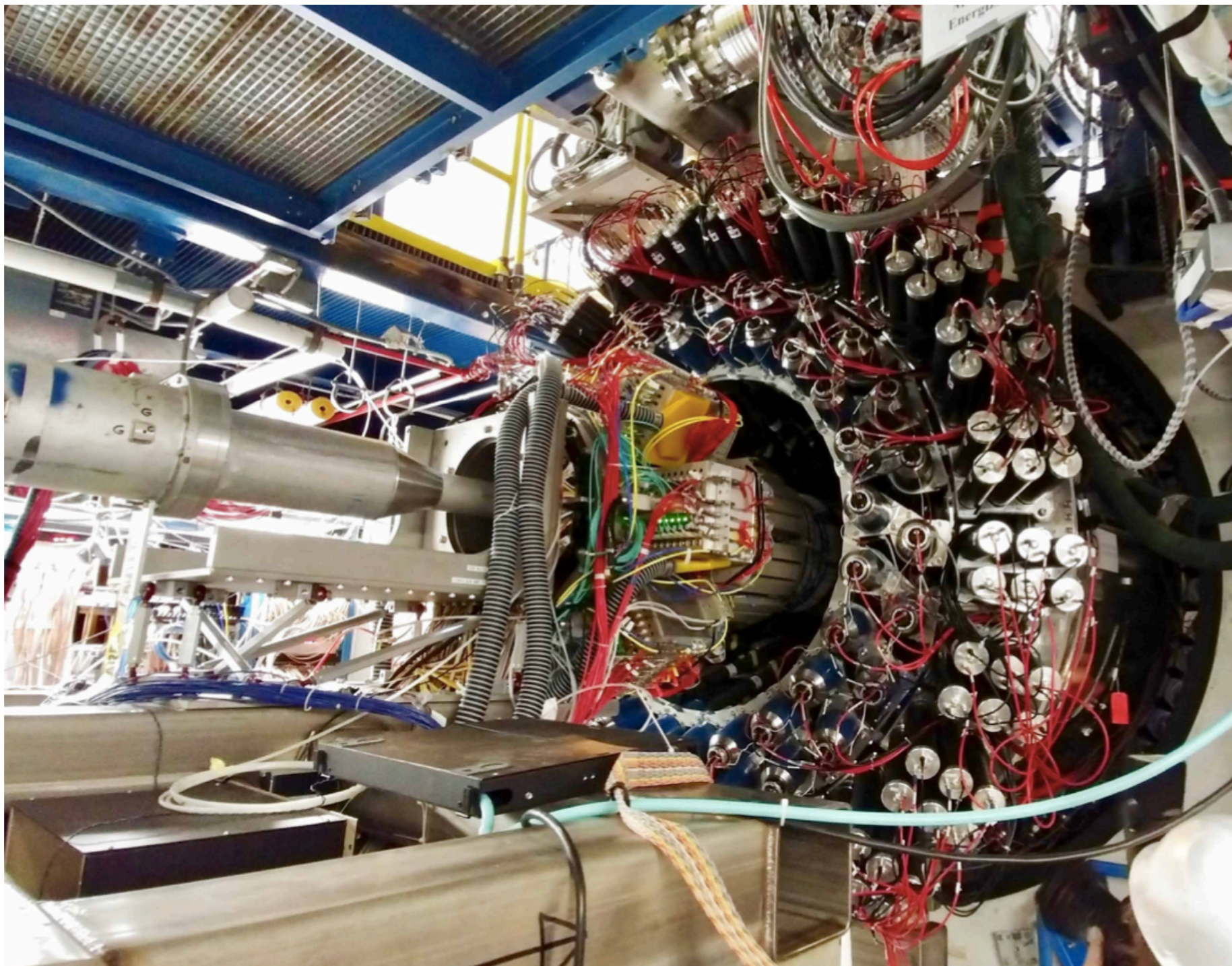
В таблице представлены нуклонные резонансы, для которых получены амплитуды электровозбуждения из анализа данных CLAS по эксклюзивным каналам электророждения мезонов на протонах в резонансной области.

# Введение



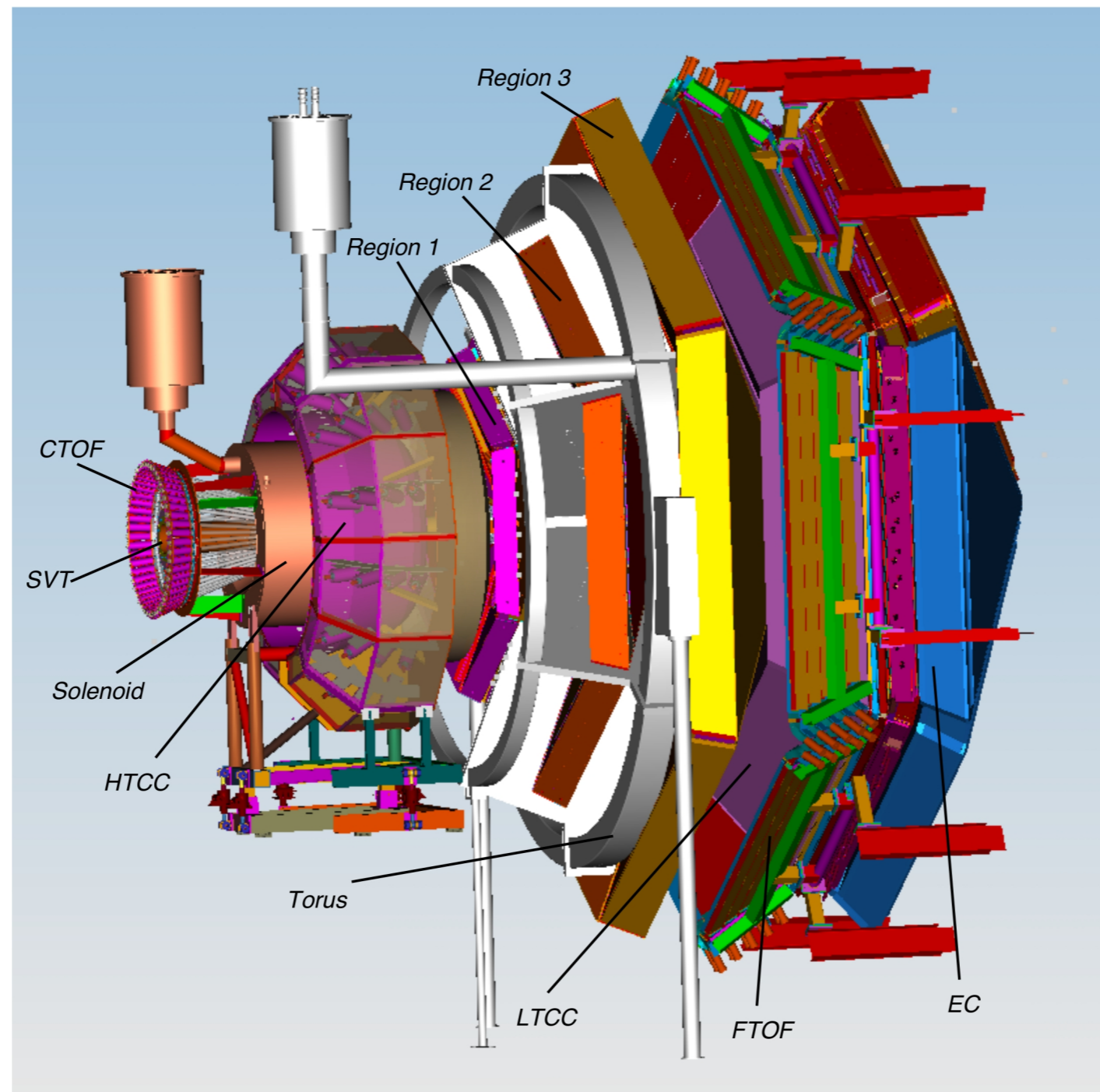
На двухпионный канал  
возложены перспективы по  
поиску недостающих  
барионных состояний и  
гибридных барионов

Предсказанный спектр  $N^*$  из расчета на  
решетках включает как обычные  $q^3$   
состояния, так и гибридные  $q^3g$



# Ускоритель СЕВАФ

Энергия непрерывного пучка электронов до 11 ГэВ,  
светимость —  $10^{35} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$



# Детектор CLAS12

Практически полное угловое покрытие. Две большие подсистемы:  
Центральный (CD) и Передний (FD) детекторы

# Данные RG-K

Условия эксперимента – осень 2018	
Ток Тороида	100% (3375 A) - <b>negative outbending</b>
Соленоид	-100 %
Энергия пучка	6.535 ГэВ
FT	<b>OFF</b>
Пучок/Мишень	Поляризованные электроны/ неполяризованная мишень из жидкого H <sub>2</sub>
Светимость	10 <sup>35</sup> см <sup>-2</sup> с <sup>-1</sup> @ 6.5 ГэВ <b>Полная светимость</b>
Ток пучка	60 нА

# Отбор событий реакции $ep \rightarrow e\pi^+\pi^-p$

- Фиксируем все адроны в конечном состоянии:  $p, \pi^+, \pi^-$
- Отбрасываем события, содержащие другие заряженные частицы
- Инвариантная масса конечных адронов  $W > 1.2$  ГэВ
- Стандартные отборы для идентификации электронов:
  - электрон в переднем детекторе,
  - импульс электрона ( $1.0 \text{ ГэВ} \leq p_{el} \leq 6.535 \text{ ГэВ}$ ),
  - координата вершины ( $-10 \text{ см} \leq vz_{el} \leq 2 \text{ см}$ ),
  - время пролета ( $21 \text{ нс} < \text{TOF}_{el} \leq 26 \text{ нс}$ ),
  - отбор на загрязнение пионами
  - отбор по энергии, оставленной в калориметре
  - геометрические отборы в калориметре и дрейфовой камере

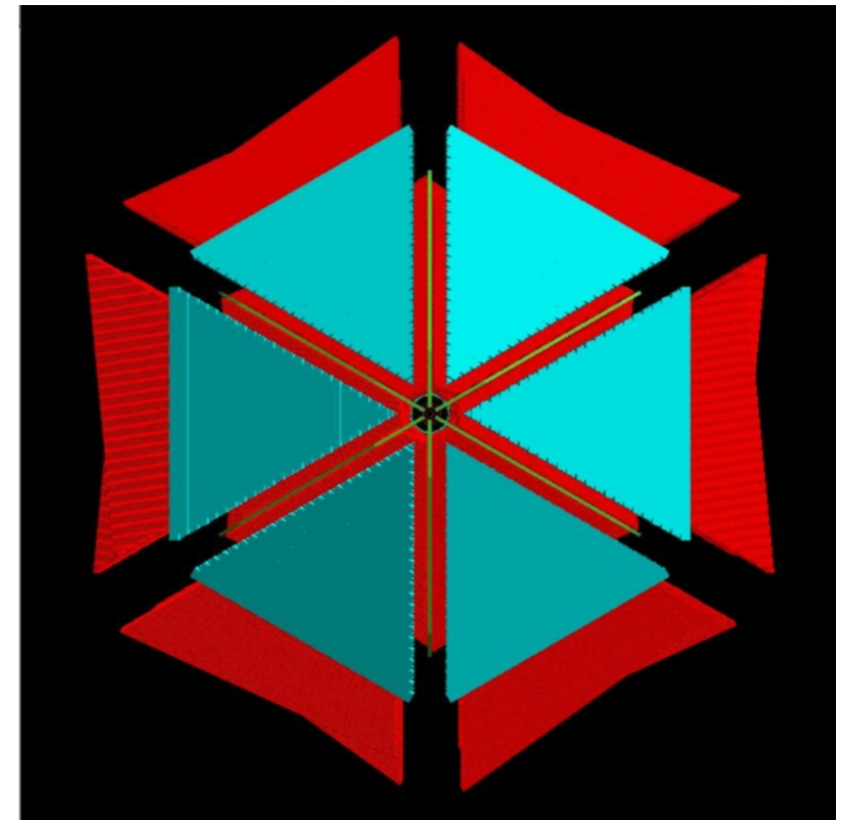
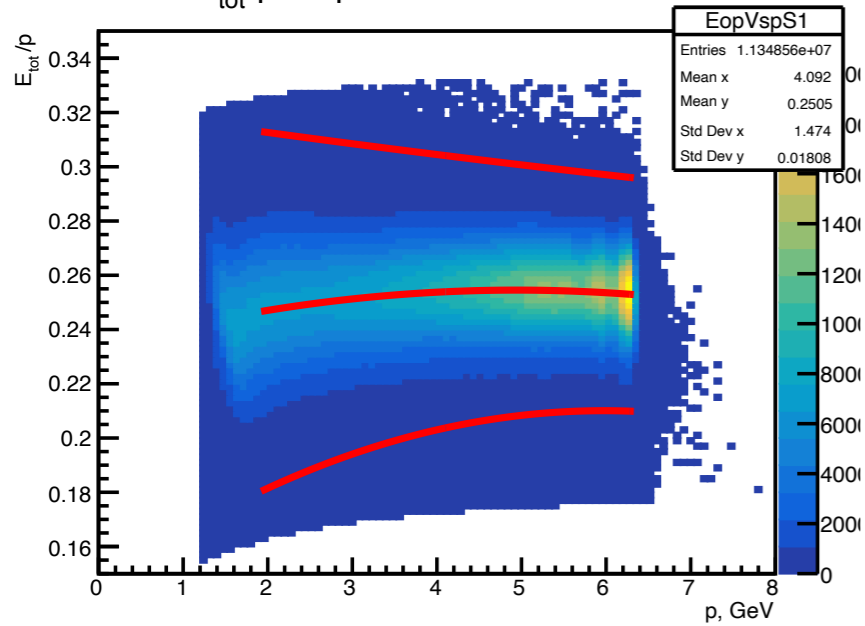


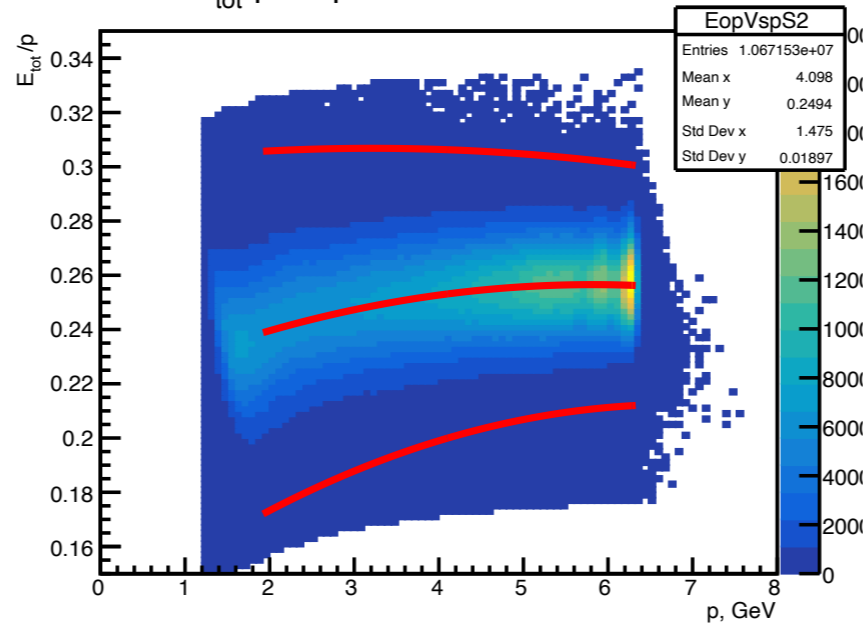
Схема переднего  
электромагнитного калориметра

# Отбор по энергии, оставленной в калориметре ( $E_{tot}$ )

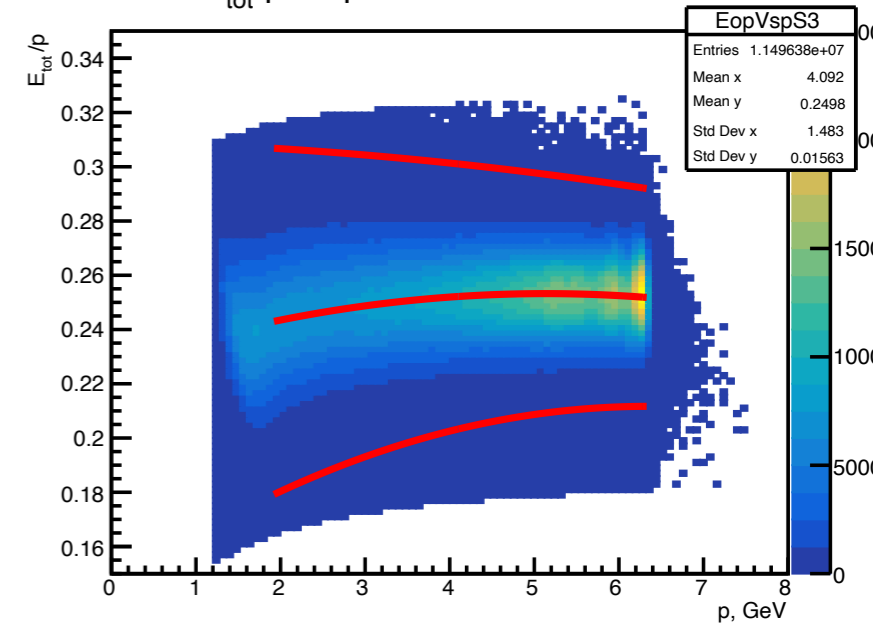
$E_{tot}/p$  Vs  $p$  for the electron in S1



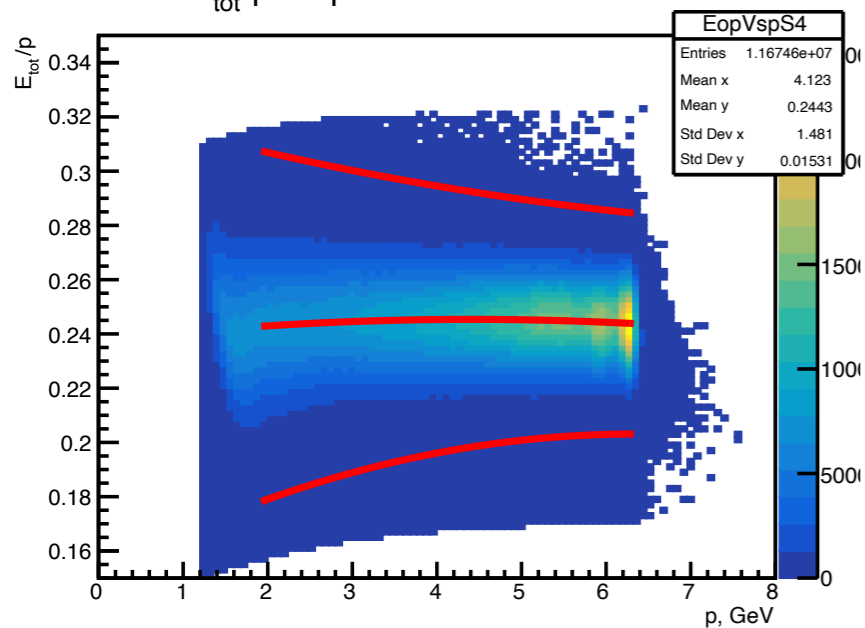
$E_{tot}/p$  Vs  $p$  for the electron in S2



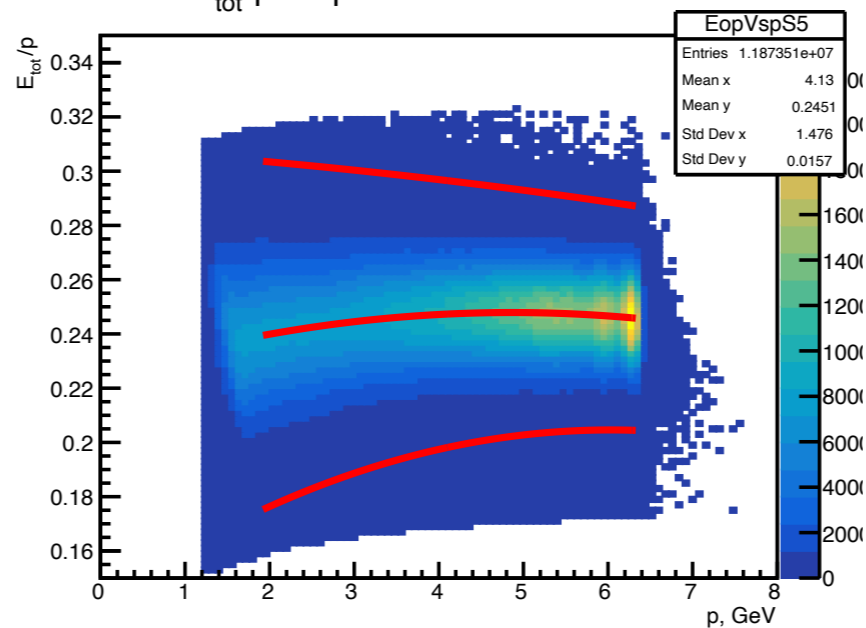
$E_{tot}/p$  Vs  $p$  for the electron in S3



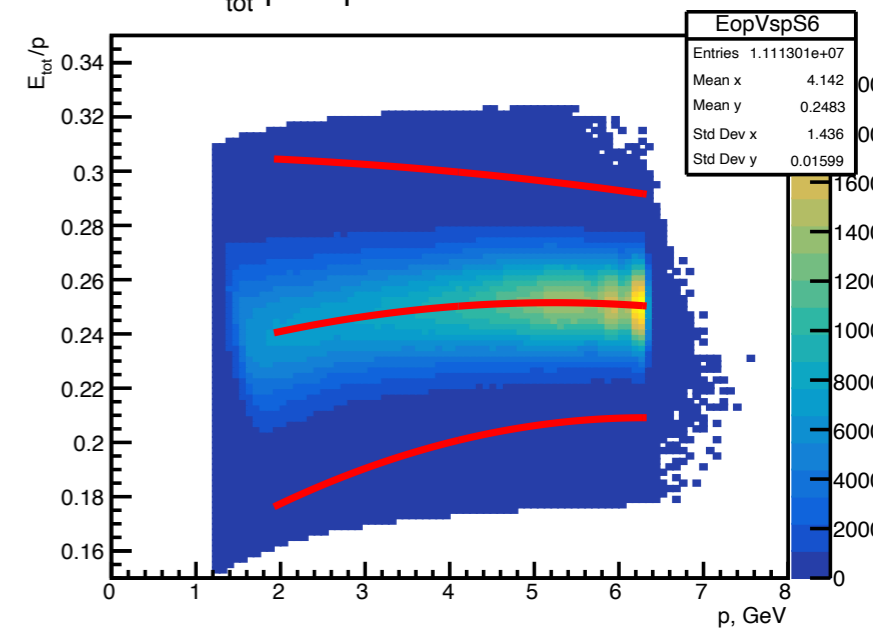
$E_{tot}/p$  Vs  $p$  for the electron in S4



$E_{tot}/p$  Vs  $p$  for the electron in S5



$E_{tot}/p$  Vs  $p$  for the electron in S6





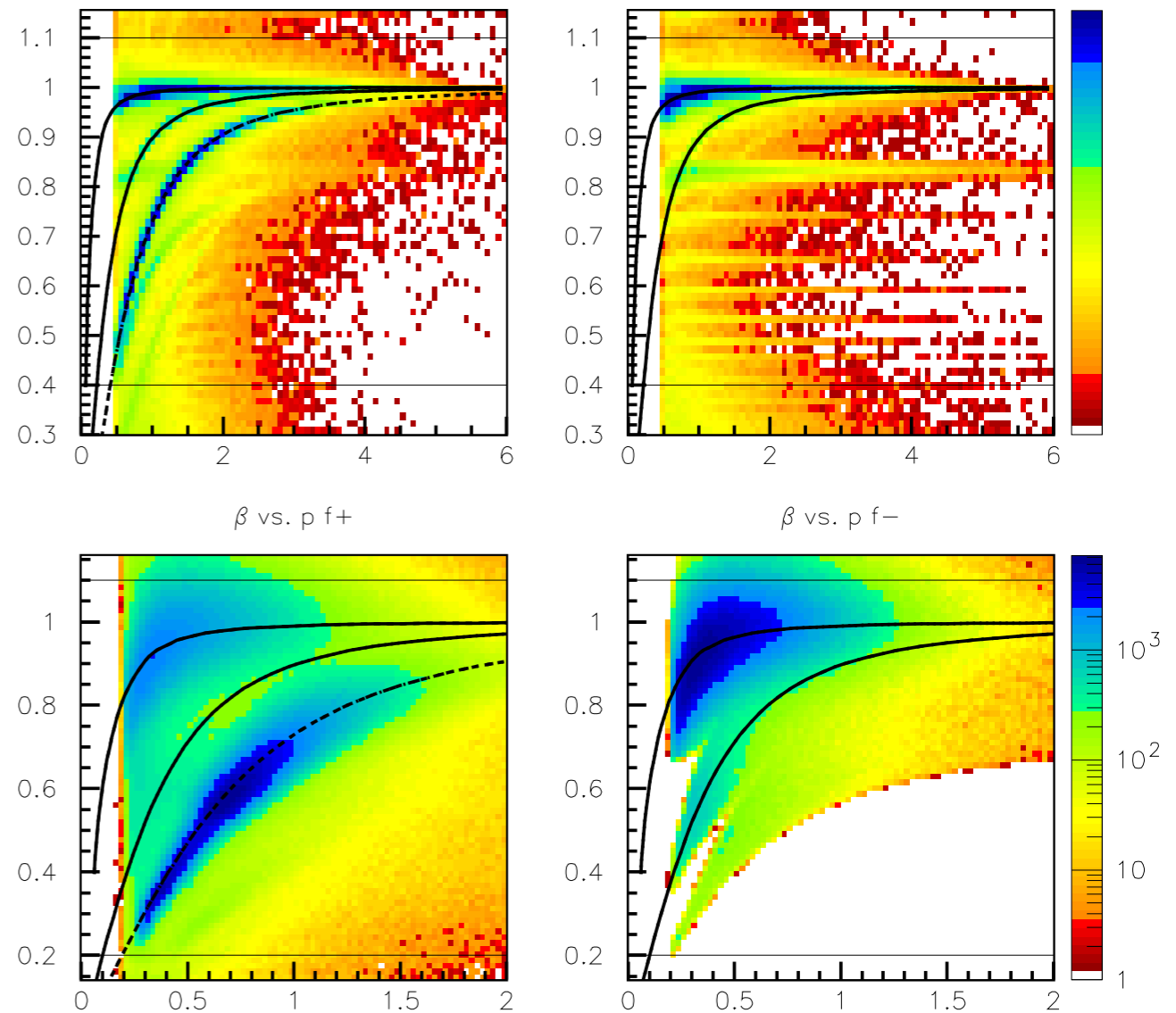
# Параметризация стандартного отбора по ( $E_{tot}$ ) в 3.5 сигма

- $-3,5\sigma$ :  $p_0 + \frac{p_1 \cdot x}{1000} + \frac{p_2 \cdot x^2}{1000}$
- $+3,5\sigma$ :  $p'_0 + \frac{p'_1 \cdot x}{1000} + \frac{p'_2 \cdot x^2}{1000}$

параметры секторы	<b>p0</b>	<b>p1</b>	<b>p2</b>	<b>p0'</b>	<b>p1'</b>	<b>p2'</b>
<b>S1</b>	0,145	21,6	-1,81	0,321	-4,58	-0,086
<b>S2</b>	0,134	23,0	-1,07	0,300	4,18	-0,650
<b>S3</b>	0,145	21,1	-1,66	0,309	-0,712	-0,322
<b>S4</b>	0,152	16,1	-1,27	0,322	-8,78	0,434
<b>S5</b>	0,141	21,0	-1,74	0,308	-2,01	-0,211
<b>S6</b>	0,141	21,52	-1,70	0,306	-0,253	-0,328

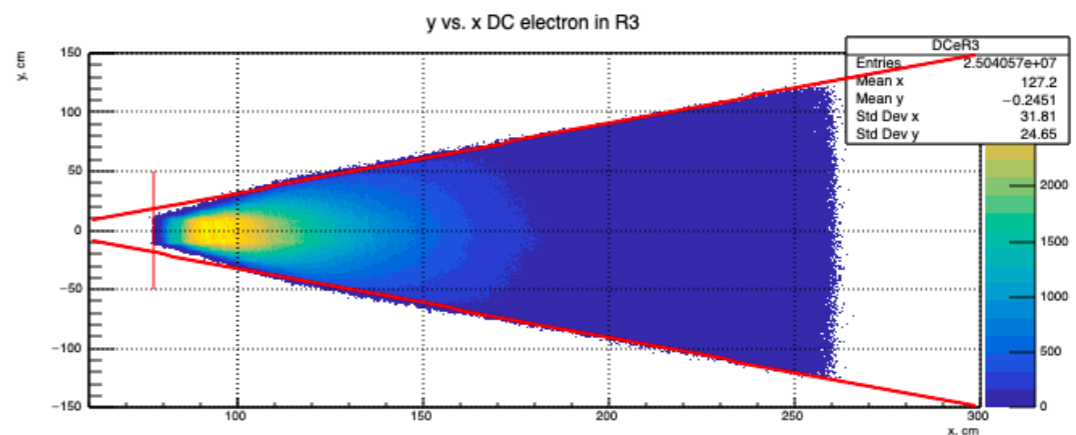
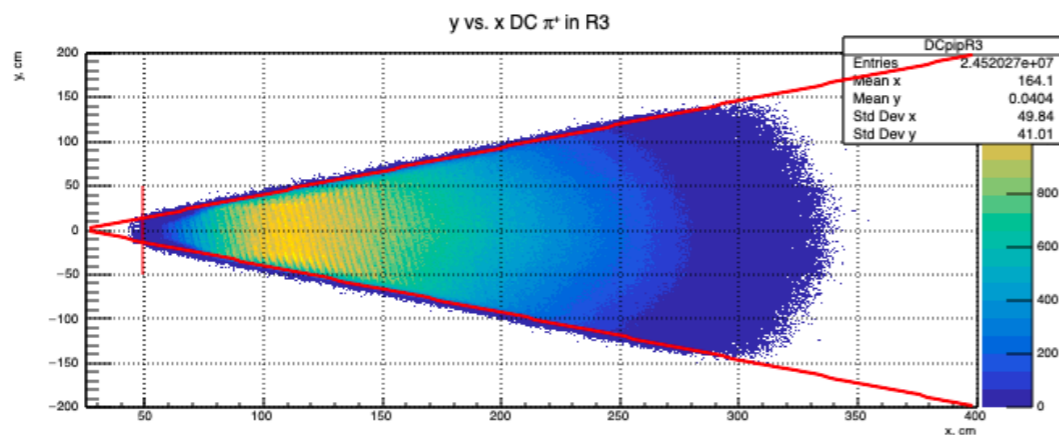
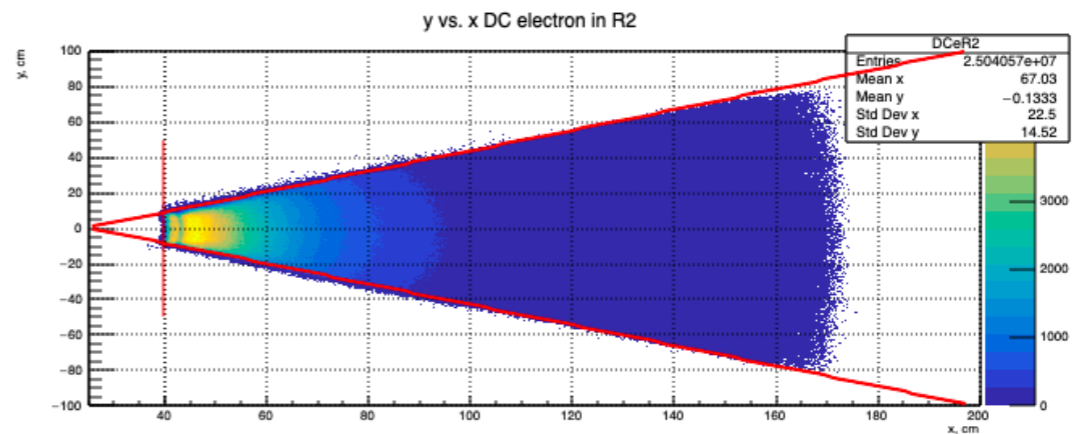
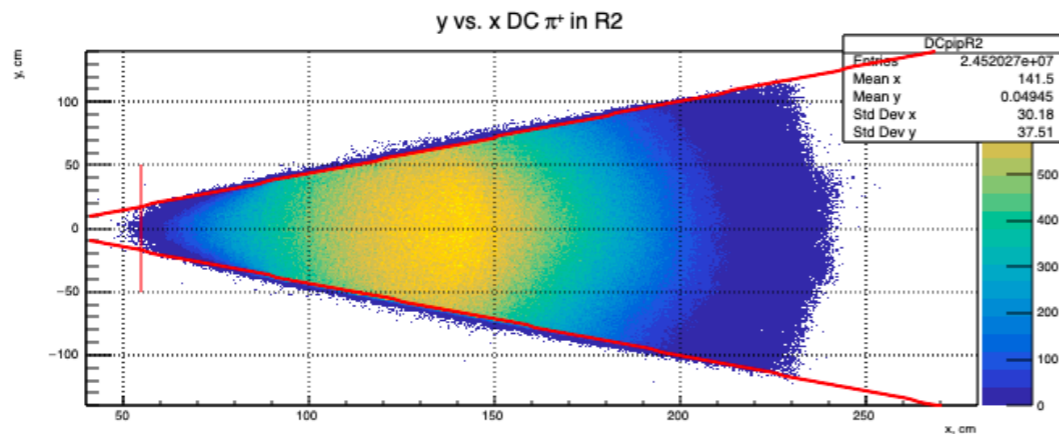
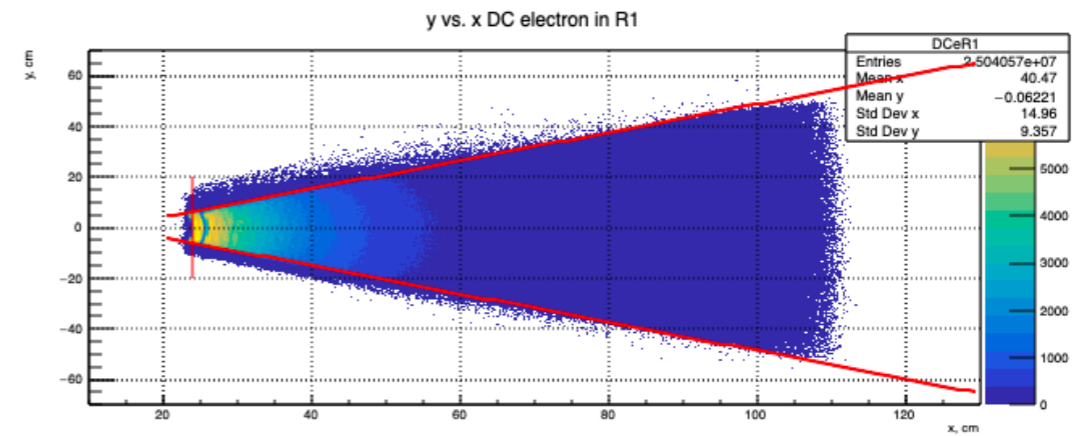
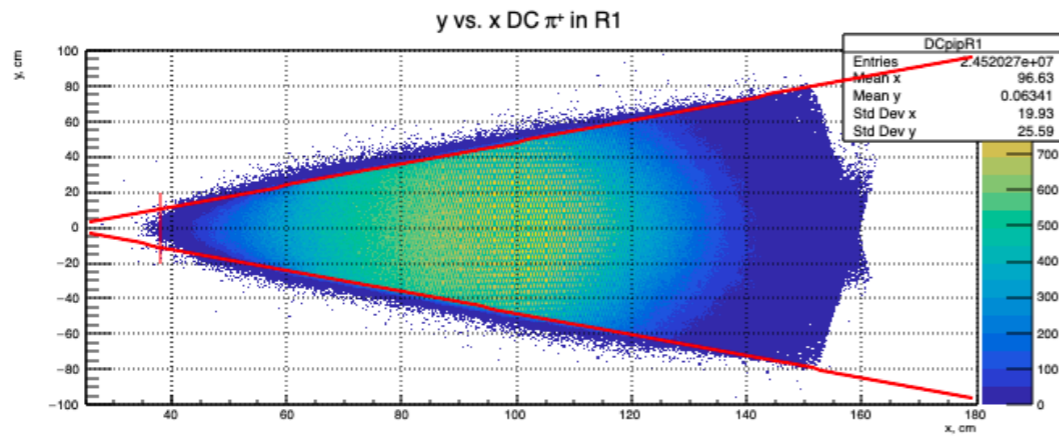
# Отборы для адронов

- импульсы адронов ( $p_h \geq 0.4$  ГэВ в FD и  $p_h \geq 0.2$  ГэВ в CD),
- координата вершины ( $-10 \text{ см} \leq v_{z_h} \leq 2 \text{ см}$ ),
- $\beta$  vs.  $p$  отбор,
- геометрические отборы в дрейфовой камере



Распределения  $\beta$  vs.  $p$  для положительных (слева) и отрицательных (справа) адронов в FD (сверху) и CD (снизу).

# Геометрические отборы в дрейфовой камере

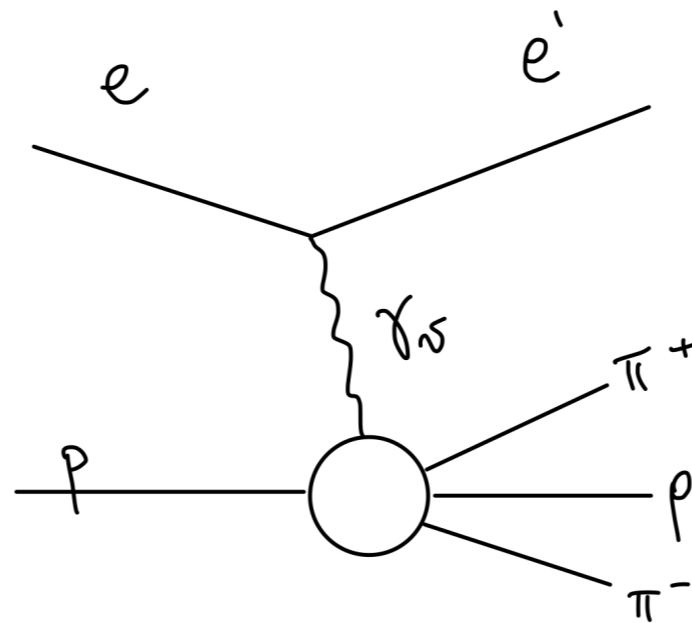


# Геометрические отборы в дрейфовой камере

электрон/ $\pi^-$	R1	R2	R3
$y <$	$0,556 \cdot x - 6,878$	$0,578 \cdot x - 13,898$	$0,591 \cdot x - 27,459$
$y >$	$-0,56 \cdot x + 7,482$	$-0,577 \cdot x + 14,851$	$-0,588 \cdot x + 26,912$
$x >$	24,052	39,705	77,755

протон/ $\pi^+$	R1	R2	R3
$y <$	$0,610 \cdot x - 12,720$	$0,573 \cdot x - 13,949$	$0,527 \cdot x - 11,998$
$y >$	$-0,604 \cdot x + 12,159$	$-0,569 \cdot x + 13,891$	$-0,530 \cdot x + 13,372$
$x >$	38,02	54,88	49,0

# Расчет недостающих массы и энергии для реакции



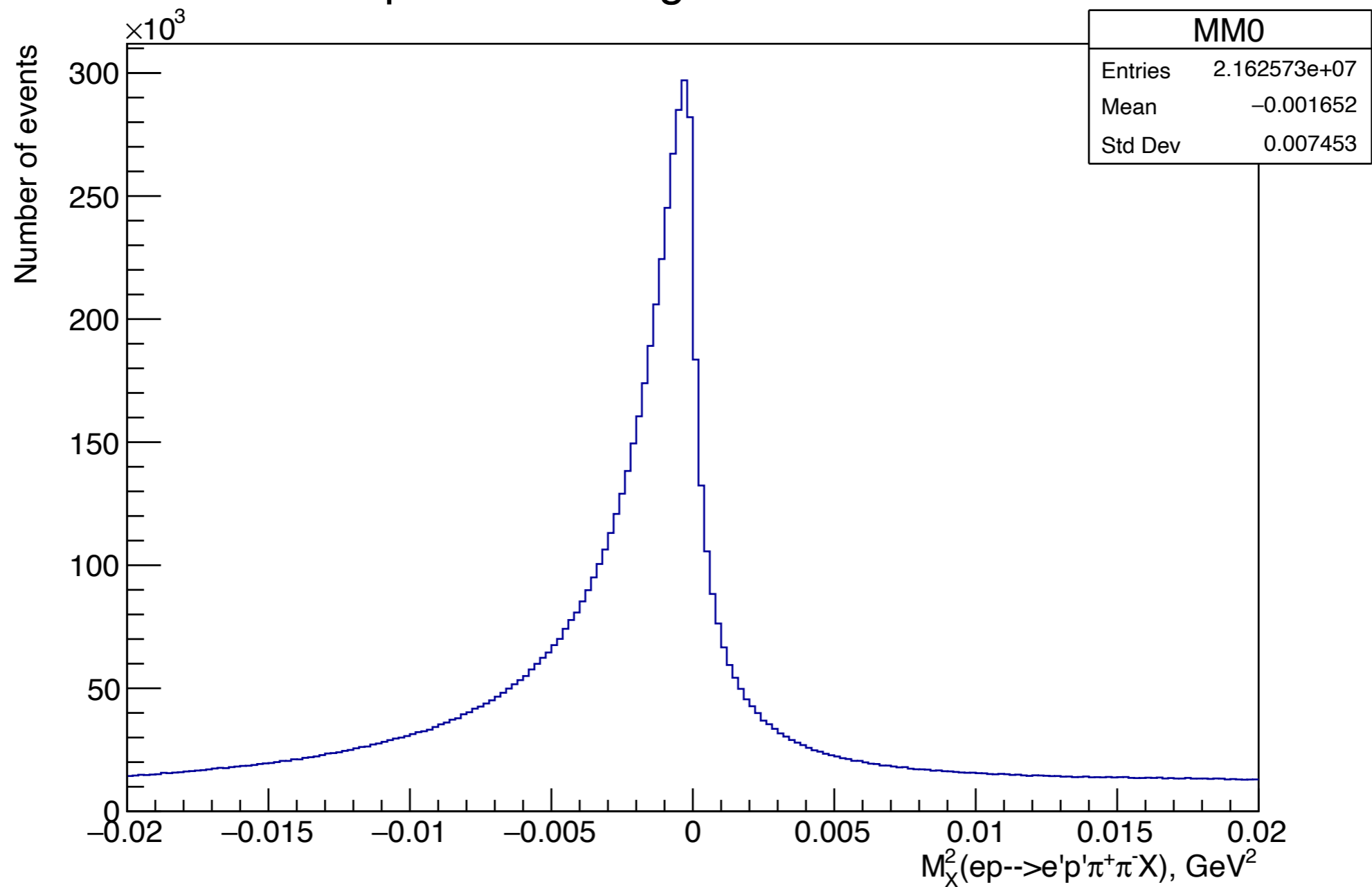
$$MM_X^2 = (p_{\gamma_v} + p_p - (p_{p'} + p_{\pi^+} + p_{\pi^-}))^2$$

$$ME_X = E_{\gamma_v} + E_p - (E_{p'} + E_{\pi^+} + E_{\pi^-})$$

# Квадрат недостающей массы

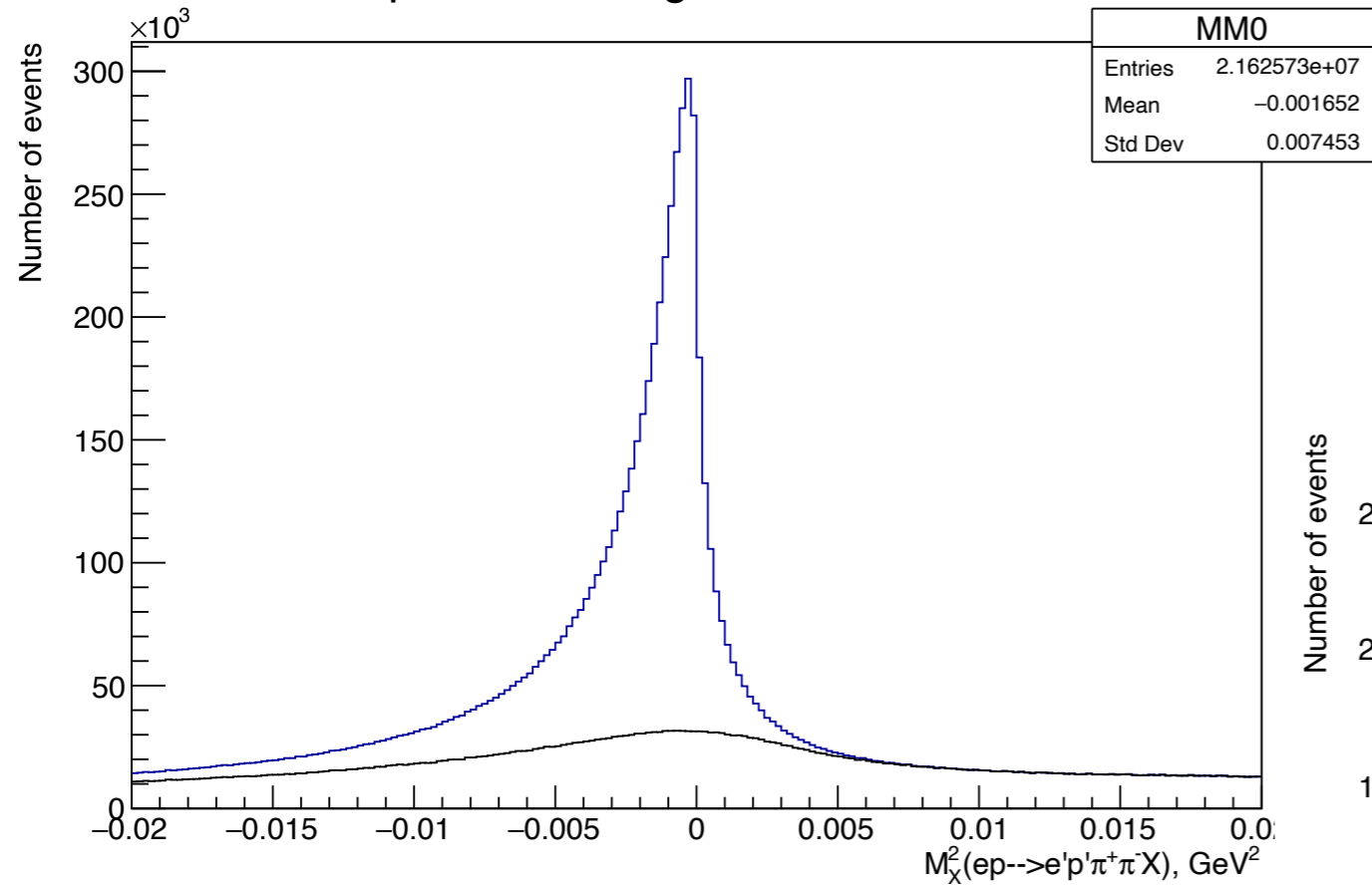
## $ep \rightarrow e\pi^+\pi^-p$

Squared Missing Mass distribution

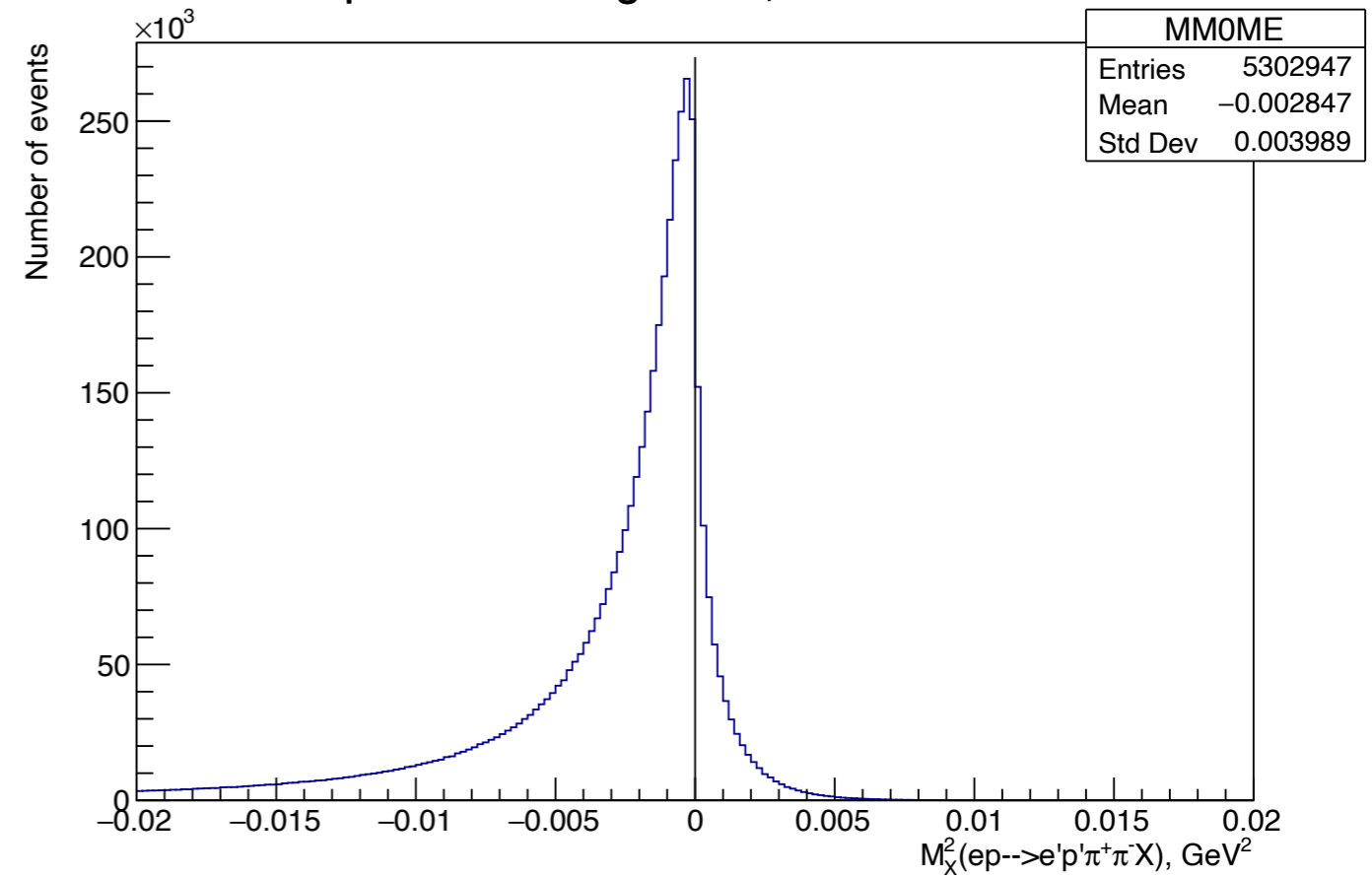


# Отбор по недостающей энергии

Squared Missing Mass distribution

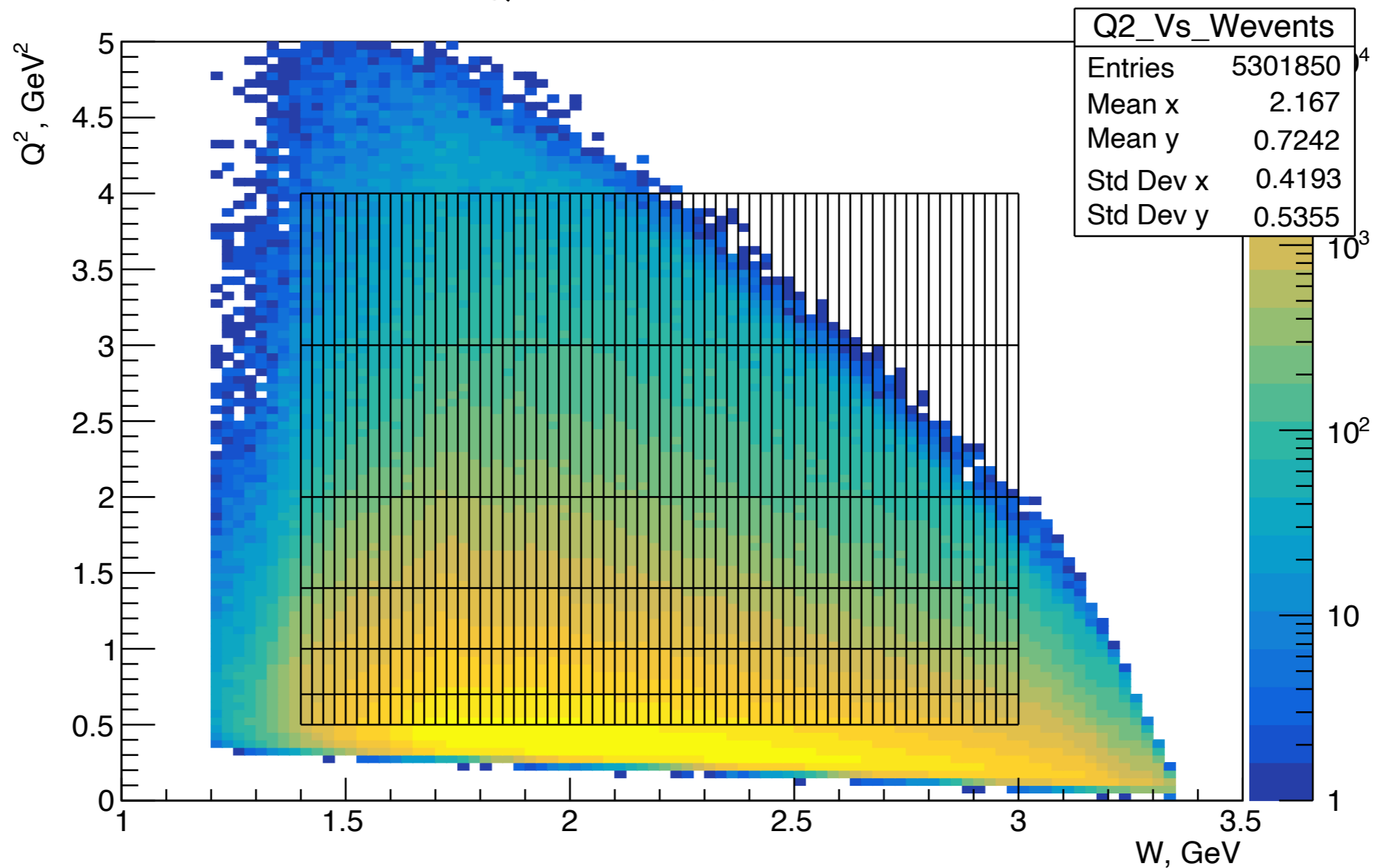


Squared Missing Mass,  $\text{IMEI} < 0.1 \text{ GeV}$



# Выделение событий реакции в срезках по $W$ и $Q^2$

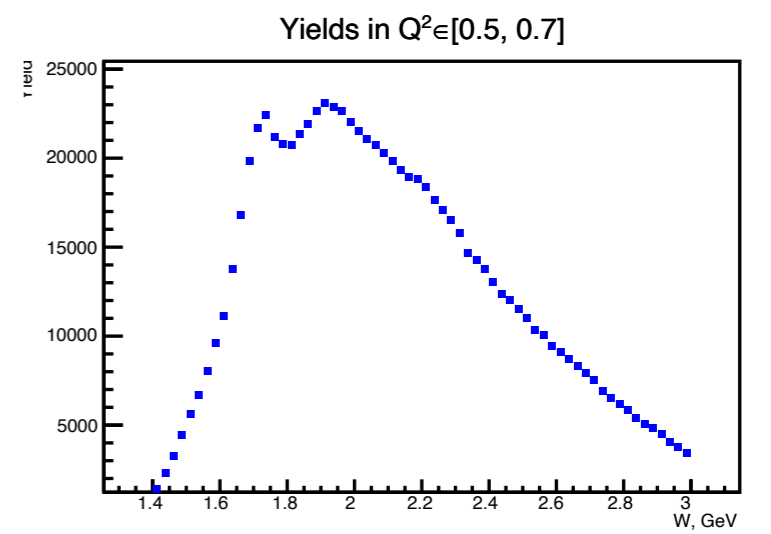
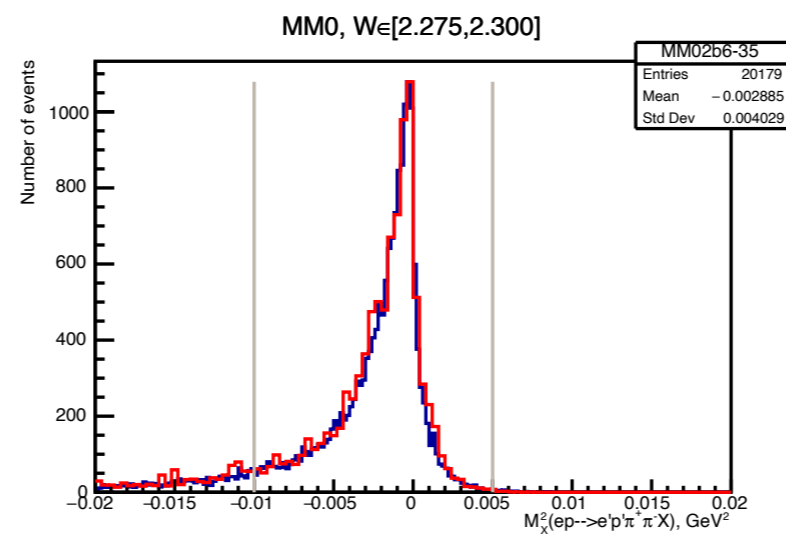
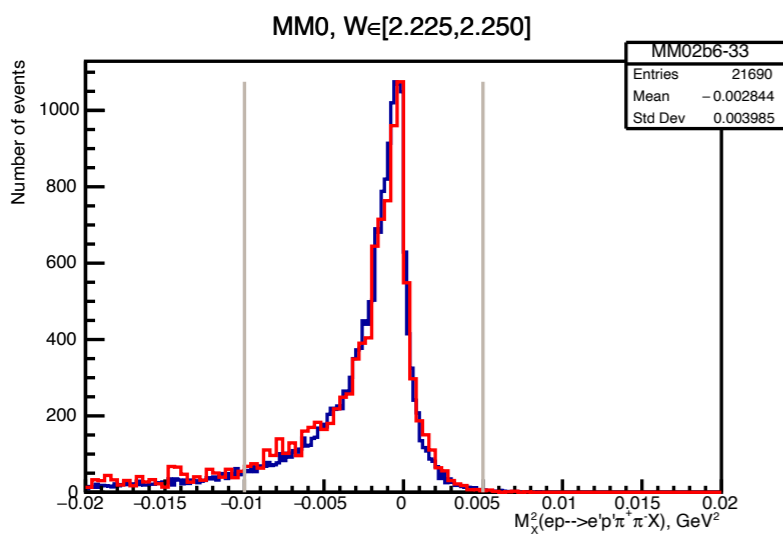
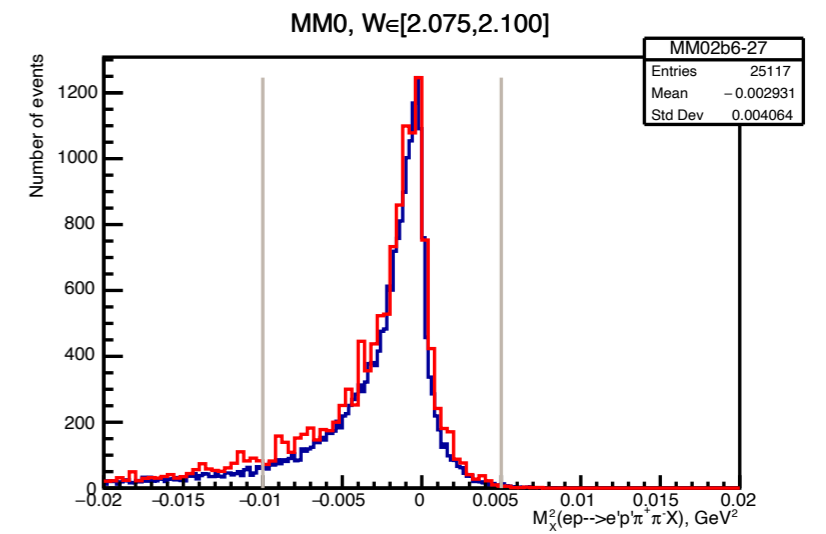
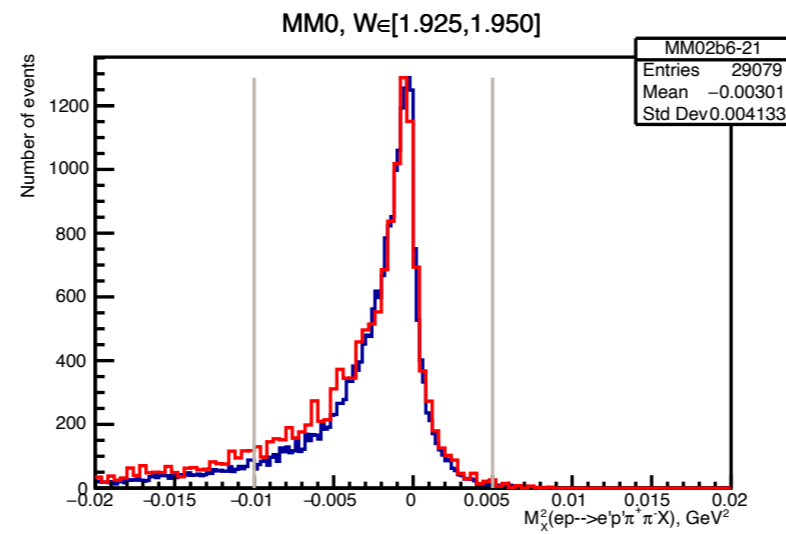
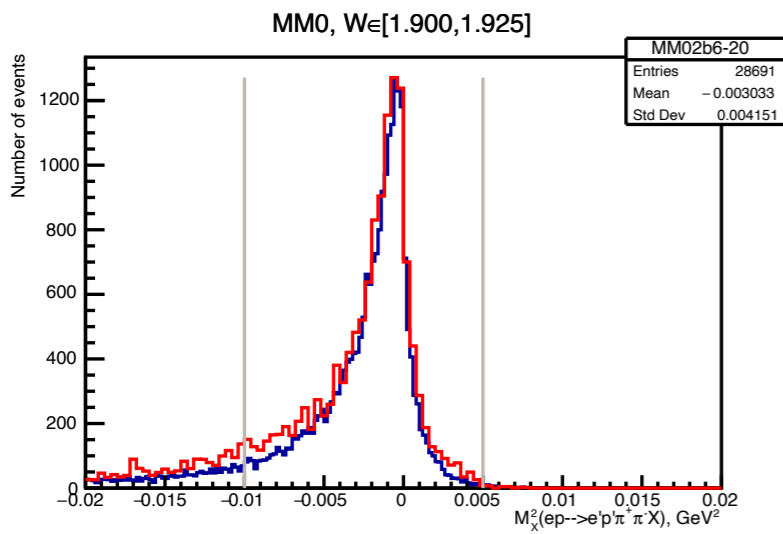
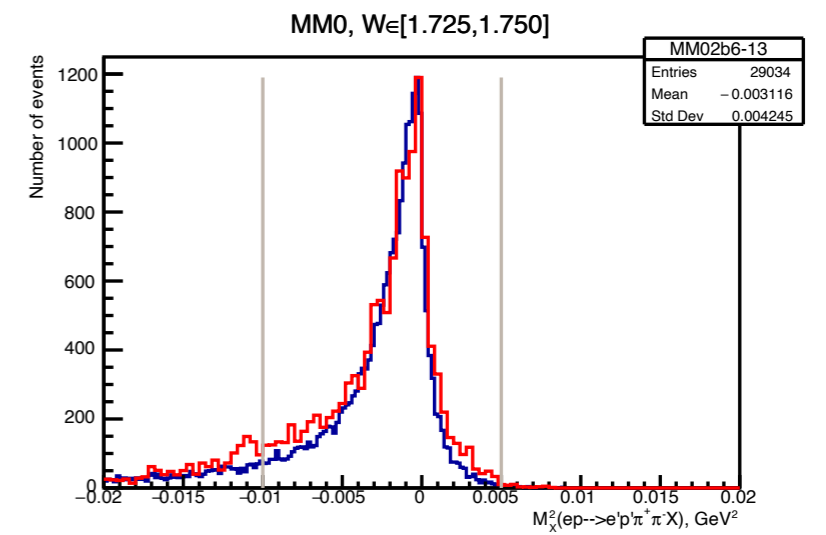
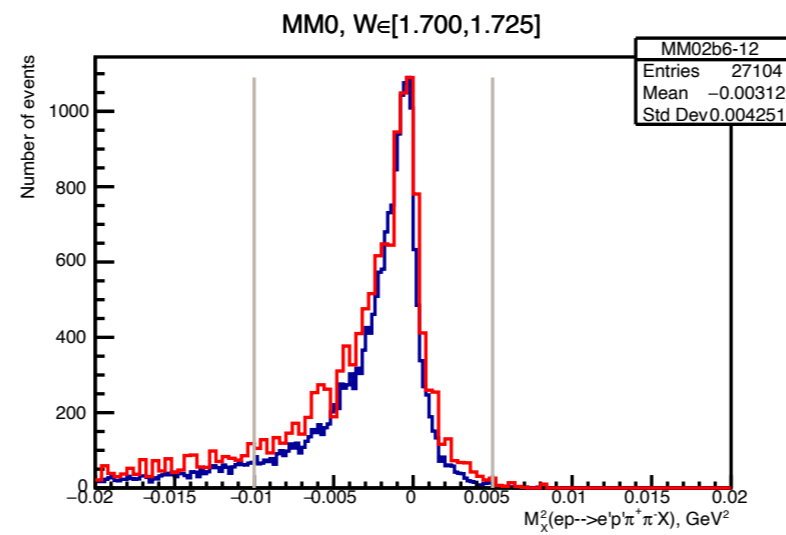
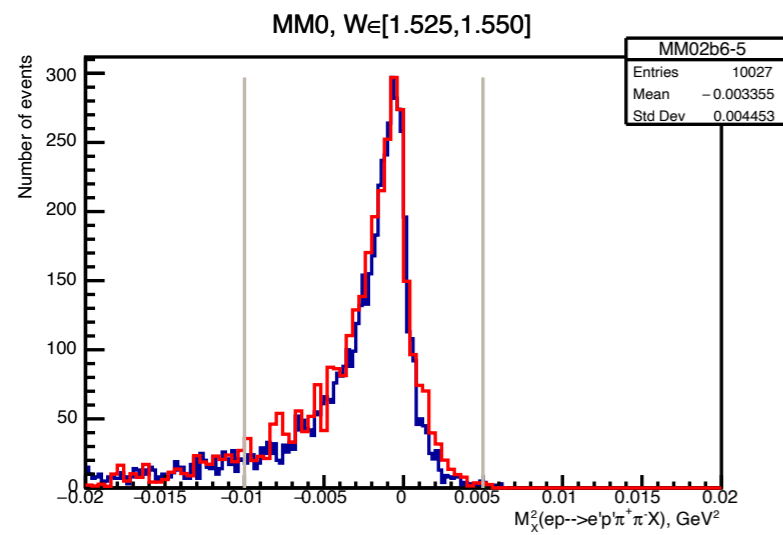
$Q^2$  Vs  $W$  distribution



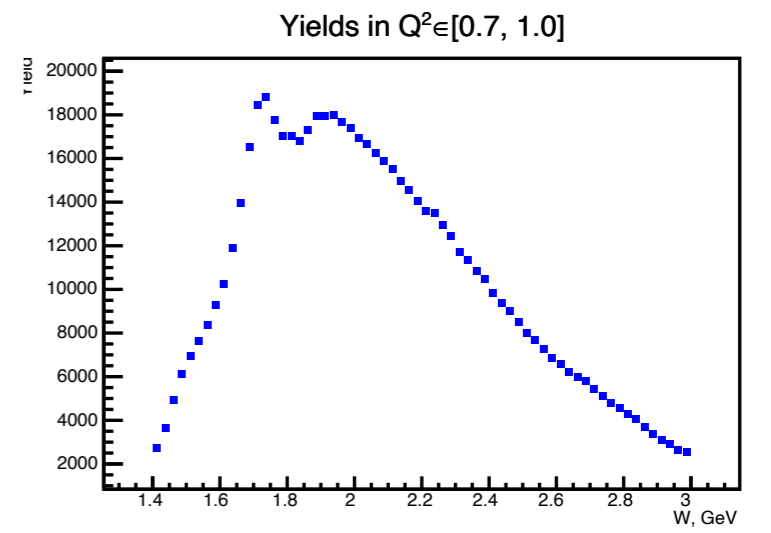
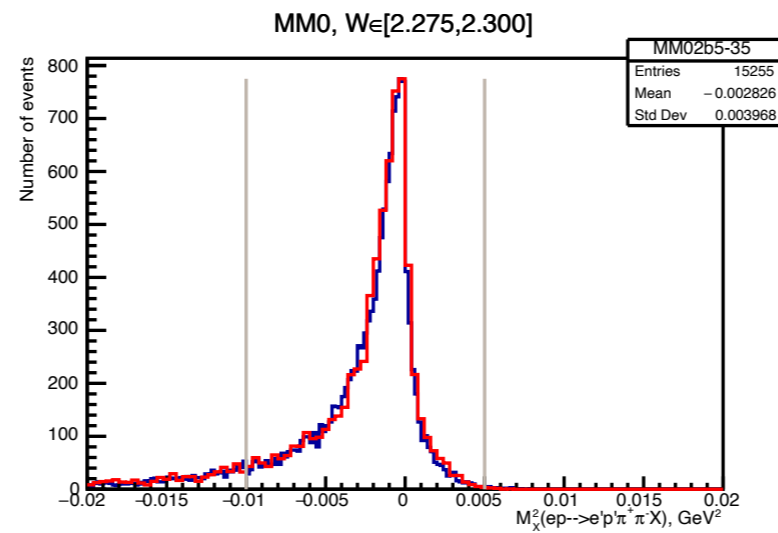
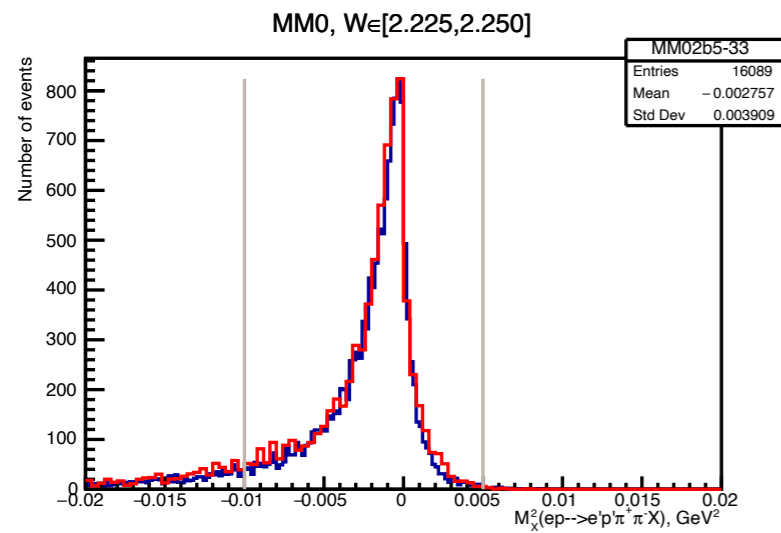
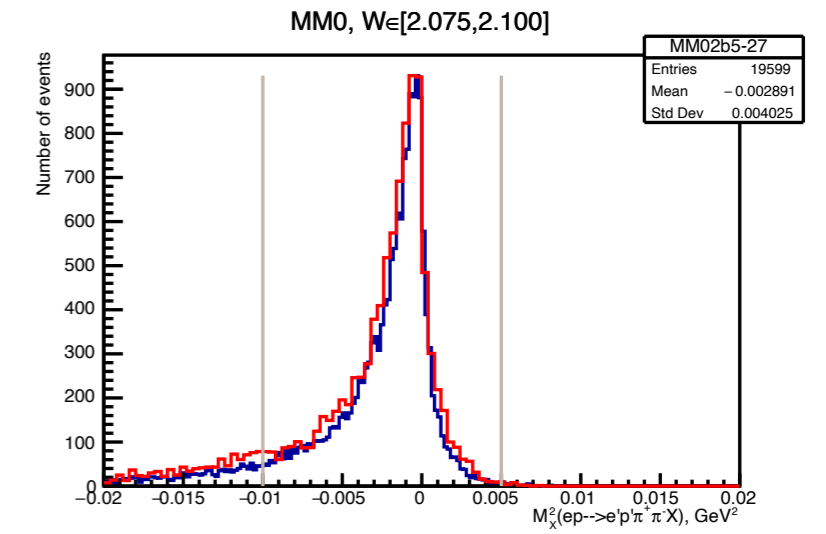
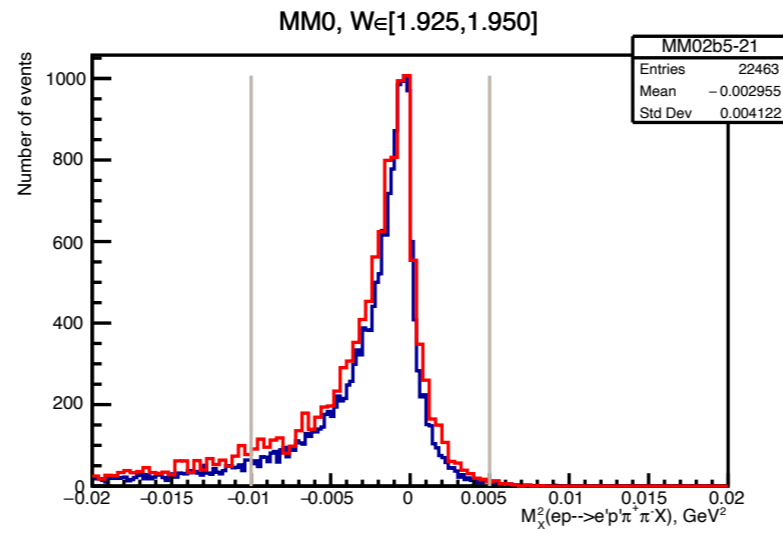
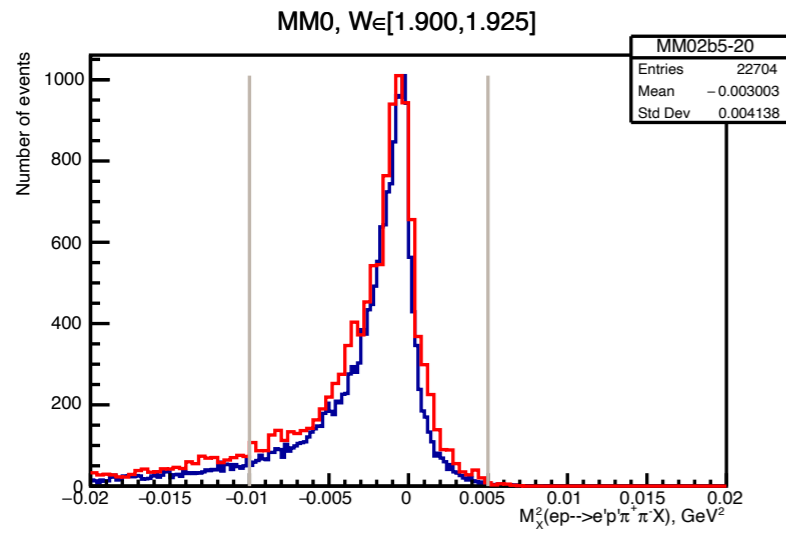
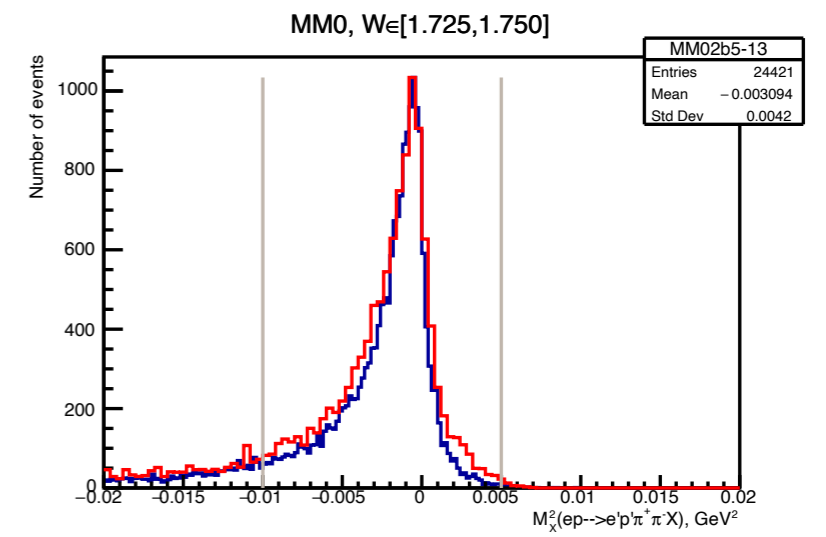
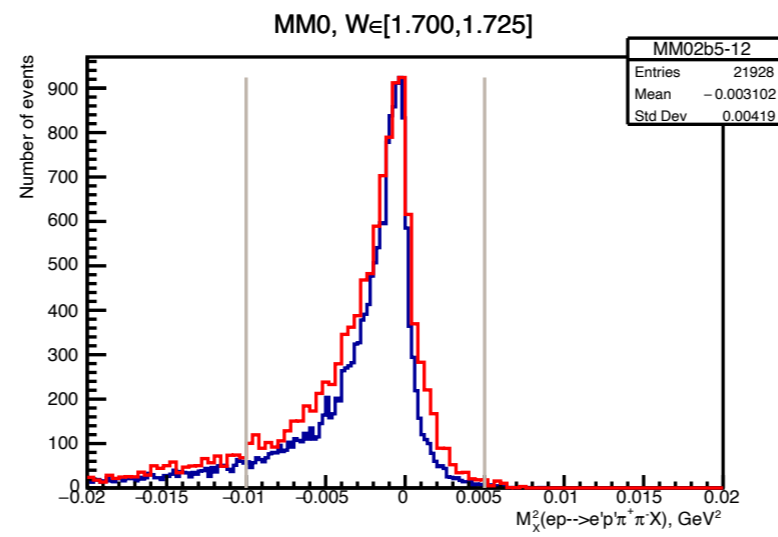
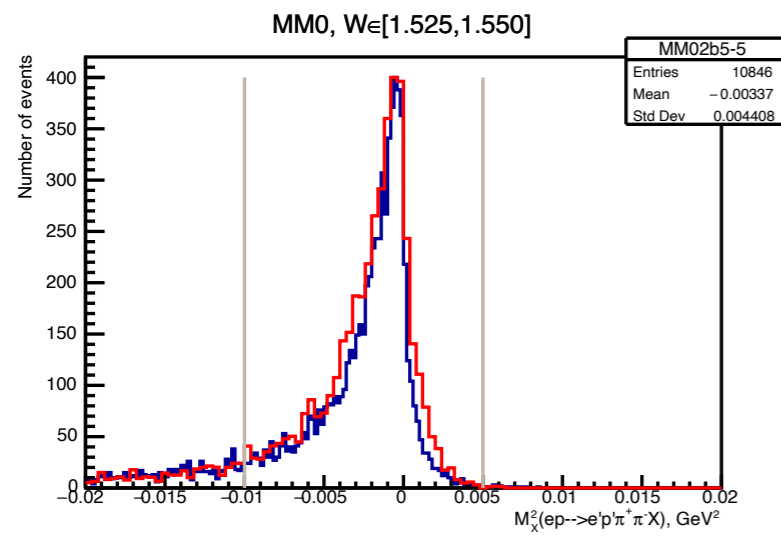


# Получение данных моделирования

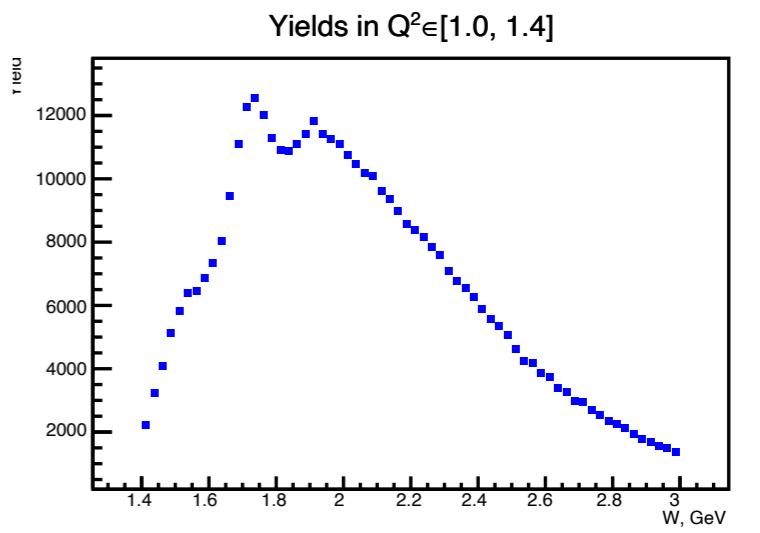
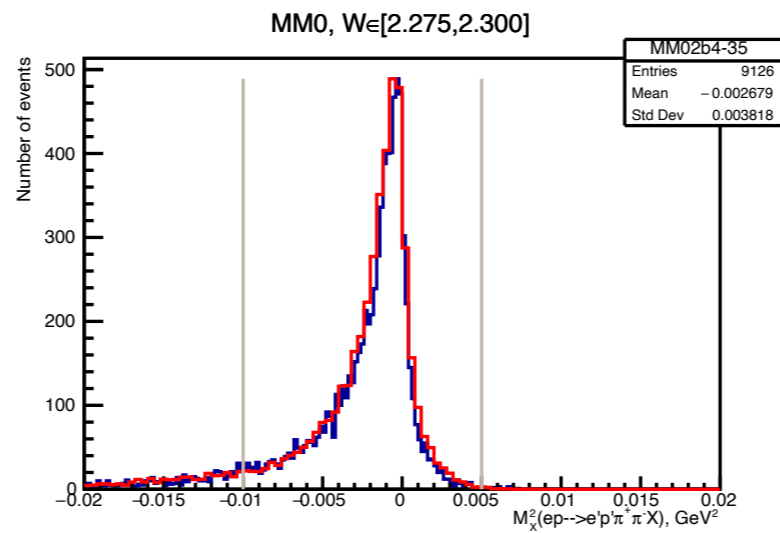
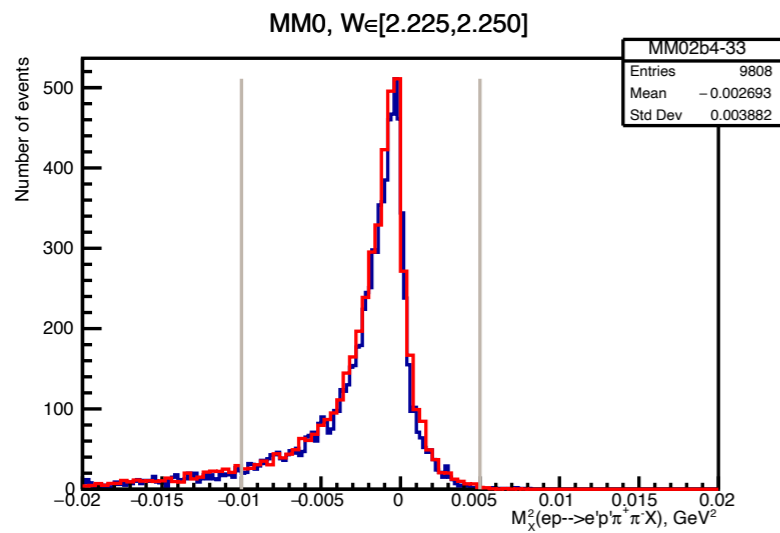
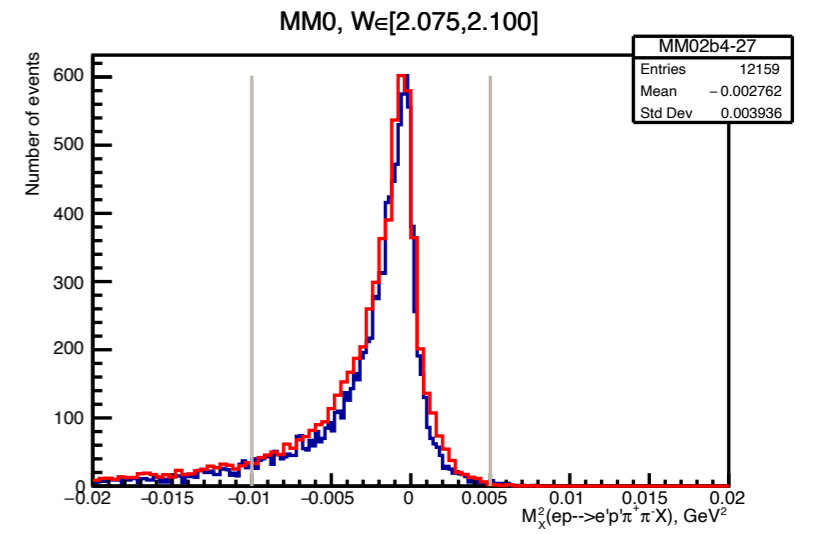
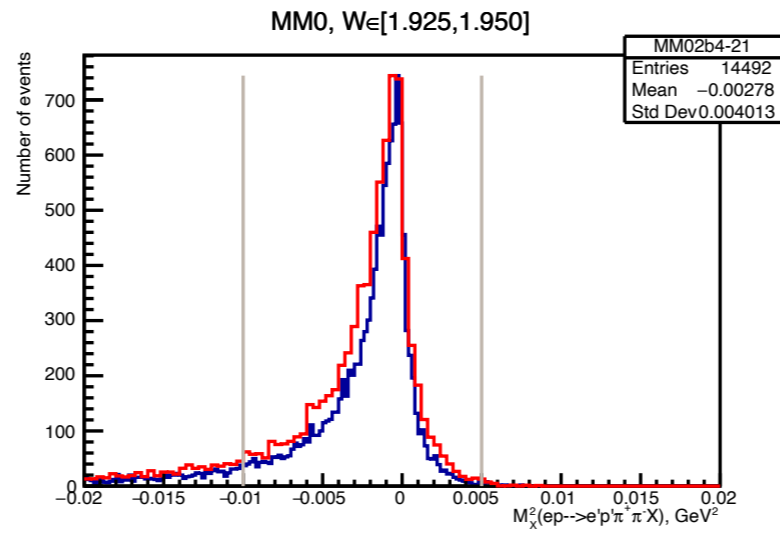
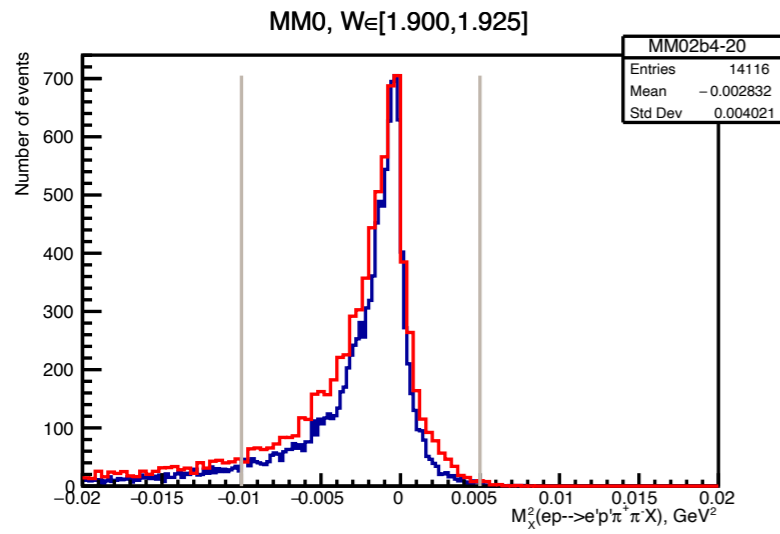
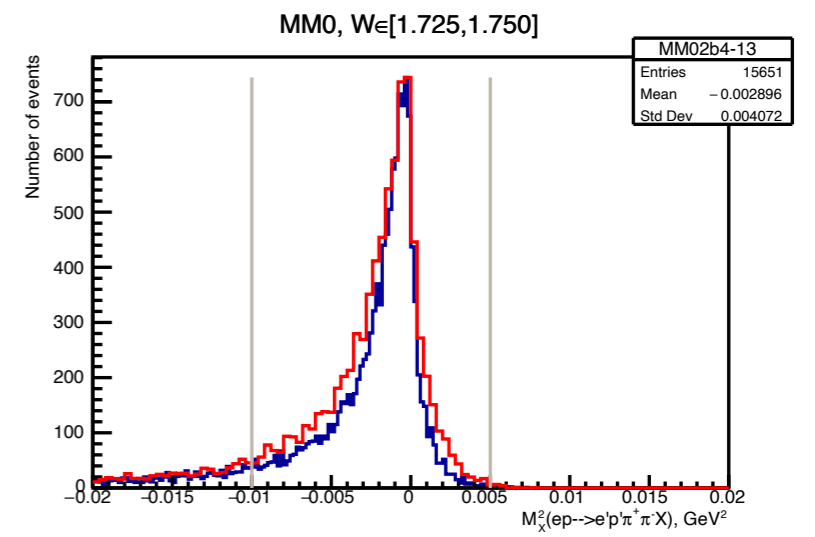
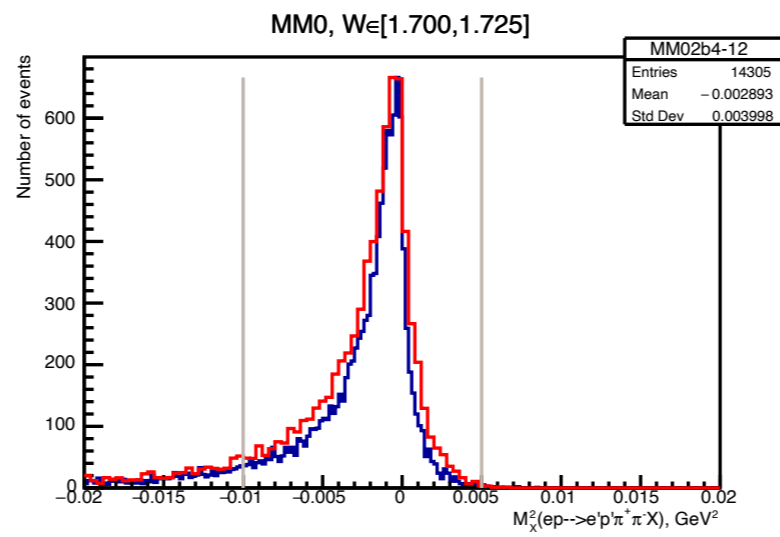
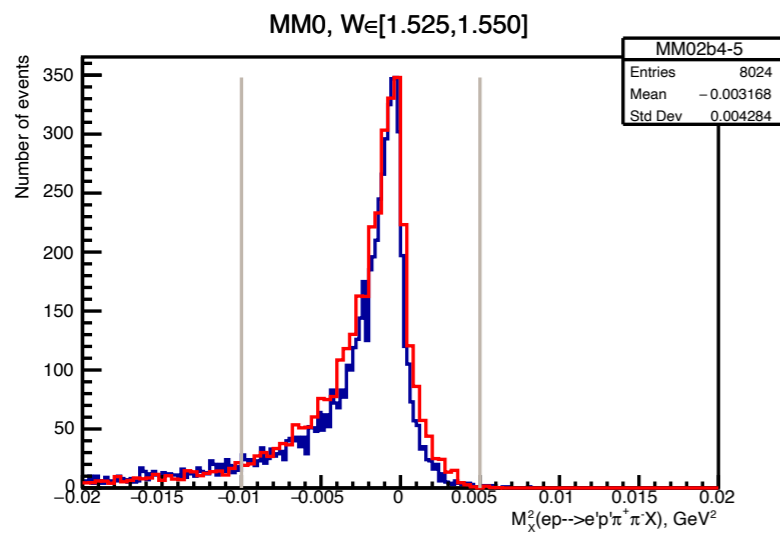
Project	CLAS12
Configuration	rgk_fall2018_FTOff
Magnetic Fields	tor+1.00_sol-1.00
Generator	twopeg
Generator Options	--ebeam 6.535 --wmin 1.1 --wmax 3.5 -- q2min 0.4 --q2max 6.0 --thmin 1.0 -- thmax 50.0 --emin 1.0 --trad 0.0 --tlen 5.0 --toff -3.0 --twlen 30.0 --twflen 30.0 -- flagbos 0 --flagrad 2
Number of Events / Job	10000
Number of Jobs	10000
Total Number of Events	100 M
Fields:	tor+1.00_sol-1.00 M
Background Merging	60nA_6535MeV M



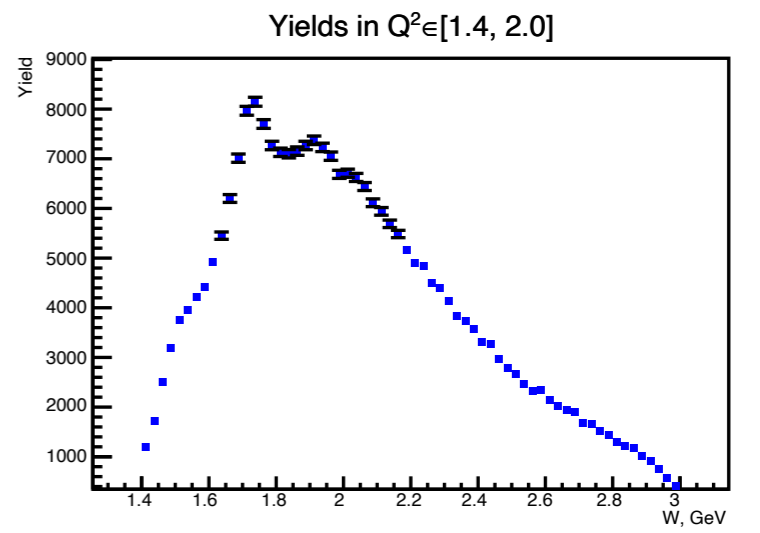
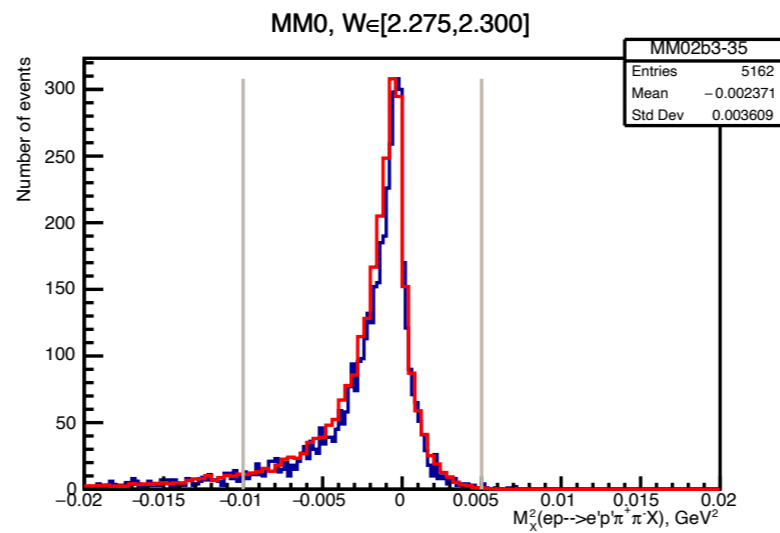
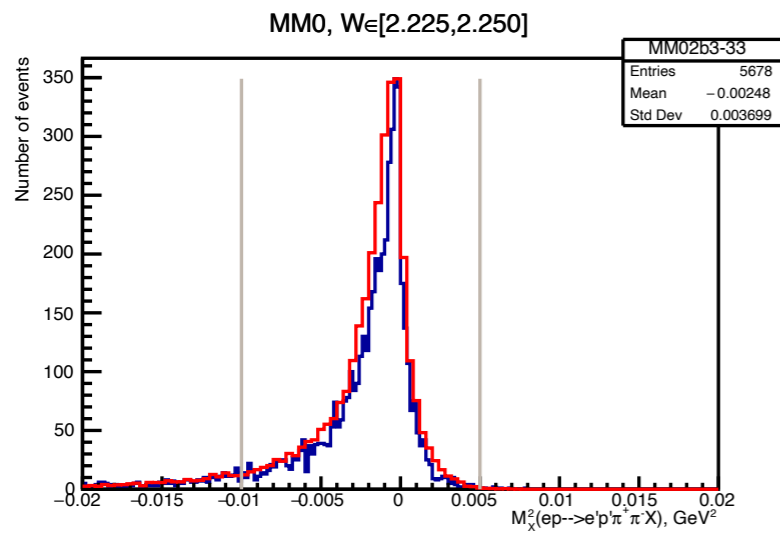
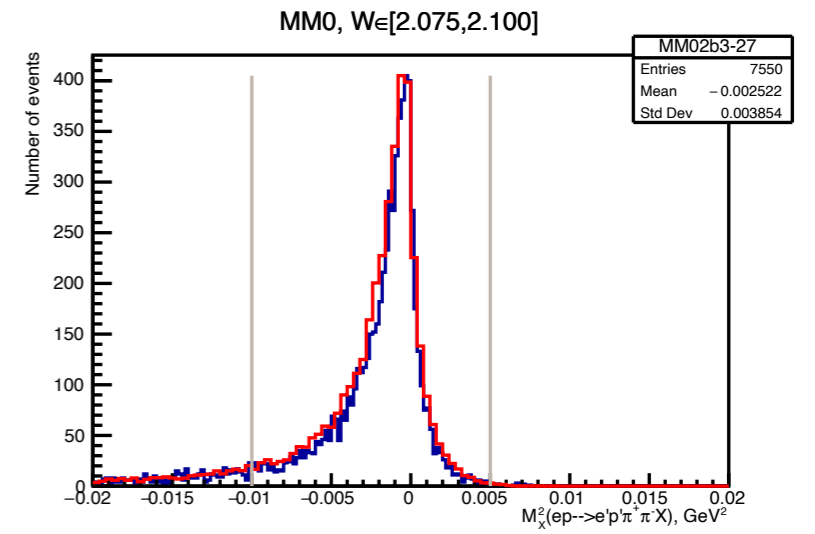
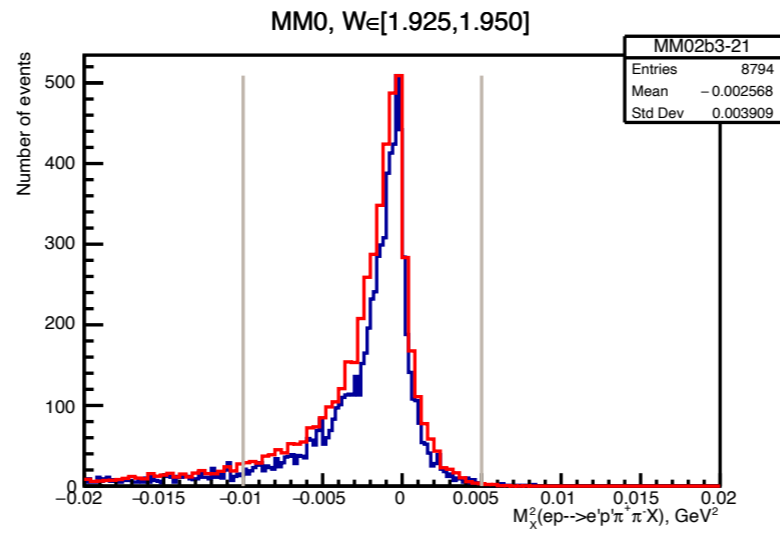
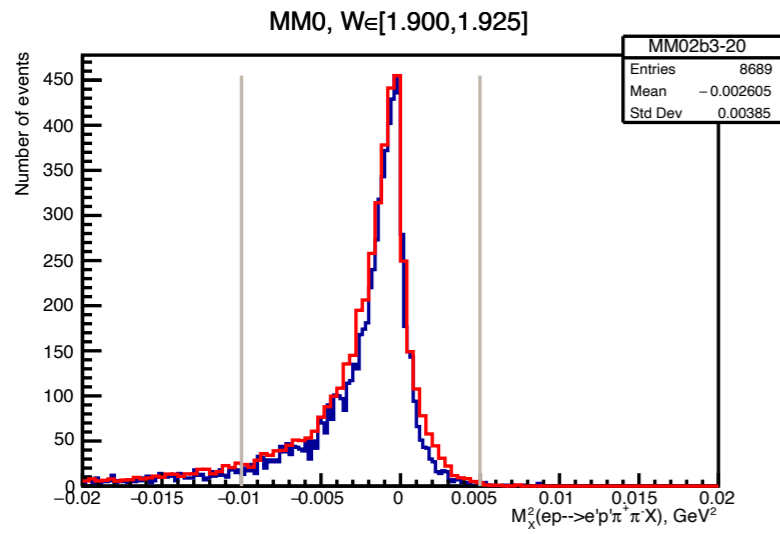
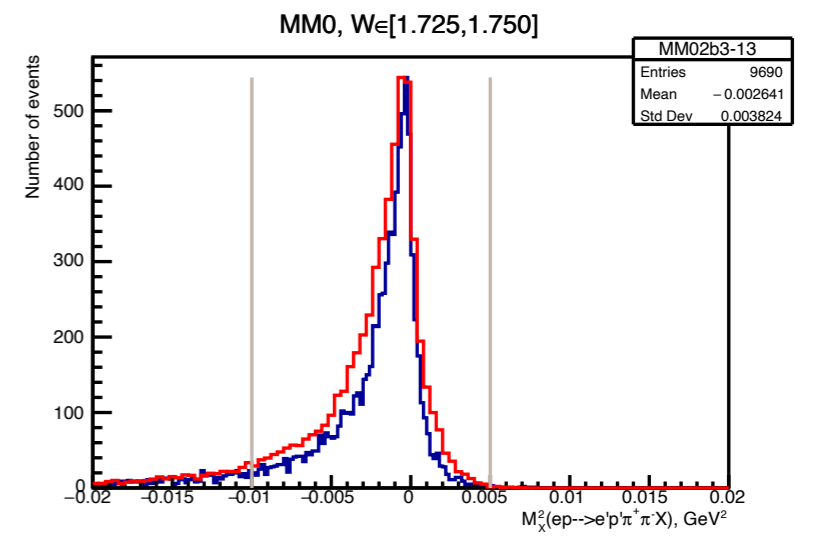
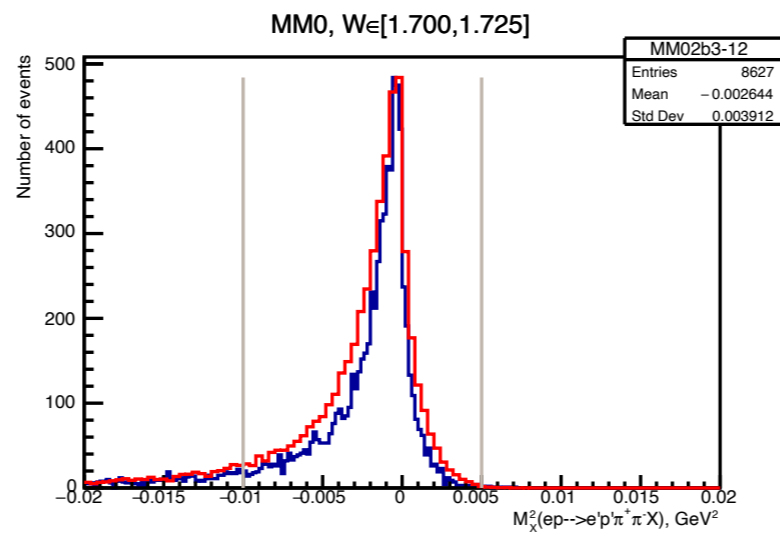
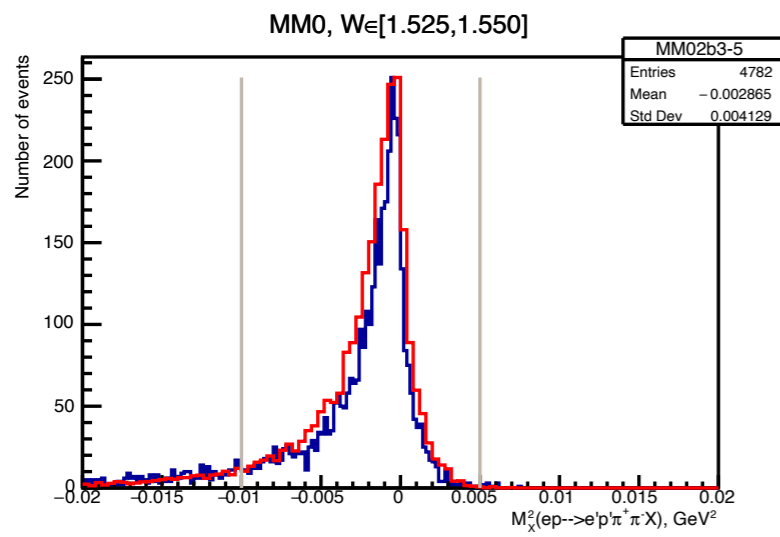
**Распределения квадрата недостающей массы в некоторых ячейках по  $W$  и  $Q^2$ , результаты моделирования показаны красным, экспериментальные данные синим, к данным моделирования применено уширения с учетом реальных разрешений**



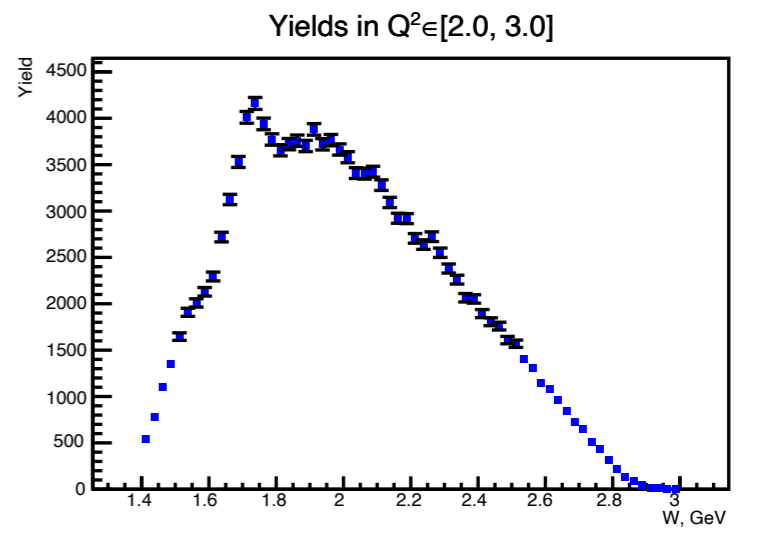
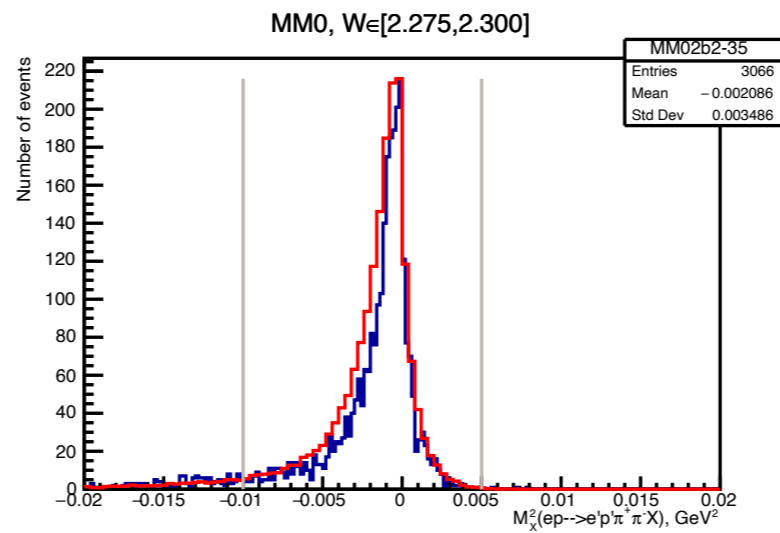
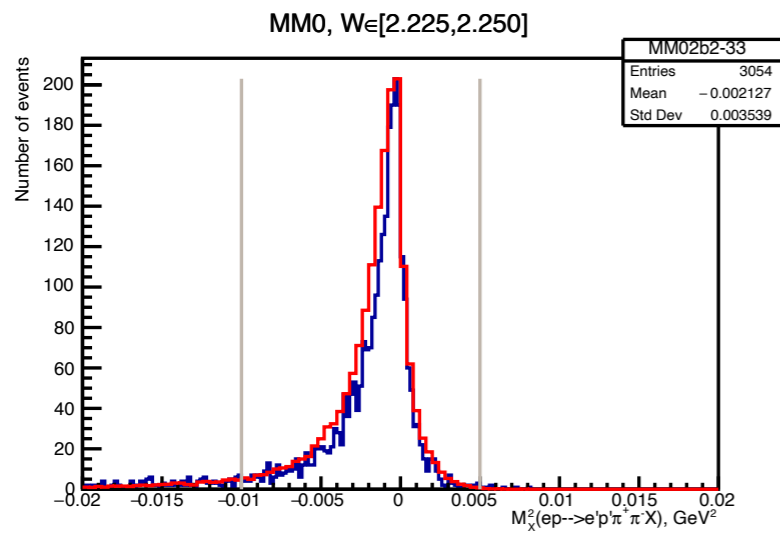
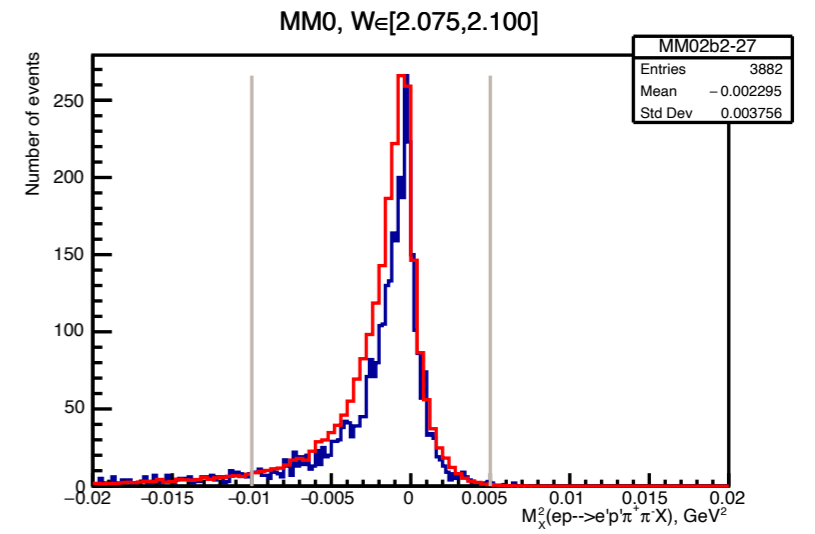
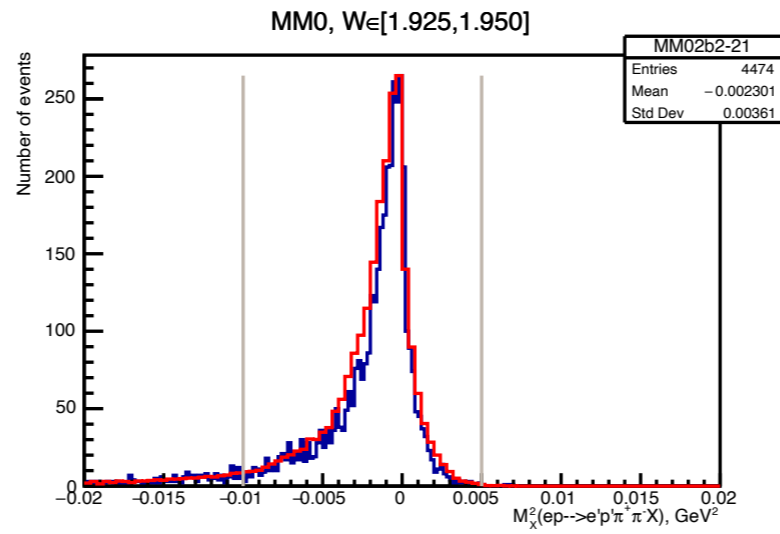
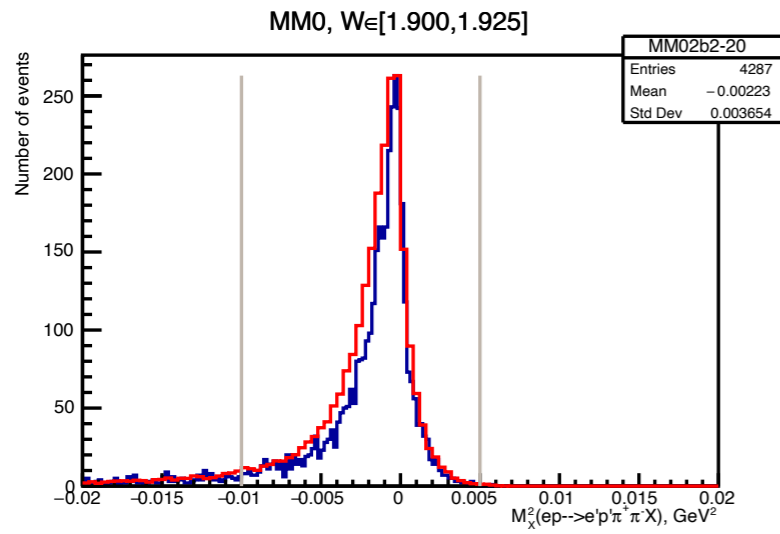
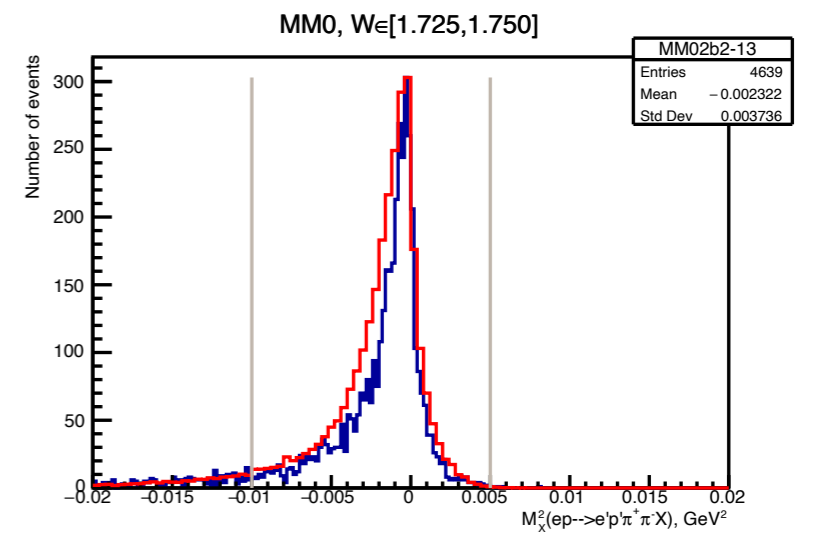
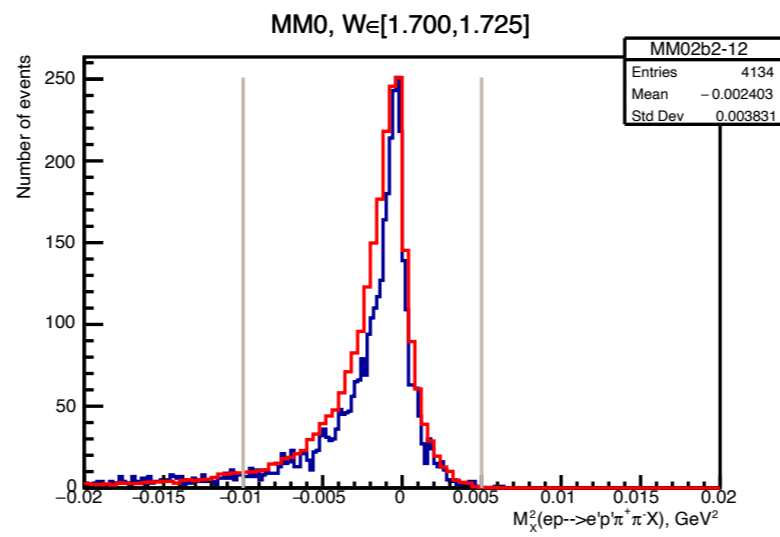
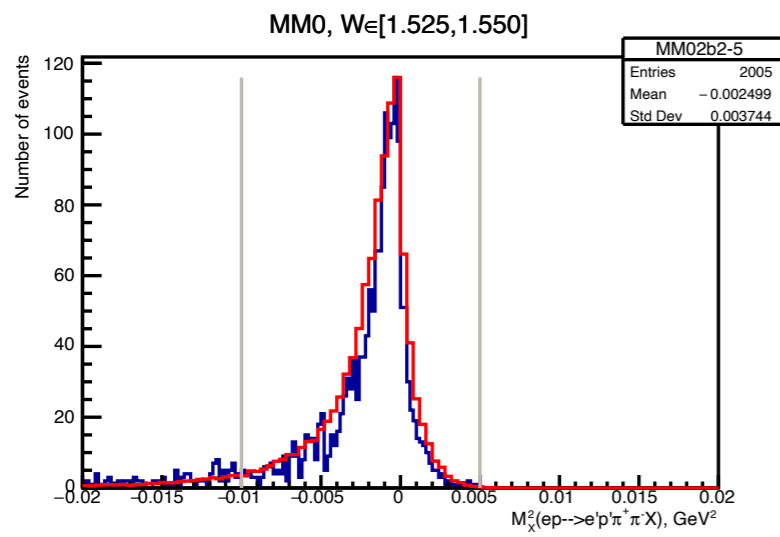
**Распределения квадрата недостающей массы в некоторых ячейках по  $W$  и  $Q^2$ , результаты моделирования показаны красным, экспериментальные данные синим, к данным моделирования применено уширения с учетом реальных разрешений**



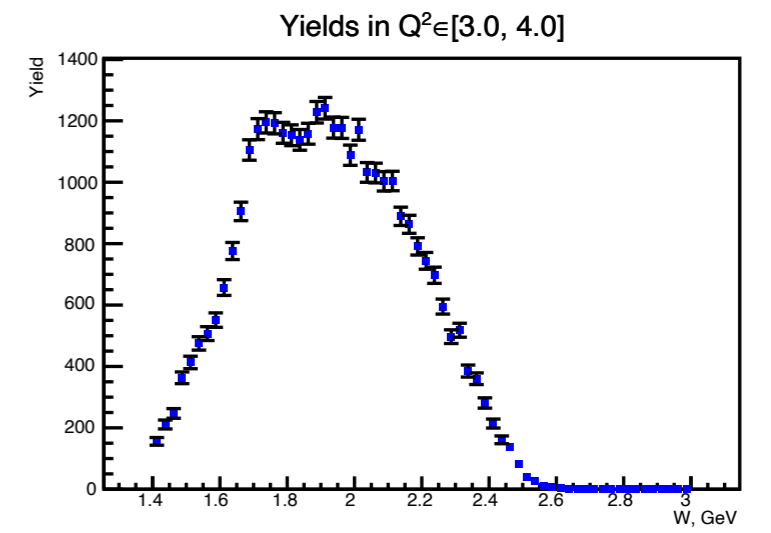
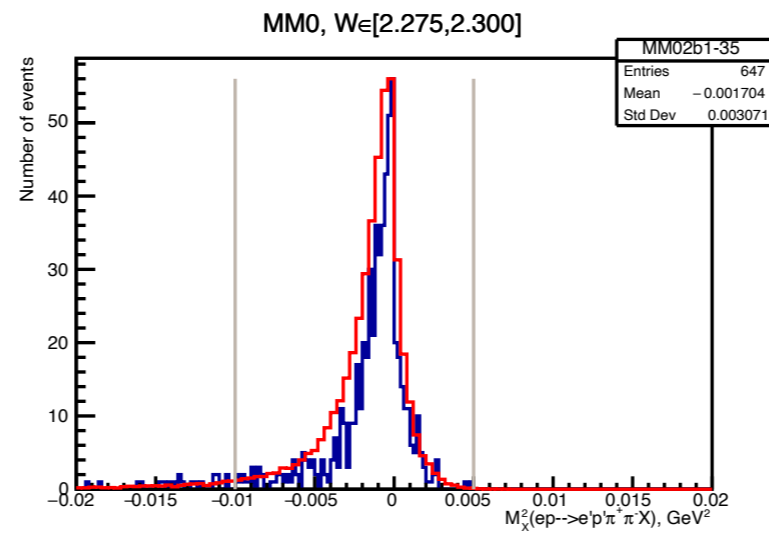
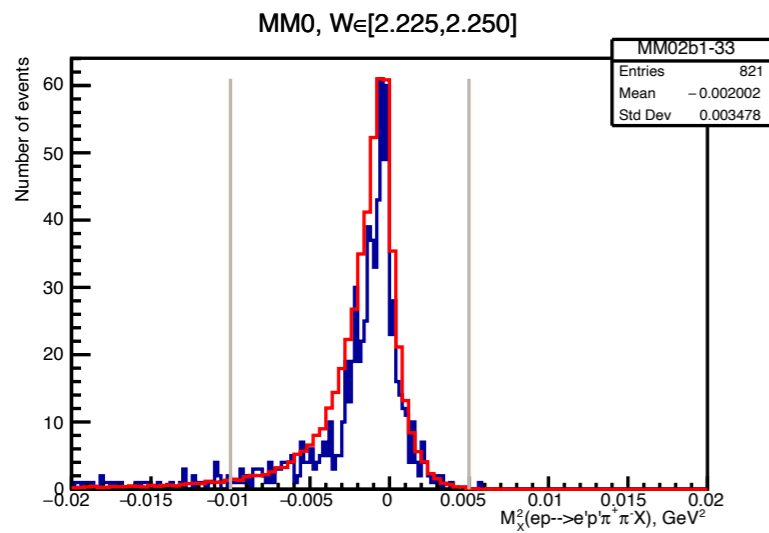
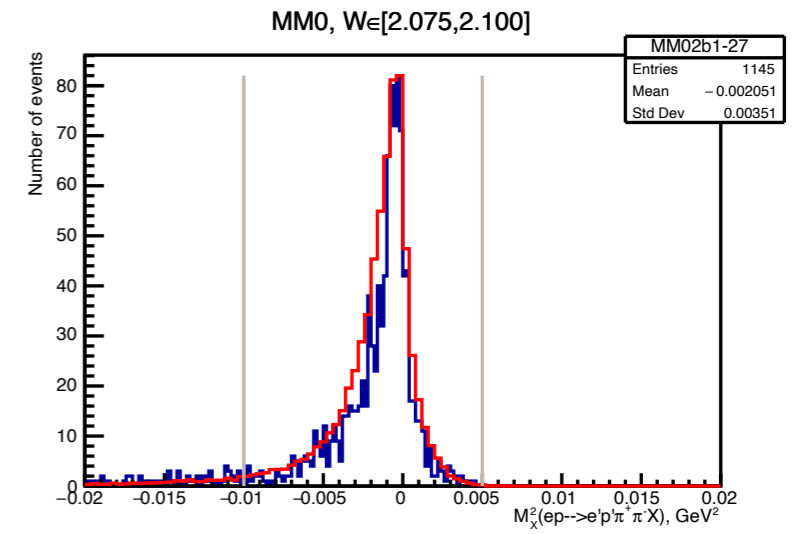
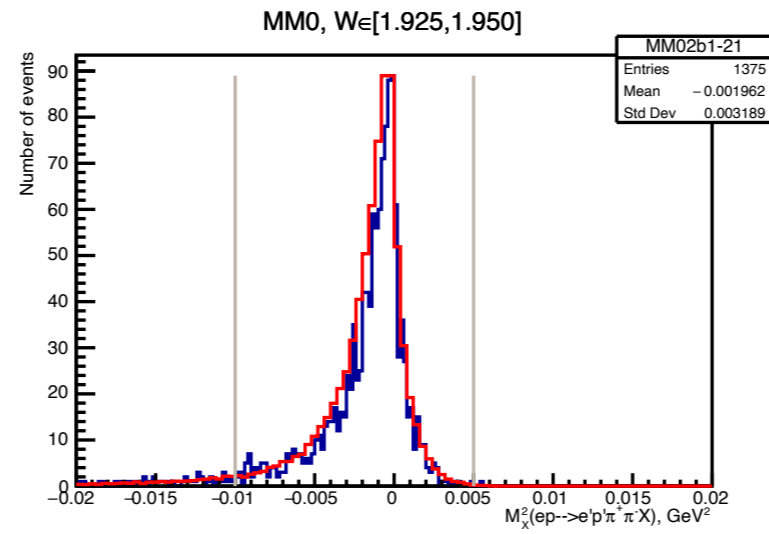
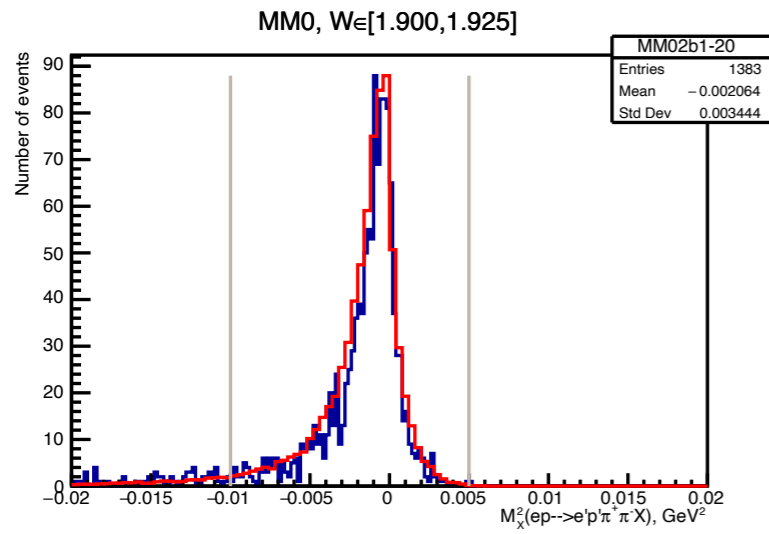
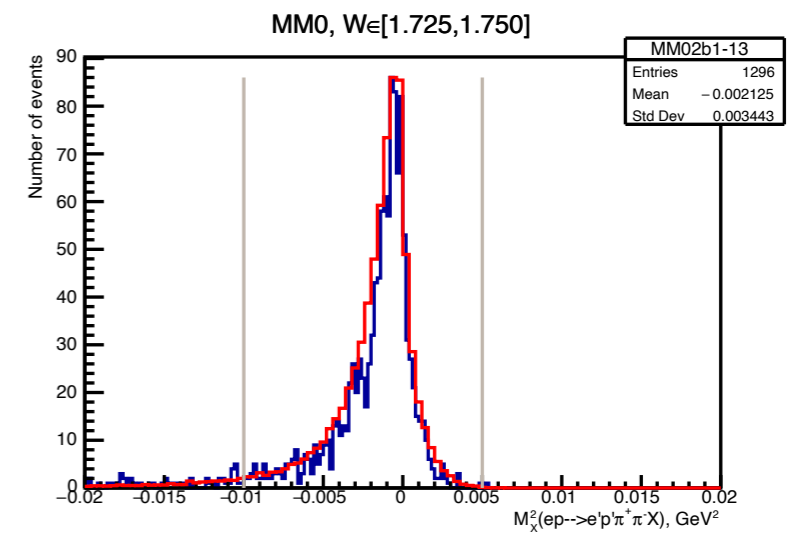
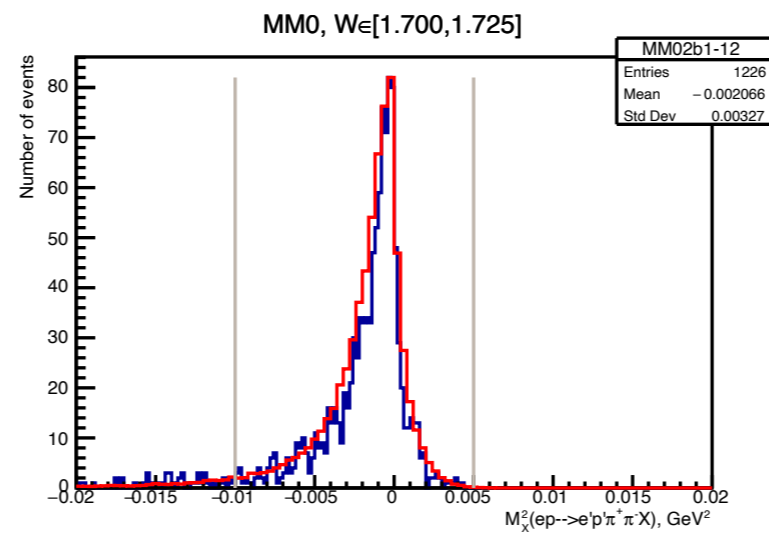
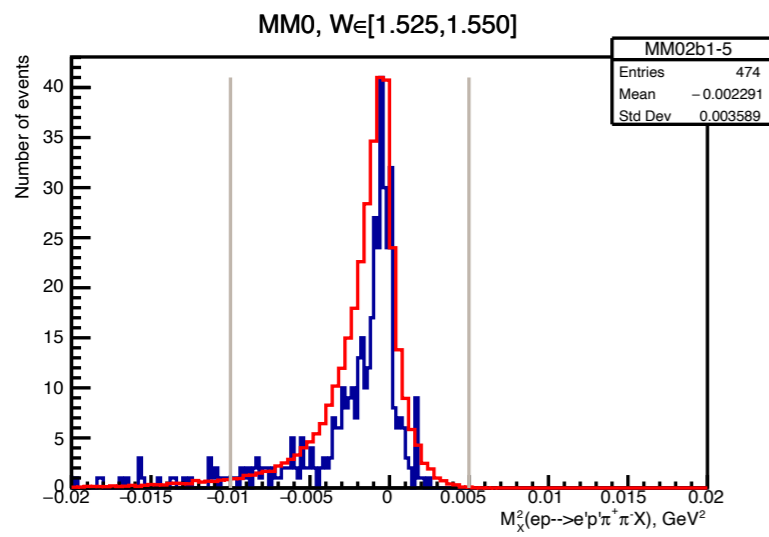
**Распределения квадрата недостающей массы в некоторых ячейках по  $W$  и  $Q^2$ , результаты моделирования показаны красным, экспериментальные данные синим, к данным моделирования применено уширения с учетом реальных разрешений**



**Распределения квадрата недостающей массы в некоторых ячейках по  $W$  и  $Q^2$ , результаты моделирования показаны красным, экспериментальные данные синим, к данным моделирования применено уширения с учетом реальных разрешений**



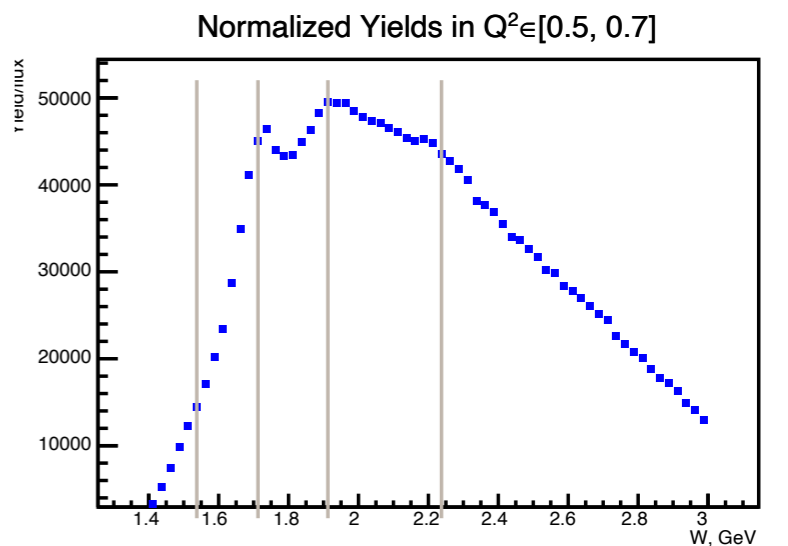
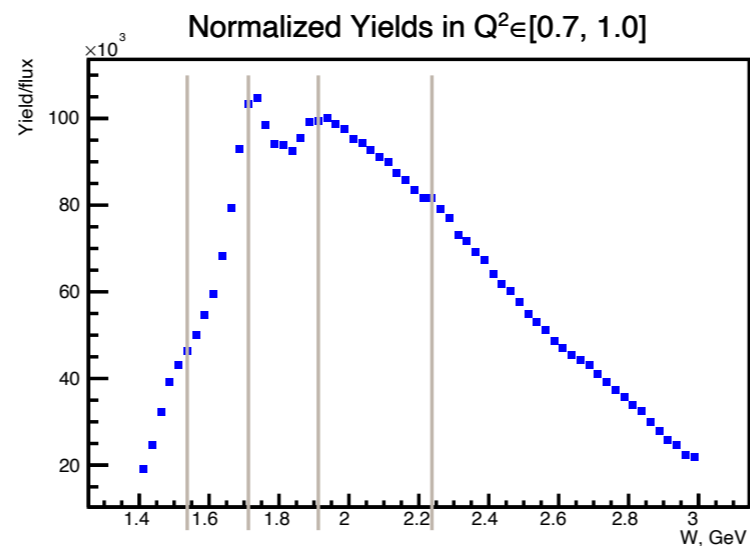
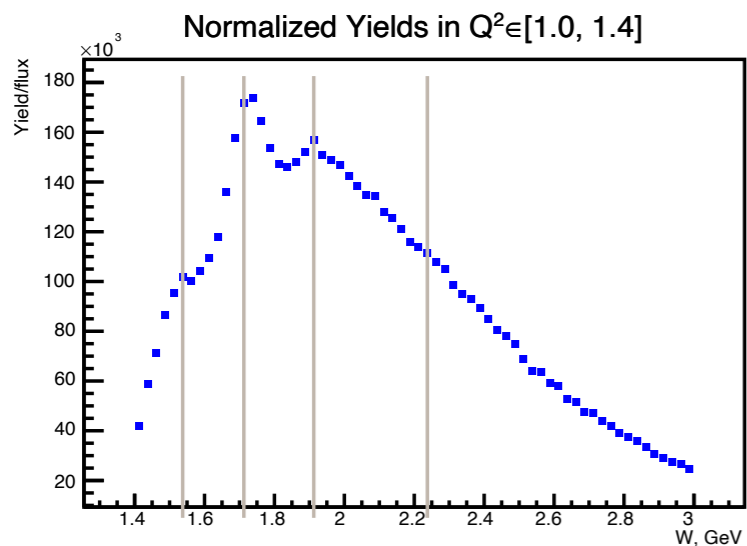
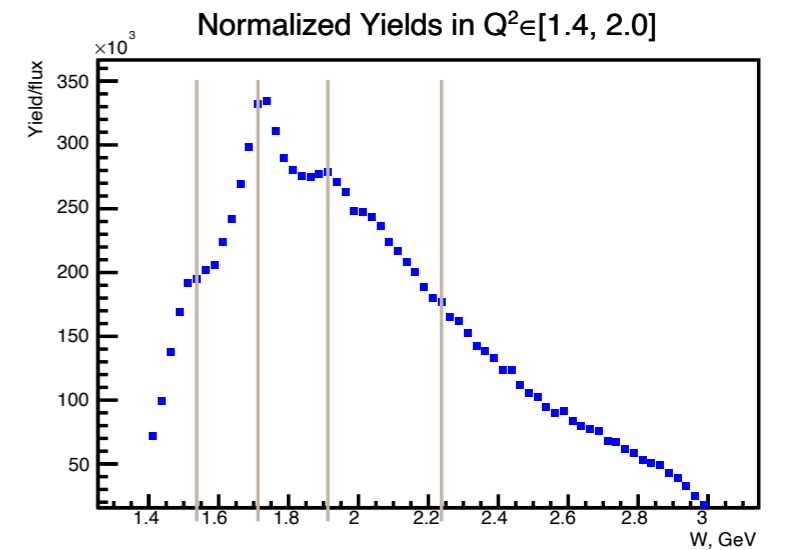
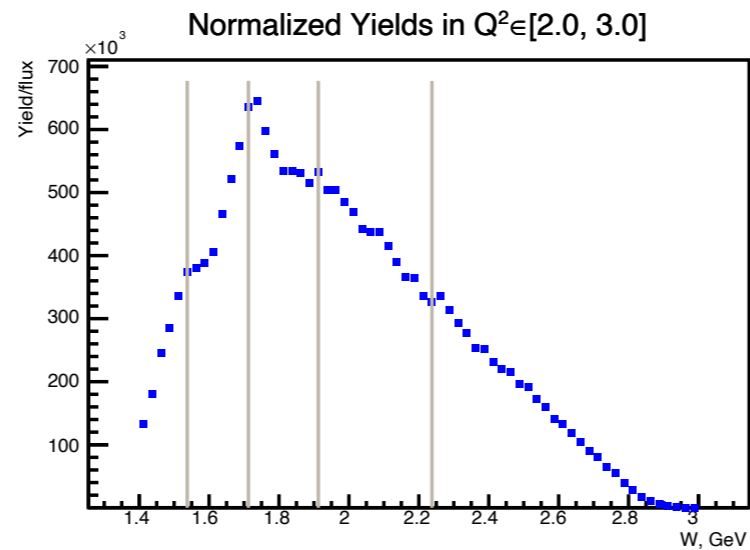
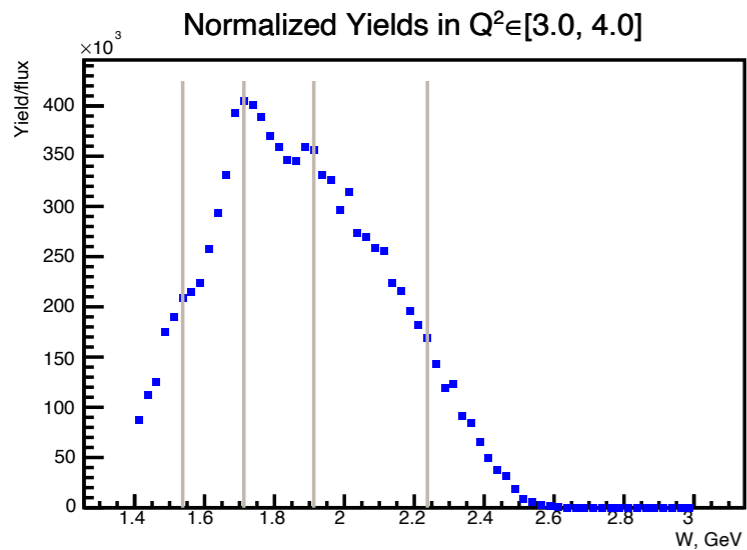
**Распределения квадрата недостающей массы в некоторых ячейках по  $W$  и  $Q^2$ , результаты моделирования показаны красным, экспериментальные данные синим, к данным моделирования применено уширения с учетом реальных разрешений**



**Распределения квадрата недостающей массы в некоторых ячейках по  $W$  и  $Q^2$ , результаты моделирования показаны красным, экспериментальные данные синим, к данным моделирования применено уширения с учетом реальных разрешений**

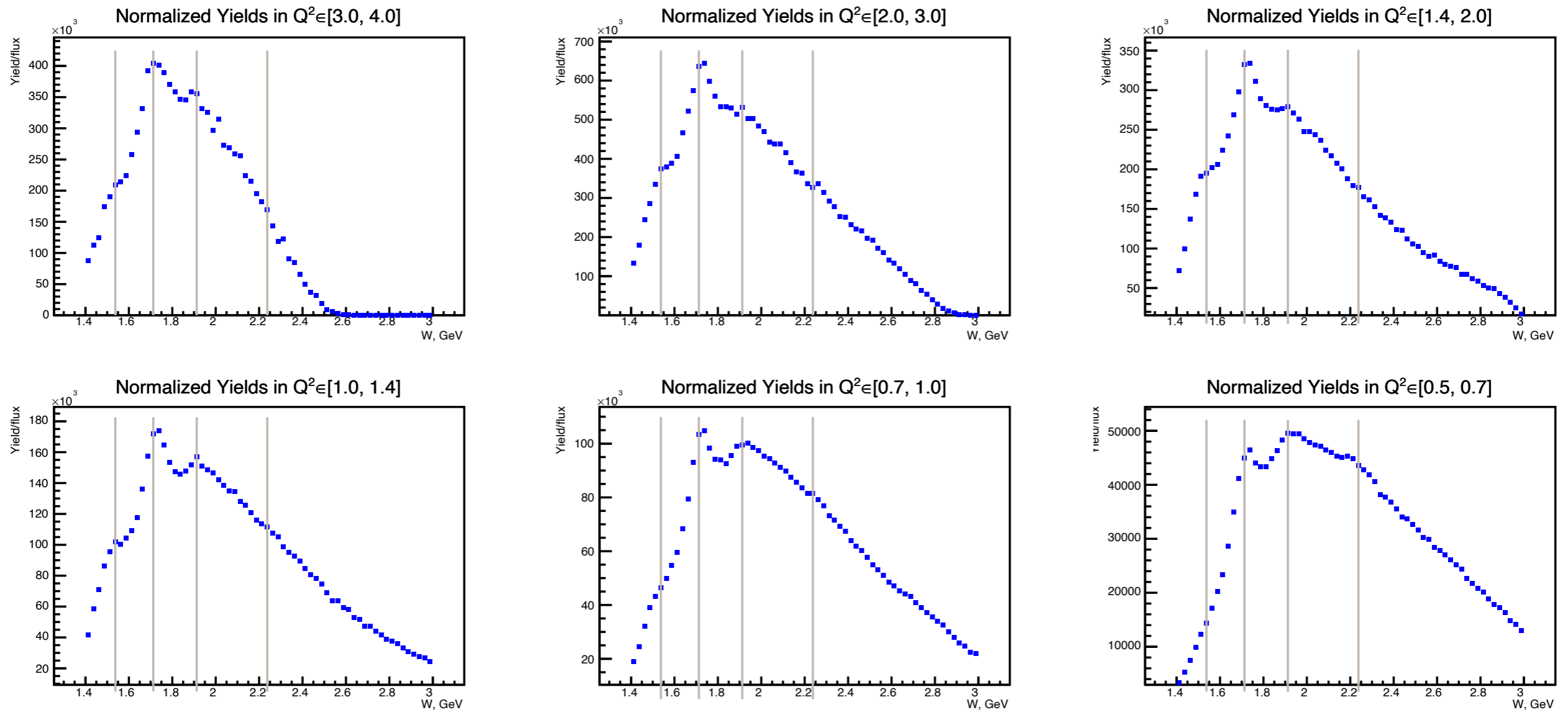
# Выходы, нормированные на поток виртуальных фотонов

$$\frac{\text{число событий}}{dW dQ^2 \cdot \Gamma_\nu}, \quad \frac{d^7 \sigma_e}{dW dQ^2 d^5 \tau} \frac{1}{\Gamma_\nu} = \frac{d^5 \sigma_{\gamma\nu}}{d^5 \tau}$$





# Выходы, нормированные на поток виртуальных фотонов



Наблюдаются структуры при  $W = \sim 1.5$  ГэВ,  $\sim 1.7$  ГэВ,  $\sim 1.9$  ГэВ, (возможно при 2.2 ГэВ)

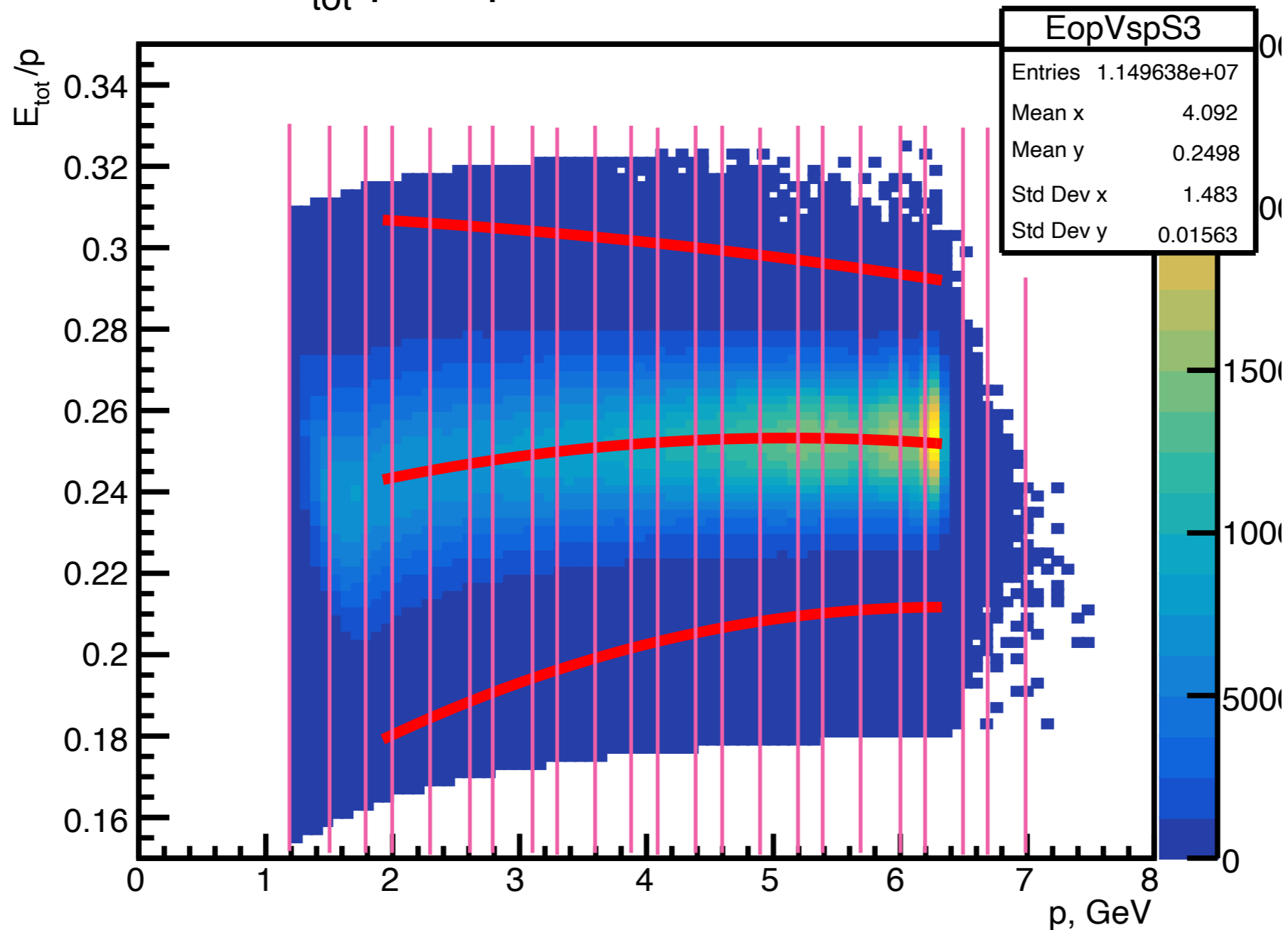
# Выводы

- Была сделана обработка данных CLAS12 по выделению событий двухпионного электророждения. Получены выходы реакции в ячейках по  $W$  и  $Q^2$ .
- Новые данные с CLAS12 перекрывают по кинематической области предыдущие данные с CLAS, а также открывают область, где возможно обнаружение более тяжелых нуклонных резонансов и гибридных состояний.
- По результатам работы была опубликована статья «Отбор событий реакции  $e p \rightarrow e p^+ \pi^- r$  из экспериментальных данных детектора CLAS12» в Ученых записках физического факультета, были выполнены доклады на конференции «Ядро-2022», «Ломоносов-2022» (был получен статус победителя).

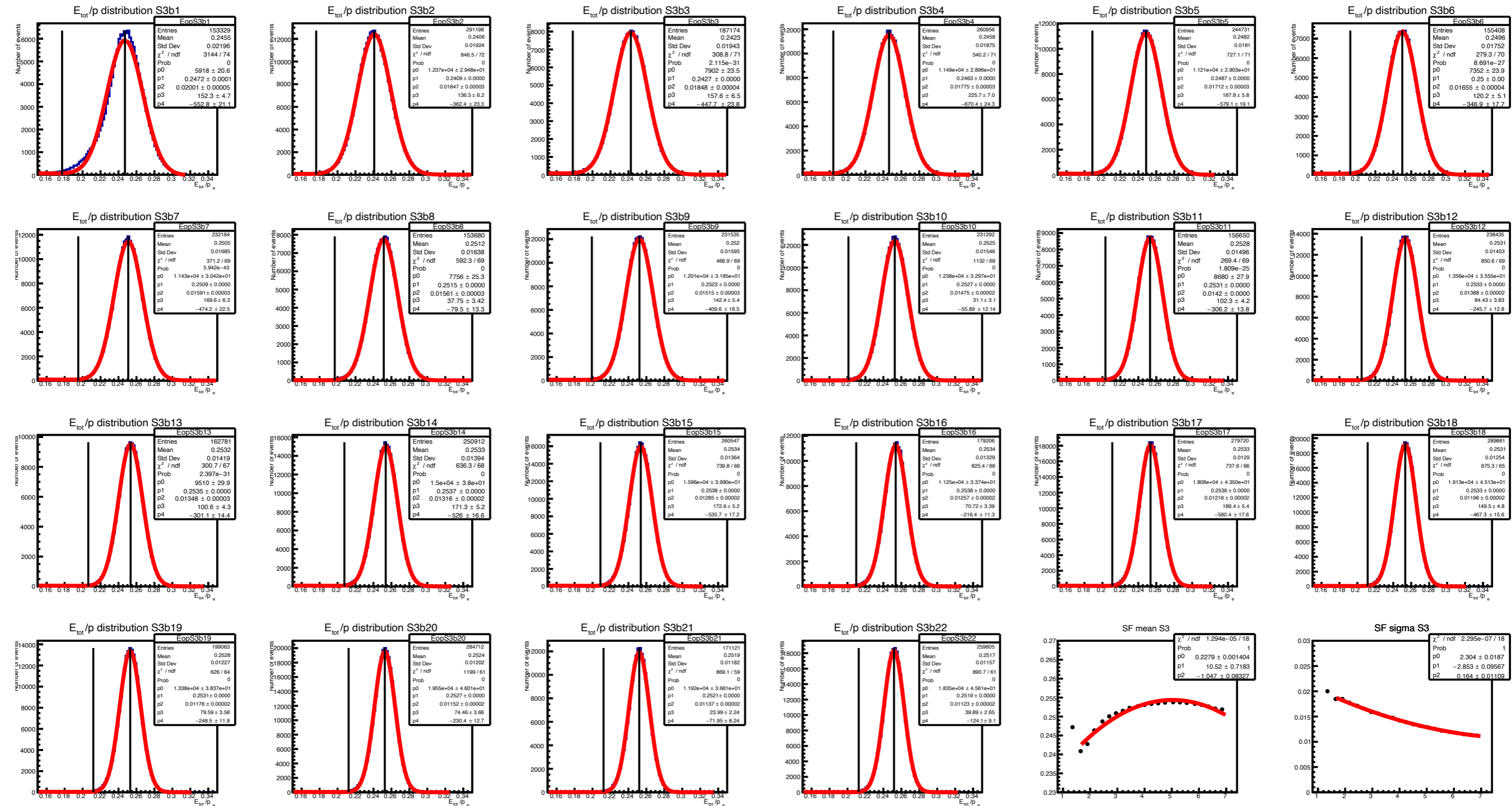
**Спасибо за внимание!**

# Отбор по энергии, оставленной в калориметре ( $E_{\text{tot}}$ )

$E_{\text{tot}}/p$  Vs  $p$  for the electron in S3



# Одномерные распределения в срезах по импульсу

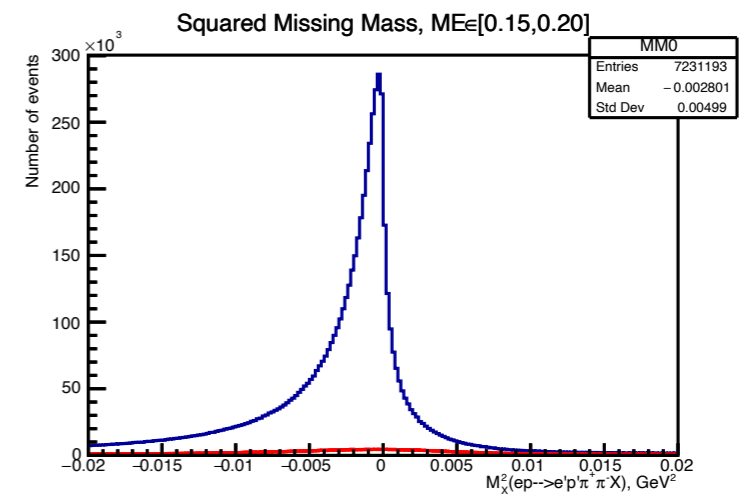
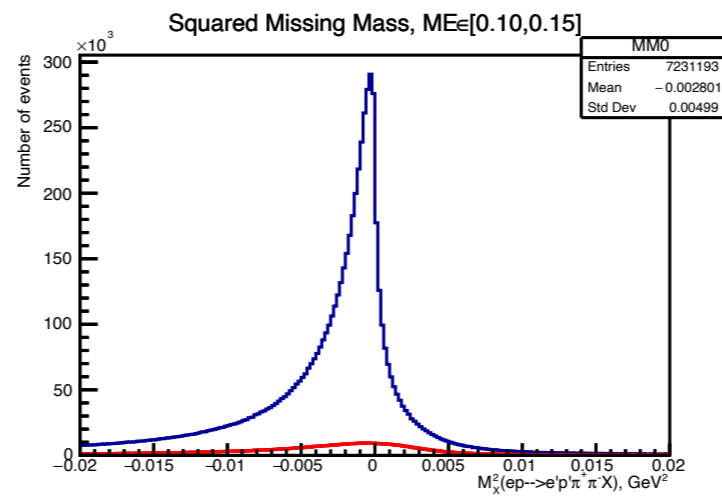
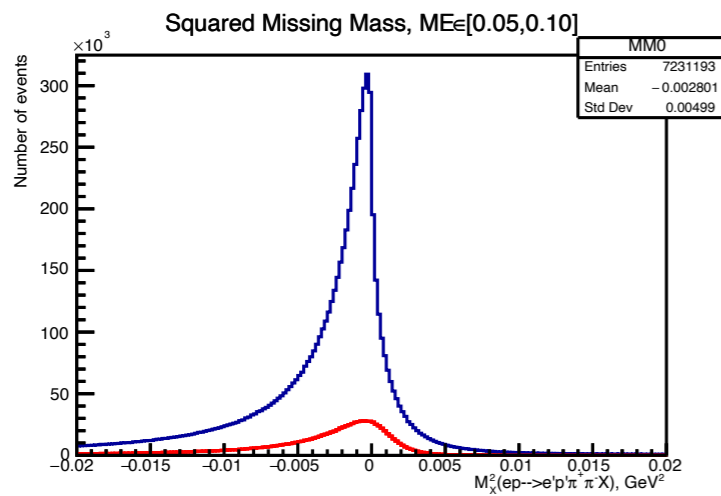
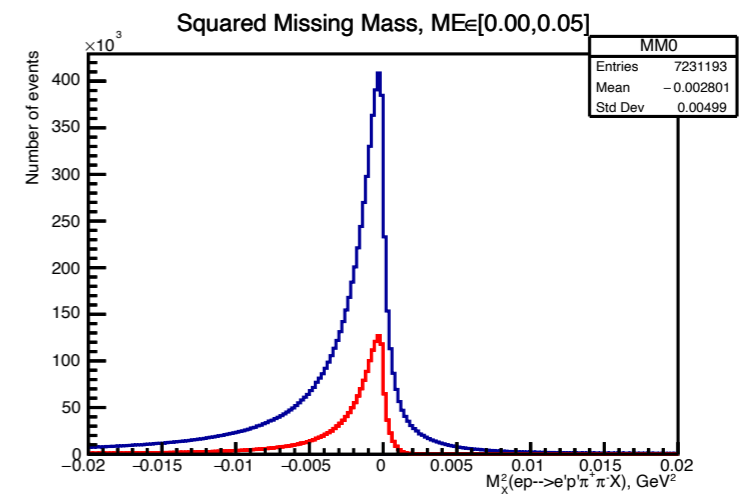
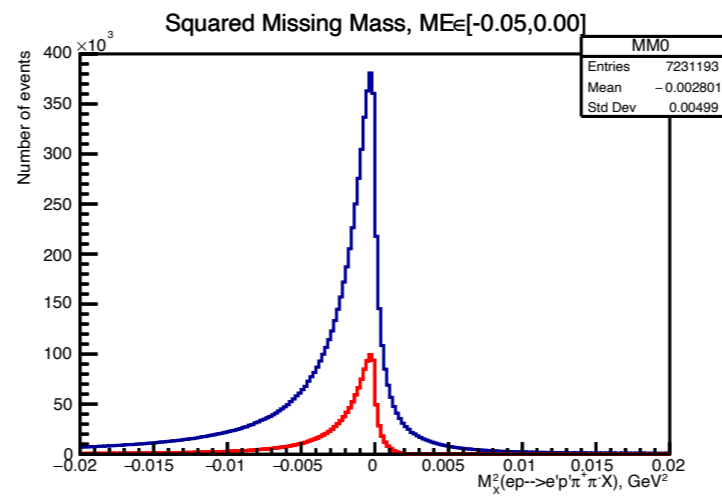
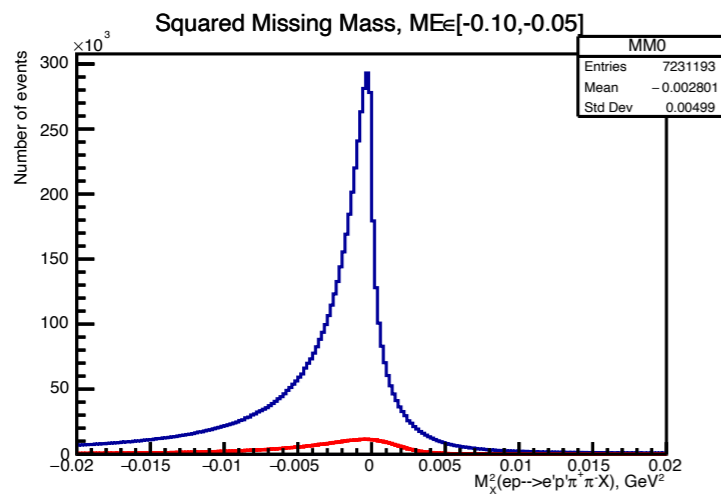
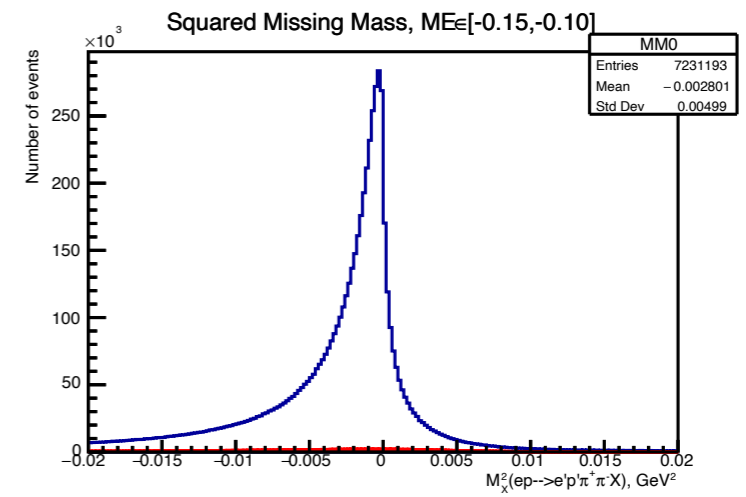
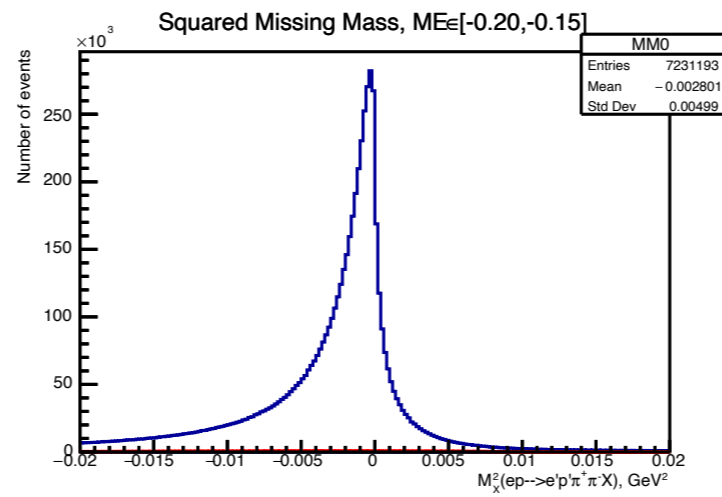
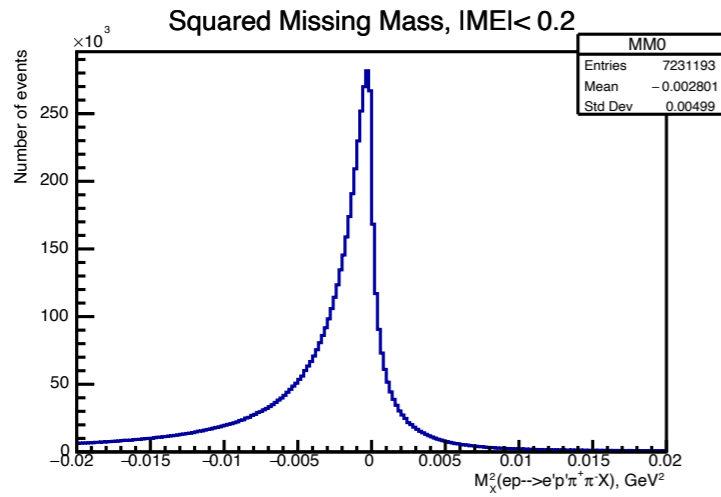


# Параметризация стандартного отбора по ( $E_{tot}$ ) в 3.5 сигма

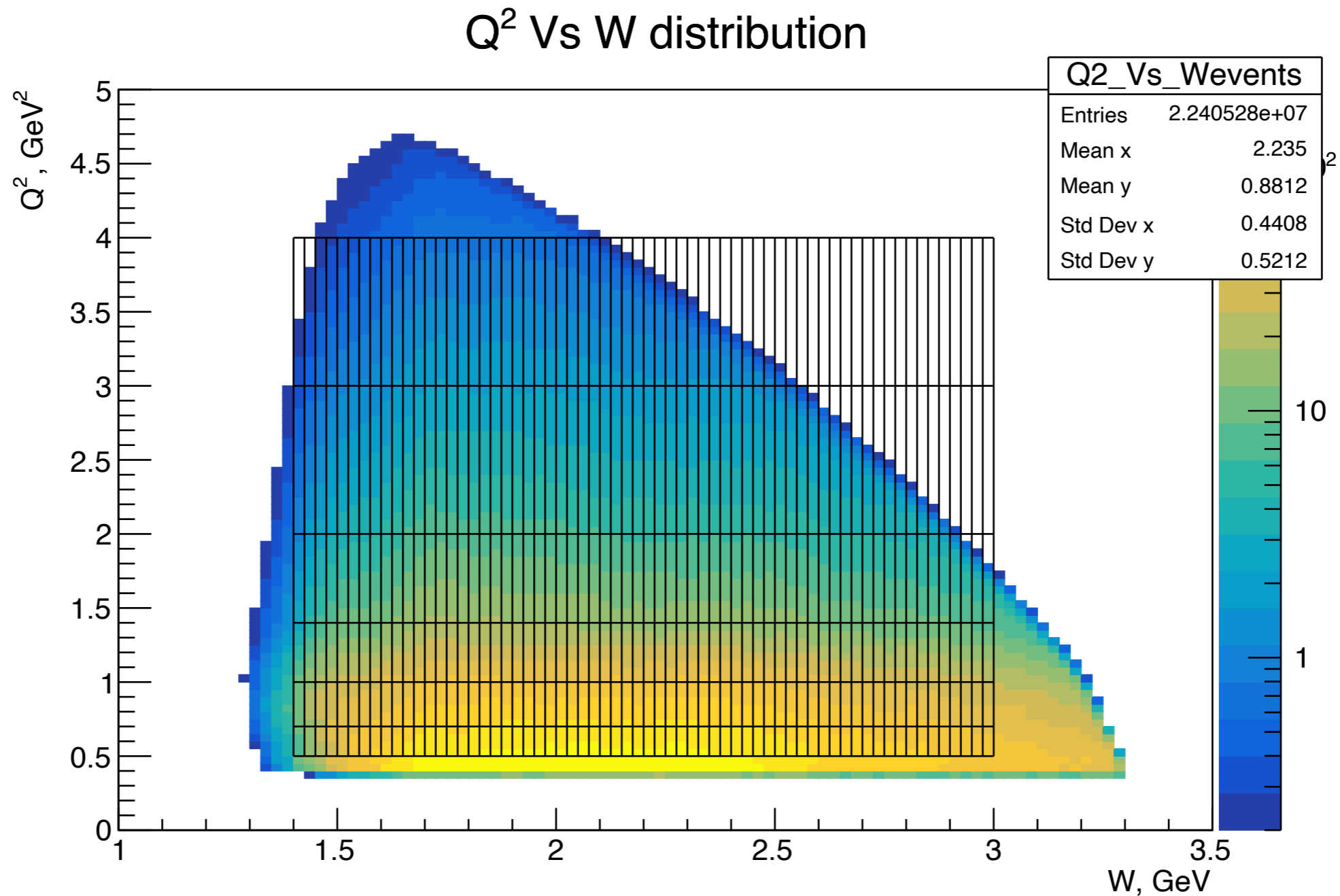
- $-3,5\sigma$ :  $p_0 + \frac{p_1 \cdot x}{1000} + \frac{p_2 \cdot x^2}{1000}$
- $+3,5\sigma$ :  $p'_0 + \frac{p'_1 \cdot x}{1000} + \frac{p'_2 \cdot x^2}{1000}$

параметры секторы	<b>p0</b>	<b>p1</b>	<b>p2</b>	<b>p0'</b>	<b>p1'</b>	<b>p2'</b>
<b>S1</b>	0,145	21,6	-1,81	0,321	-4,58	-0,086
<b>S2</b>	0,134	23,0	-1,07	0,300	4,18	-0,650
<b>S3</b>	0,145	21,1	-1,66	0,309	-0,712	-0,322
<b>S4</b>	0,152	16,1	-1,27	0,322	-8,78	0,434
<b>S5</b>	0,141	21,0	-1,74	0,308	-2,01	-0,211
<b>S6</b>	0,141	21,52	-1,70	0,306	-0,253	-0,328

# Отбор по недостающей энергии



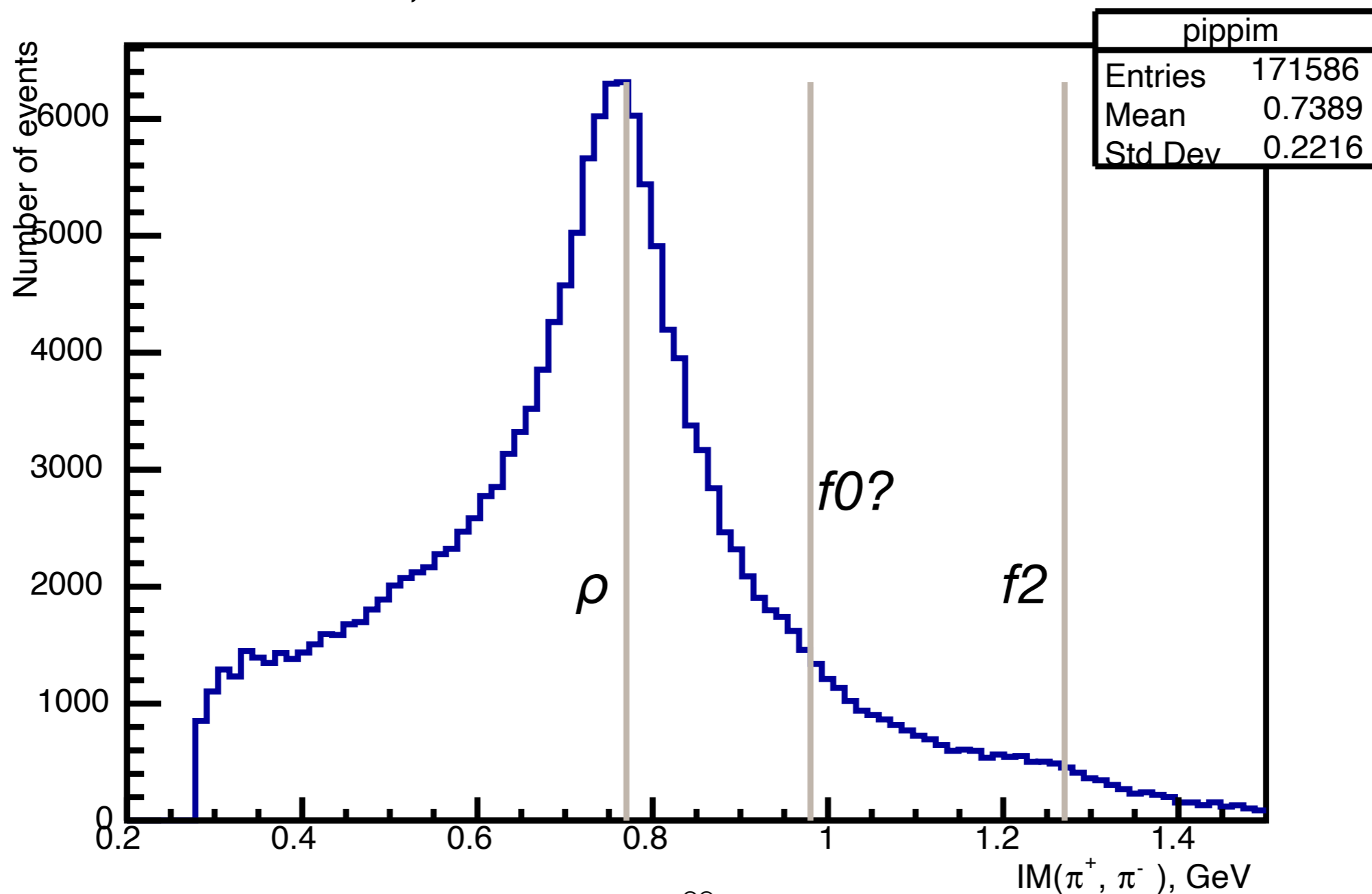
# Выделение событий реакции в срезах по $W$ и $Q^2$ (моделирование)





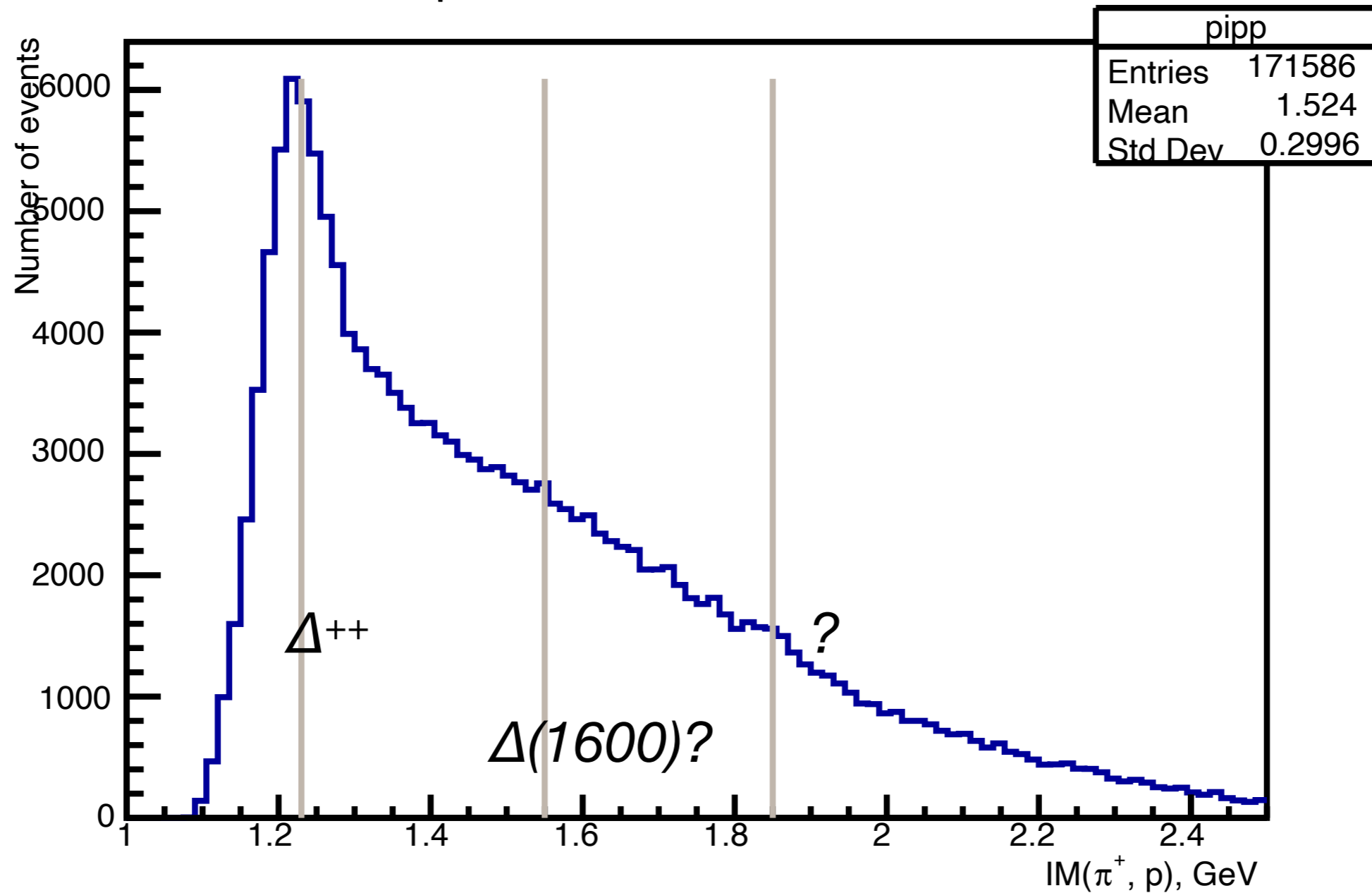
# Инвариантная масса пары пионов

$\pi^+, \pi^-$  invariant mass distribution



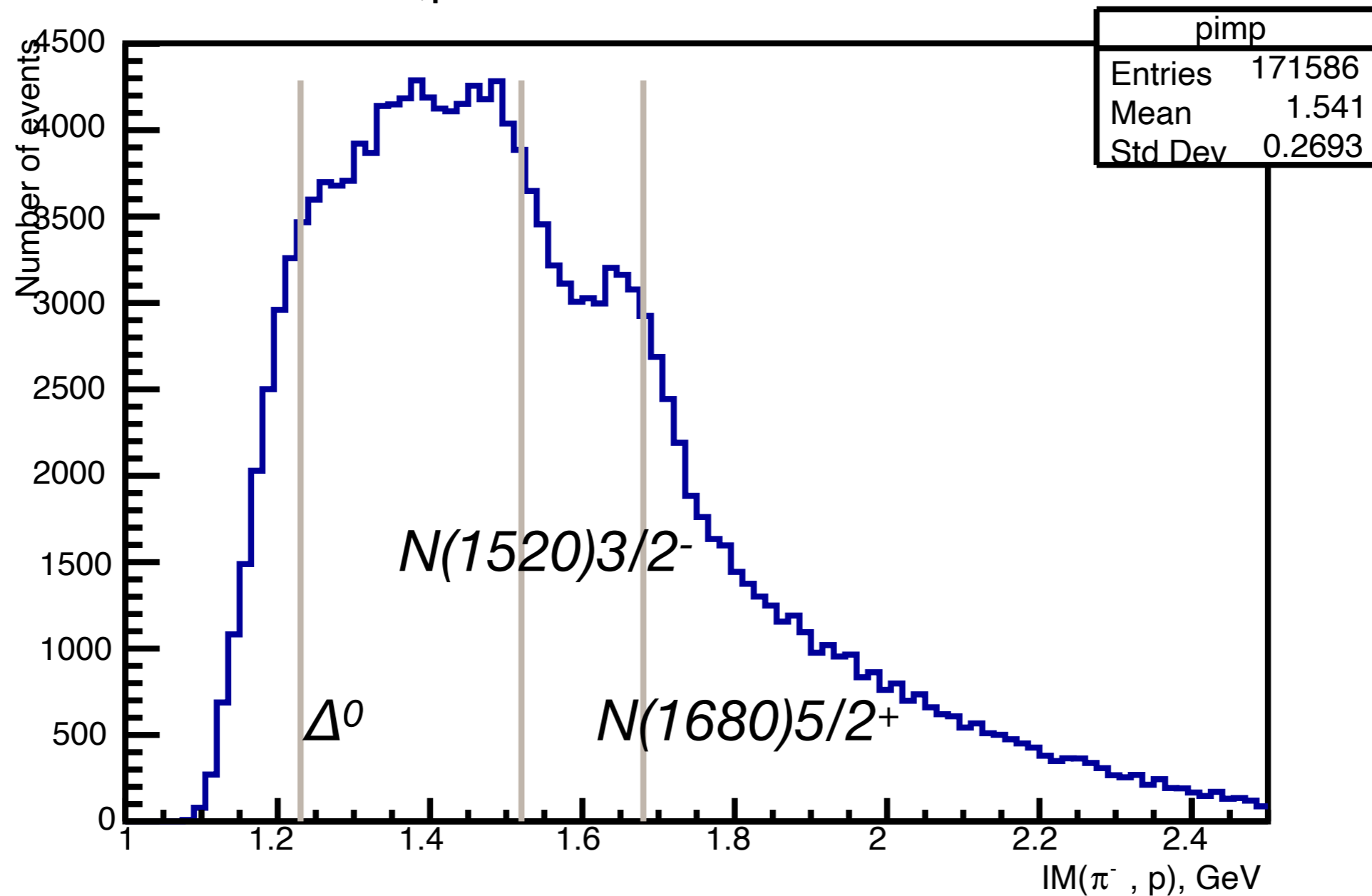
# Инвариантная масса $p\pi^+$

$\pi^+$ , p invariant mass distribution



# Инвариантная масса $p\pi^-$

$\pi^-$ , p invariant mass distribution



# Перспективы

- В целях получения сечения реакции в дальнейшем будут выделены события в ячейках по 5 кинематическим переменным, будут получены эффективности из данных моделирования.