

Институт ядерной физики и технологий  
Кафедра №40 «Физика элементарных частиц»

Выпускная квалификационная работа студента на тему:

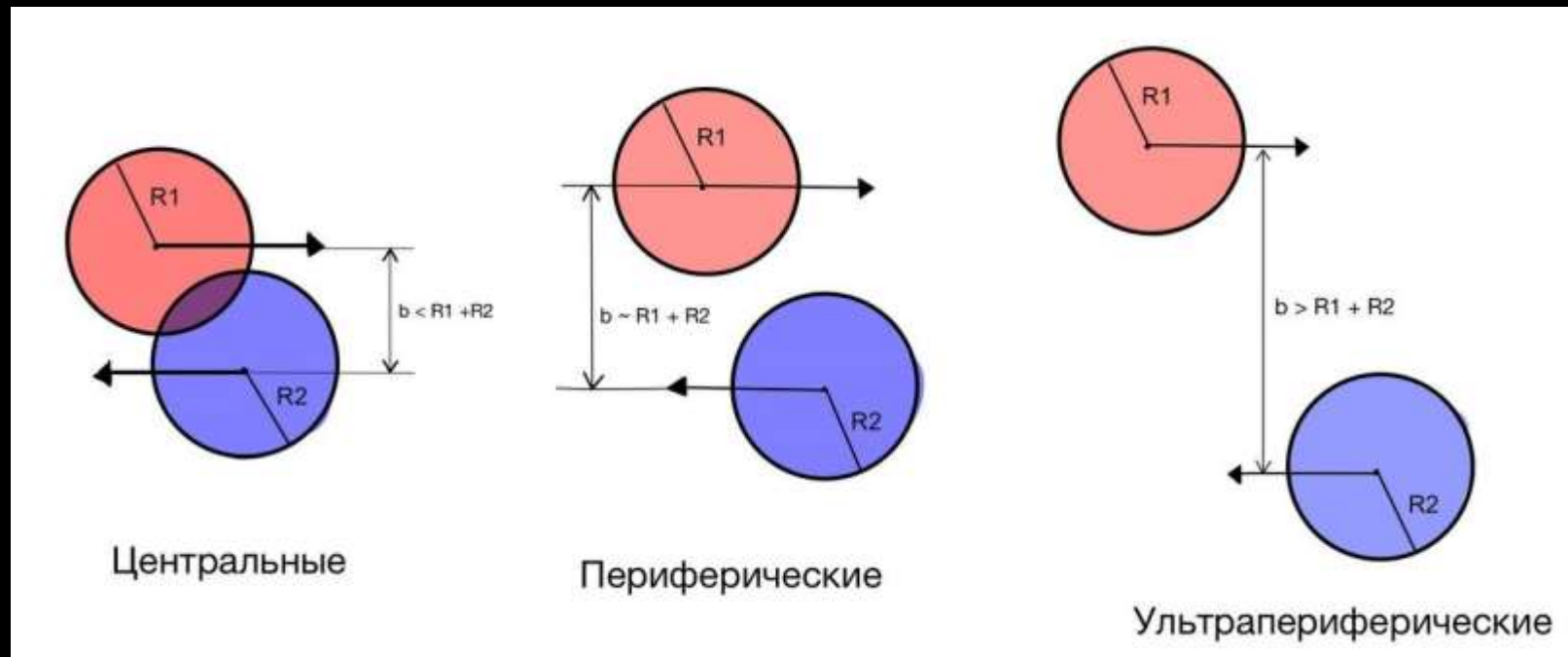
Четырехчастичные события в  
ультрапериферических столкновениях  
релятивистских ядер свинца при энергии 5,02  
ТэВ/нуклон в эксперименте ATLAS на БАК

Научный руководитель:  
Тимошенко С.Л.  
Студент:  
Дадашова А.Э.

Москва 2024

Цель работы: полное моделирование фотон-фотонного образования пары  $\rho^0$  мезонов и поиск соответствующего сигнала в данных 2023 года в ультрапериферических столкновениях релятивистских ионов свинца на БАК в эксперименте ATLAS.

Мотивация: одиночное образование  $\rho^0$  мезона хорошо изучено коллаборациями STAR и ALICE, однако образование пары  $\rho^0$  мезонов в двухфотонном взаимодействии исследовались только на  $e^+e^-$  коллайдерах. Текущие возможности БАК позволяют выделить и рассмотреть изучаемый процесс в большем диапазоне энергий и с большей статистикой, что в дальнейшем предоставит возможность для исследования интерференционных эффектов в образовании  $\rho^0$  мезона и оценить вклад в фон для реакции образования возбужденного состояния  $\rho^0$  мезона с последующим его распадом на четыре заряженных пиона.



Классификация столкновений тяжелых ионов по прицельному параметру  $b$

Ультрапериферические столкновения (УПС) – столкновения с прицельным параметром налетающих ядер большим, чем сумма их радиусов ( $b > 2R$ ). В виду малой плотности ядерной материи в области взаимодействия в таком типе столкновений сильное взаимодействие выражено в меньшей степени, чем преобладающие когерентное фотон-фотонное ( $\gamma\gamma$ ), фотон-померонное ( $\gamma P$ ) и померон-померонное ( $PP$ ) взаимодействия.

Реакции при ультрапериферических столкновениях характеризуются малой множественностью и малыми значениями поперечных импульсов рождаемых систем, что является одним из критериев отбора данного вида событий.

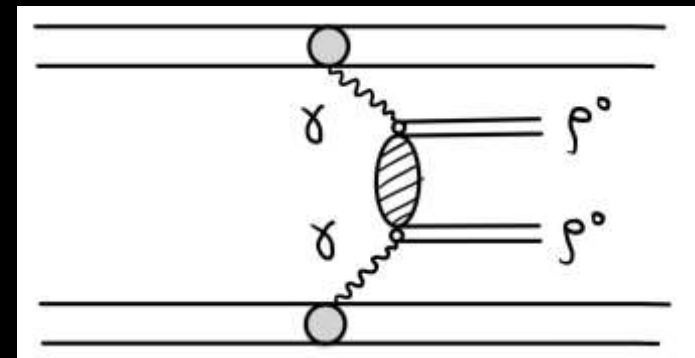


Диаграмма образования пары  $\rho^0$  мезонов в двухфотонном взаимодействии

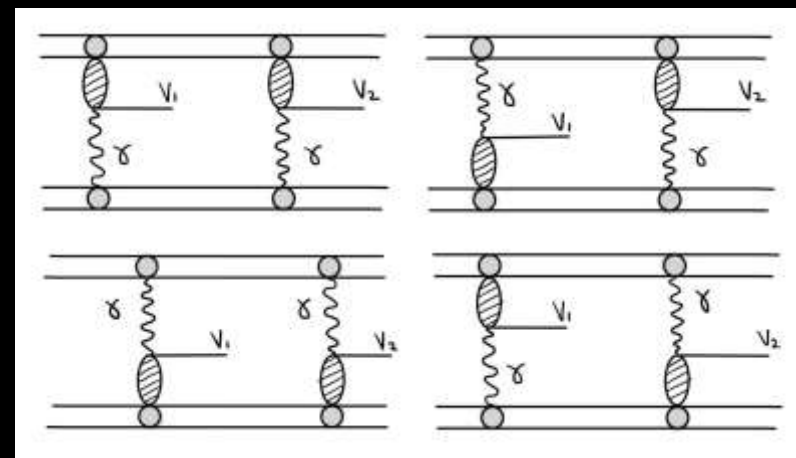


Диаграмма образования пары  $\rho^0$  мезонов в механизме двойного рассеяния

Meson	Au+Au, RHIC $\sigma(\text{mb})$	Pb+Pb, LHC $\sigma(\text{mb})$	Meson	Pb+Pb, LHC $\sigma(\text{mb})$
			$\rho^0\rho^0$	8,8
$\rho^0$	590	5200	$\omega\omega$	0,073
$\omega$	59	490	$\phi\phi$	0,076
$\phi$	39	460	$\rho^0\omega$	1,6
$J/\psi$	0.29	32	$\rho^0\phi$	1,6
$\Upsilon$		150 $\mu\text{b}$	$\rho^0 J/\psi$	0,2

Сечения образования векторных мезонов в ультрапериферических столкновениях

Одним из экспериментов, изучающих столкновения тяжелых ионов, является эксперимент ATLAS

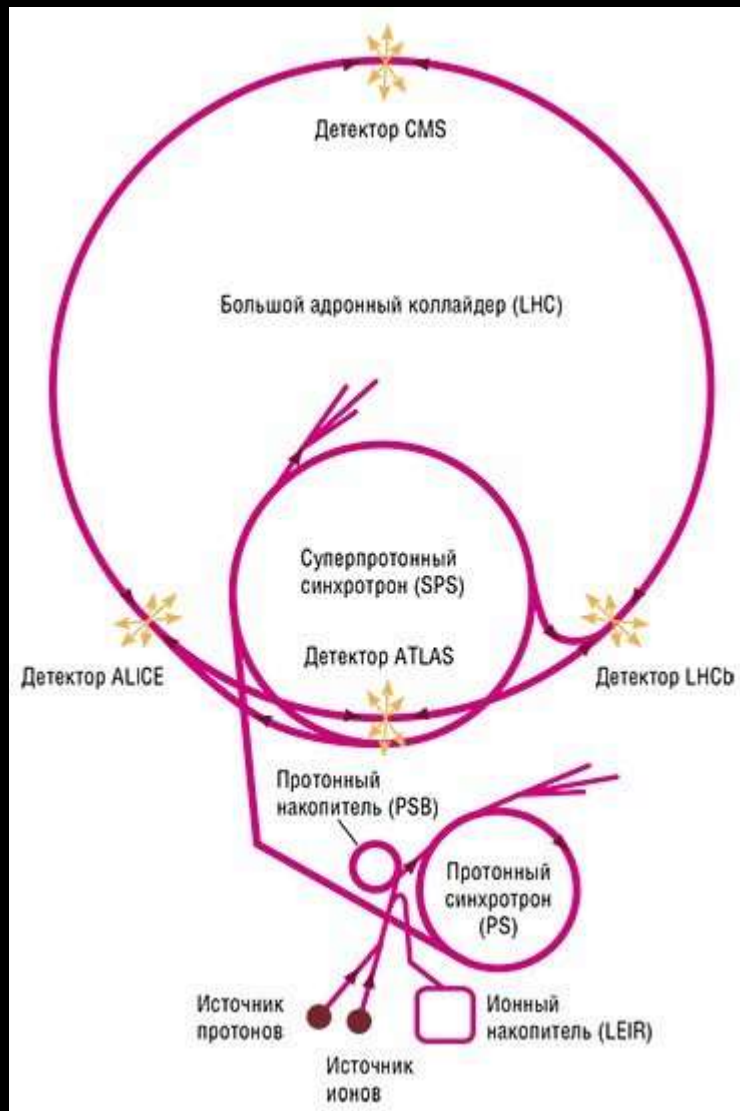
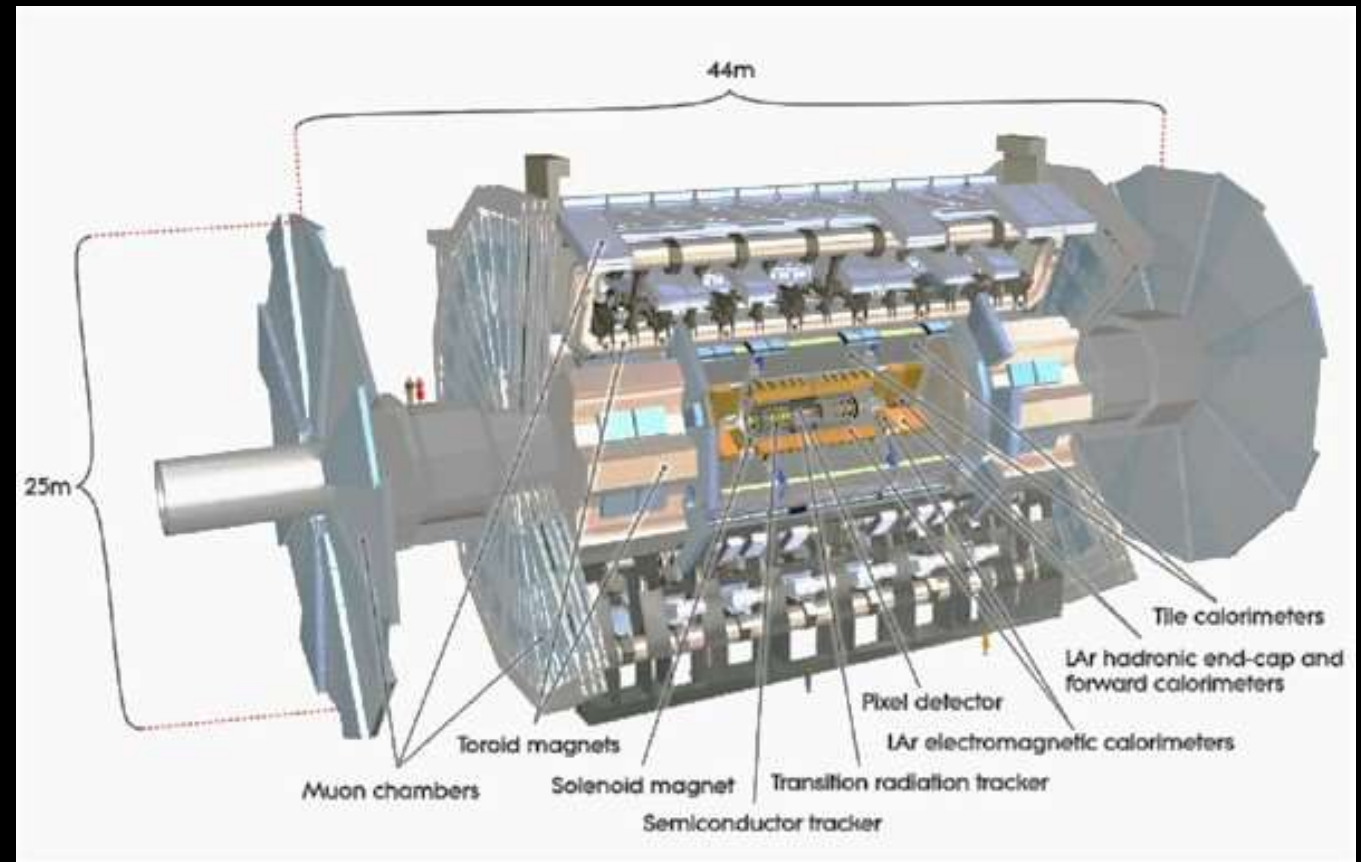


Схема ускорительного комплекса CERN



Общий вид детектора ATLAS

# Полное моделирование

Процесс полного моделирования можно условно разделить на три этапа:

1) Генерация событий.

В данной работе для моделирования исследуемого процесса был использован MC генератор STARLIGHT, встроенный в Athena.

2) Симуляция.

На данном этапе происходит моделирование взаимодействий сгенерированных частиц со средой детектора ATLAS и последующая имитация их регистрации.

3) Реконструкция.

На этапе реконструкции набор данных проходит те же алгоритмы, что используются для реконструкции экспериментальных данных с детектора ATLAS.

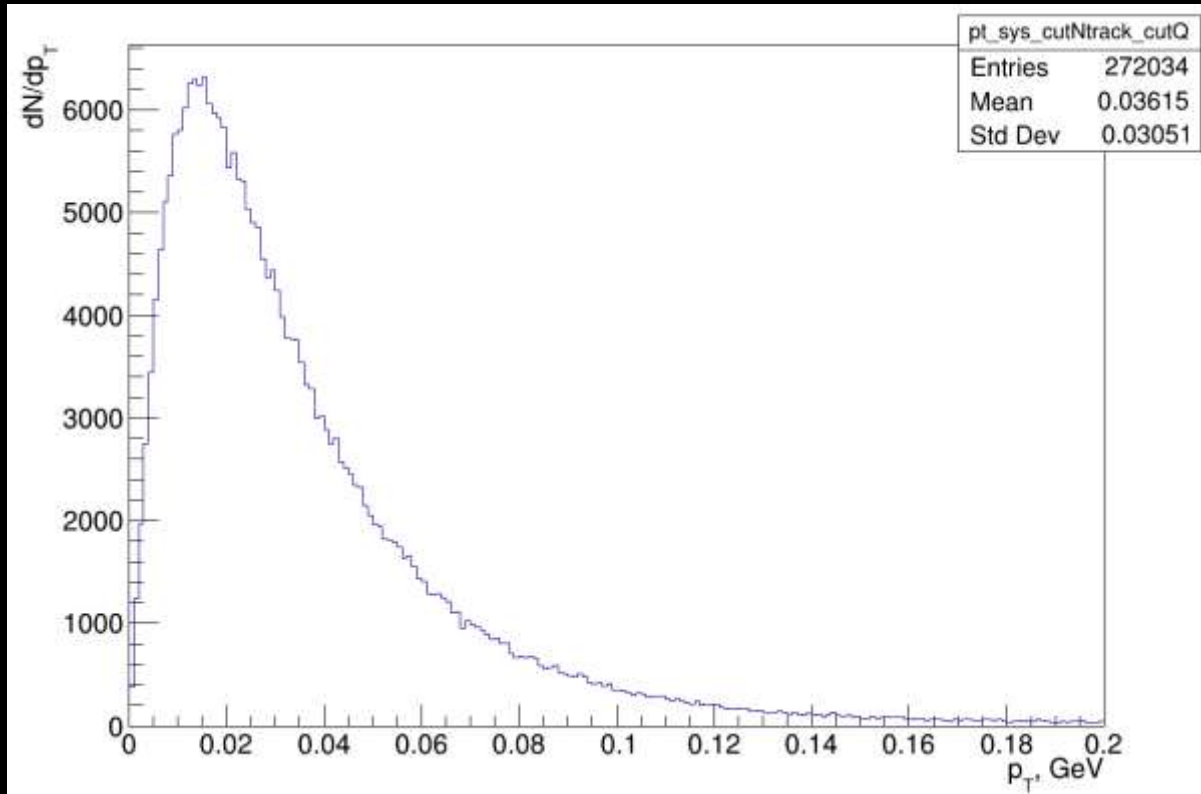
Критерии отбора событий:

- $\sum Q = 0,$
- $N^{track} = 4,$
- $|\eta^{track}| < 2.4,$
- $|d_0^{track}| < 1.5 \text{ мм}$

Two-Photon Channels	
Particle	Jetset ID
$e^+e^-$ pair	<b>11</b>
$\mu^+\mu^-$ pair	<b>13</b>
$\tau^+\tau^-$ pair	<b>15</b>
$\tau^+\tau^-$ pair, polarized decay	<b>10015*</b>
$\rho^0$ pair	<b>33</b>
$a_2(1320)$ decayed by PYTHIA	<b>115</b>
$\eta$ decayed by PYTHIA	<b>221</b>
$f_2(1270)$ decayed by PYTHIA	<b>225</b>
$\eta'$ decayed by PYTHIA	<b>331</b>
$f_2(1525) \rightarrow K^+K^-(50\%), K^0\bar{K}^0(50\%)$	<b>335</b>
$\eta_c$ decayed by PYTHIA	<b>441</b>
$f_0(980)$ decayed by PYTHIA	<b>9010221</b>

Реализуемые на STARLIGHT каналы двухфотонных взаимодействий

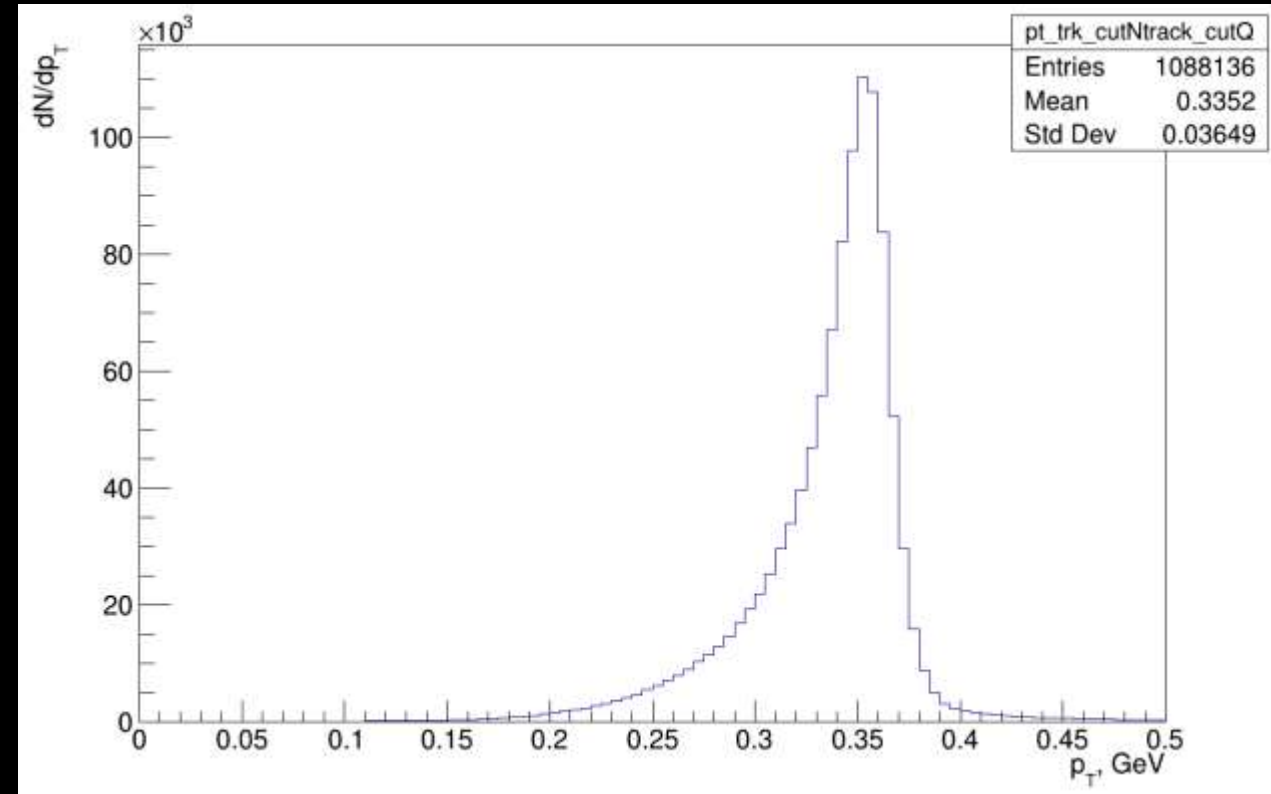
Распределение по поперечному импульсу системы четырех  
заряженных пионов



Ограничения:  $\sum Q = 0$ ,  $N^{track} = 4$ .

$p_T^{4trk} < 0.12$  ГэВ

Распределение по поперечному импульсу заряженного пиона

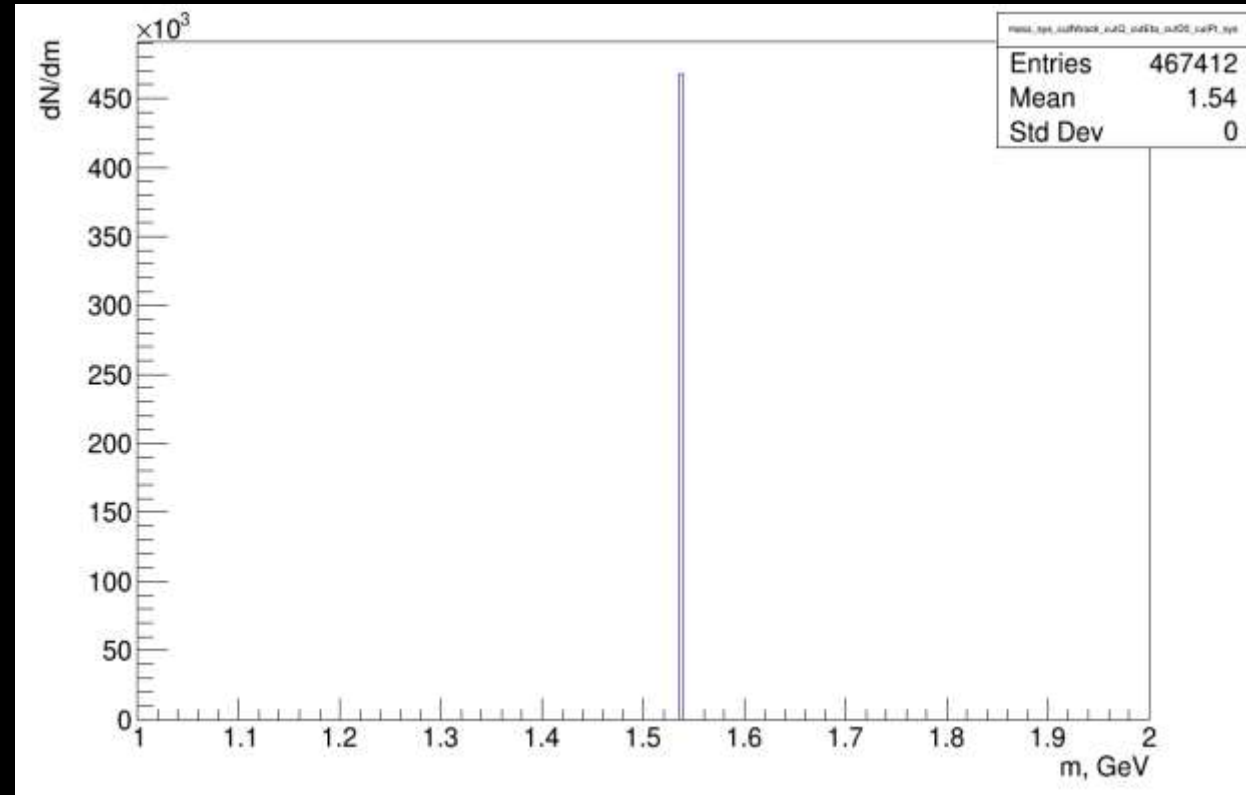
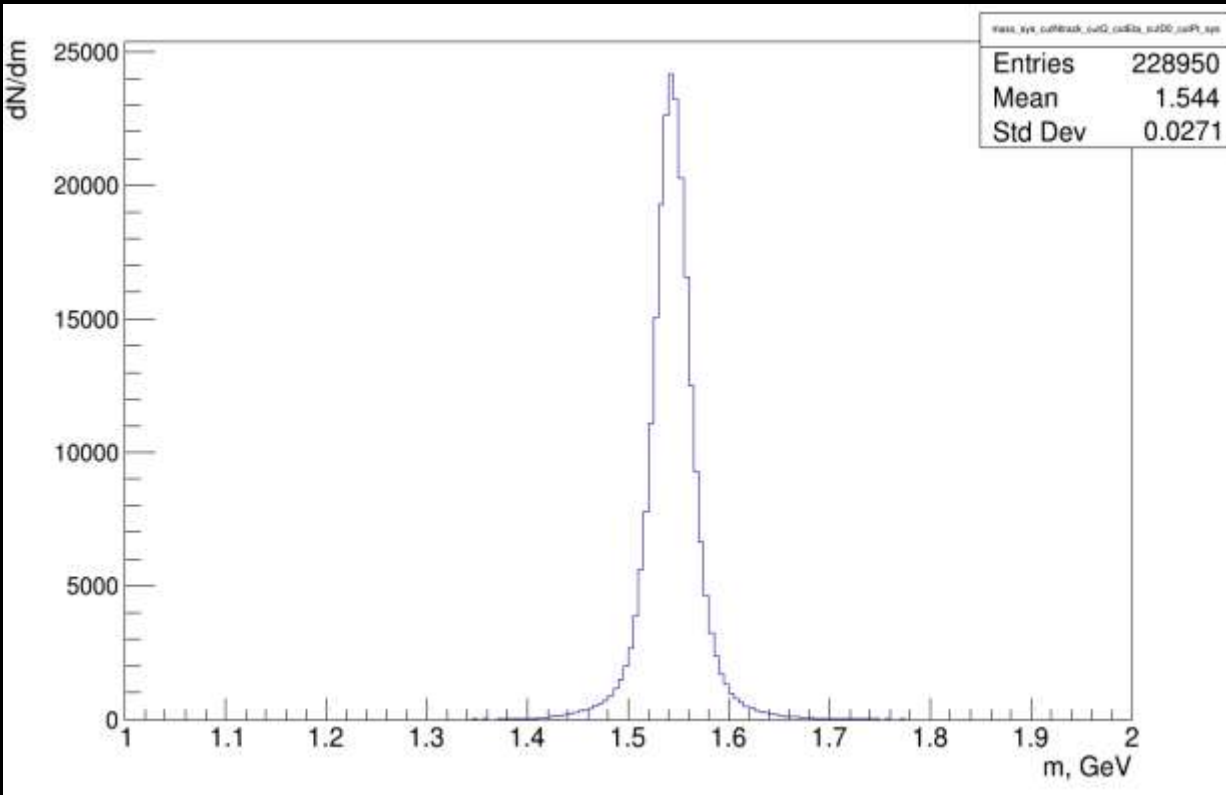


$p_T^{trk} > 0.2, 0.225, 0.25, 0.3$  ГэВ

# Распределения по инвариантной массе системы четырех заряженных пионов

Реконструкция

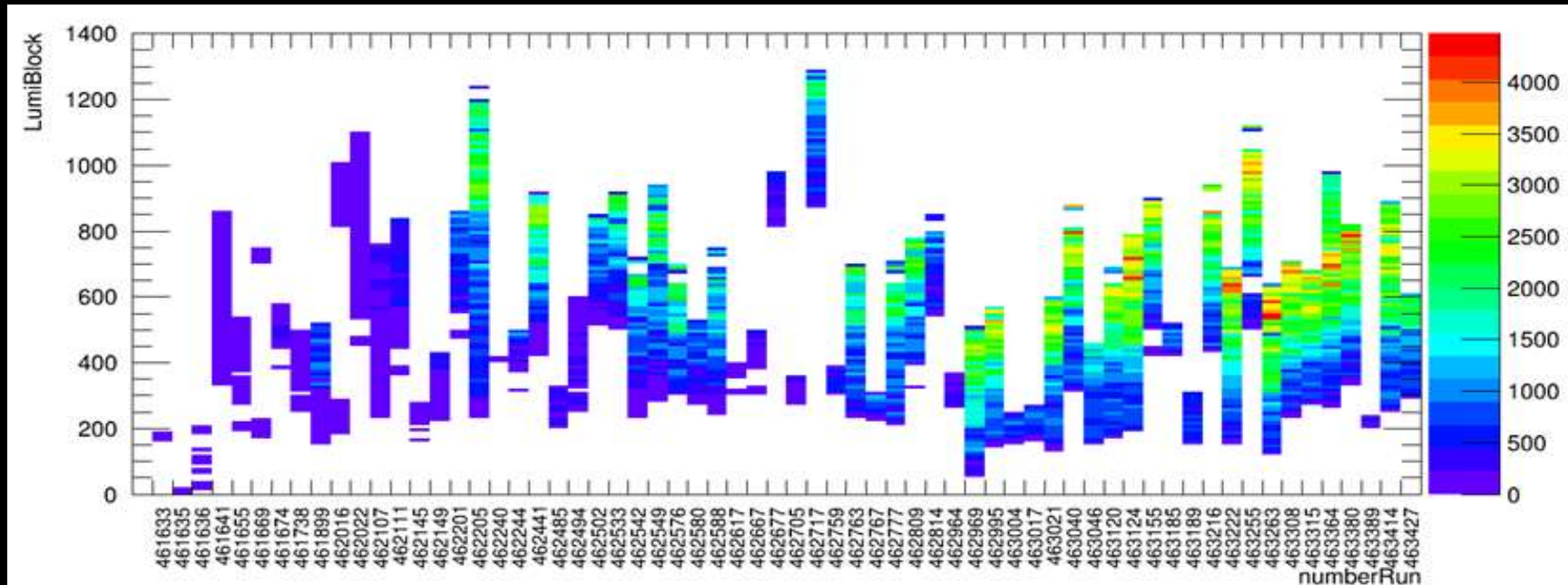
STARLIGHT



Ограничения:  $\sum Q = 0$ ,  $N^{track} = 4$ ,  $|\eta^{track}| < 2.4$ ,  $p_T^{4trk} < 0.12$  ГэВ

# Анализ данных

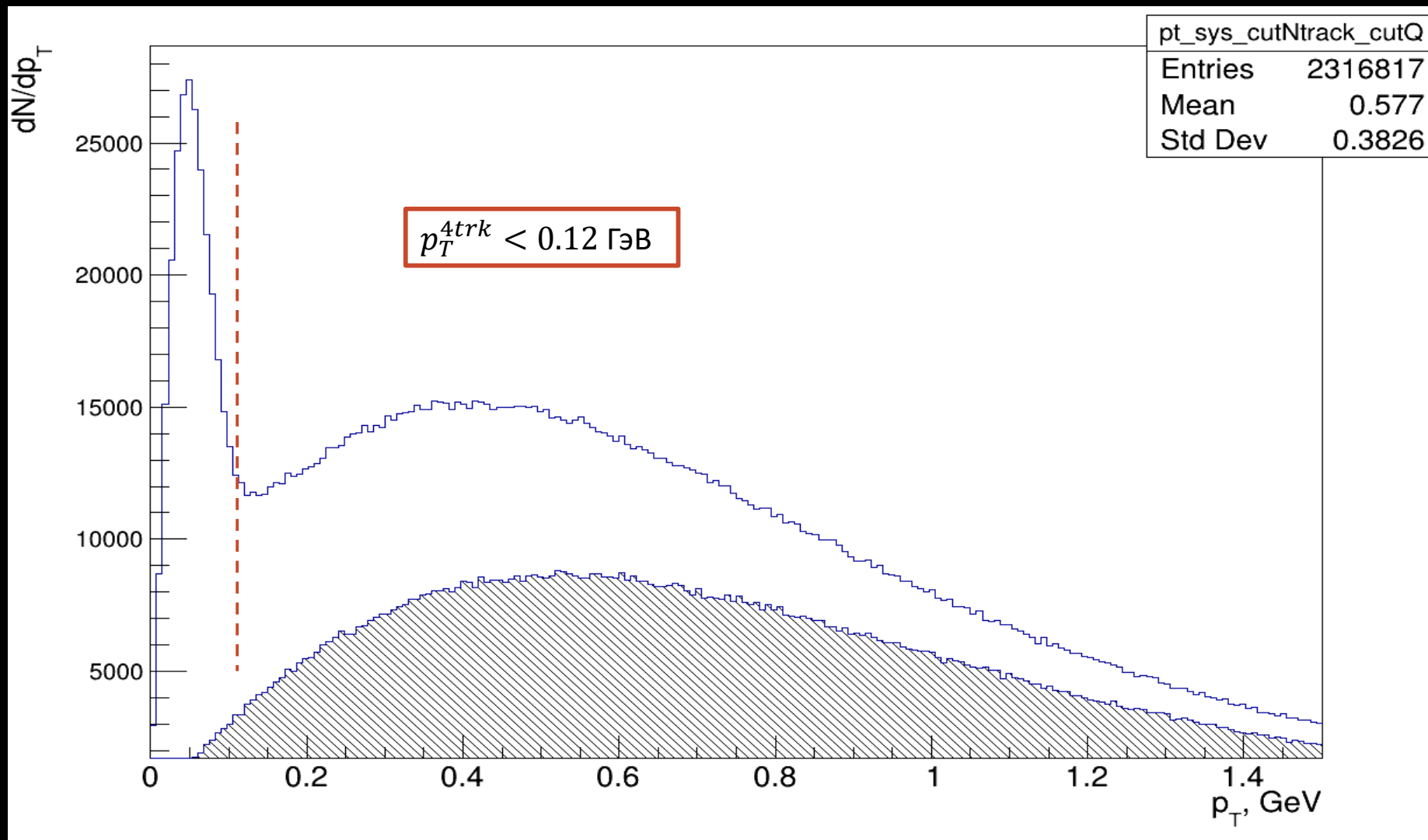
- 2023 ( $Pb + Pb$ ) – 64 датасета –  $2.6 \cdot 10^9$  событий
- Триггер: HLT\_mb\_sptrk\_L11ZDC\_A\_1ZDC\_C\_VTE200 –  $4.04 \cdot 10^6$  событий
- $(N^{track} = 4) + (\sum Q = 0) + (n^{pixel} \geq 1, n^{SCT} \geq 2)$  –  $2.3 \cdot 10^6$  событий



Распределение по блокам светимости в зависимости от номера датасета для четырехтрековых событий, прошедших отбор по триггеру

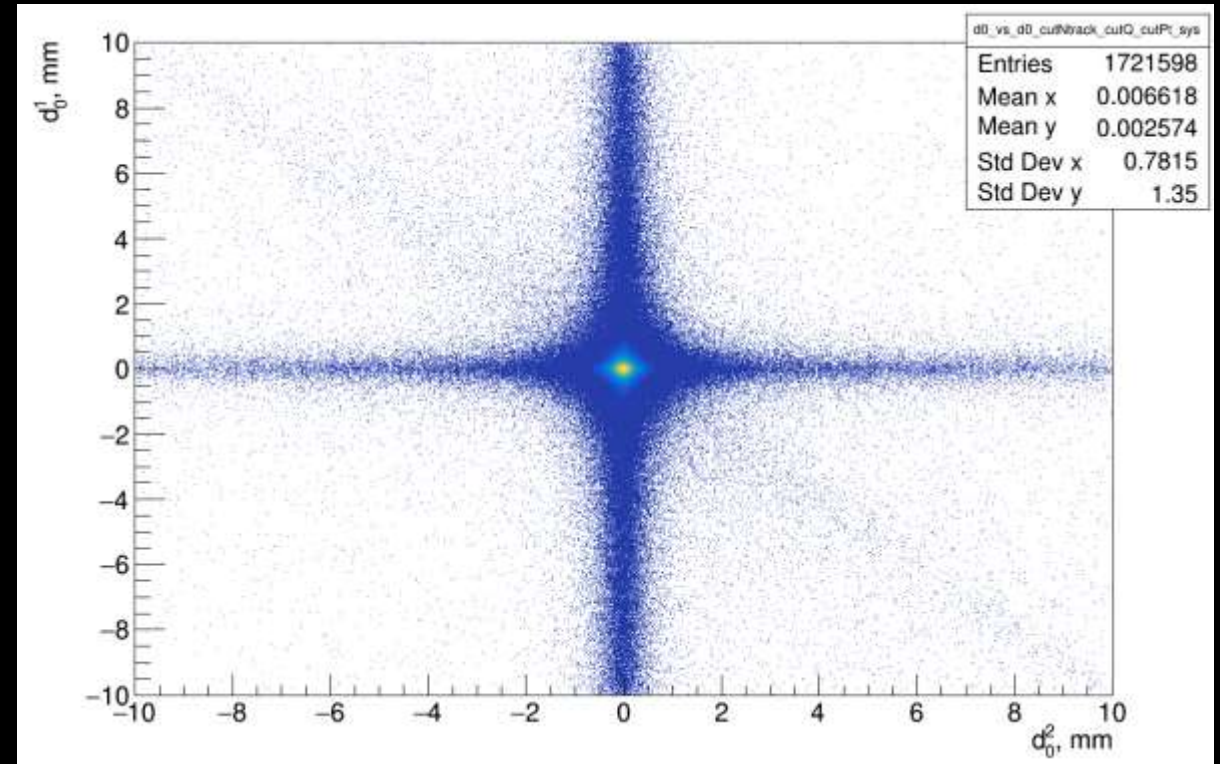
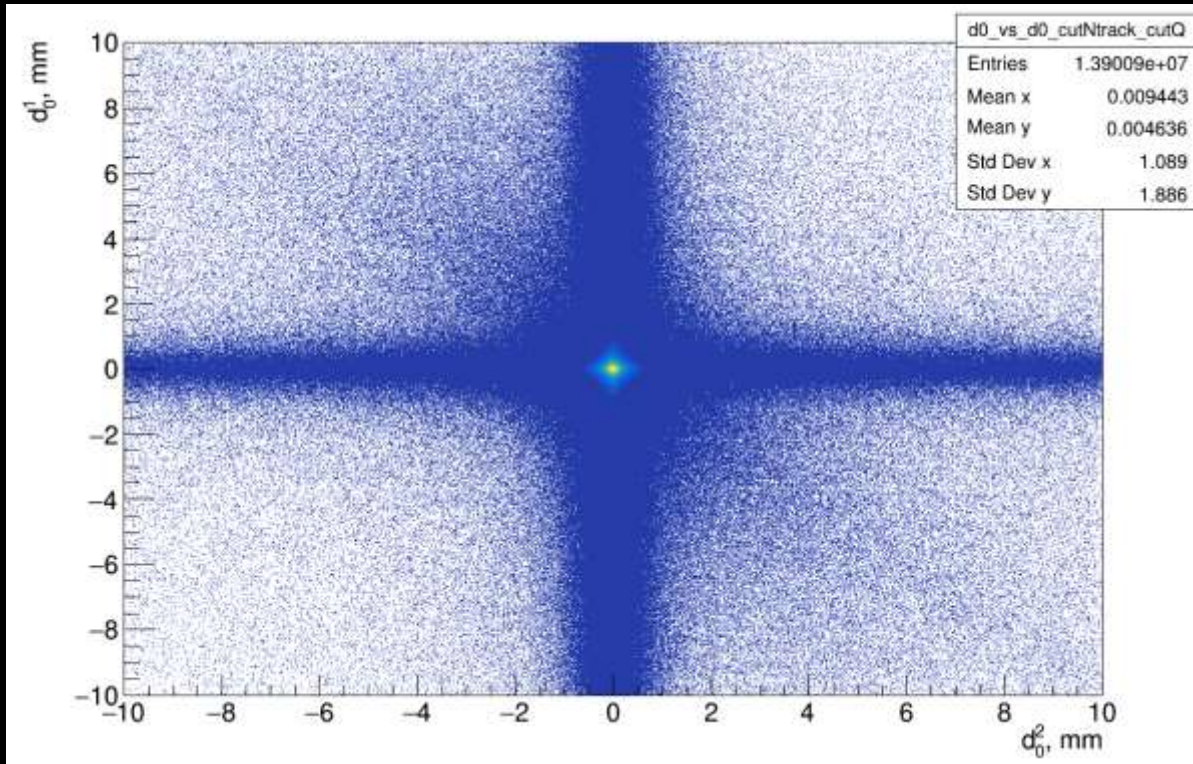


# Распределение по поперечному импульсу системы четырех заряженных пионов



Ограничения:  $\sum Q = 0$ ,  $N^{track} = 4$ ,  $n^{pixel} \geq 1$ ,  $n^{SCT} \geq 2$

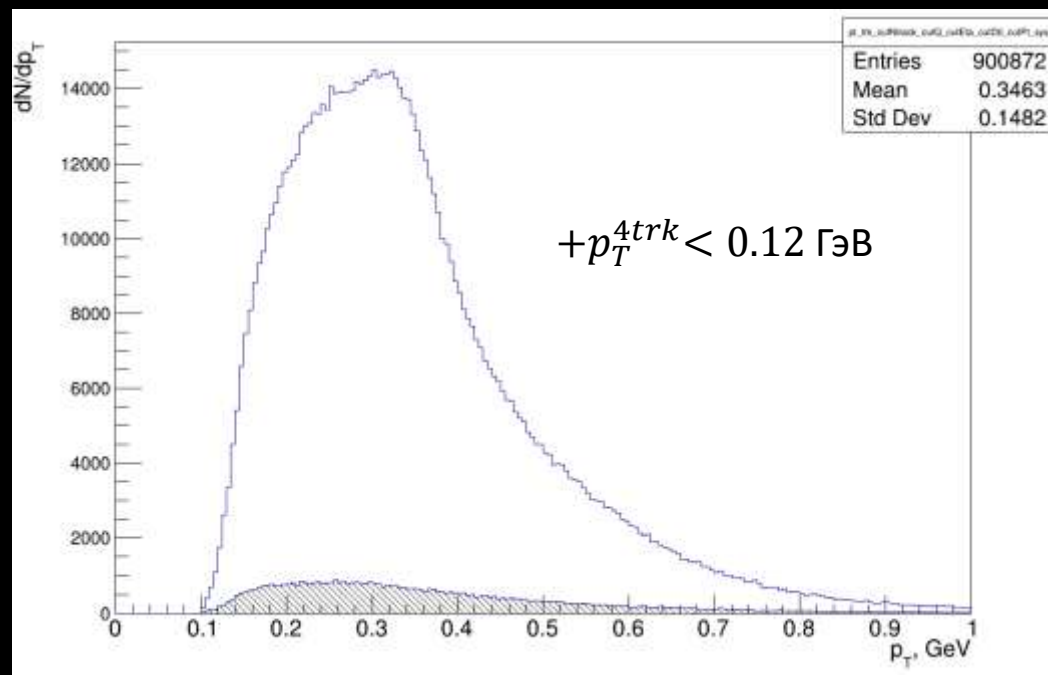
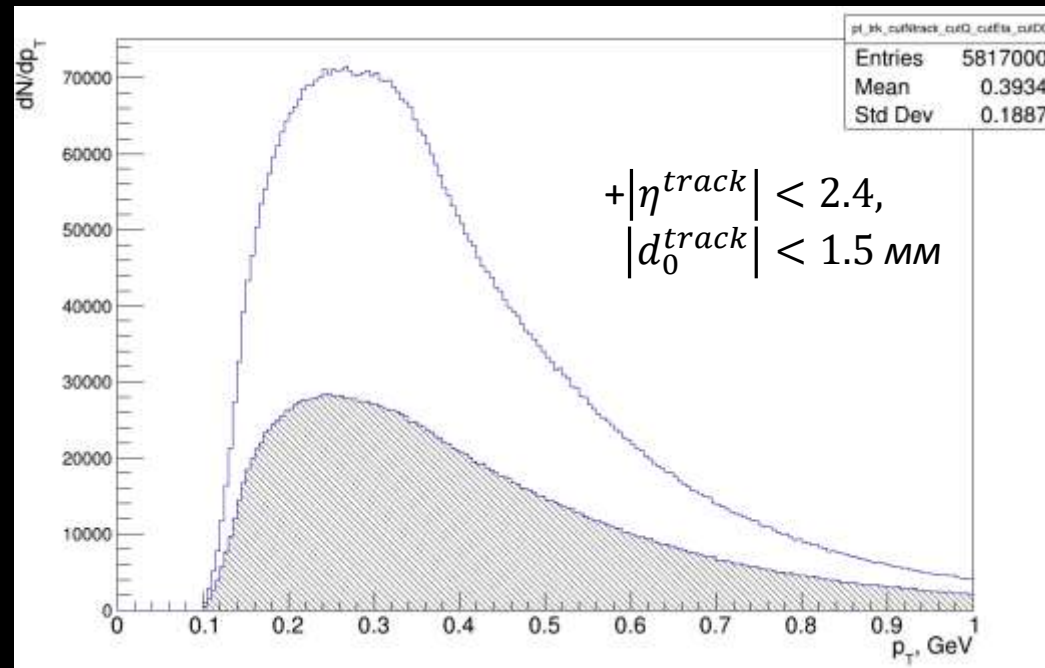
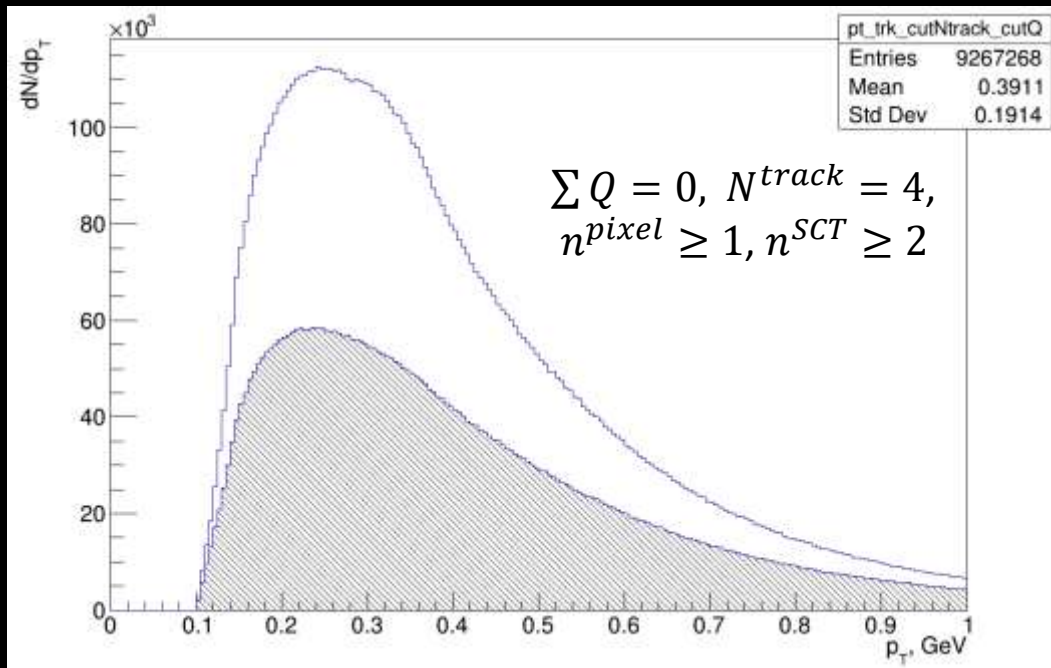
## Двумерные распределения по $d_0$ для треков



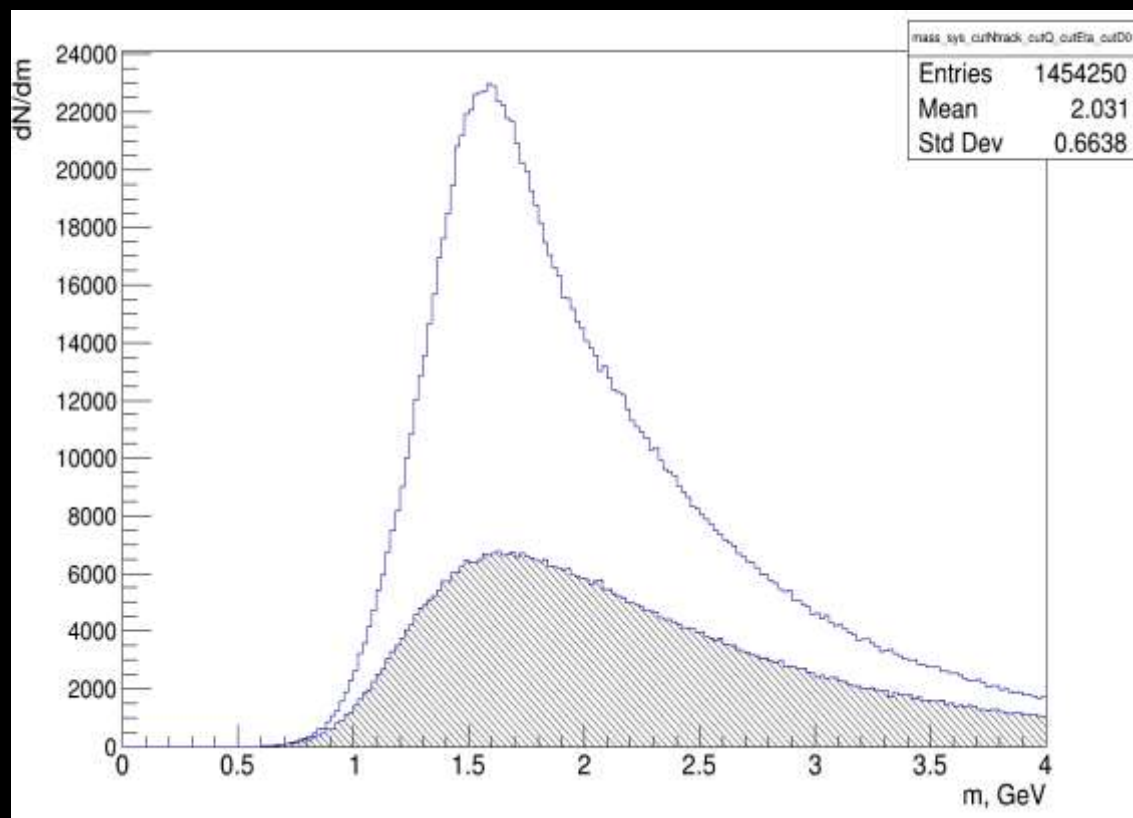
Ограничения:  $\sum Q = 0$ ,  $N^{track} = 4$ ,  $n^{pixel} \geq 1$ ,  $n^{SCT} \geq 2$

$+p_T^{4trk} < 0.12$  ГэВ

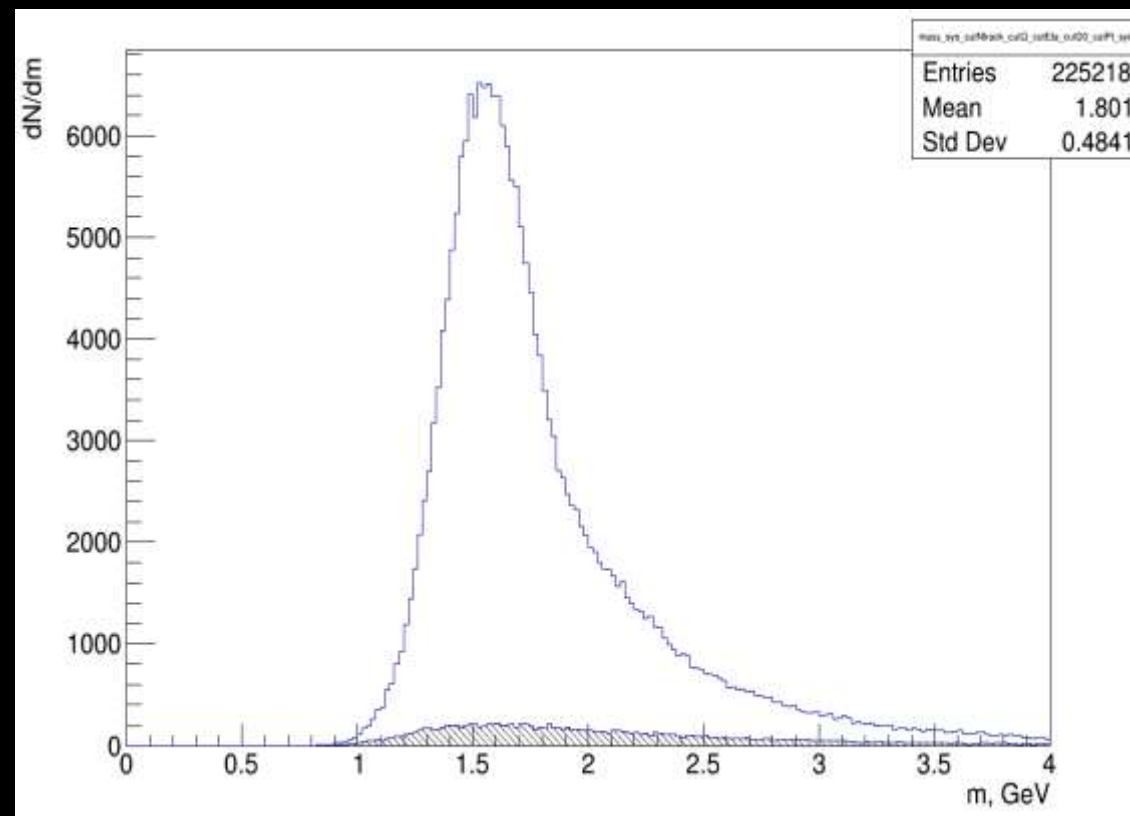
# Распределения по поперечному импульсу трека



## Распределения по инвариантной массе системы четырех заряженных пионов

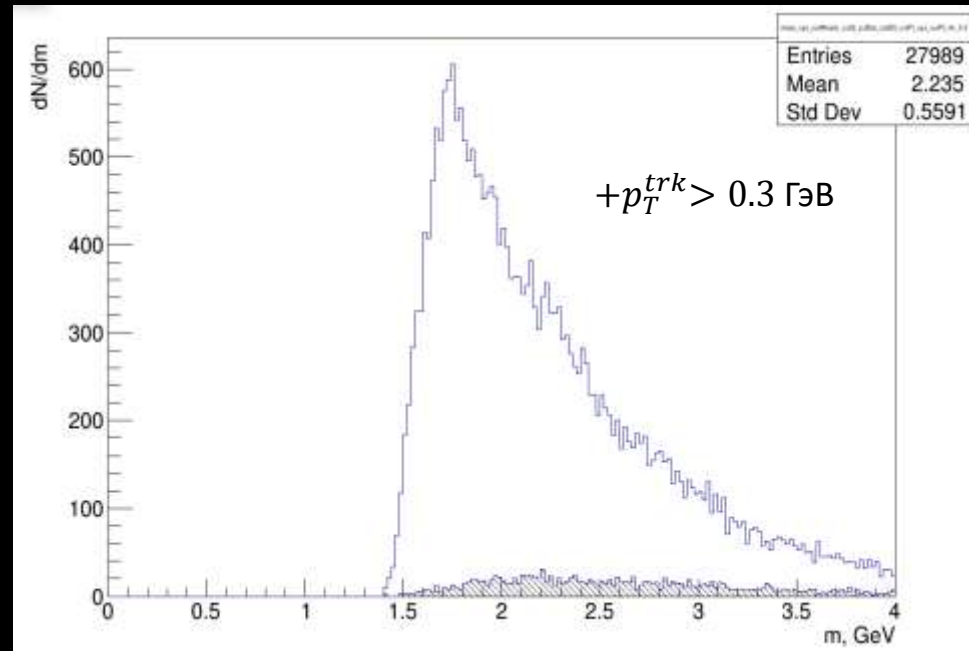
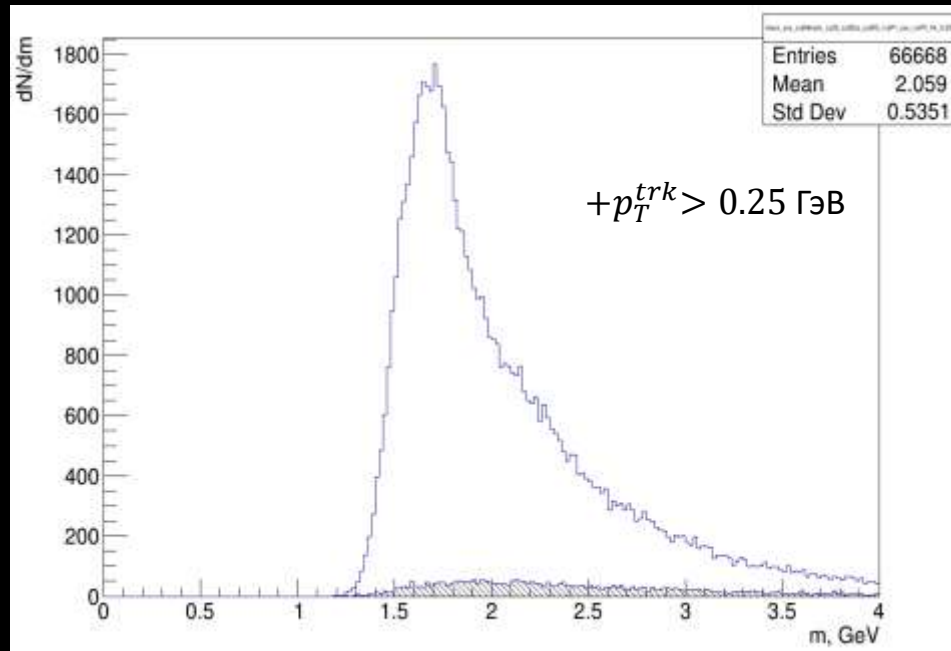
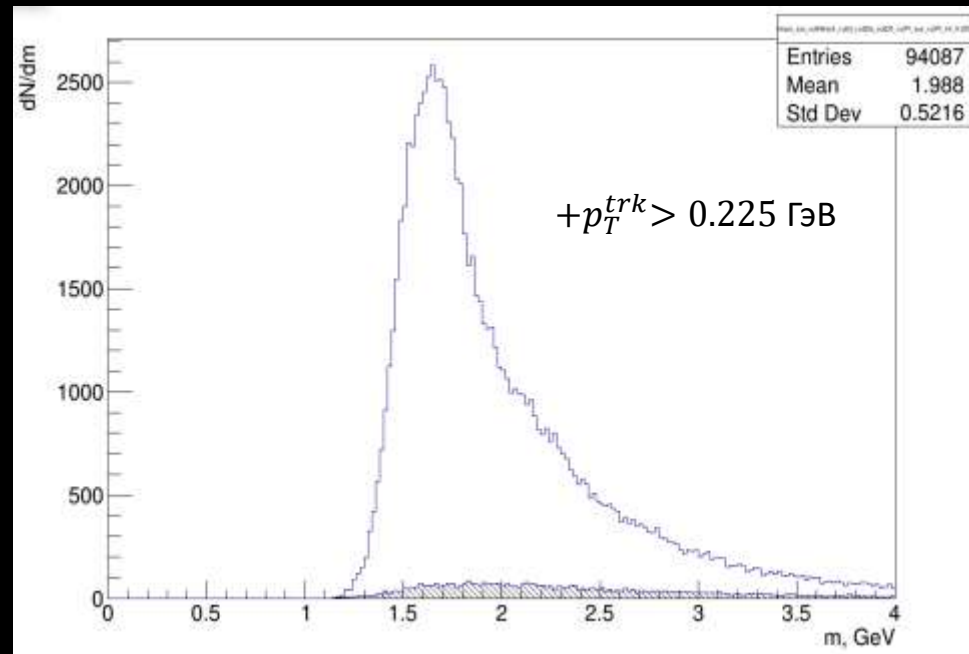
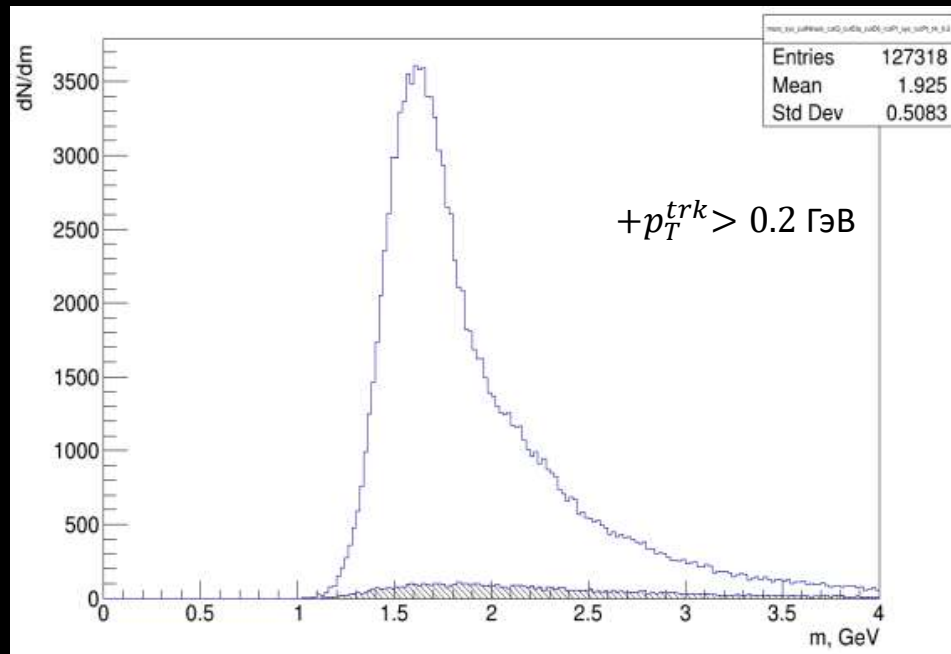


Ограничения:  $\sum Q = 0$ ,  $N^{track} = 4$ ,  $n^{pixel} \geq 1$ ,  $n^{SCT} \geq 2$ ,  
 $|\eta^{track}| < 2.4$ ,  $|d_0^{track}| < 1.5$  мм

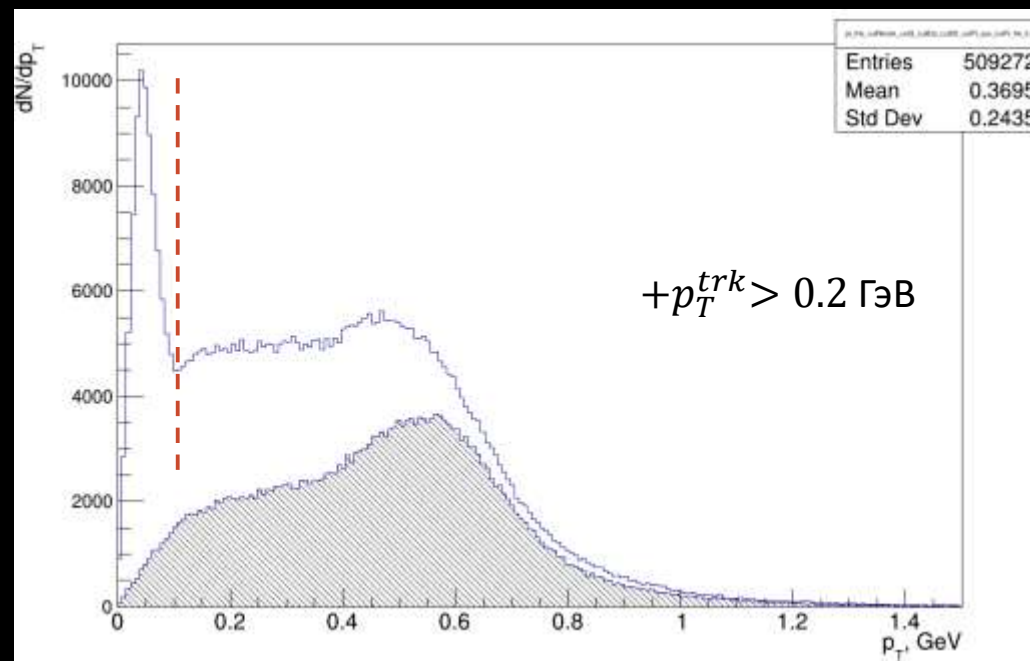
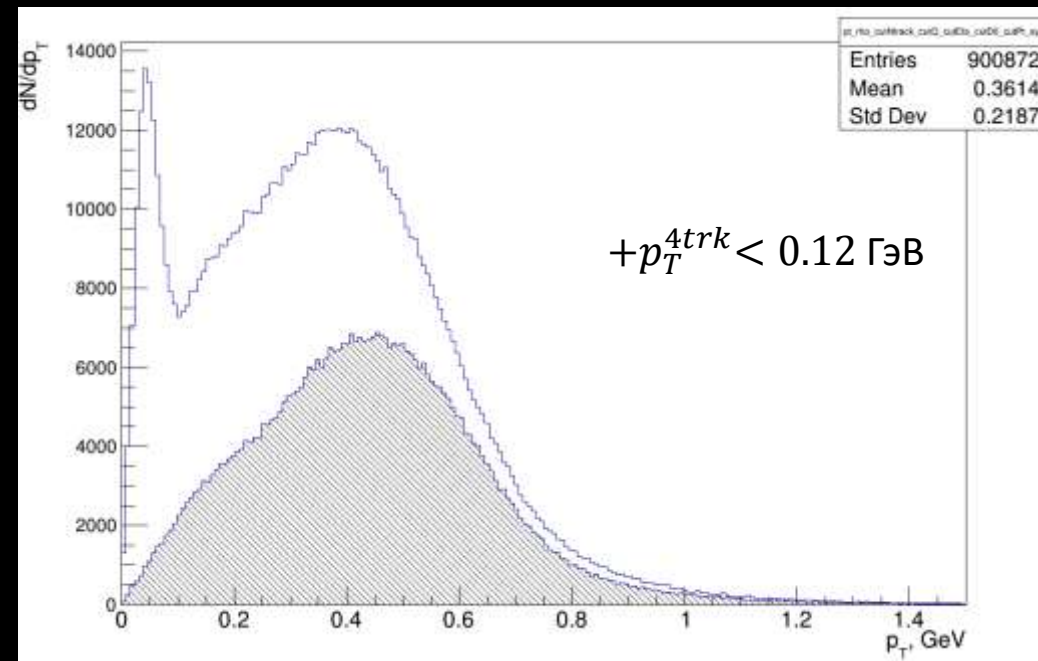
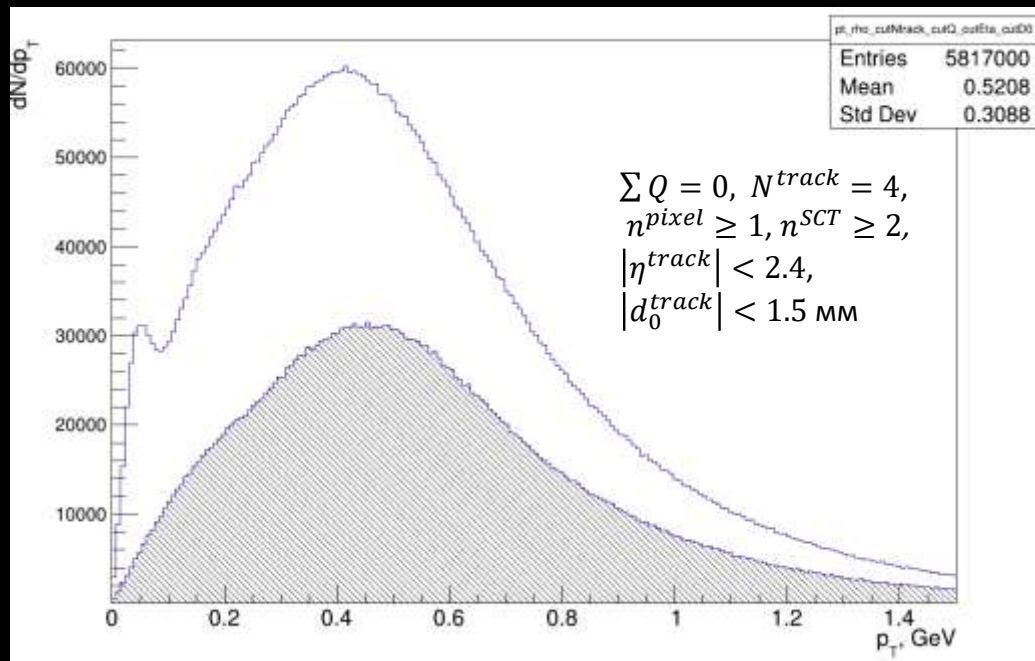


$+p_T^{4trk} < 0.12$  ГэВ

# Распределения по инвариантной массе системы четырех заряженных пионов

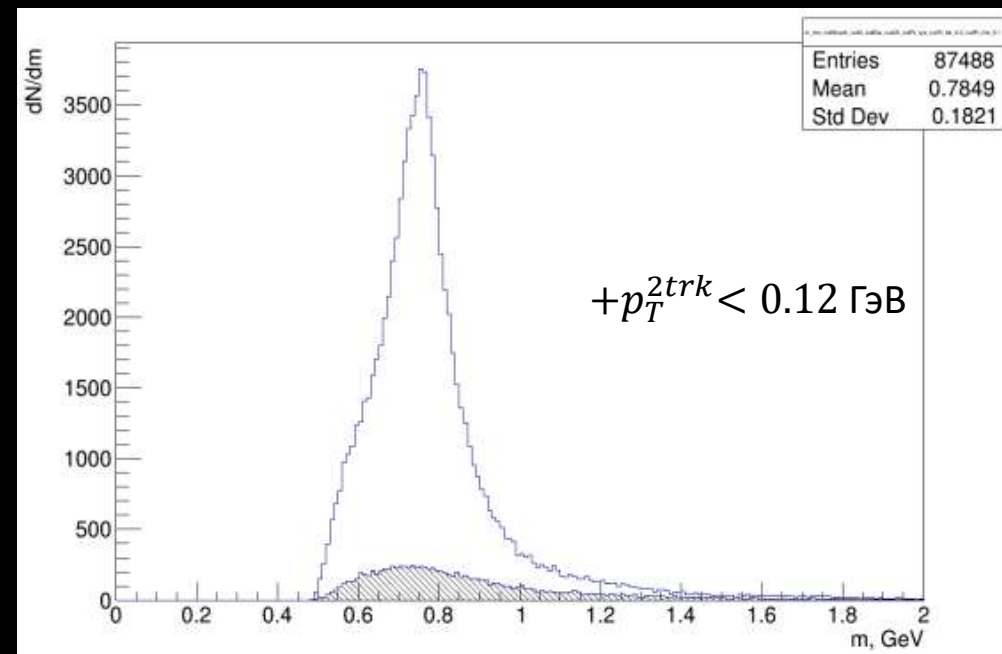
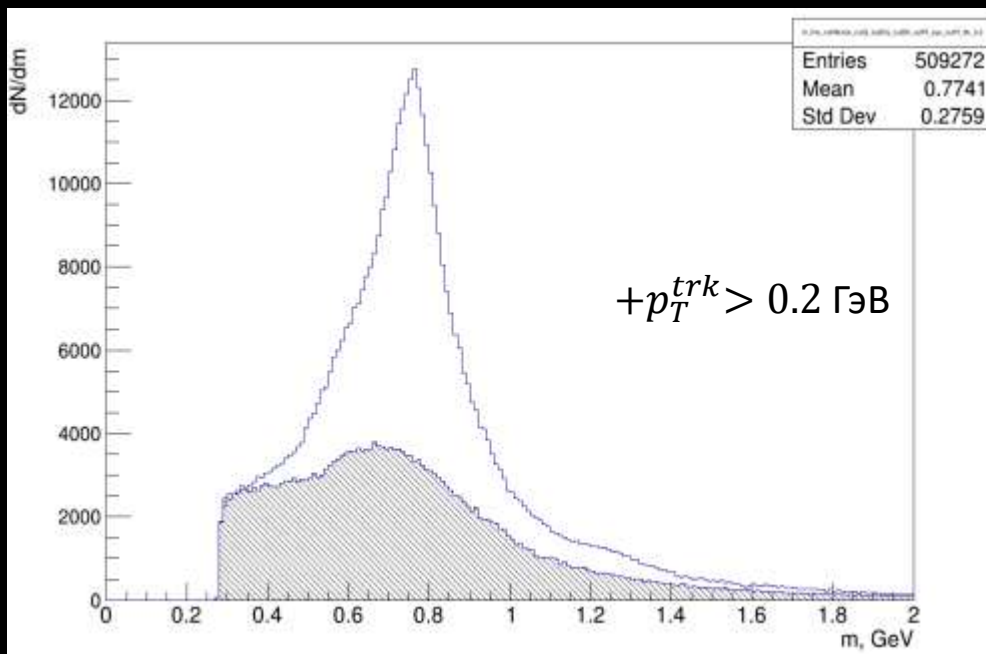
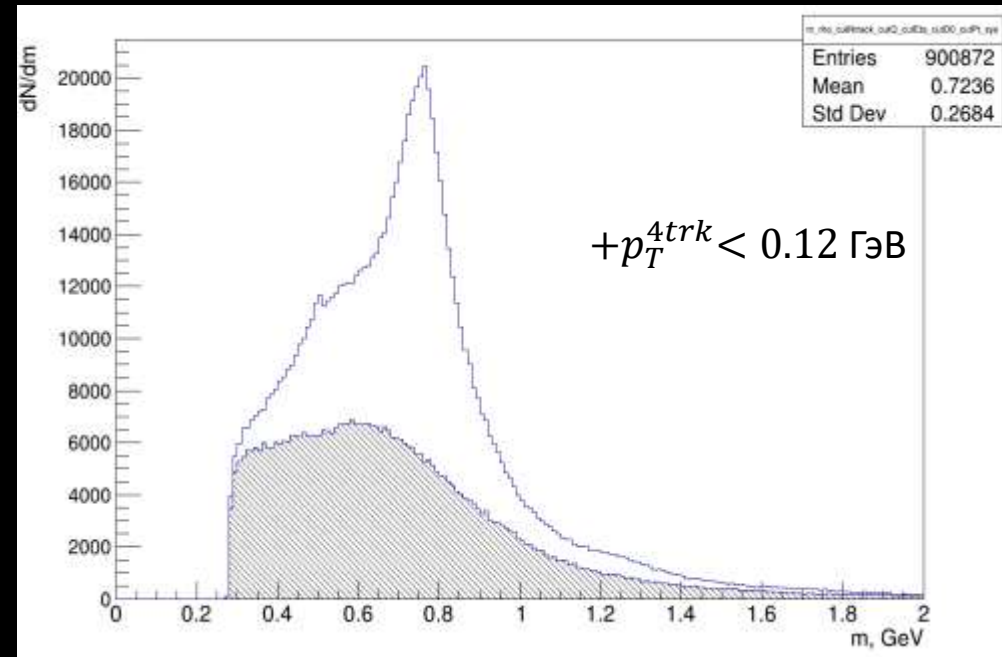
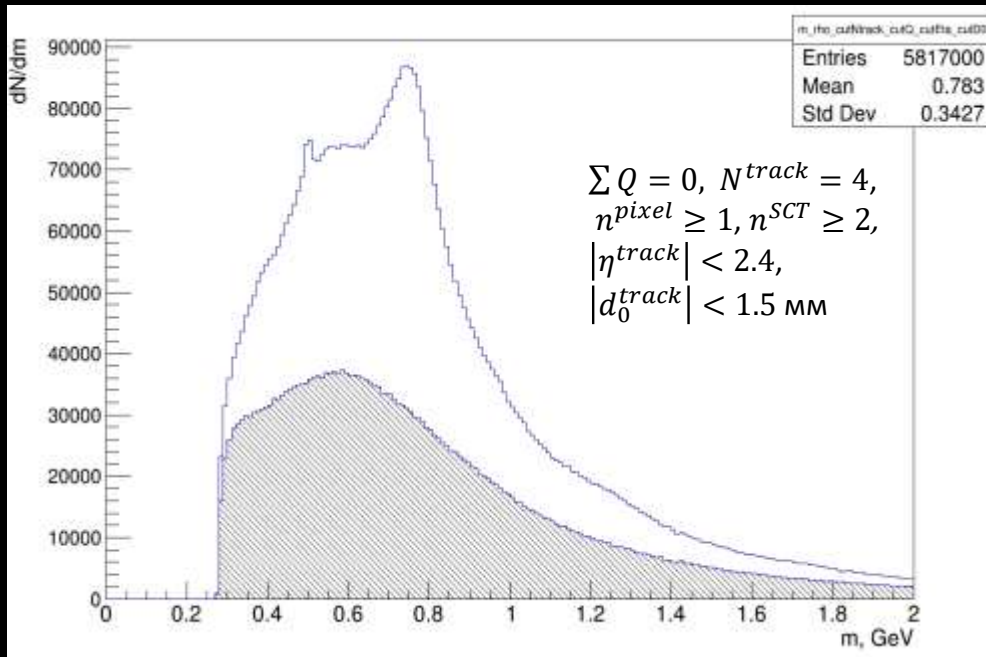


# Распределения по поперечному импульсу системы двух заряженных пионов

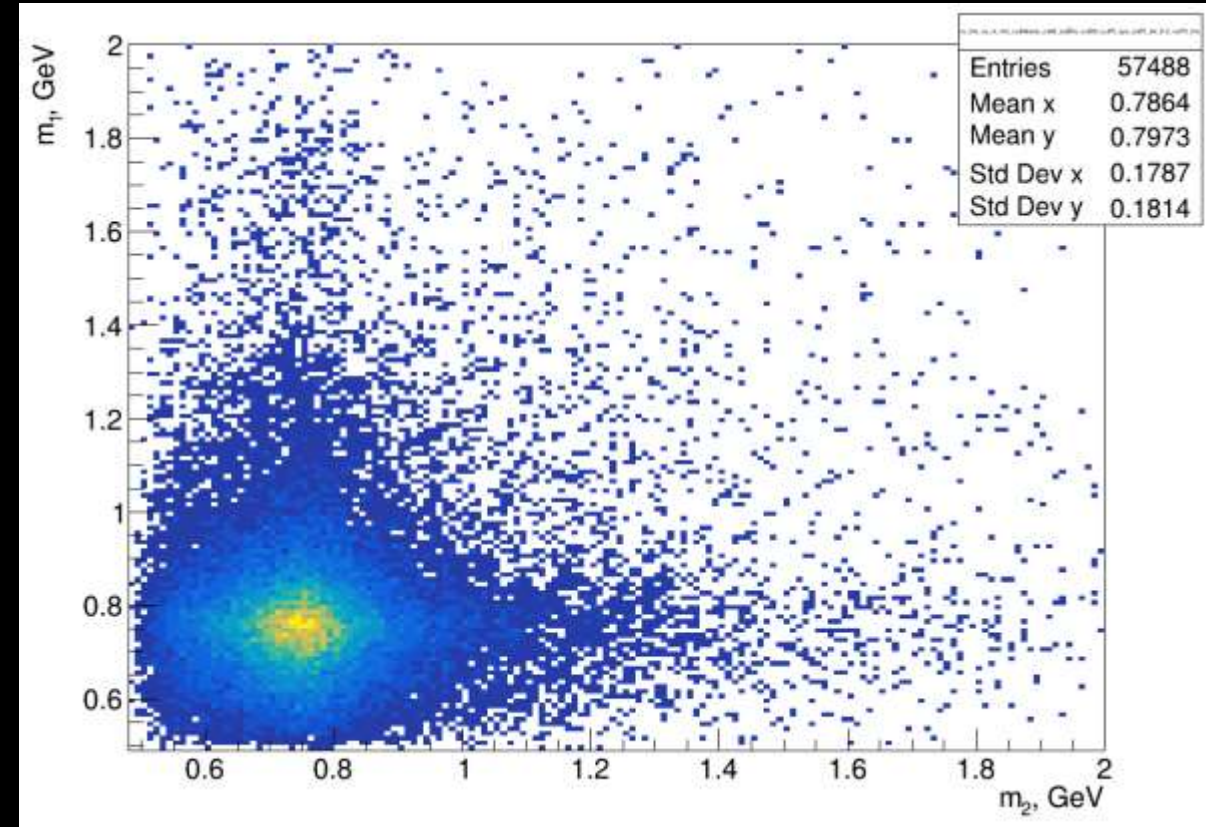
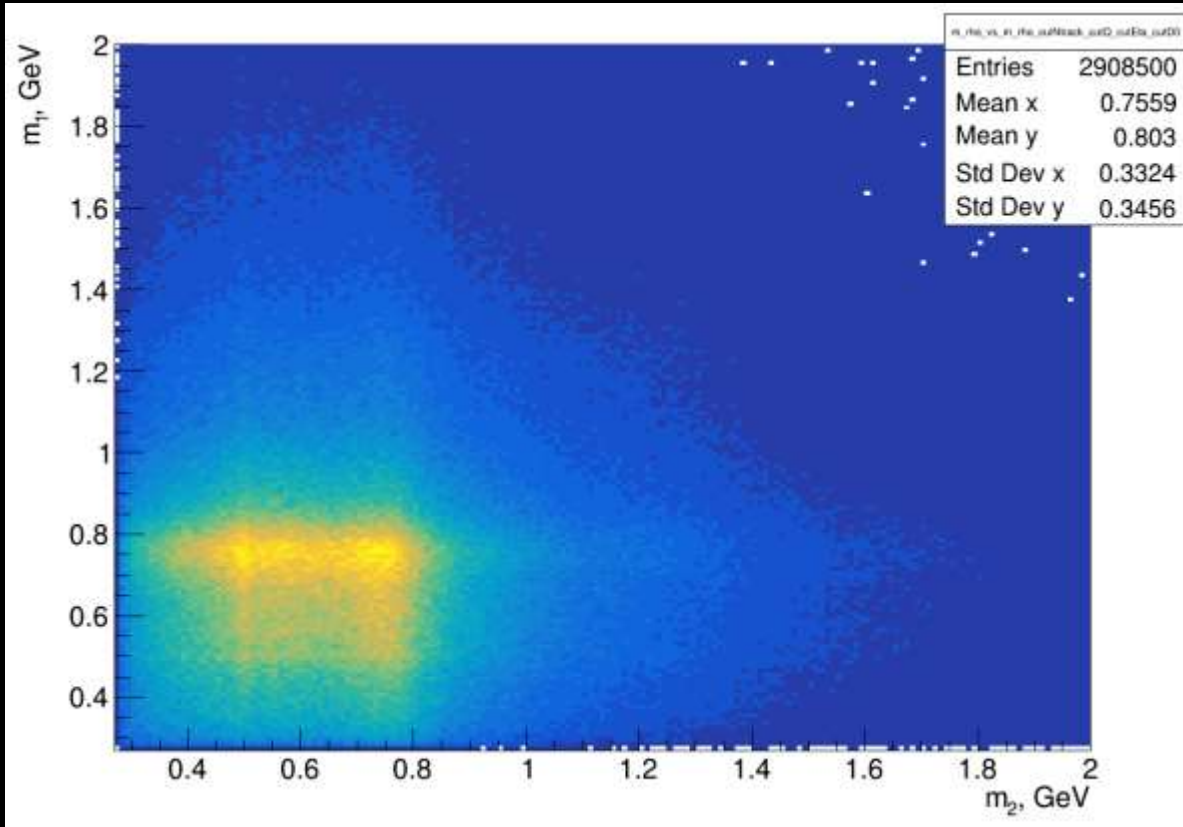


→  $p_T^{2trk} < 0.12 \text{ ГэВ}$

# Распределения по инвариантной массе системы двух заряженных пионов



## Двумерные распределения по инвариантной массе для системы двух заряженных пионов

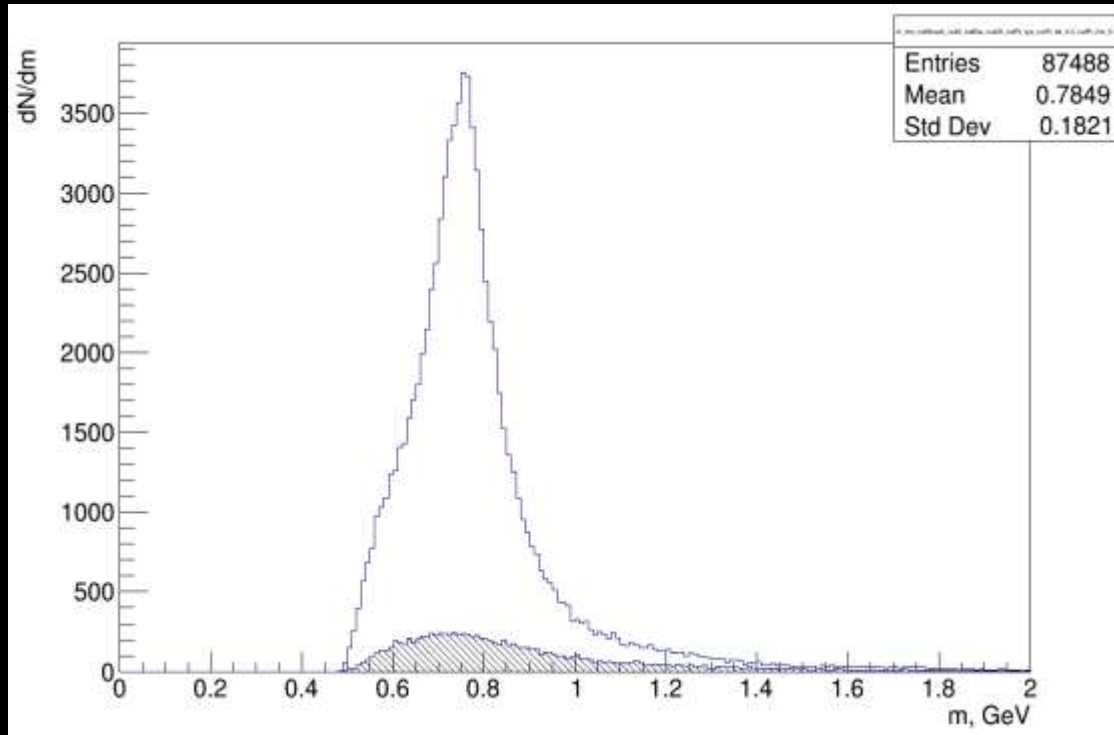


Ограничения:  $\sum Q = 0$ ,  $N^{track} = 4$ ,  $n^{pixel} \geq 1$ ,  $n^{SCT} \geq 2$ ,  
 $|\eta^{track}| < 2.4$ ,  $|d_0^{track}| < 1.5$  мм

$+p_T^{4trk} < 0.12$  ГэВ,  $p_T^{trk} > 0.2$  ГэВ,  $p_T^{2trk} < 0.12$  ГэВ



Распределение по инвариантной массе системы двух заряженных пионов для четырёхтрековых событий



Ограничения:  $\sum Q = 0$ ,  $N^{track} = 4$ ,  $n^{pixel} \geq 1$ ,  $n^{SCT} \geq 2$ ,  
 $|\eta^{track}| < 2.4$ ,  $|d_0^{track}| < 1.5$  мм,  $p_T^{4trk} < 0.12$  ГэВ,  $p_T^{trk} > 0.2$  ГэВ,  
 $p_T^{2trk} < 0.12$  ГэВ

Функция Сединга (3.1)

$$dN/dM_{\pi\pi} = \left| A_1 \frac{\sqrt{M_{\pi\pi} M_\rho \Gamma_\rho}}{M_{\pi\pi}^2 - M_\rho^2 + i M_\rho \Gamma_\rho} + B \right|^2 + f_p$$

Функция Росса-Стодольского (3.3)

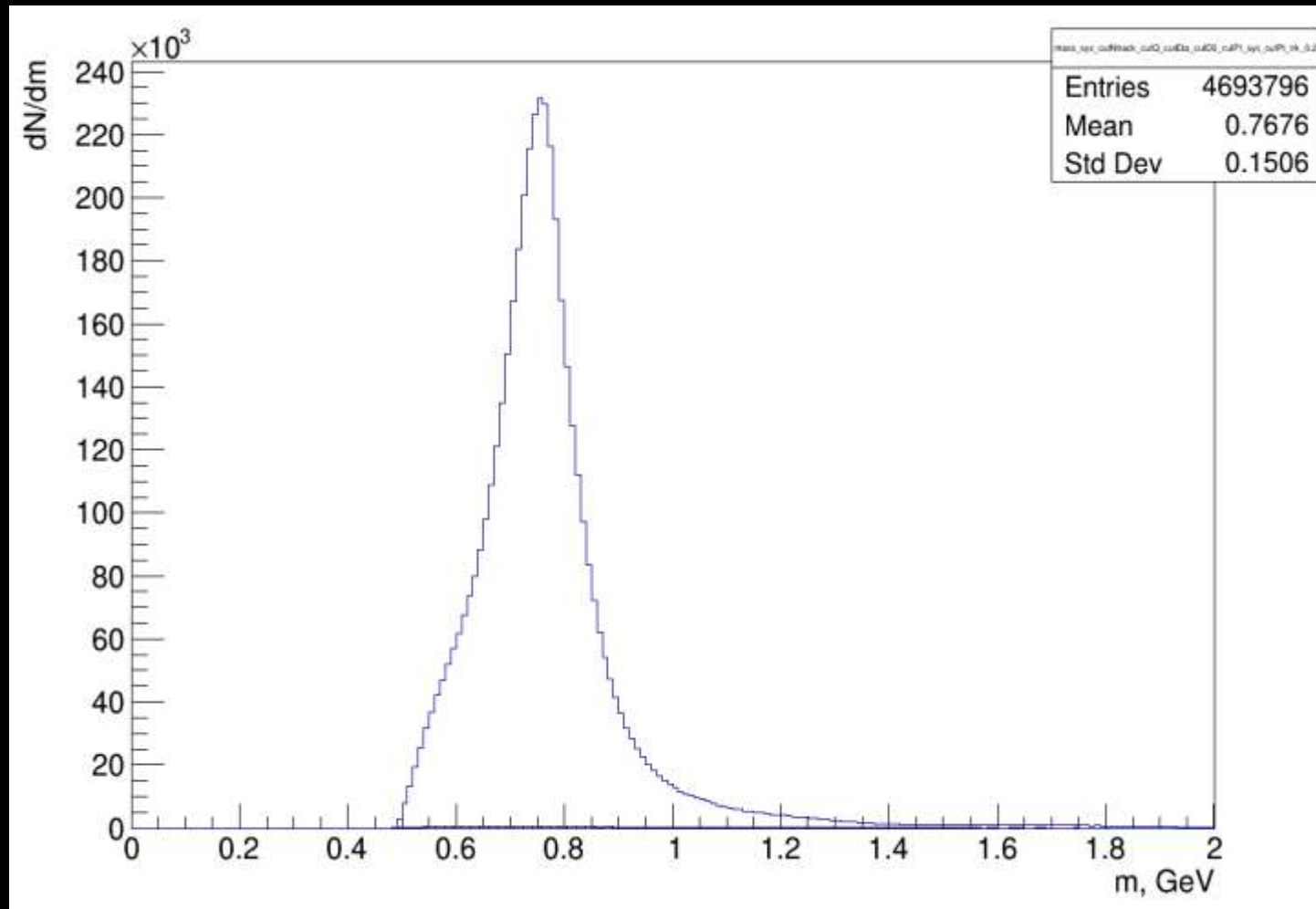
$$dN/dM_{\pi\pi} = \left| A_2 \frac{\sqrt{M_{\pi\pi} M_\rho \Gamma_\rho}}{M_{\pi\pi}^2 - M_\rho^2 + i M_\rho \Gamma_\rho} \right|^2 \left( \frac{M_\rho}{M_{\pi\pi}} \right)^n + f_p$$

Ширина  $\rho^0$  мезона, зависящая от импульса

$$\Gamma_\rho = \Gamma_0 \cdot (M_\rho/M_{\pi\pi}) \cdot \left[ (M_{\pi\pi}^2 - 4m_\pi^2)/(M_\rho^2 - 4m_\pi^2) \right]^{3/2}$$

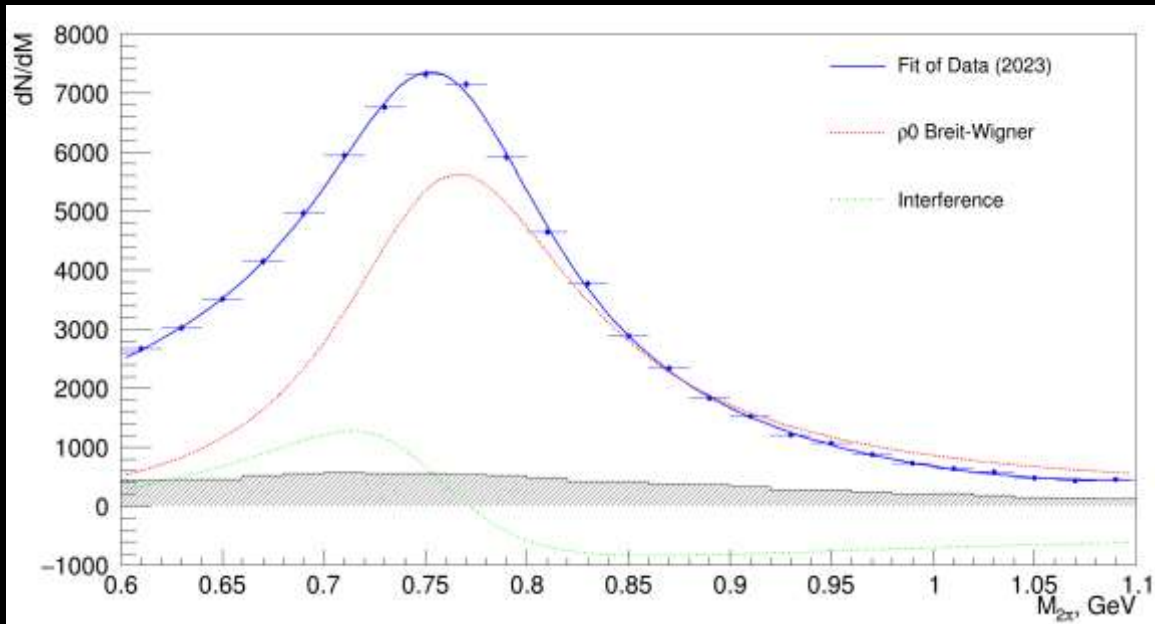
$A_1$ ,  $A_2$  – амплитуды функции Брейт-Вигнера,  $B$  – амплитуда прямого не резонансного производства  $\pi^+\pi^-$ ,  $M_{\pi\pi}$  – инвариантная масса двух заряженных пионов,  $M_\rho$  – масса  $\rho^0$  мезона,  $\Gamma_\rho$  – ширина  $\rho^0$  мезона,  $m_\pi$  – масса заряженного пиона,  $n$  – параметр отклонения от функции Брейт-Вигнера

Распределение по инвариантной массе системы двух заряженных пионов  
для двухтрековых событий

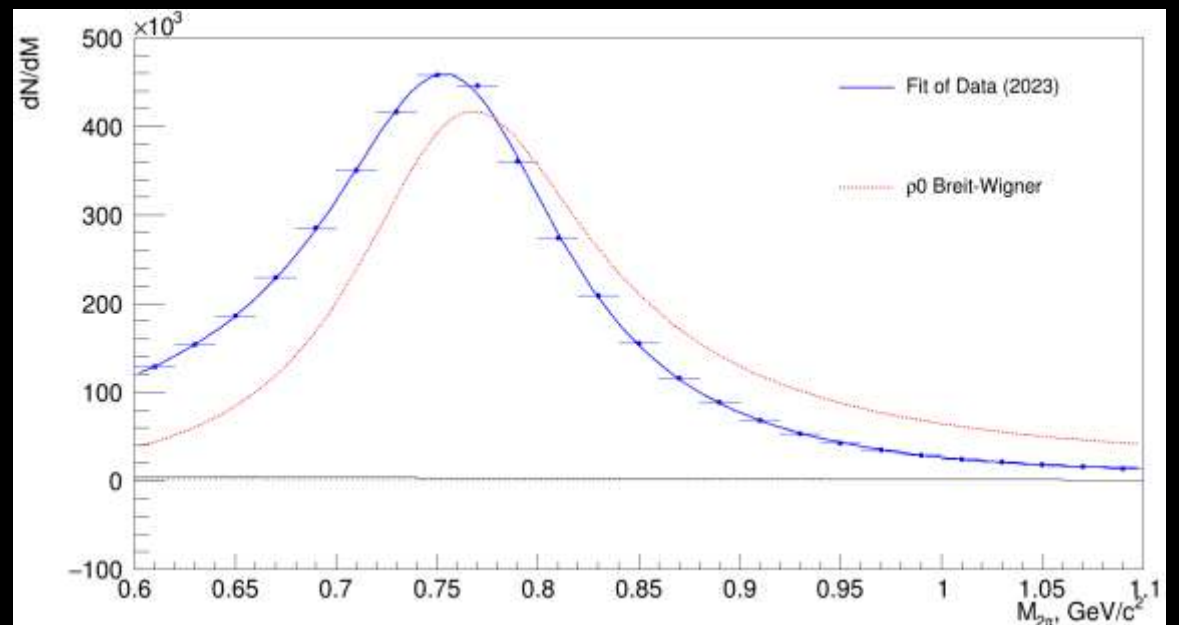
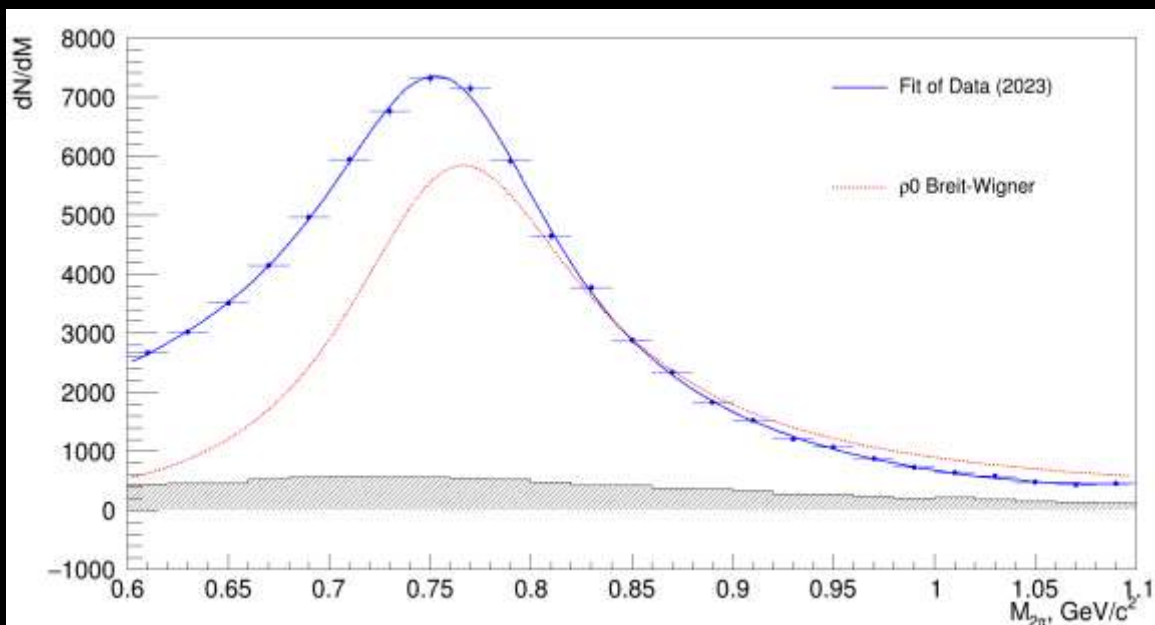
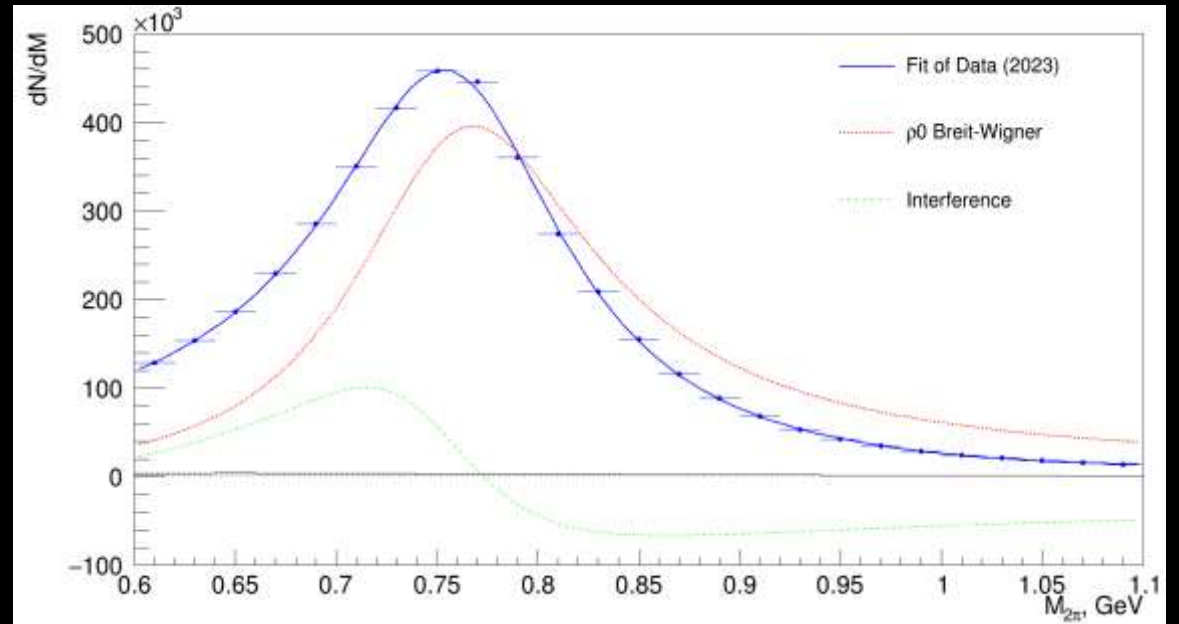


Ограничения:  $\sum Q = 0$ ,  $N^{track} = 2$ ,  $n^{pixel} \geq 1$ ,  $n^{SCT} \geq 2$ ,  $|\eta^{track}| < 2.4$ ,  
 $|d_0^{track}| < 1.5$  мм,  $p_T^{2trk} < 0.12$  ГэВ,  $p_T^{trk} > 0.2$  ГэВ

Результат фитирования функциями 3.1 и 3.3 распределения по инвариантной массе двух заряженных пионов для **четырёхтрековых** событий



Результат фитирования функциями 3.1 и 3.3 распределения по инвариантной массе двух заряженных пионов для **двухтрековых** событий



Параметры фитирования распределения по инвариантной массе системы двух заряженных пионов для **четырёхтрековых** событий

Параметры фитирования распределения по инвариантной массе системы двух заряженных пионов для **двухтрековых** событий

Параметры фита	Функция 3.1	Функция 3.3	PDG
$A_1$	$-29.1 \pm 0.3$	-	-
$A_2$	-	$-29.7 \pm 0.3$	-
$B$	$14.2 \pm 0.5$	-	-
$ A_1/B $	$2.05 \pm 0.15$	-	-
$n$	-	$3.67 \pm 0.13$	-
$M_\rho$ , МэВ	$771.63 \pm 1.06$	$771.61 \pm 1.03$	$775.26 \pm 0.23$
$\Gamma_0$ , МэВ	$151 \pm 3$	$151 \pm 3$	$149.1 \pm 0.8$

Параметры фита	Функция 3.1	Функция 3.3	PDG
$A_1$	$-244.3 \pm 0.2$	-	-
$A_2$	-	$-250.7 \pm 0.2$	-
$B$	$134.3 \pm 0.4$	-	-
$ A_1/B $	$1.819 \pm 0.010$	-	-
$n$	-	$3.67 \pm 0.13$	-
$M_\rho$ , МэВ	$773.15 \pm 0.10$	$773.13 \pm 0.10$	$775.26 \pm 0.23$
$\Gamma_0$ , МэВ	$151.5 \pm 0.3$	$151.4 \pm 0.3$	$149.1 \pm 0.8$

Ширина и масса  $\rho^0$  мезона, полученные путем фитирования функцией 3.1 распределения по инвариантной массе двух заряженных пионов по данным УПС тяжелых ядер с энергией  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  ТэВ в эксперименте ALICE и с энергией  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ в эксперименте STAR

	ALICE	STAR
$M_\rho$ , МэВ	$769.5 \pm 1.2(\text{стат.}) \pm 2.0(\text{сис.})$	$775 \pm 3$
$\Gamma_0$ , МэВ	$156 \pm 2(\text{стат.}) \pm 3(\text{сис.})$	$162 \pm 7$

4 трека:  $N_{\rho^0}$  ( функция 3.1) –  $(28.4 \pm 0.5) \cdot 10^3$ ,  $N_{\rho^0}$  (функция 3.3) –  $(27.3 \pm 0.5) \cdot 10^3$

$N_{\rho^0\rho^0}/N_{\rho^0} = (28.4 \pm 0.5)/(3848 \pm 8)$

2 трека:  $N_{\rho^0}$  ( функция 3.1) –  $(3848 \pm 8) \cdot 10^3$ ,  $N_{\rho^0}$  (функция 3.3) –  $(4054 \pm 8) \cdot 10^3$

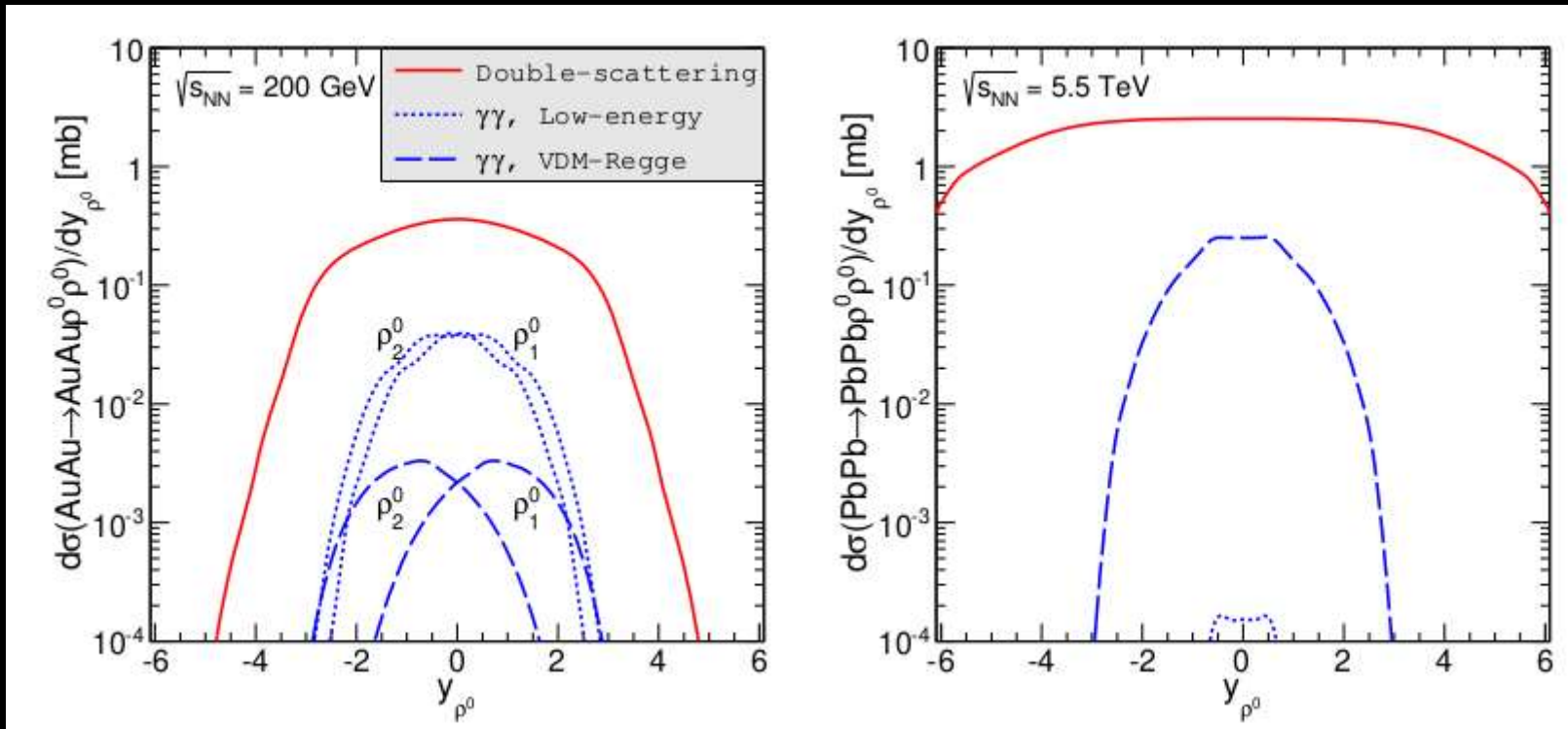
$(\sigma_{\rho^0\rho^0}/\sigma_{\rho^0} = 8.8/5200)$

# Заключение

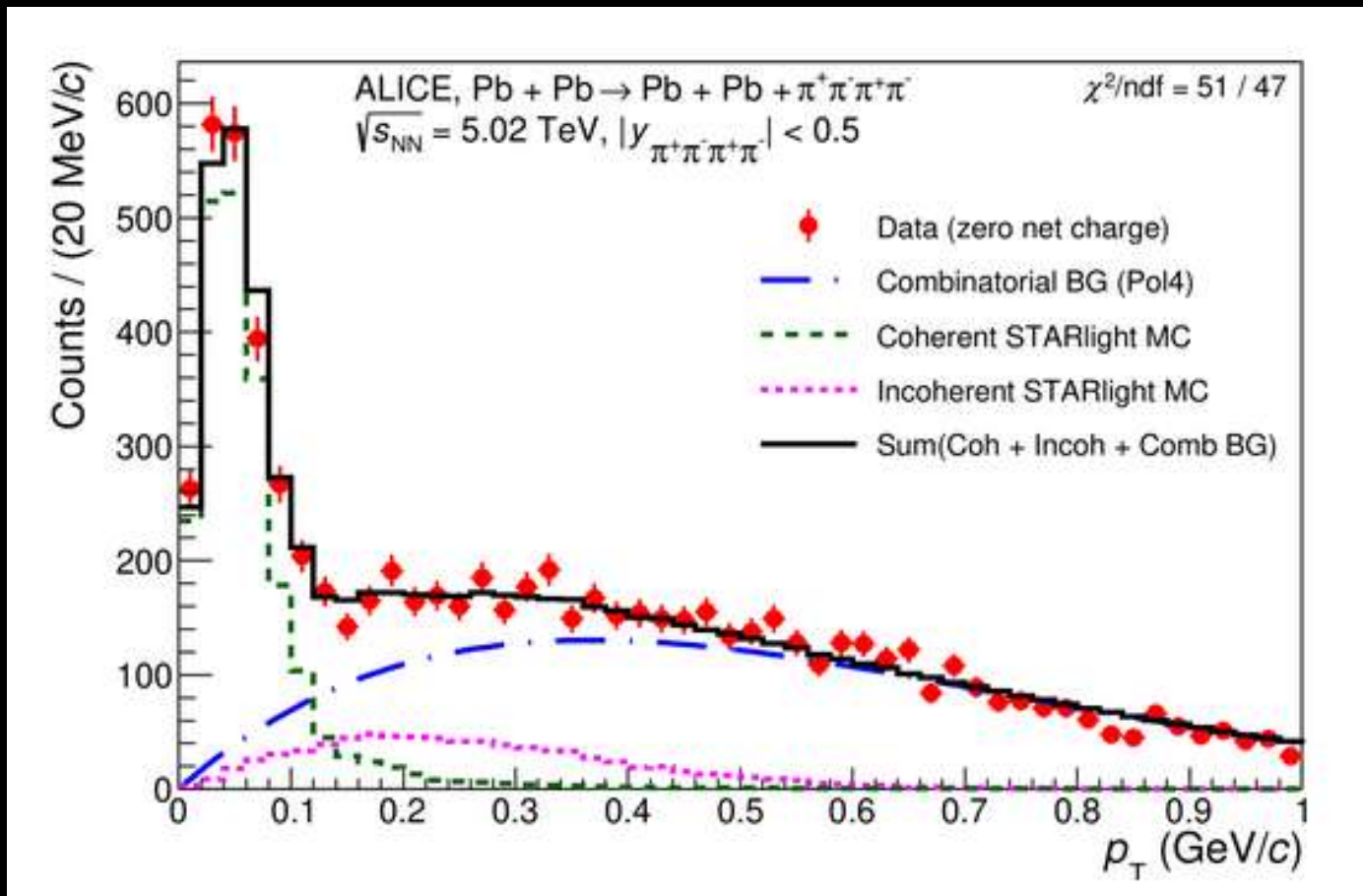
- Проведено ознакомление с ультрапериферическими столкновениями тяжелых ядер и изучены публикации, связанные с двухфотонным образованием пары  $\rho^0$  мезонов.
- Получены навыки работы с Монте-Карло генератором STARLIGHT и методами анализа в программной среде ATLAS.
- Проведено полное моделирование исследуемого процесса, выделены критерии отбора событий для наложения их на экспериментальные данные, построены характерные кинематические распределения.
- Был проведен анализ данных 2023 года по ультрапериферическим столкновениям релятивистских ядер свинца с эксперимента ATLAS для четырехтрековых событий с выделением сигнала образования пары  $\rho^0$  мезонов.
- Определены значения ширины и массы  $\rho^0$  мезонов для четырехтрековых событий:  
$$M_\rho = 771.63 \pm 1.06 \text{ МэВ}, \Gamma_0 = 151 \pm 3 \text{ МэВ}.$$
- Получена оценка отношения числа  $\rho^0$  мезонов в четырехтрековых событиях к числу  $\rho^0$  мезонов в двухтрековых событиях:

$$N_{\rho^0\rho^0}/N_{\rho^0} = (28.4 \pm 0.5)/(3848 \pm 8).$$

BACK-UP



Зависимость дифференциального сечения  $\text{AuAu} \rightarrow \text{AuAup}^0\rho^0$  от быстроты одного  $\rho^0$  мезона, красная линия – для механизма двойного рассеяния, синие линии – для двухфотонного слияния, правая панель – для энергий RHIC, левая панель – для энергий LHC

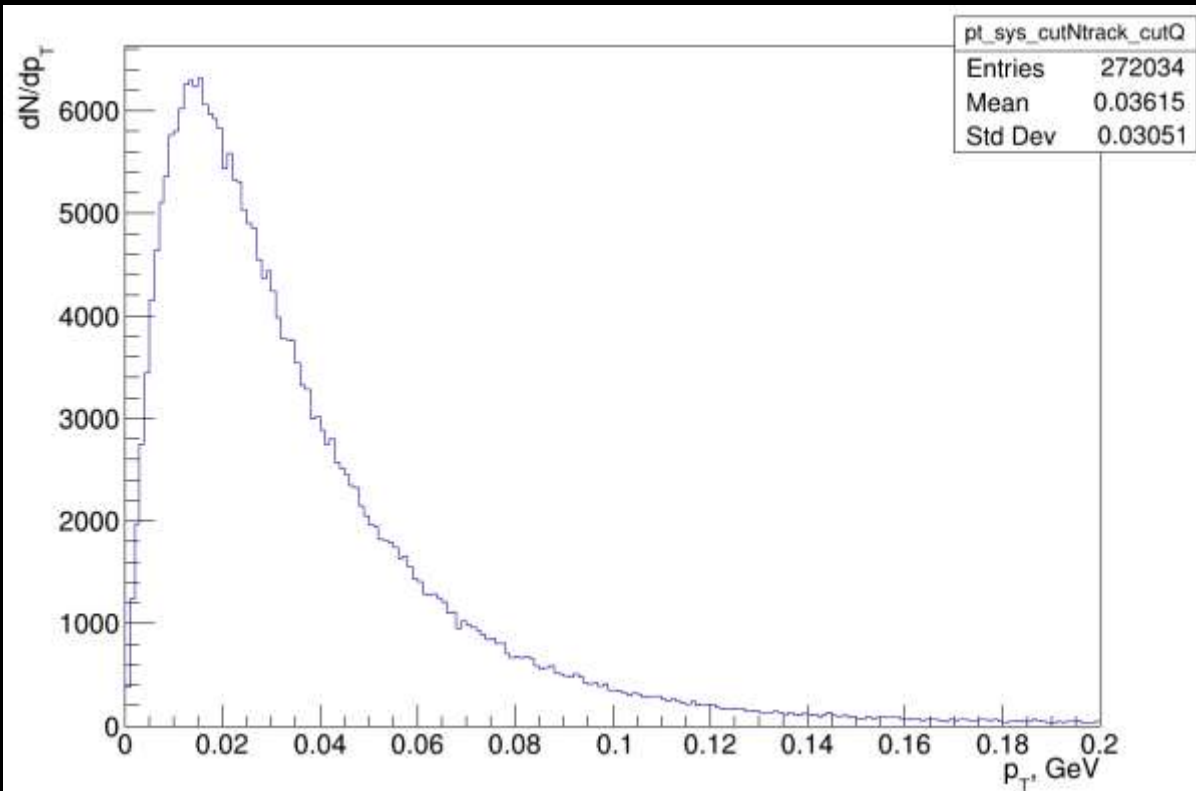


Распределение по поперечному импульсу системы четырех заряженных пионов для данных ALICE по ультрапериферическим столкновениям  $Pb - Pb$  с энергией центра масс  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  ТэВ

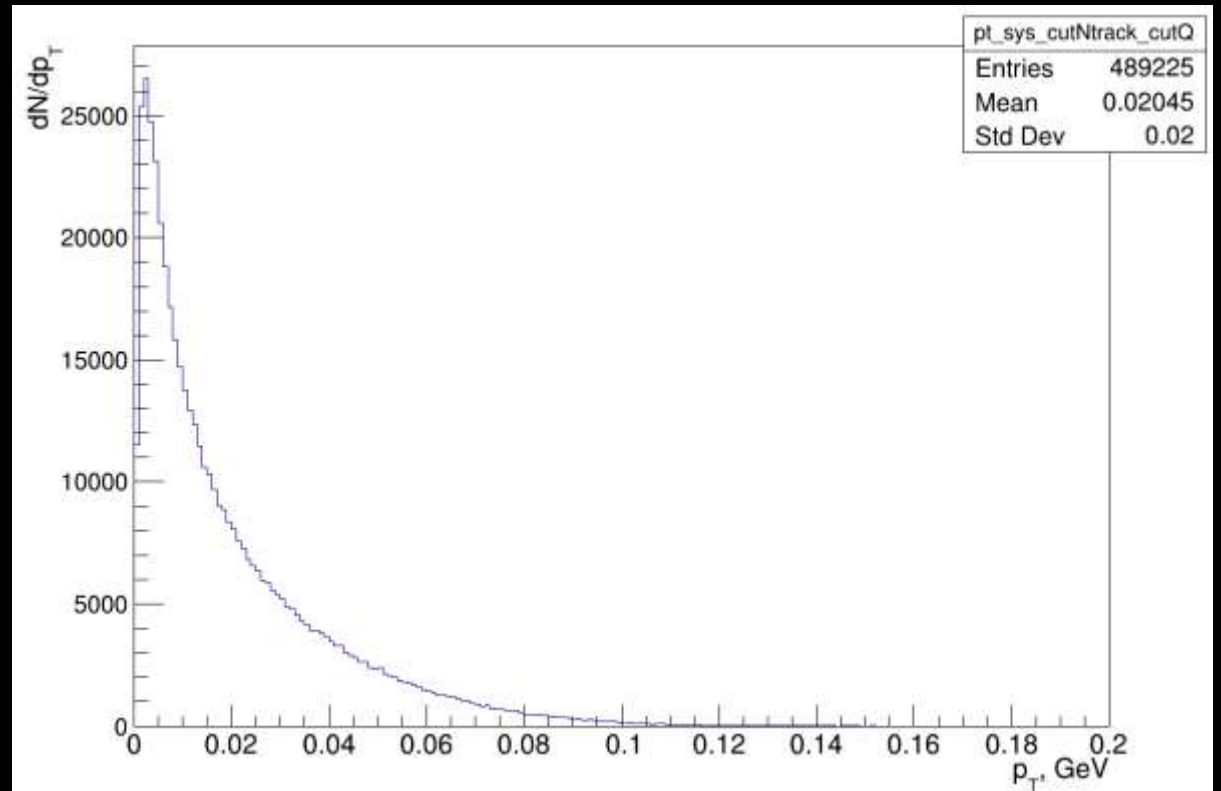


# Распределения по поперечному импульсу системы четырех заряженных пионов

Реконструкция



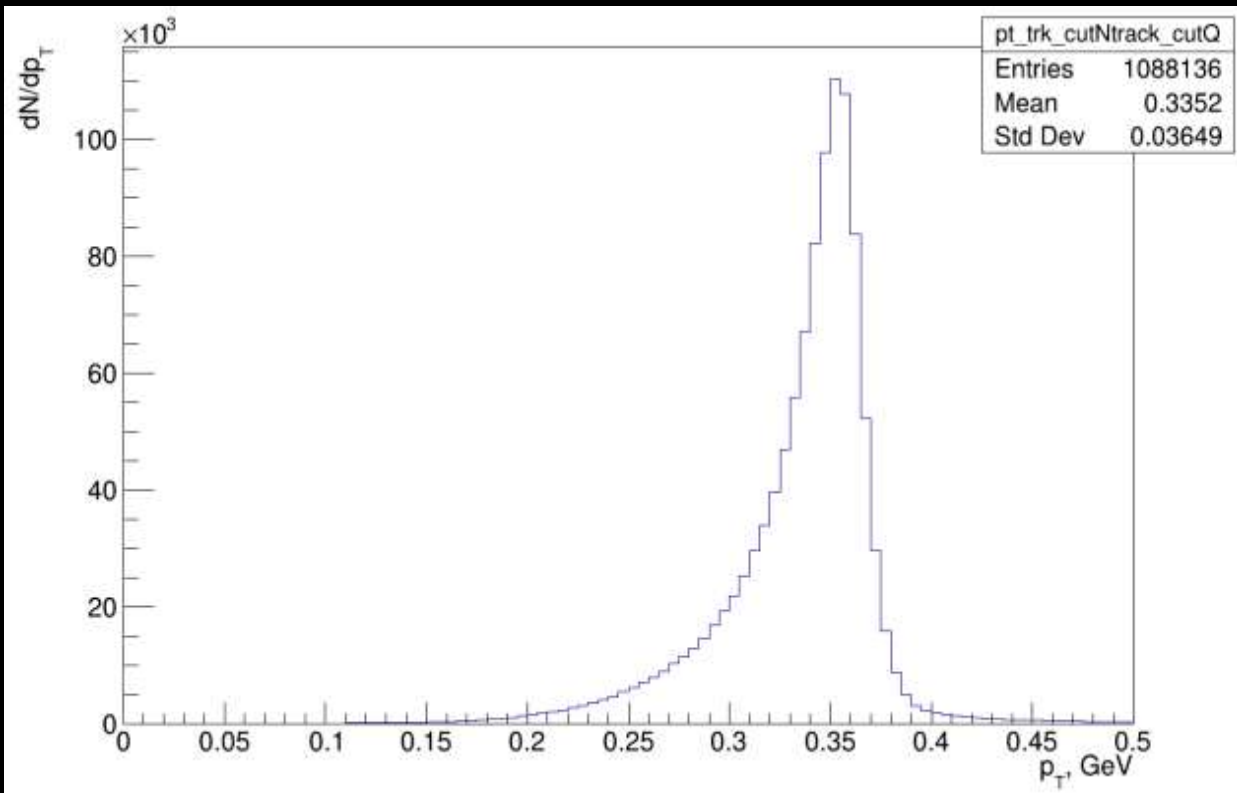
STARLIGHT



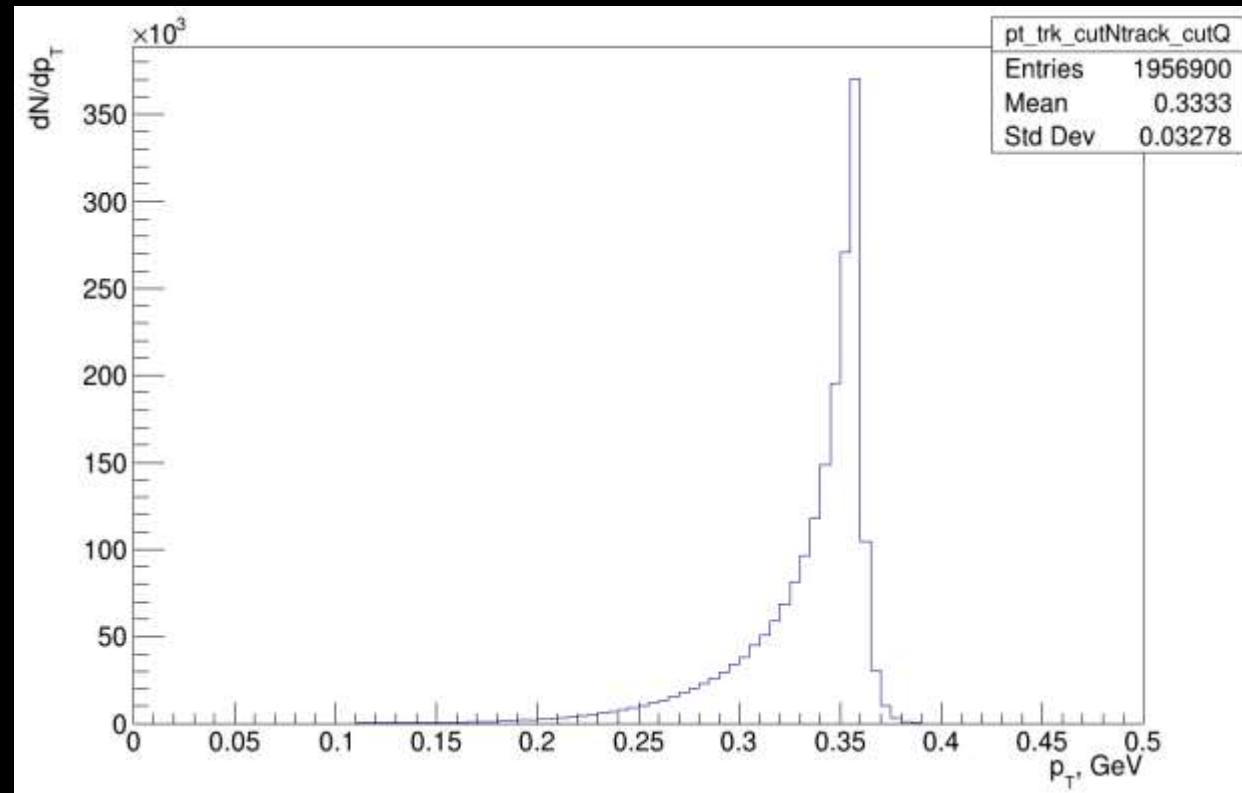
Ограничения:  $\sum Q = 0$ ,  $N^{track} = 4$ .

# Распределения по поперечному импульсу заряженного пиона

Реконструкция

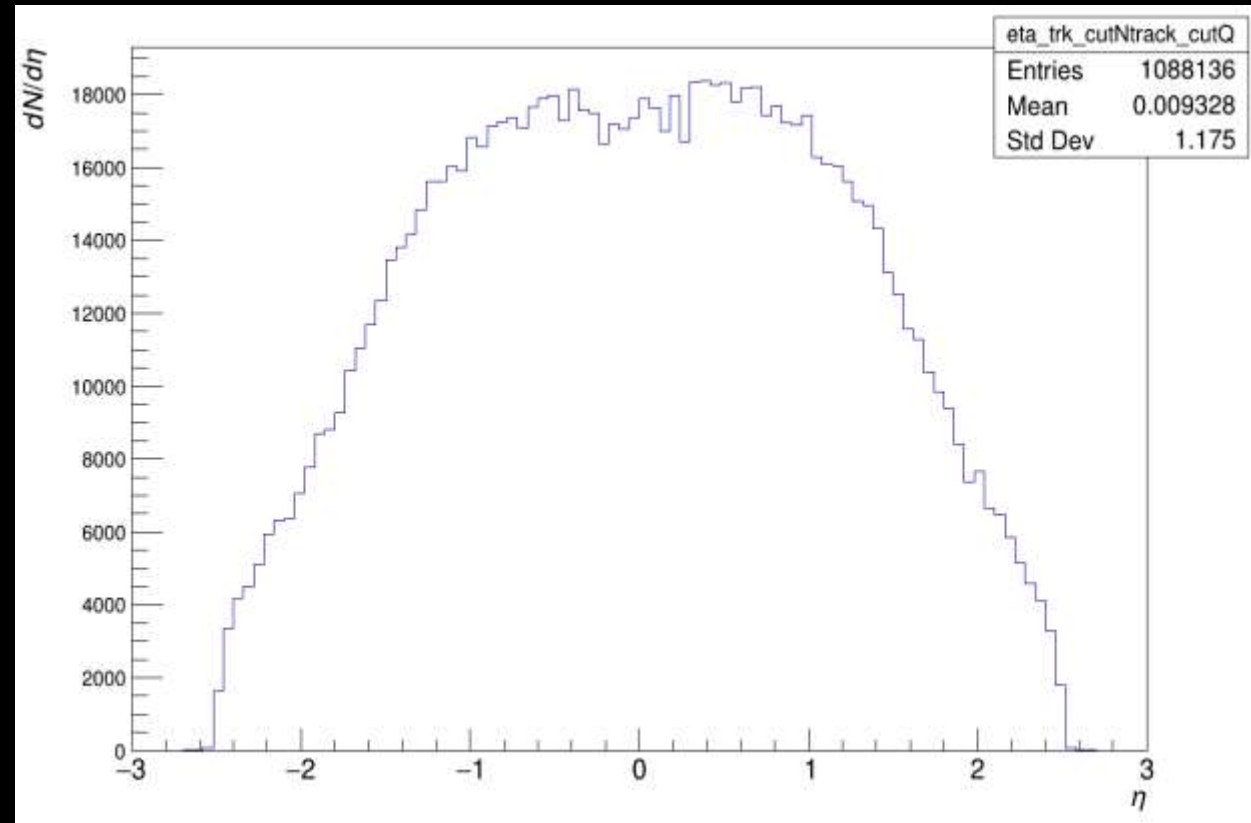


STARLIGHT

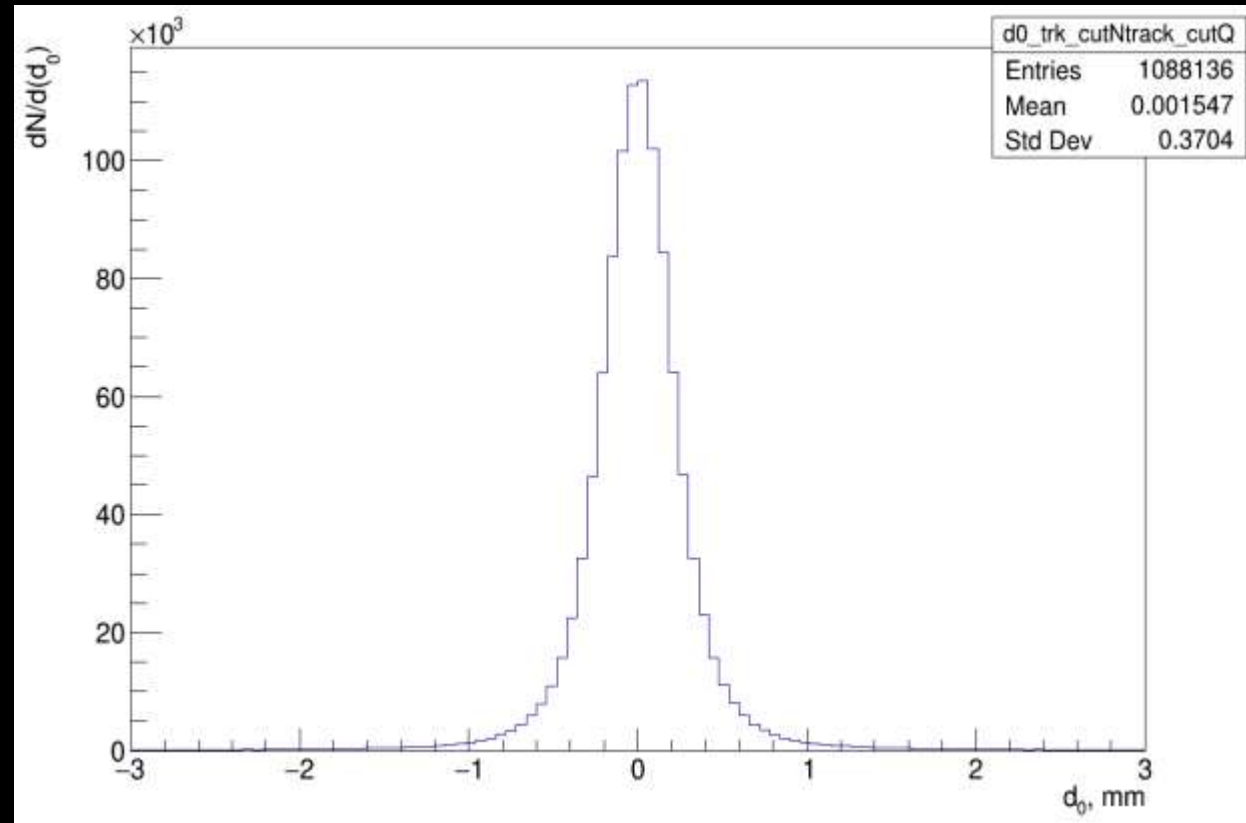


Ограничения:  $\sum Q = 0, N^{track} = 4$

Распределение по псевдобыстроте трека

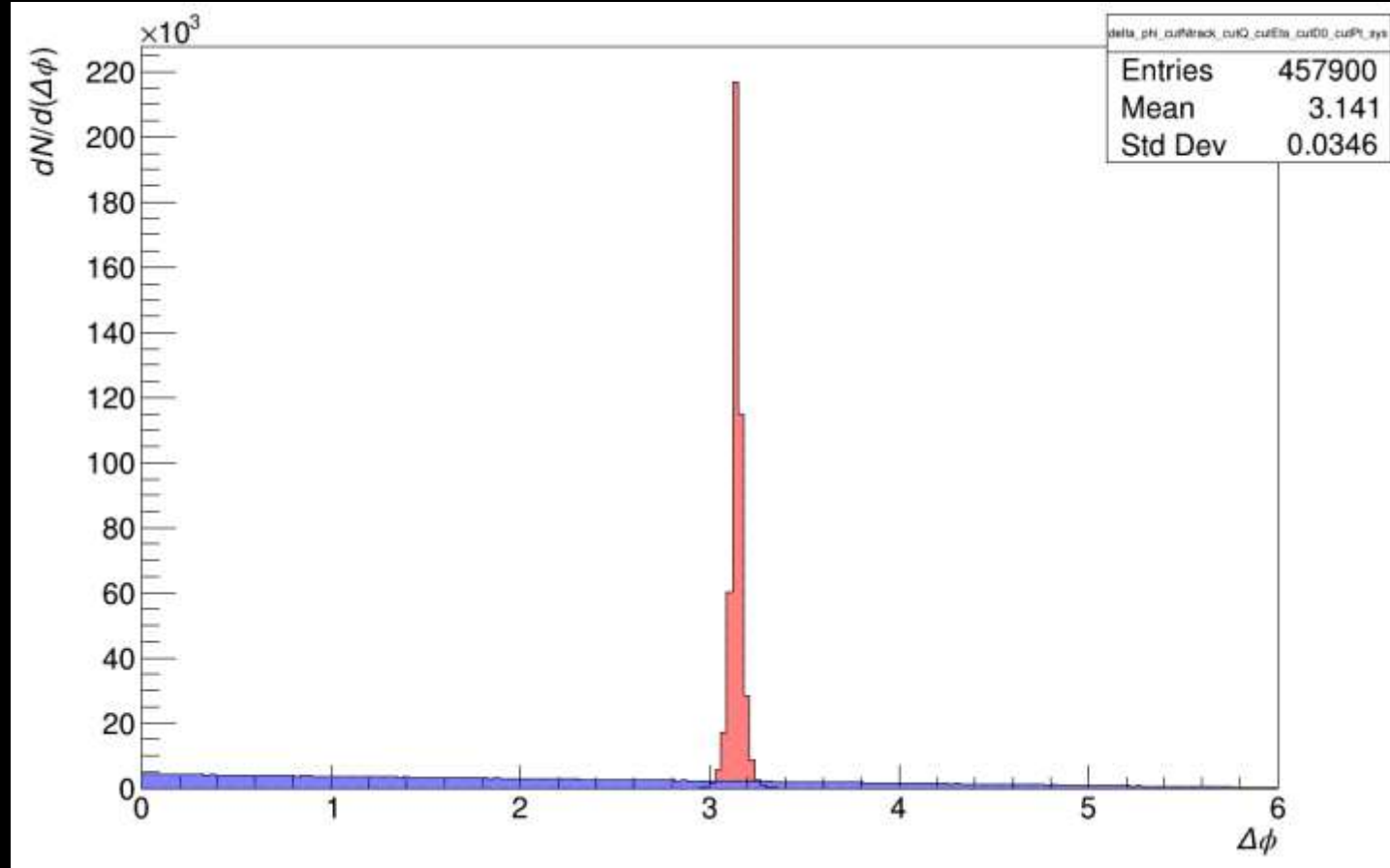


Распределение по  $d_0$  трека



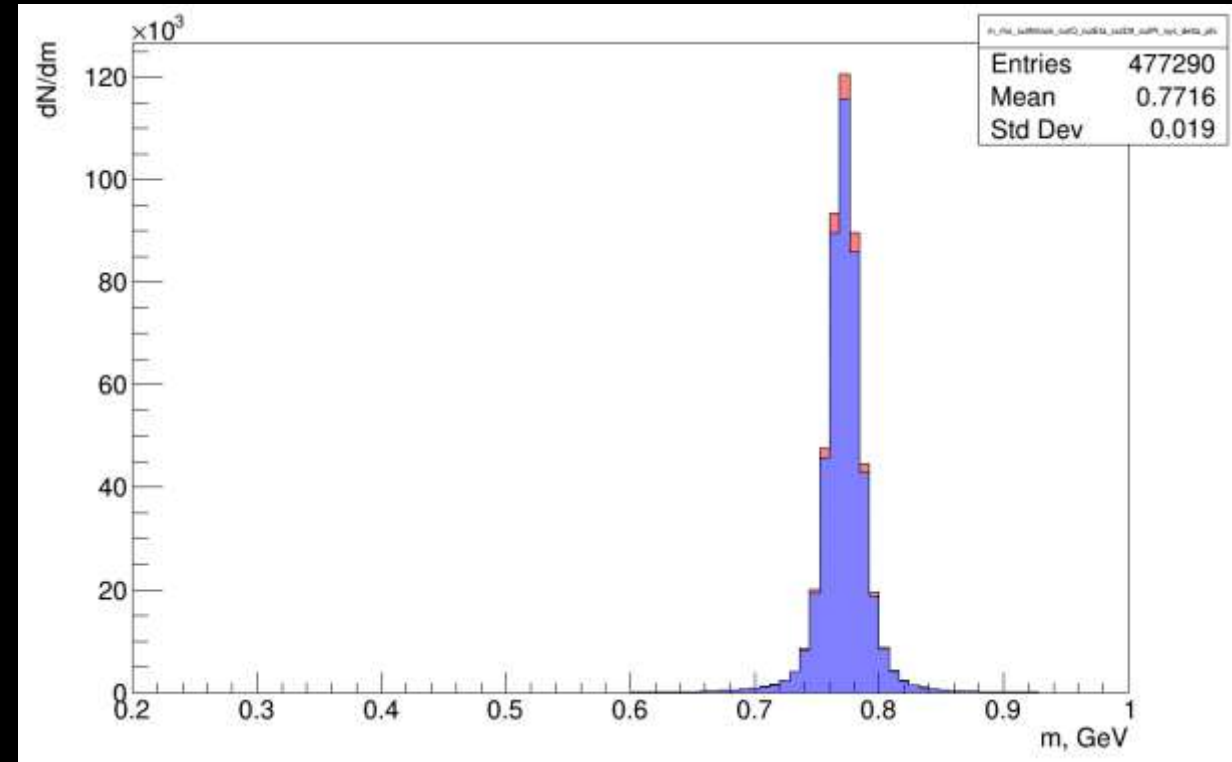
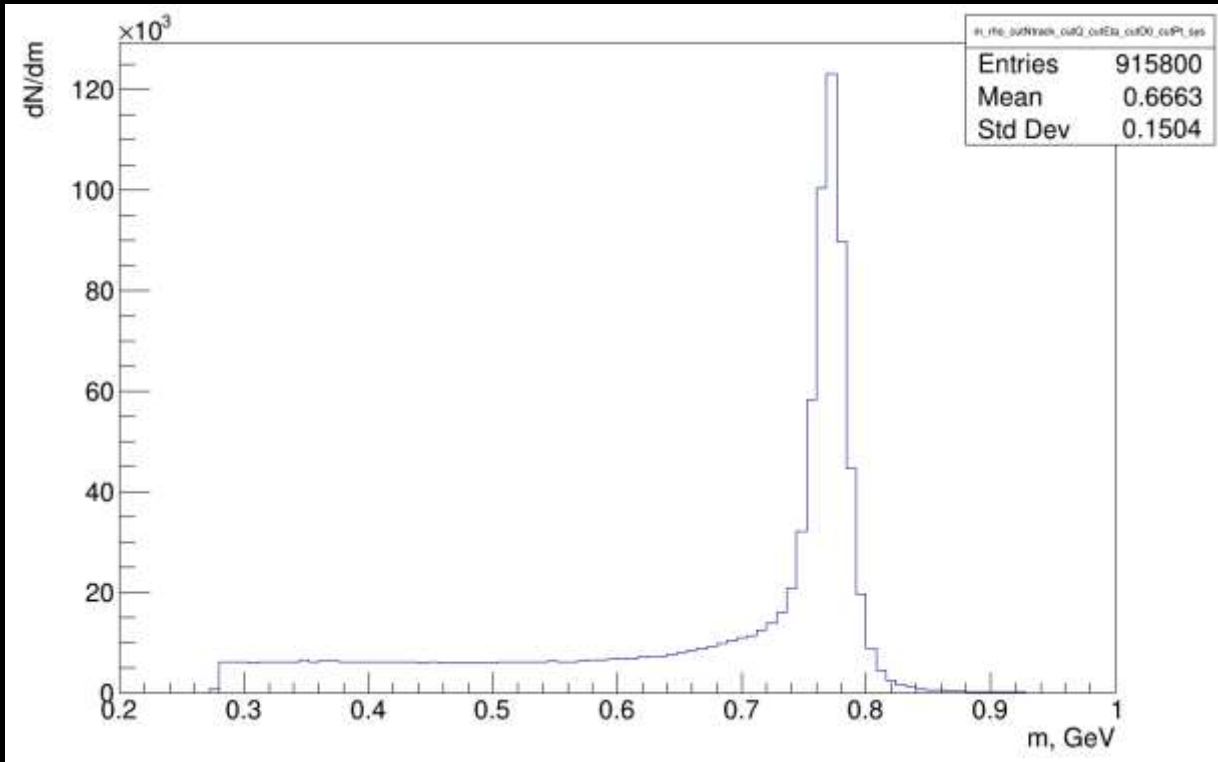
Ограничения:  $\sum Q = 0, N^{track} = 4$

В выходном файле STARLIGHT позиции треков строго фиксированы по принадлежности к одному и тому же  $\rho^0$  мезону, после реконструкции выходной файл сгенерированных событий имеет тот же формат, что и у экспериментальных данных, то есть отсутствует информация о родительских частицах, но к ней можно обратиться, используя класс ElementLink. Для попытки разделения в экспериментальных данных пионов по их принадлежности к  $\rho^0$  мезонам были построены различные параметры двухпионных систем после реконструкции с знанием того, какая пара пионов каким мезоном была рождена.



Распределение по полярному углу между заряженными пионами с ограничениями:  
 $\sum Q = 0$ ,  $N^{track} = 4$ ,  $|\eta^{track}| < 2.4$ ,  $|d_0^{track}| < 1.5$  мм,  $p_T^{4trk} < 0.12$  ГэВ, красный – от одного  $\rho^0$  мезона, синий – от разных  $\rho^0$  мезонов

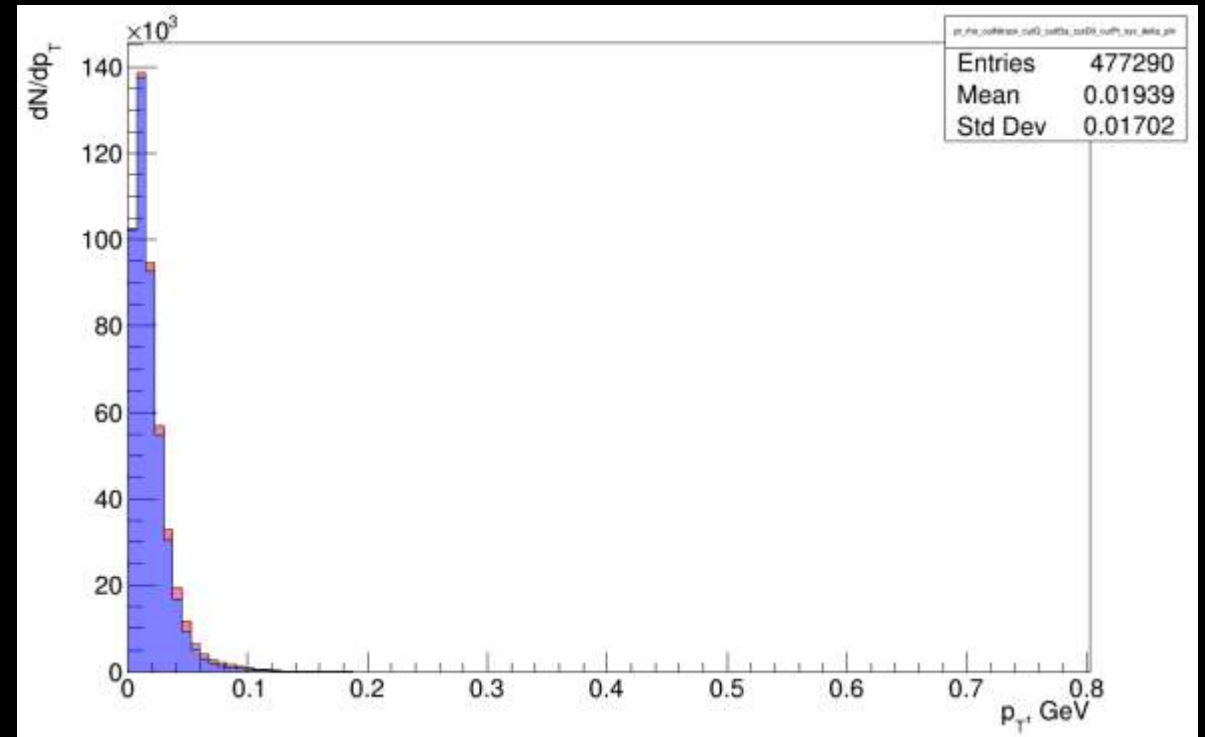
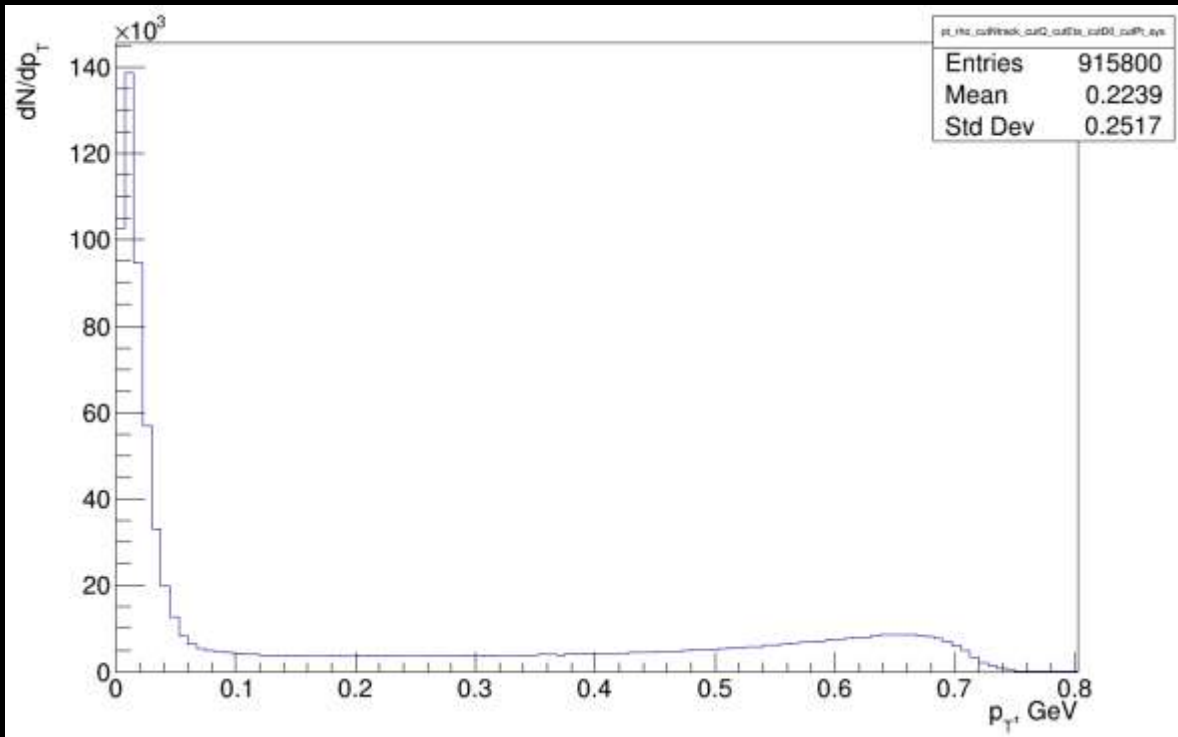
## Распределения по инвариантной массе системы двух заряженных пионов



красный – от одного  $\rho^0$  мезона, синий – добавление ограничения  $\Delta\varphi < 3.0$

Ограничения:  $\sum Q = 0$ ,  $N^{track} = 4$ ,  $|\eta^{track}| < 2.4$ ,  $|d_0^{track}| < 1.5$  мм,  $p_T^{4trk} < 0.12$  ГэВ

## Распределения по инвариантной массе системы двух заряженных пионов

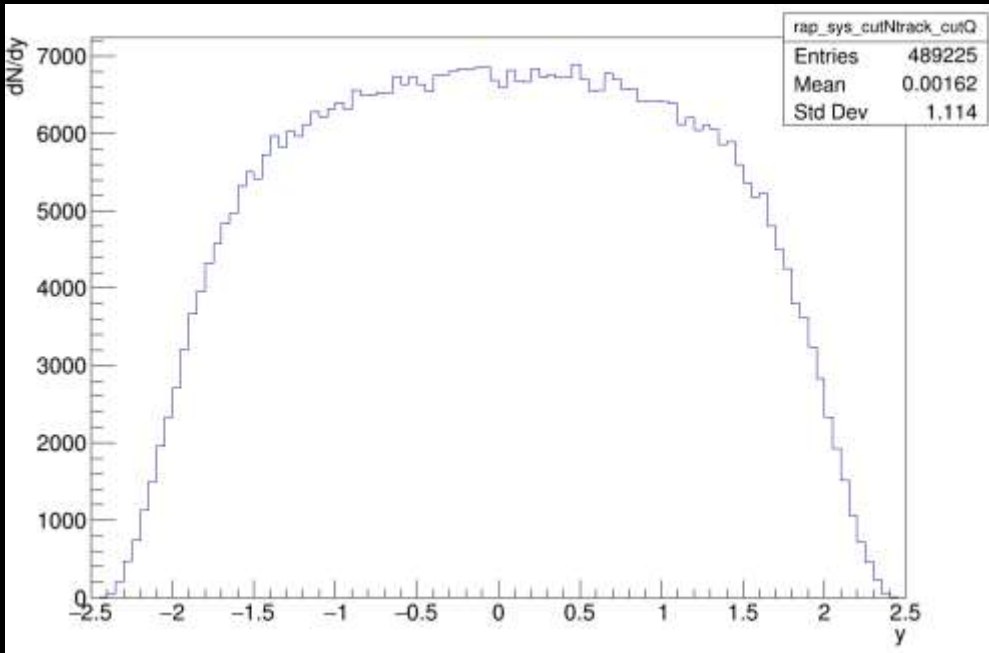


красный – от одного  $\rho^0$  мезона, синий – добавление ограничения  $\Delta\varphi < 3.0$

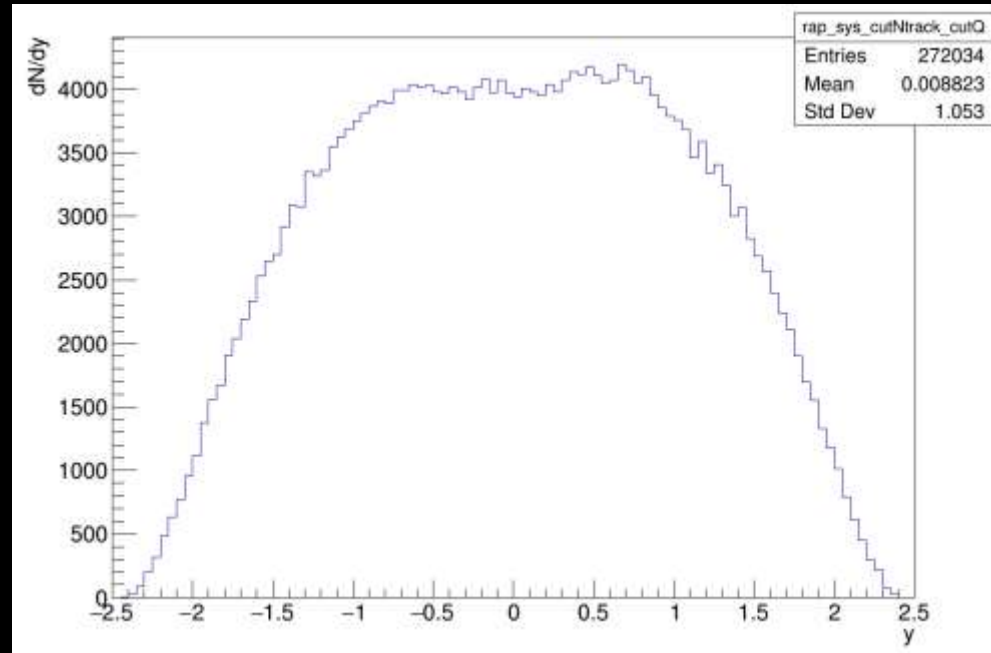
Ограничения:  $\sum Q = 0$ ,  $N^{track} = 4$ ,  $|\eta^{track}| < 2.4$ ,  $|d_0^{track}| < 1.5$  мм,  $p_T^{4trk} < 0.12$  ГэВ

При анализе экспериментальных данных выяснилось, что ограничение на поперечный импульс системы двух заряженных пионов оказалось более эффективным, чем ограничение на полярный угол

# Распределения по быстрой системе четырех заряженных пионов

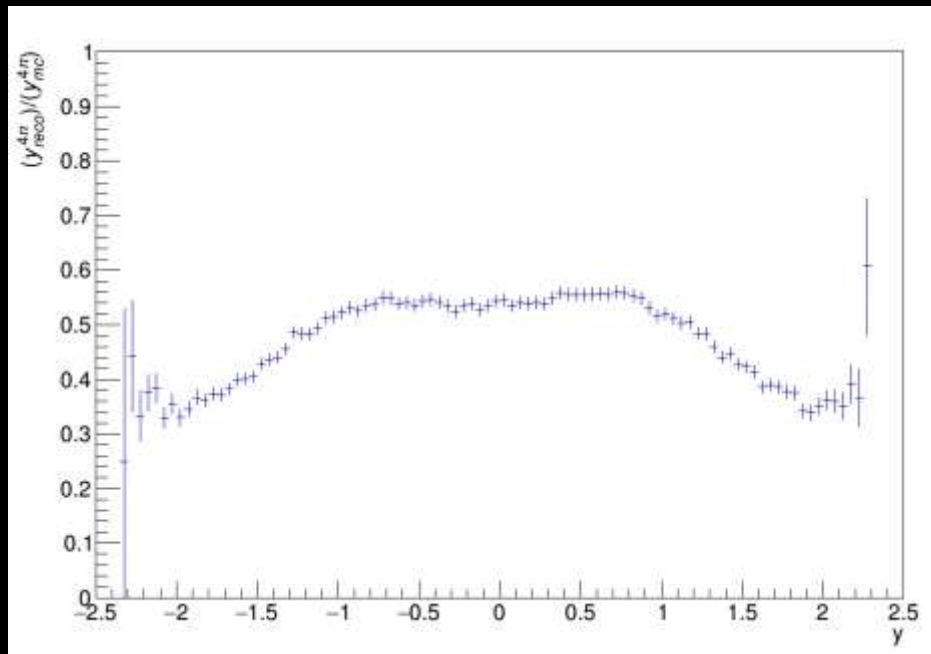


Ограничения:  $\sum Q = 0$ ,  
 $N^{track} = 4$



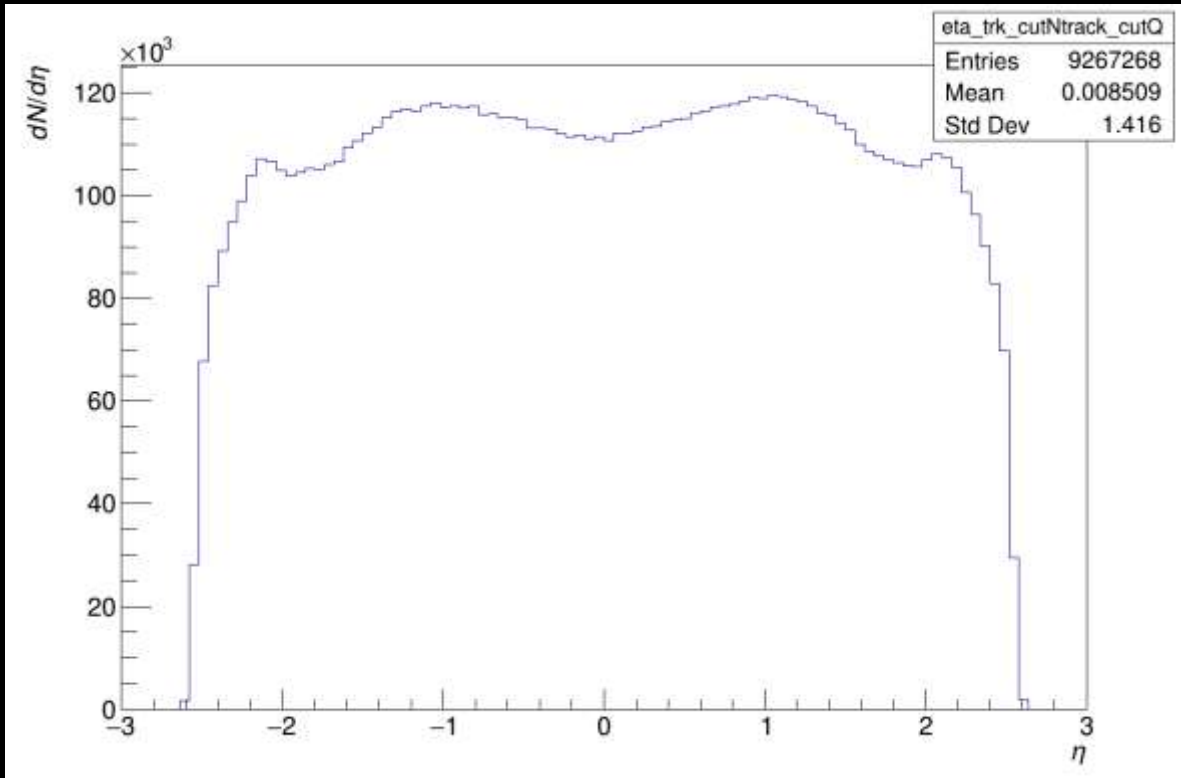
STARLIGHT

Эффективность реконструкции  
быстроты системы четырех  
заряженных пионов

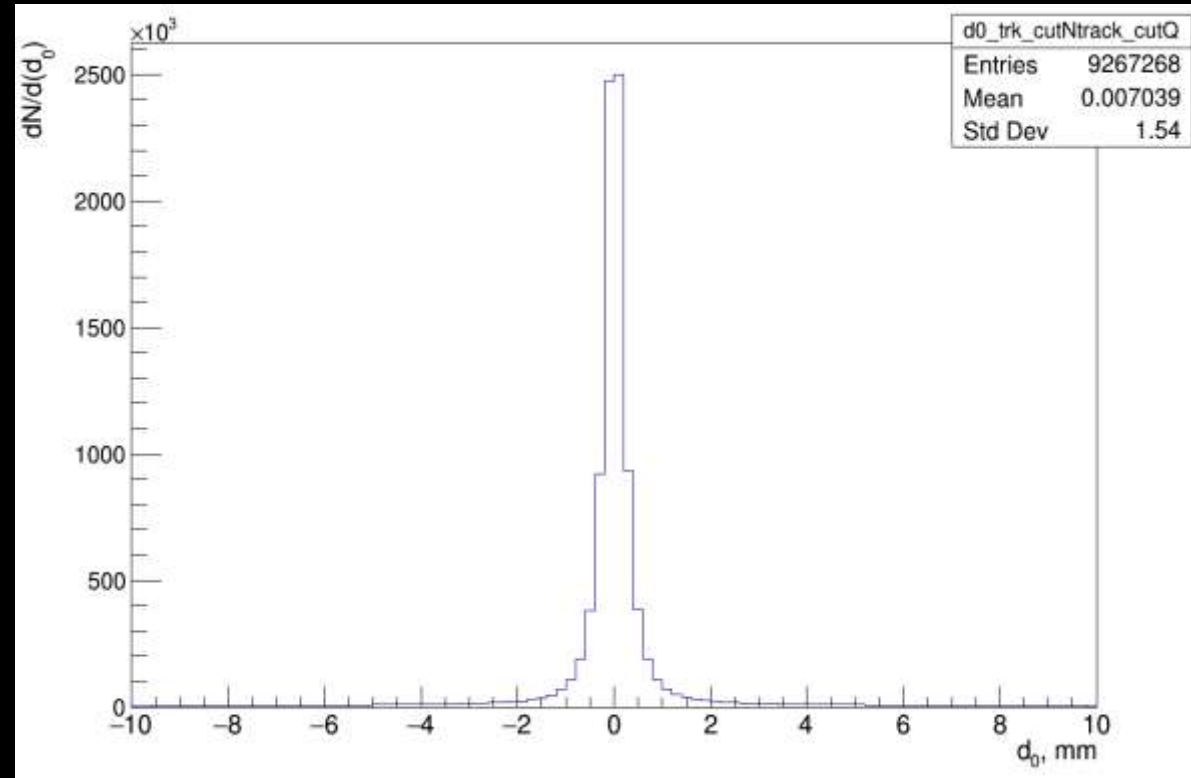


Реконструкция

Распределение по псевдобыстроте трека



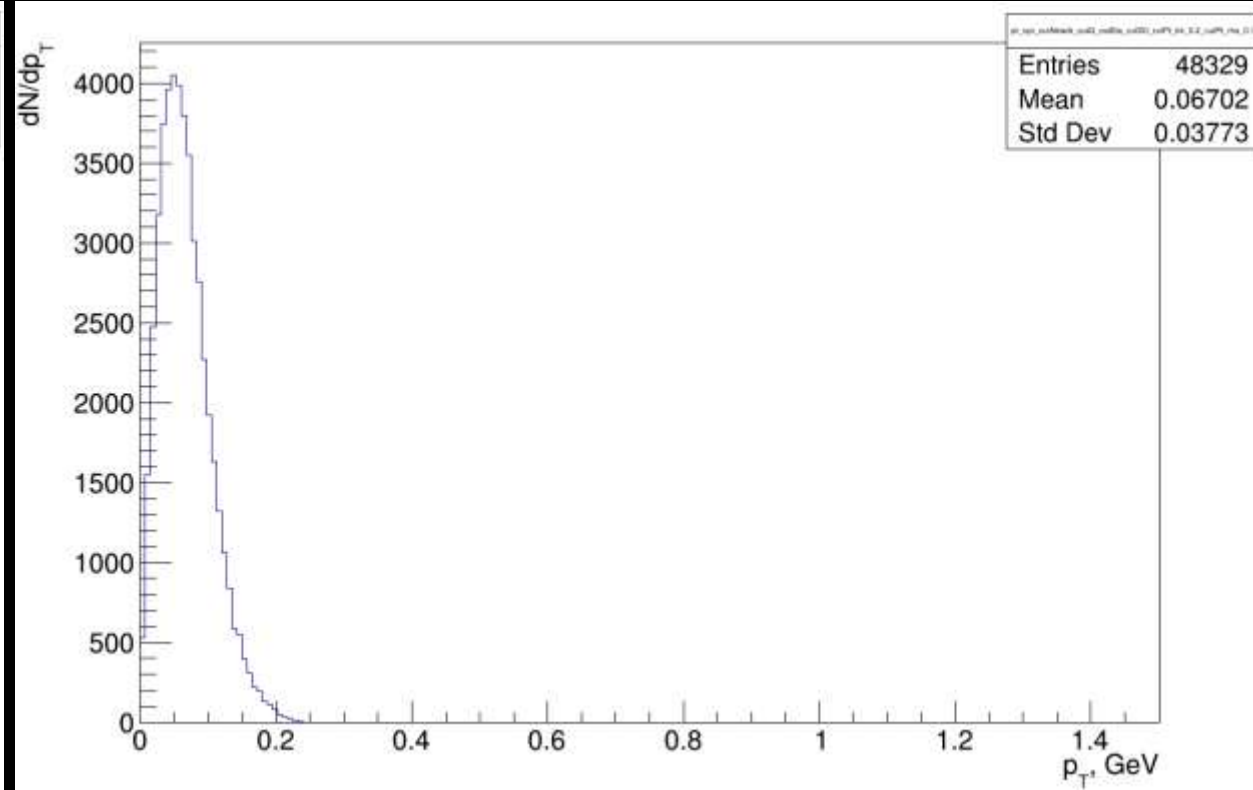
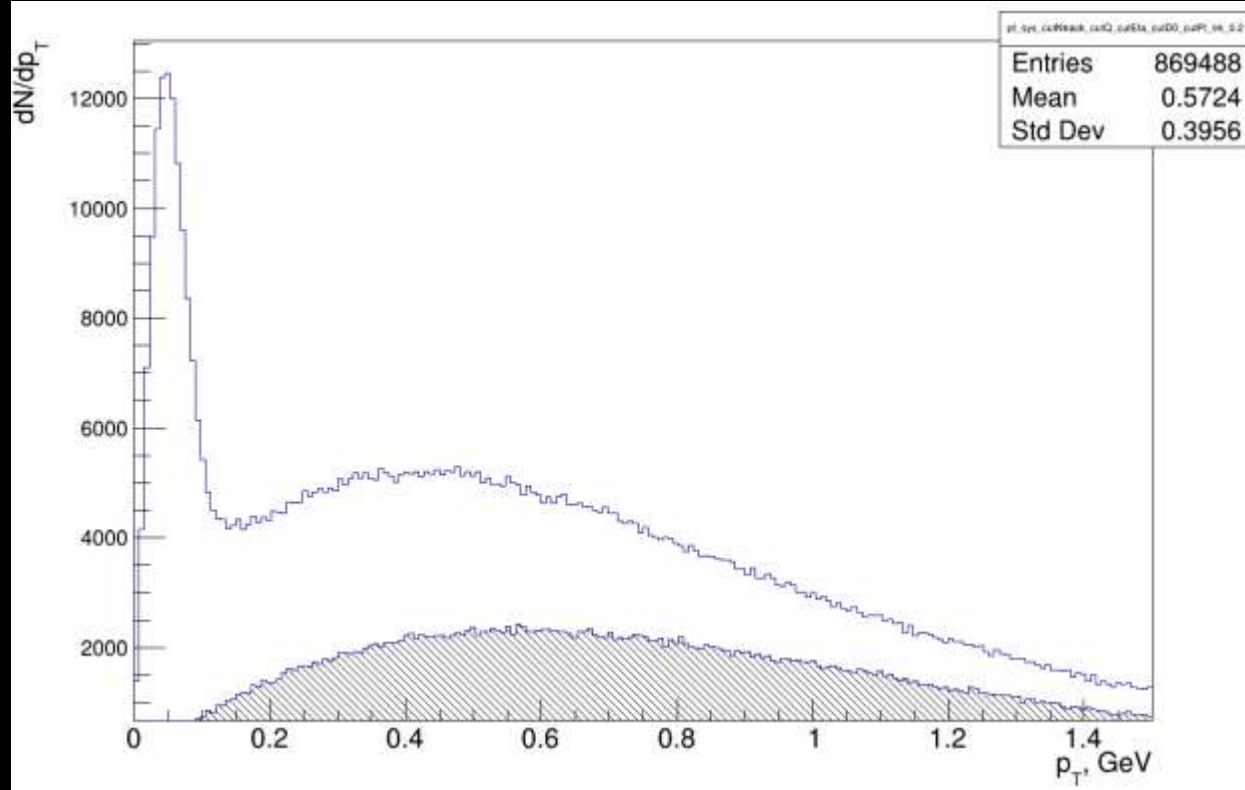
Распределение по  $d_0$  трека



Ограничения:  $\sum Q = 0$ ,  $N^{track} = 4$ ,  $n^{pixel} \geq 1$ ,  $n^{SCT} \geq 2$

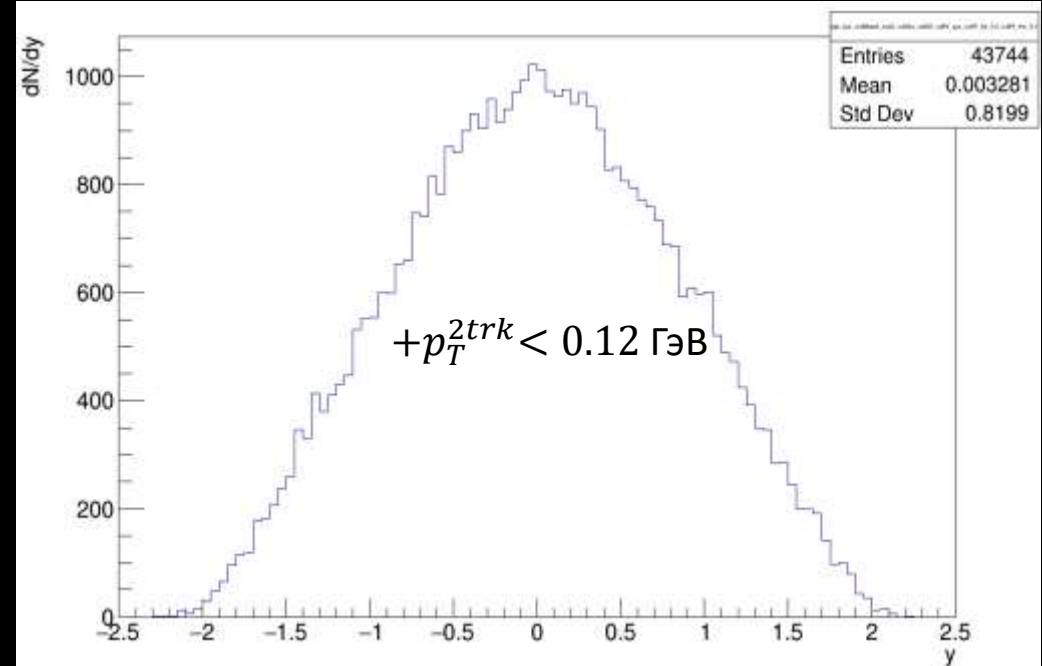
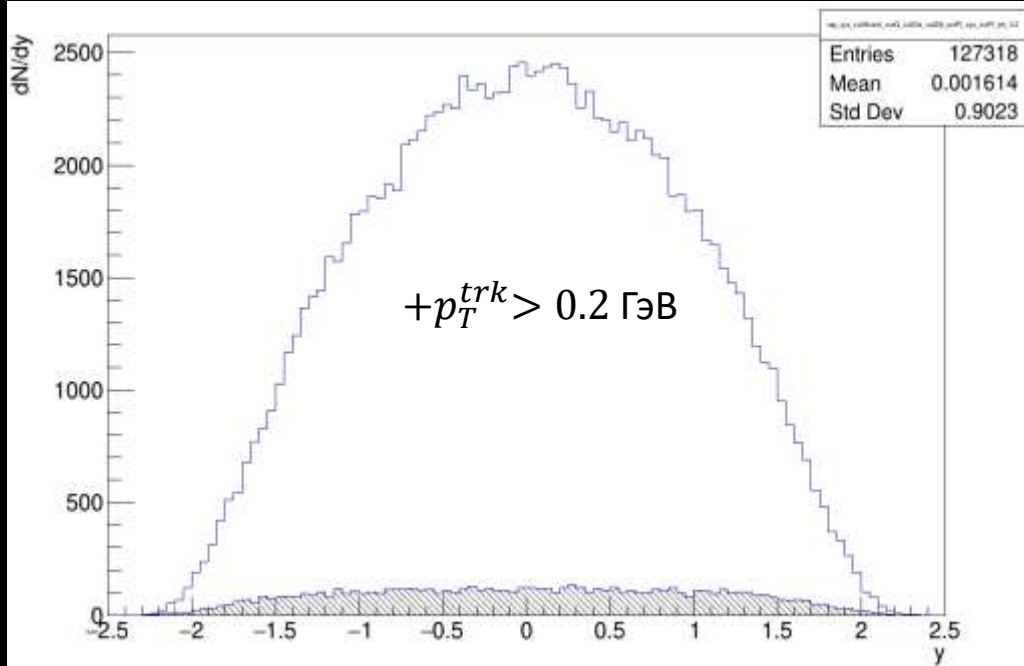
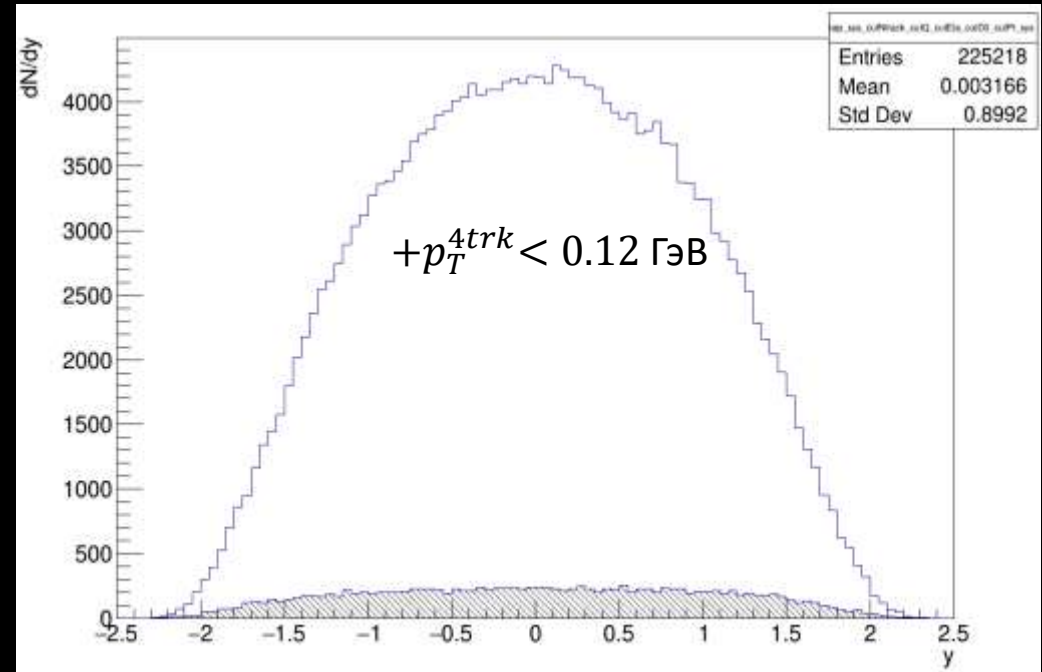
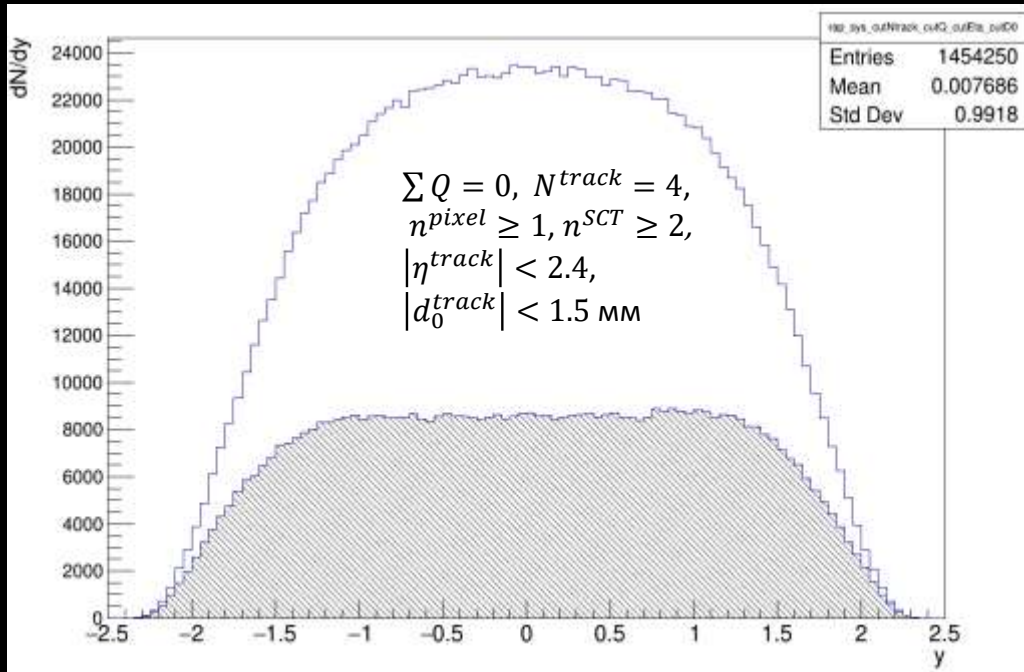


# Распределение по поперечному импульсу системы четырех заряженных пионов

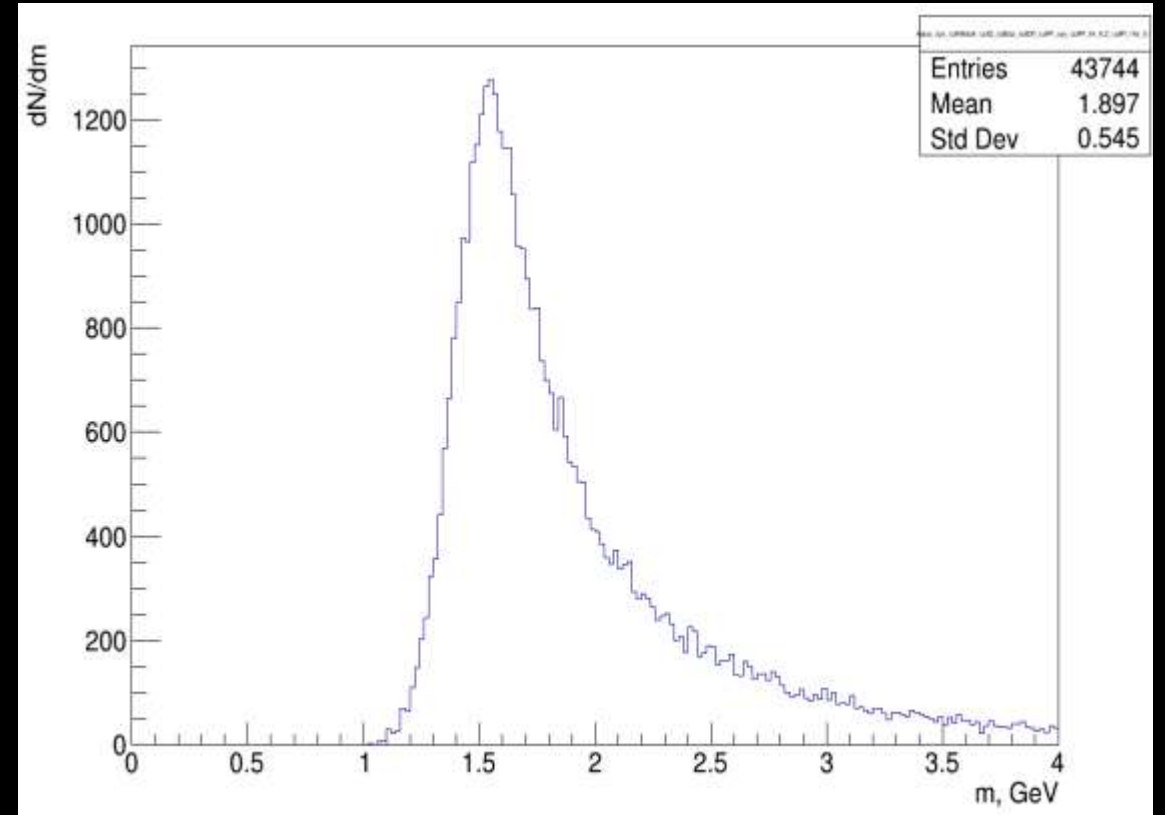
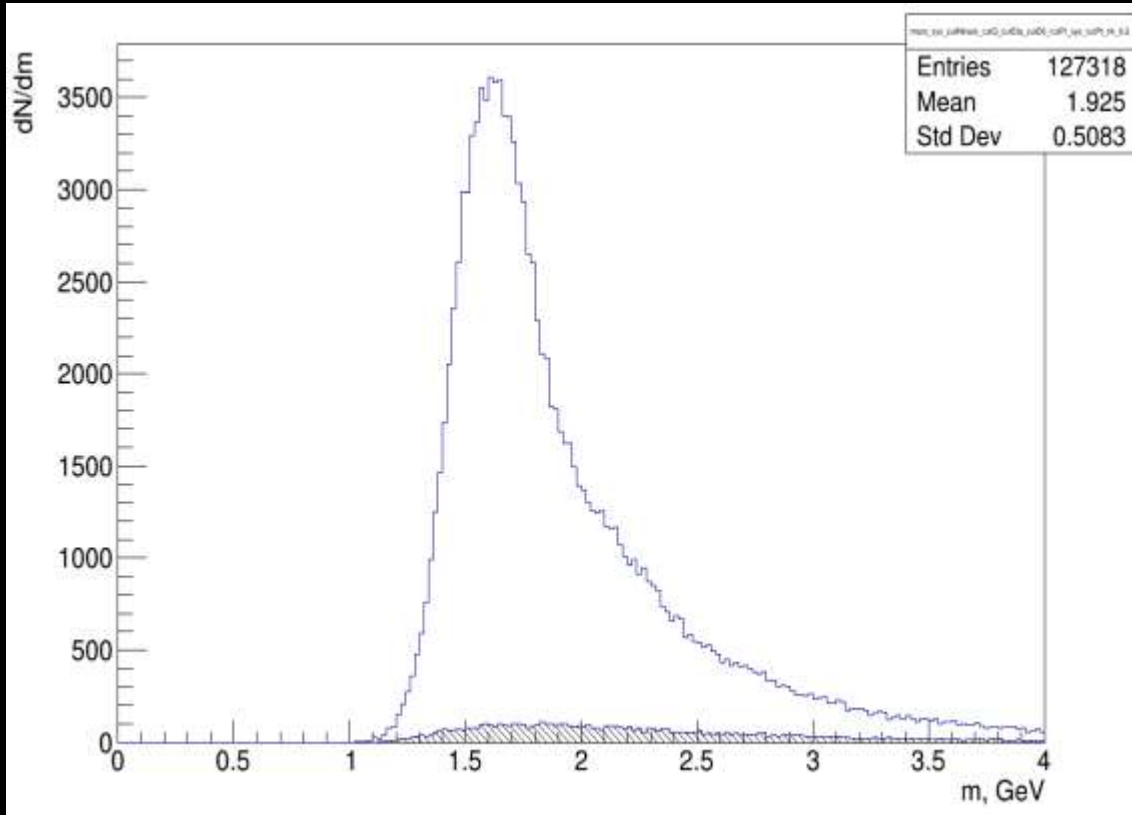


Ограничения:  $\sum Q = 0$ ,  $N^{track} = 4$ ,  $n^{pixel} \geq 1$ ,  $n^{SCT} \geq 2$ ,  $|\eta^{track}| < 2.4$ ,  $|d_0^{track}| < 1.5$  мм,  $p_T^{trk} > 0.2$  ГэВ,  $+p_T^{2trk} < 0.12$  ГэВ

# Распределения по быстрой системе четырех заряженных пионов



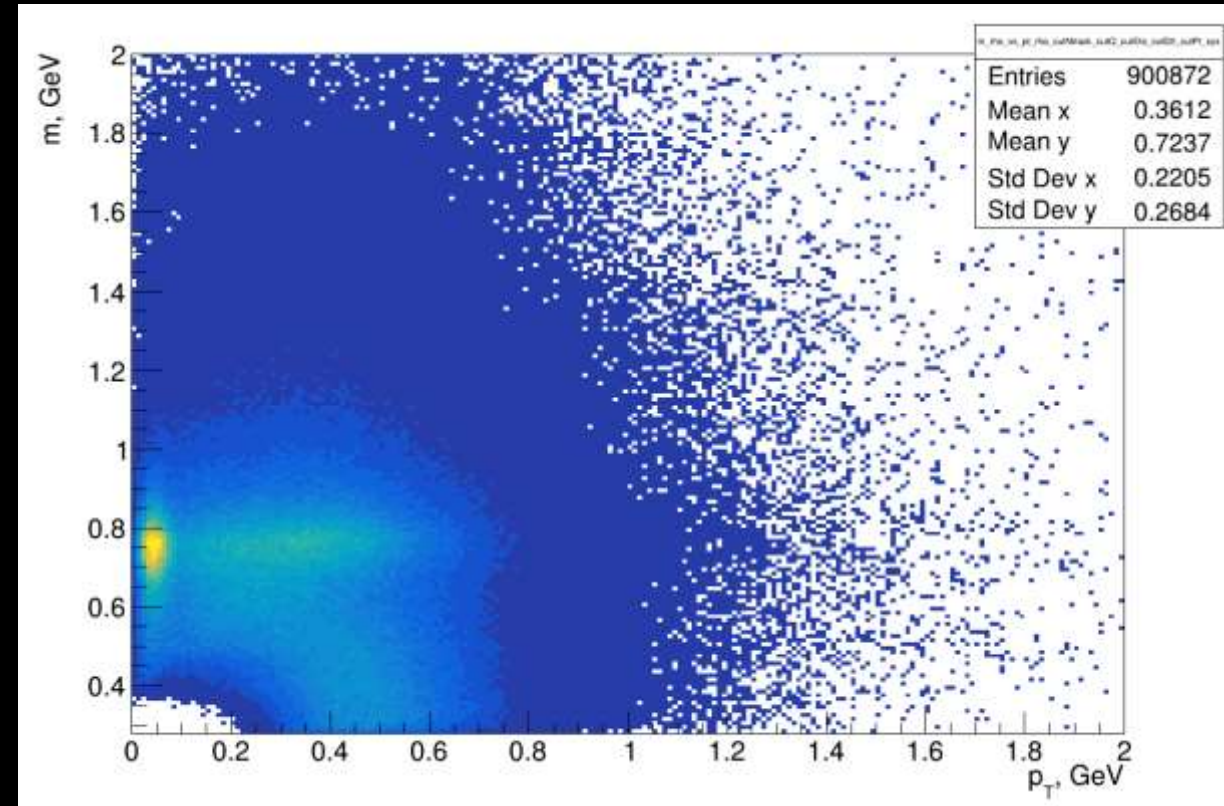
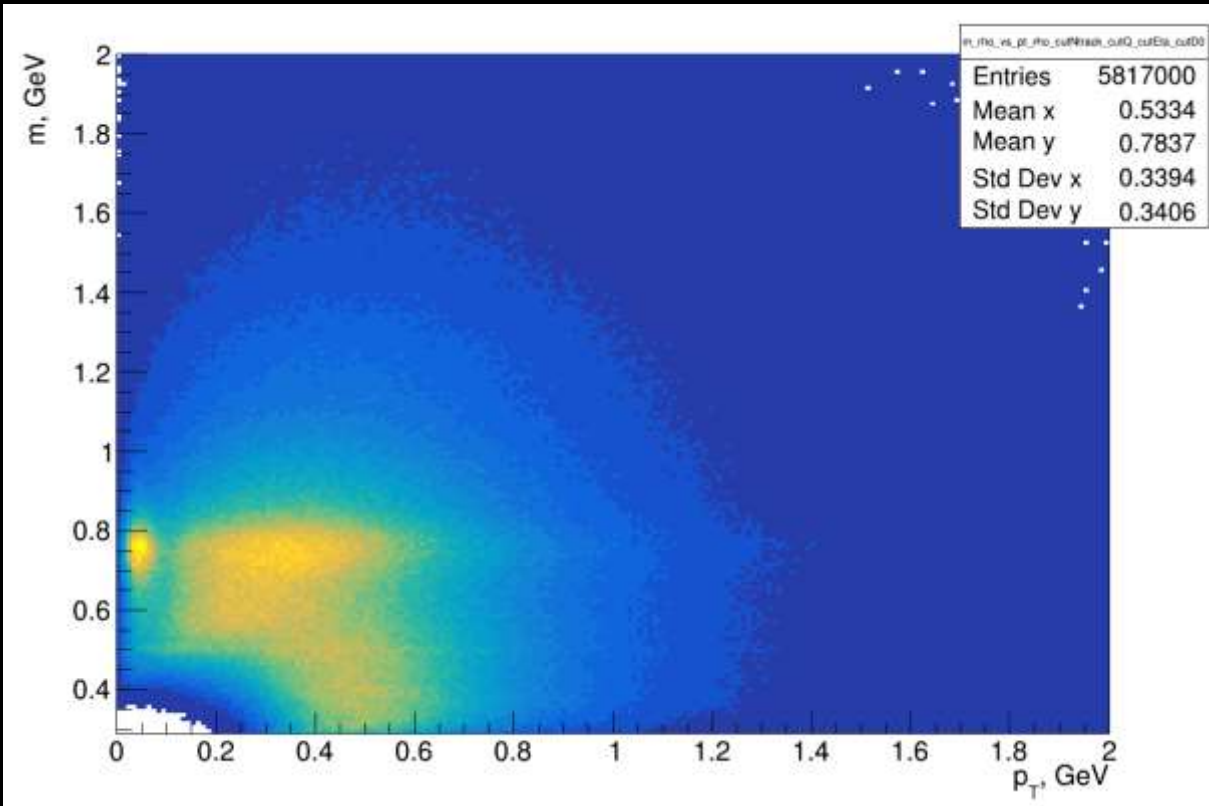
## Распределения по инвариантной массе системы четырех заряженных пионов



Ограничения:  $\sum Q = 0$ ,  $N^{track} = 4$ ,  $n^{pixel} \geq 1$ ,  $n^{SCT} \geq 2$ ,  
 $|\eta^{track}| < 2.4$ ,  $|d_0^{track}| < 1.5$  мм,  $p_T^{4trk} < 0.12$  ГэВ,  $p_T^{trk} > 0.2$  ГэВ

$+p_T^{2trk} < 0.12$  ГэВ

# Двумерные распределения инвариантной массы от поперечного импульса для системы двух заряженных пионов



Ограничения:  $\sum Q = 0$ ,  $N^{track} = 4$ ,  $n^{pixel} \geq 1$ ,  $n^{SCT} \geq 2$ ,  
 $|\eta^{track}| < 2.4$ ,  $|d_0^{track}| < 1.5$  мм

$+p_T^{4trk} < 0.12$  ГэВ