

# Процессы рождения трех массивных векторных бозонов в соударениях протонов.

Фадееенко Б.А., Кочергин И.А., Смирнова Л.Н.

Ломоносовские чтения 2023

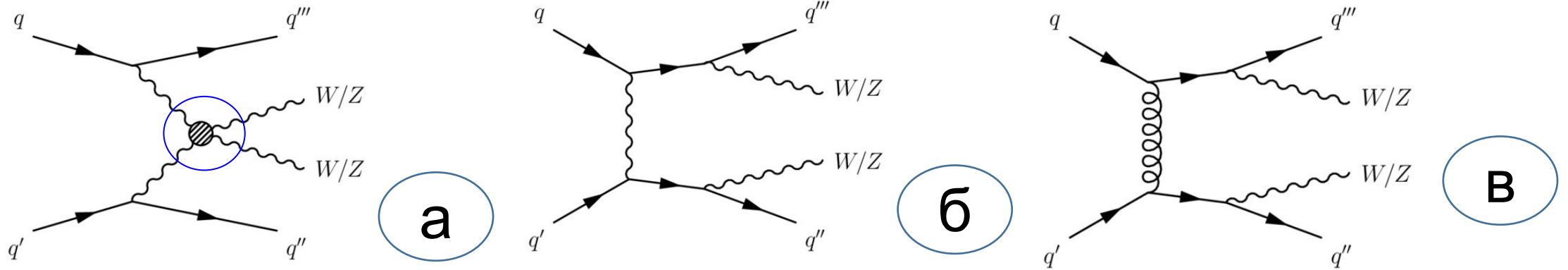
# Роль процессов рождения $W$ и $Z$ бозонов в $pp$ соударениях

- В протонных соударениях при энергии 13 ТэВ зарегистрировано свыше  $10^9$  лептонных распадов тяжелых векторных бозонов  $W$  и порядка  $10^8$  лептонных распадов  $Z$
- Измерение одночастичных инклюзивных сечений рождения  $W$  и  $Z$  позволяет определить такие параметры электрослабых взаимодействий, как: масса  $W$  бозона,  $\sin^2\theta_W$ , константы связи  $W, Z$  бозонов с кварками, величину  $\alpha_s$  и другие
- Эти измерения позволяют определить структурную функцию протона в новой области параметров в процессах  $q\bar{q} \rightarrow Z$ ,  $q\bar{q}' \rightarrow W$  и с участием начальных глюонов.

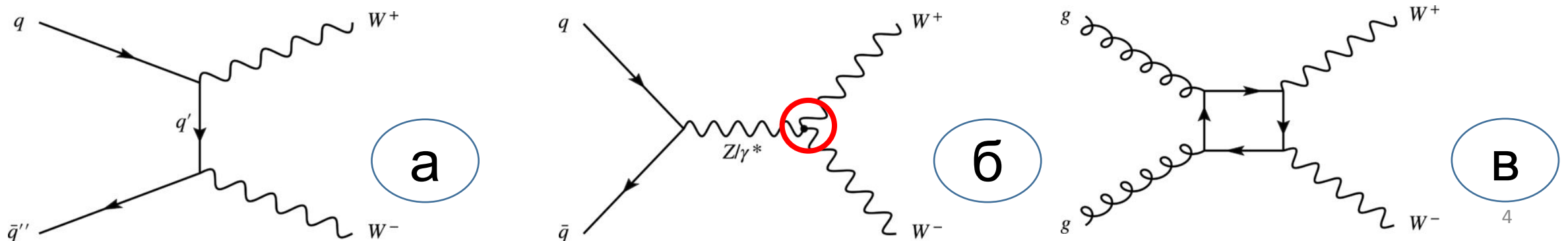
# Процессы рождения $W$ и $Z$ в сопровождении струй и пар тяжелых векторных бозонов

- Большое количество  $W$  и  $Z$  позволяет измерять более сложные процессы:
  - рождение одиночных  $W$  и  $Z$  в сопровождении струй адронов,
  - рождение пар  $VV$  ( $WW$ ,  $WZ$ ,  $ZZ$ )
  - рождение пар  $VV$  в сопровождении струй адронов
- Измеряются сечения электрослабых процессов  $EW$  и отдельно КХД процессов
- В таких процессах определяется сила самодействия  $V$  бозонов, или значения констант связи  $W$  и  $Z$  в диаграммах:

Диаграммы рождения пар  $VV$  в электрослабых процессах :  
 $VV$  рассеяния (а) и без  $VV$  рассеяния (б) и процессах КХД (в)  
 (1905.07714)

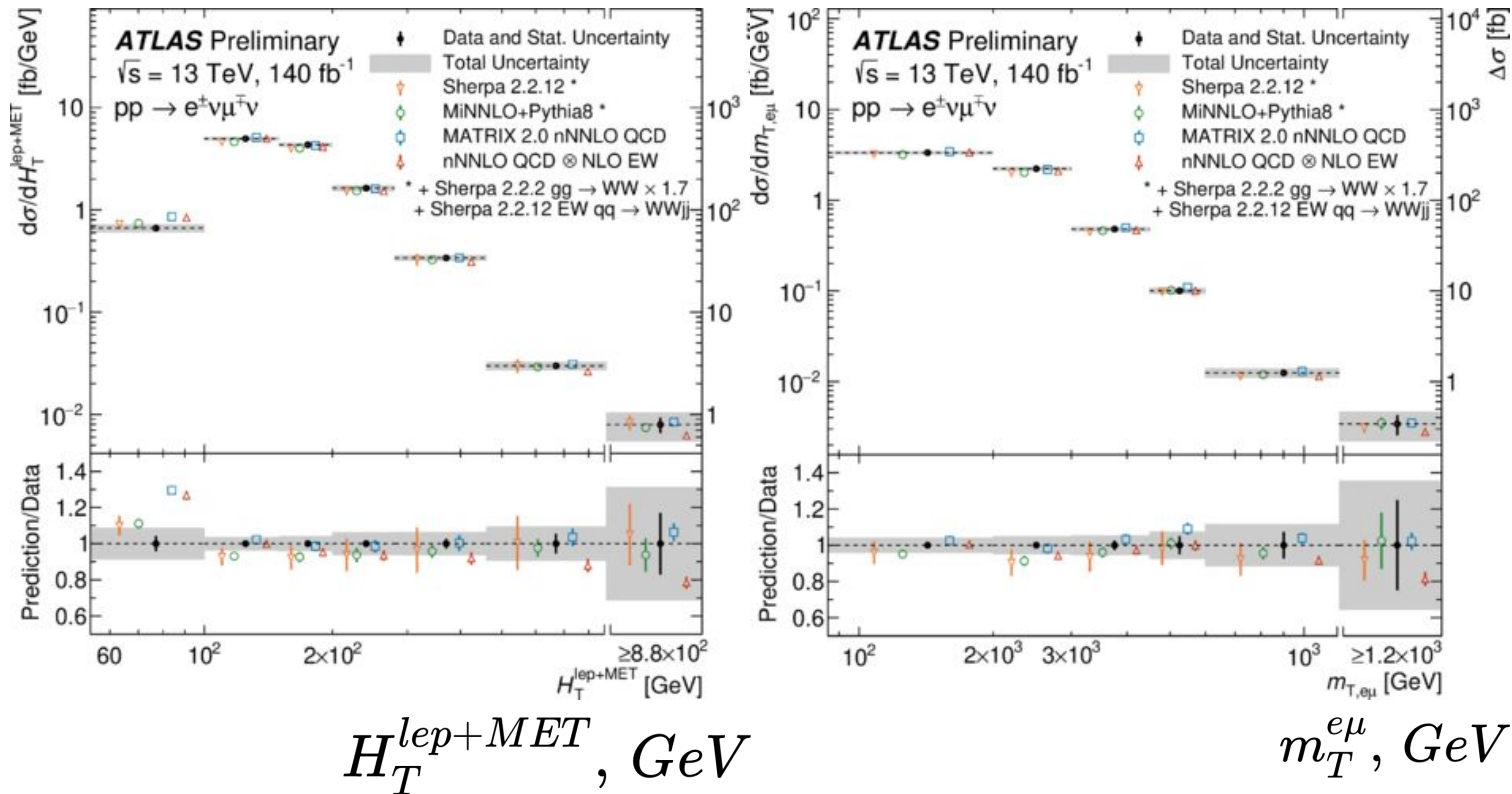


Диаграммы инклюзивного образования  $WW$  пар в  $pp$   
 взаимодействиях путем обмена в t-канале (а), s-канале (б) и  
 взаимодействия глюонов (в)



# Дифференциальные сечения пар WW при 13 ТэВ

(ATLAS-CONF-2023-012) по  $H_T$  и  $m_{T,e\mu}$



$pp \rightarrow WW \rightarrow e^{\pm} \nu \mu^{\mp} \nu$   
 $\sigma_{\text{fid}} = 707 \pm 7 \pm 20 \text{ fb}$   
 $\sigma_{\text{tot}} = 127 \pm 4 \text{ pb}$

В согласии с СМ

# Спектры для событий с парами $WW$ и $\geq 1$ струй

JHEP 06 (2021) 003

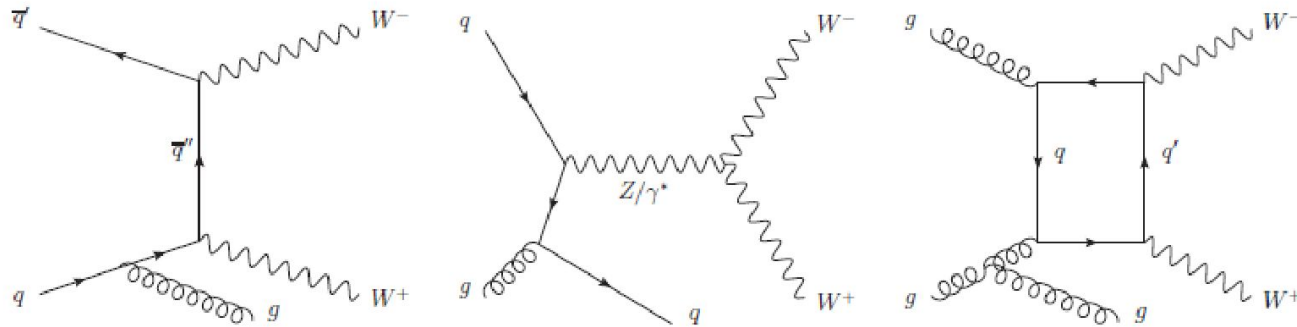
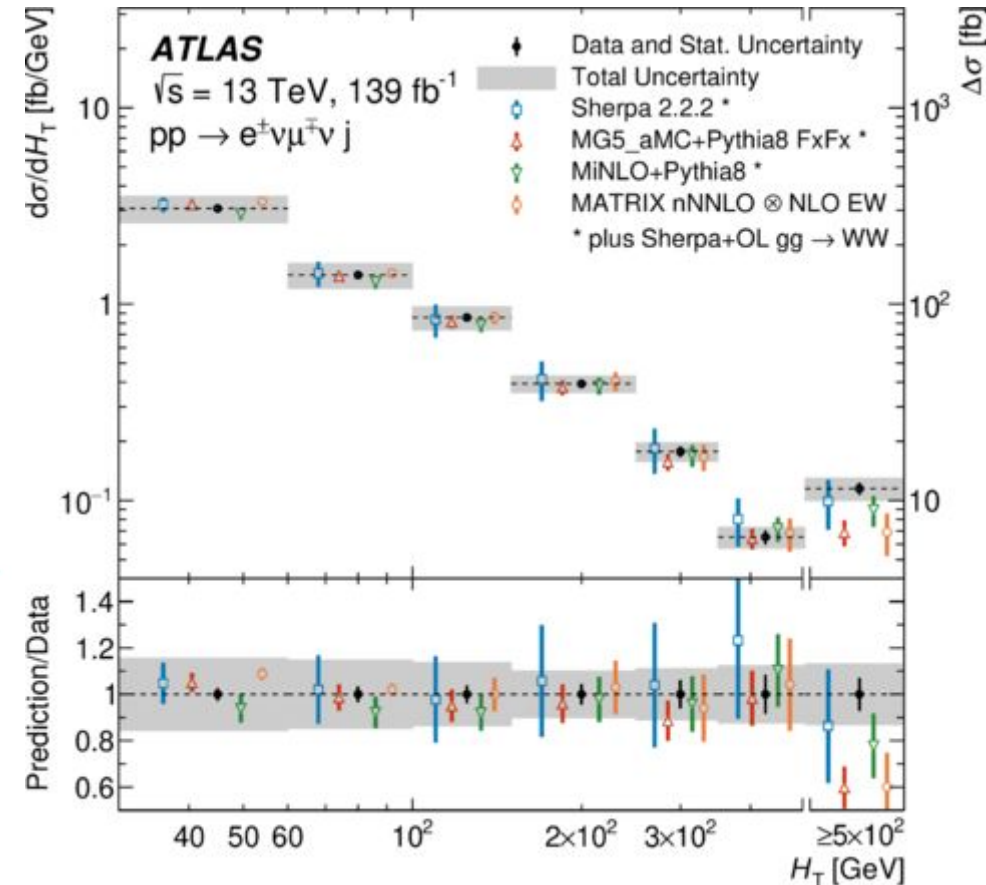


Figure 1: Feynman diagrams for the production of a  $W^+W^-$  boson pair in association with a jet.

The measured fiducial cross-section for  $WW$ +jets production, with  $WW \rightarrow e^\pm \nu \mu^\mp \bar{\nu}$ , at  $\sqrt{s} = 13$  TeV, for the phase space defined in Table 5 is

$$\sigma_{\text{fid}} = 258 \pm 4 \text{ (stat.)} \pm 25 \text{ (syst.) fb,}$$

with a total uncertainty of 10%. In Figure 5, the measured result is compared with various predictions for  $WW$ +jets production, and good agreement is found. Differential fiducial cross-sections are presented in Figures 6 to 8. Figure 9 displays distributions in a phase space that additionally requires a jet with a transverse momentum of at least 200 GeV.



$$L_{\text{int}} = 139 \text{ fb}^{-1}$$

# Диаграммы процессов рождения трех $WWW$ бозонов

- Процессы рождения  $WWW$  дают информацию о силе самодействия  $W$  бозонов в Стандартной модели (СМ) через 3-х и 4-х частичные вершины диаграмм

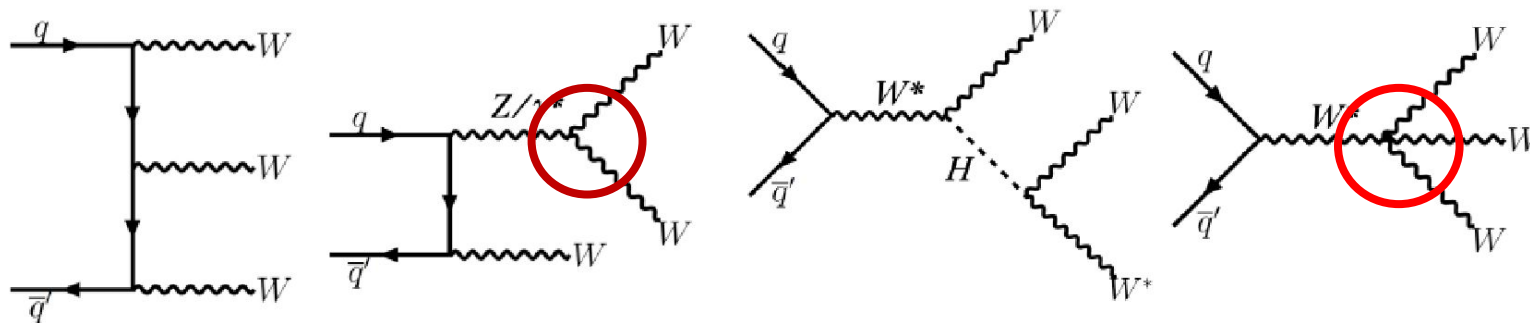


Figure 1: Representative Feynman diagrams at LO for the production of three massive  $W$  bosons, including diagrams sensitive to triple and quartic gauge couplings.

- Актуальность измерения рождения  $WWW$  бозонов определяется малыми сечениями этих процессов
- Калибровочные константы этих процессов могут показать вклад новой физики за пределами СМ

# Что измерено

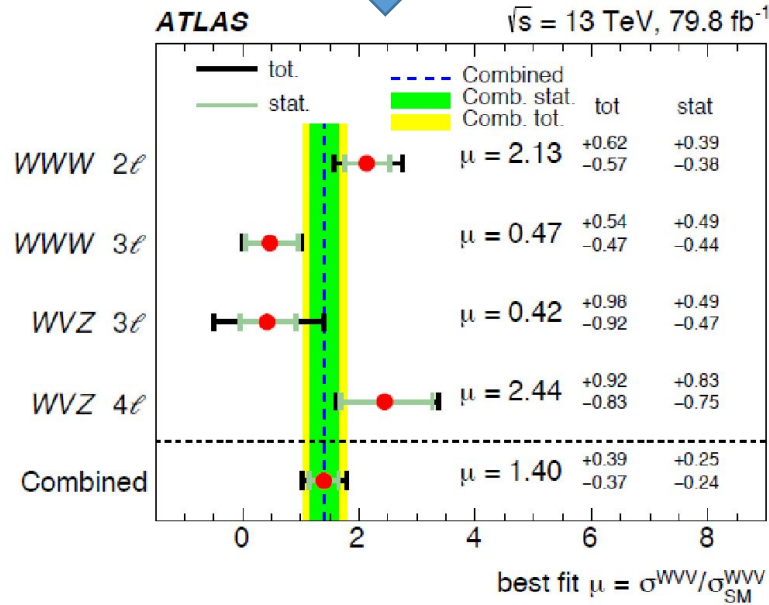


Table 1: Number of events for postfit signal, background and data observed in the 2 $\ell$  and 3 $\ell$  SRs. The uncertainty shown include both the statistical and systematic contributions.

	$e^\pm e^\pm$	$e^\pm \mu^\pm$	$\mu^\pm \mu^\pm$	3 $\ell$
WWW signal	$28.4 \pm 4.3$	$124 \pm 19$	$82 \pm 12$	$34.8 \pm 5.2$
WZ	$81.1 \pm 5.7$	$346 \pm 22$	$170 \pm 10$	$16.4 \pm 1.5$
Charge-flip	$31.1 \pm 7.3$	$19 \pm 5$	-	$1.7 \pm 0.4$
$\gamma$ conversions	$60.8 \pm 8.5$	$139 \pm 15$	-	$1.5 \pm 0.1$
Nonprompt	$17.0 \pm 4.0$	$145 \pm 23$	$104 \pm 21$	$26.6 \pm 2.9$
Other	$22.3 \pm 2.4$	$100 \pm 10$	$58 \pm 6$	$8.0 \pm 0.9$
Total predicted	$241 \pm 11$	$873 \pm 22$	$415 \pm 17$	$89.0 \pm 5.4$
Data	242	885	418	79

In conclusion, the first observation of the  $pp \rightarrow WWW$  process is reported by the ATLAS experiment at the LHC. Events with two same-sign charged leptons in association with at least two jets, as well as events with three charged leptons and no same-flavor opposite-sign lepton pairs, were selected from  $139 \text{ fb}^{-1}$  of 13 TeV  $pp$  collisions. Two BDTs were trained to improve the separation between signal and background. The SM background-only hypothesis is rejected with an observed (expected) significance of 8.0 (5.4) standard deviations. The inclusive  $pp \rightarrow WWW$  production cross section is measured to be  $820 \pm 100$  (stat)  $\pm 80$  (syst) fb, approximately 2.6 standard deviations from the predicted cross section of  $511 \pm 18$  fb calculated at NLO QCD and LO electroweak accuracy.

$$\sigma_{pp \rightarrow WWW} = 820 \pm 100 \pm 80 \text{ fb}$$

$$\sigma_{SM} = 511 \pm 18 \text{ fb}$$

In conclusion, a search for the joint production of three massive vector bosons ( $W$  or  $Z$ ) in proton–proton collisions using  $79.8 \text{ fb}^{-1}$  of data at  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$  collected by the ATLAS detector at the LHC, is presented. Events with two, three or four reconstructed electrons or muons are analysed. Evidence for the production of three massive vector bosons is observed with a combined significance of 4.1 standard deviations, where the expectation is 3.1 standard deviations. The measured production cross sections are  $\sigma_{WWW} = 0.65^{+0.23}_{-0.21}$  pb, and  $\sigma_{WVZ} = 0.55^{+0.21}_{-0.19}$  pb, in agreement with the Standard Model predictions.



# Анализ событий открытых данных ATLAS с тремя лептонами с высокими $p_T$ в конечном состоянии $pp$ соударений

1. Наличие ровно 3 лептонов.
2.  $p_t > 20$  ГэВ,  $p_{t_{lead}} > 25$  ГэВ,  $E_t^{miss} > 30$  ГэВ,  $m_t^W > 30$  ГэВ
3.  $|\eta| < 2.47$  (2.5), исключая электроны из  $1.37 < |\eta| < 1.52$
4.  $\left| \frac{d_0}{\sigma_{d_0}} \right| < 5$  (3),  $|z_0 \sin(\theta)| < 0.5$  мм
5.  $\left| \frac{p_{t_{cone30}}}{p_t} \right| < 0.15$
6.  $\sum q_l = \pm 1$
7. Отсутствие / наличие  $Z$  бозона.

## Характеристики, используемые в анализе

$$|\vec{p}_{t_{ll}}| = \left| \sum_{\nu=1}^3 \vec{p}_{t_{\nu}} \right|; \quad E_t^{\vec{miss}} = - \sum_{i=1}^N \vec{p}_{t_i} = \vec{p}_{t_{\nu\nu}}$$

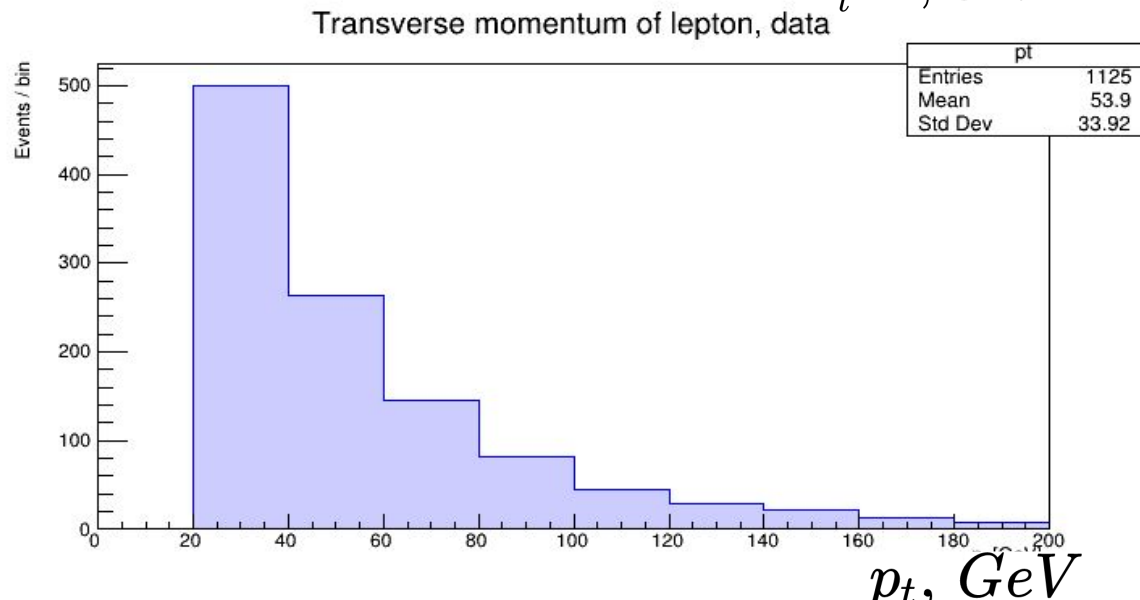
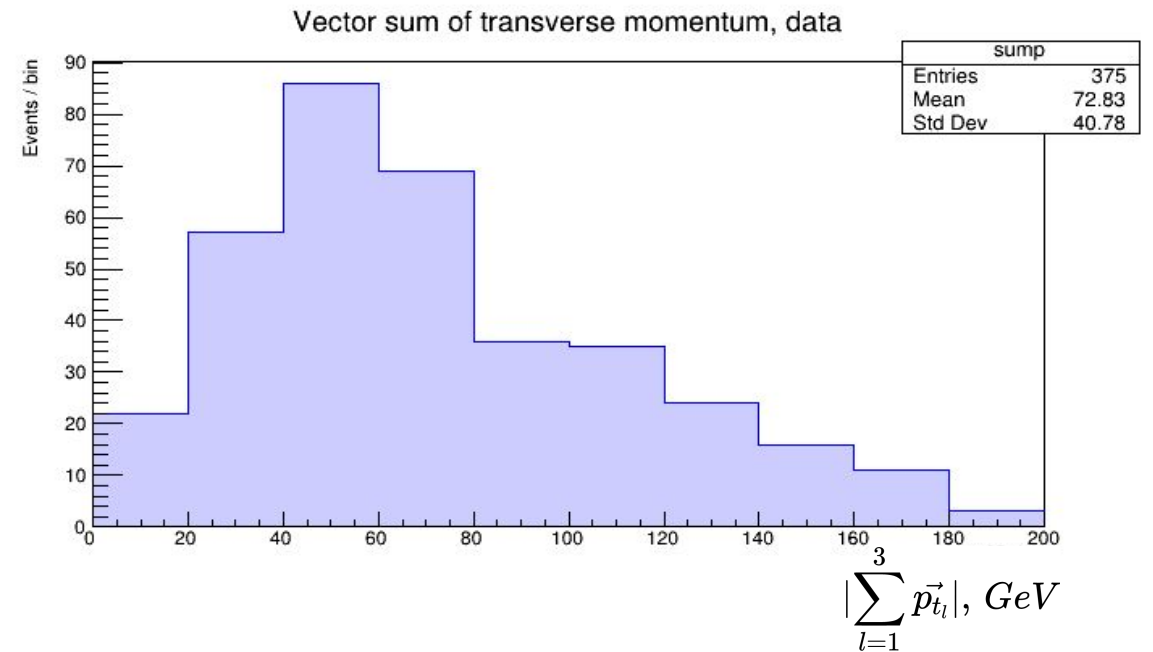
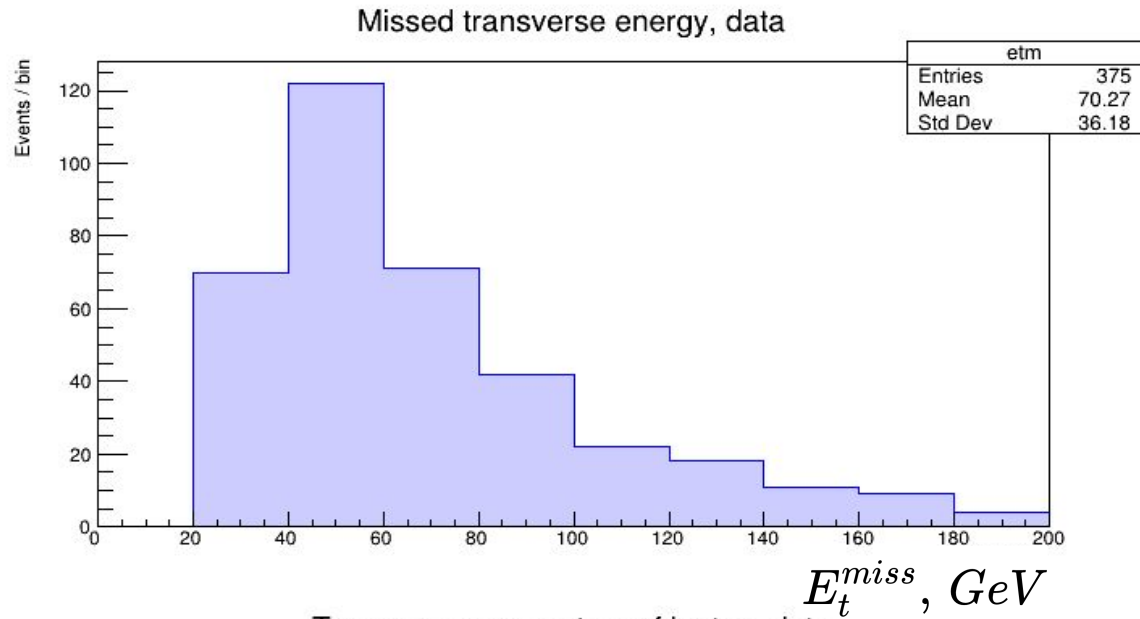
$$H_t = \sum_{\nu=1}^3 |\vec{p}_{t_{\nu}}|$$

$$m_t^{WZ} = \sqrt{\left( \sum_{l=1}^3 p_t^l + E_t^{\vec{miss}} \right)^2 - \left[ \left( \sum_{l=1}^3 p_x^l + E_x^{\vec{miss}} \right)^2 + \left( \sum_{l=1}^3 p_y^l + E_y^{\vec{miss}} \right)^2 \right]}$$

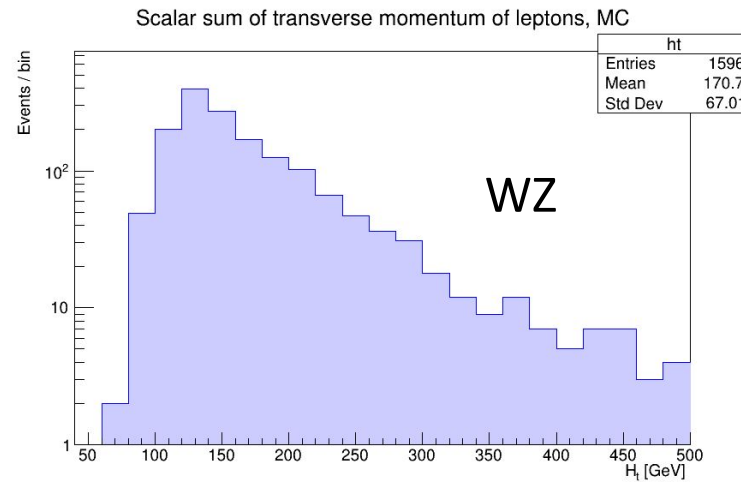
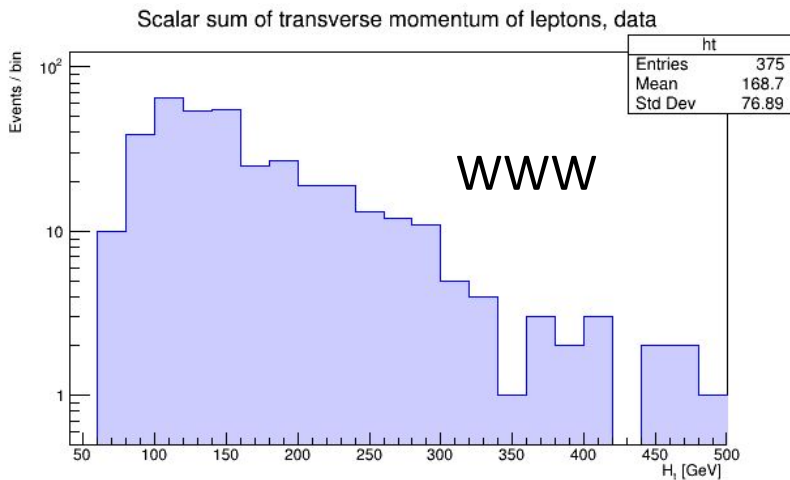
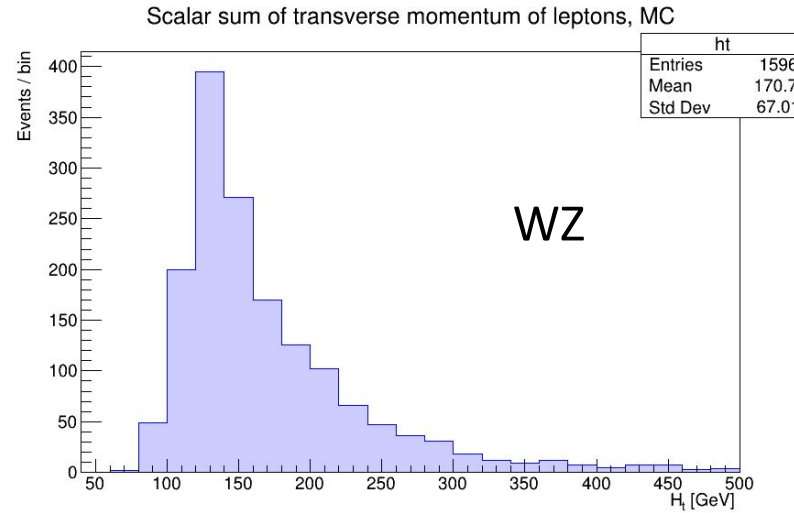
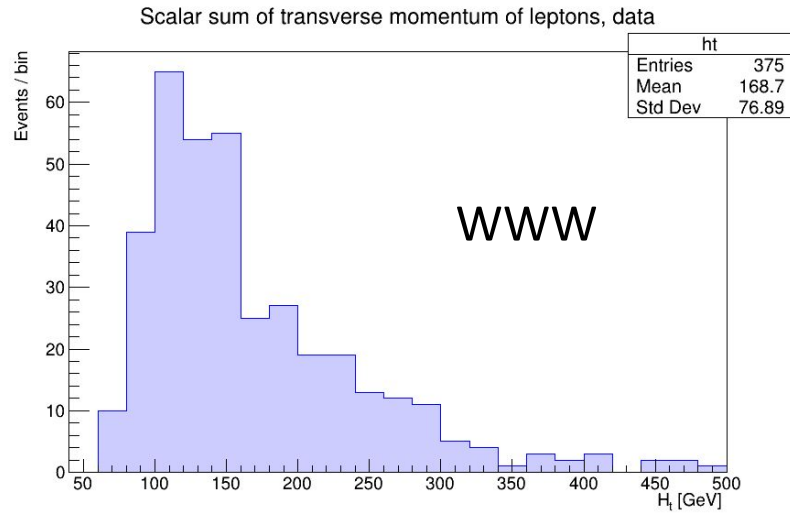
$$m_t^{WWW} = \sqrt{4 \left( \sum_{l=1}^3 p_t^l \right)^2 - \left[ \left( \sum_{l=1}^3 p_x^l + E_x^{\vec{miss}} \right)^2 + \left( \sum_{l=1}^3 p_y^l + E_y^{\vec{miss}} \right)^2 \right]}$$

# Характеристики отобранных кандидатов на события рождения

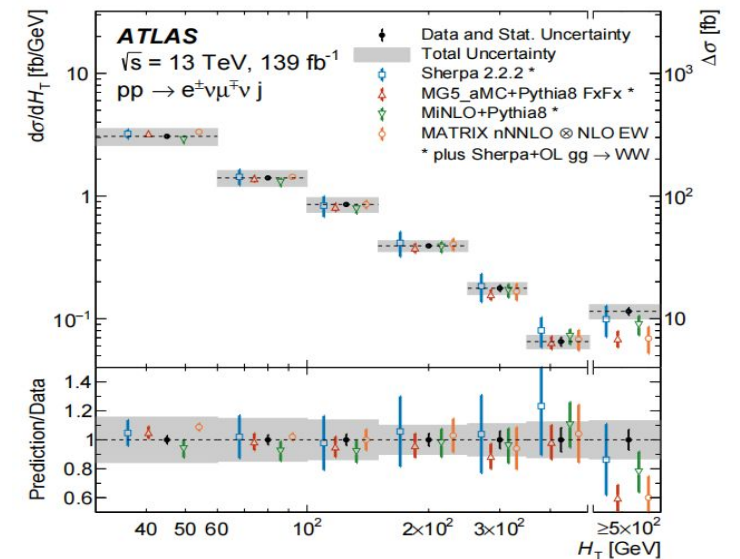
## WWW



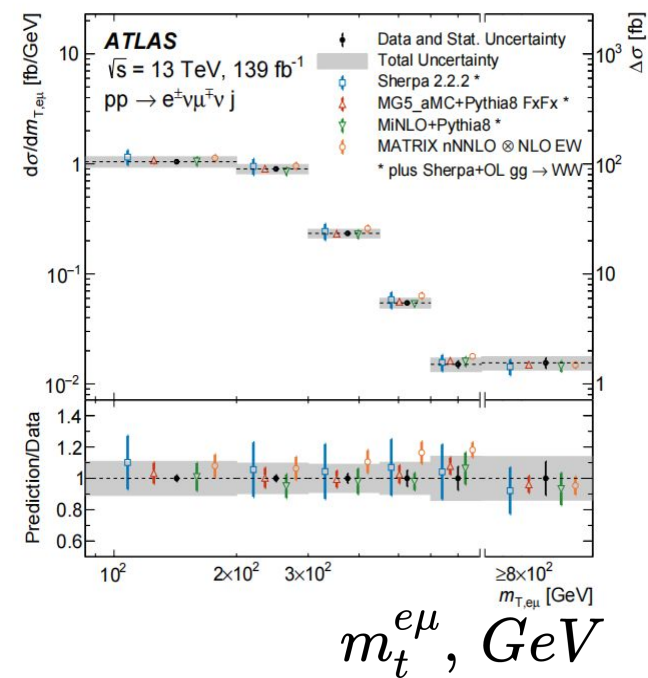
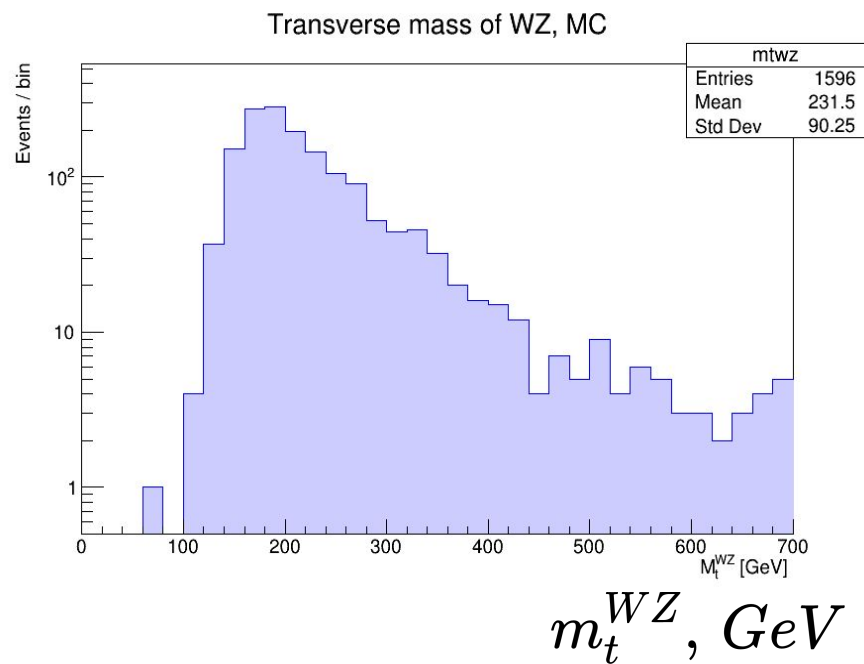
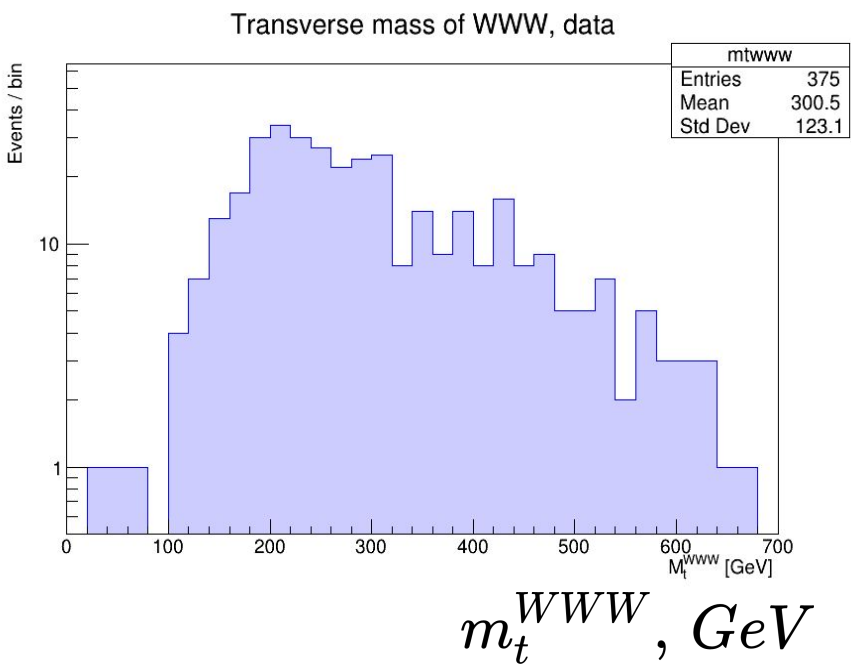
# Распределение $H_T$ в событиях $WW$ , $WZ$ и $WW$ +jet



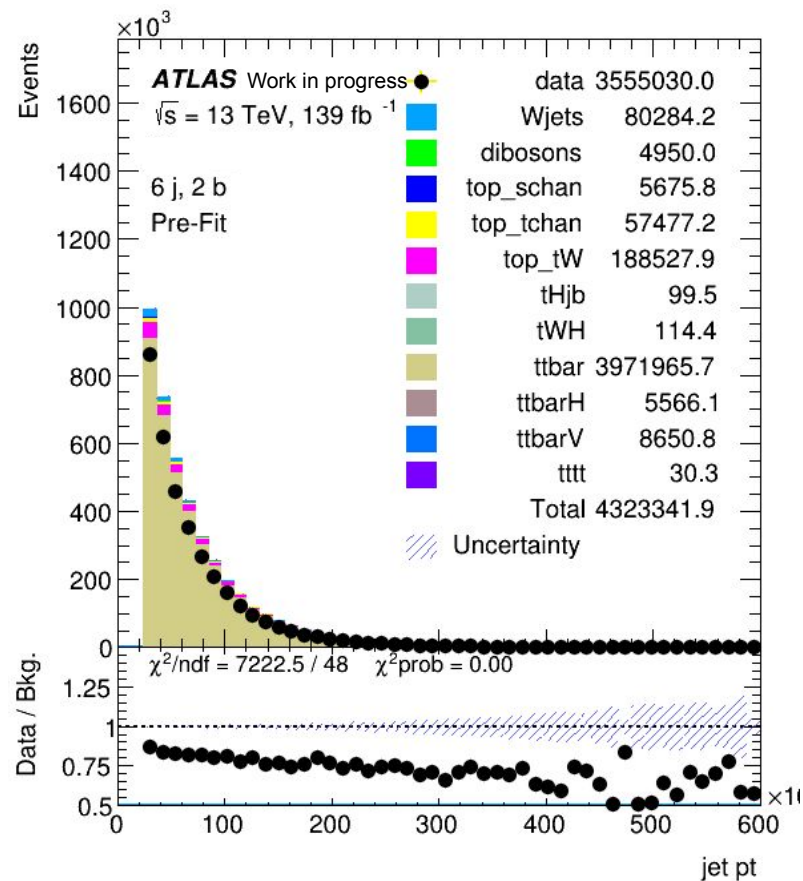
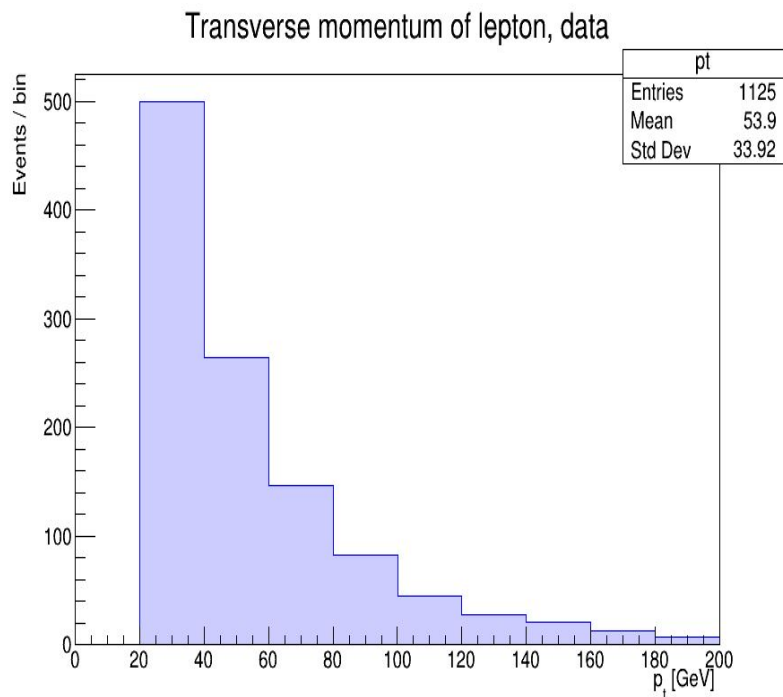
**WW + jet**



# Распределение поперечных масс $m_t$ в событиях $WWW$ , $WZ$ и для двух лептонов в $WW + \text{jet}$



# Распределения струй по рТ в фоновых событиях к рождению WWW

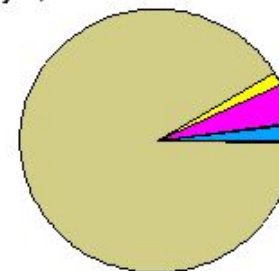


ATLAS Simulation

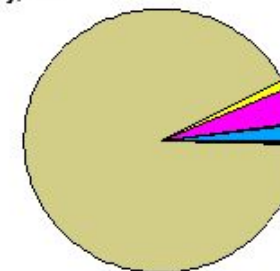
$\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$



5j,2b

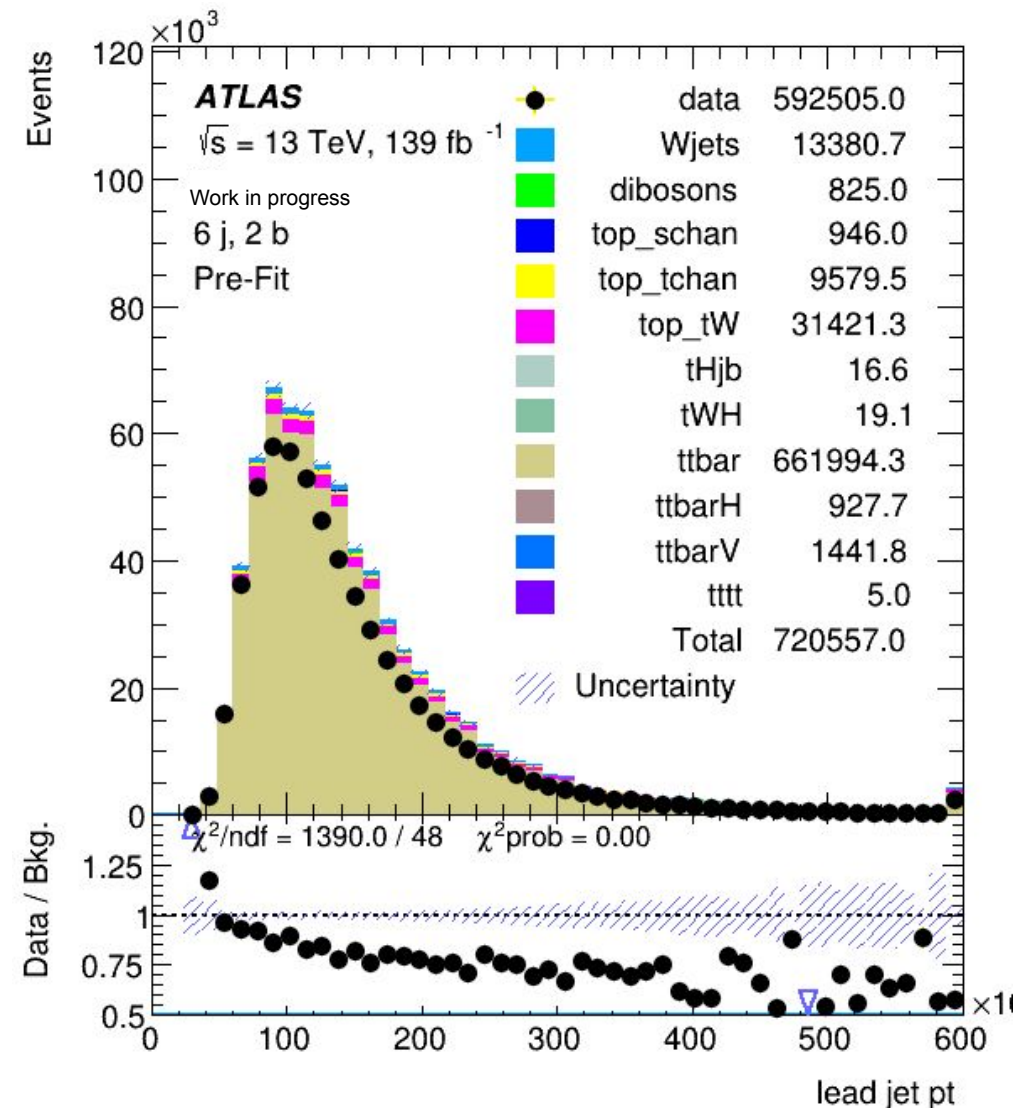
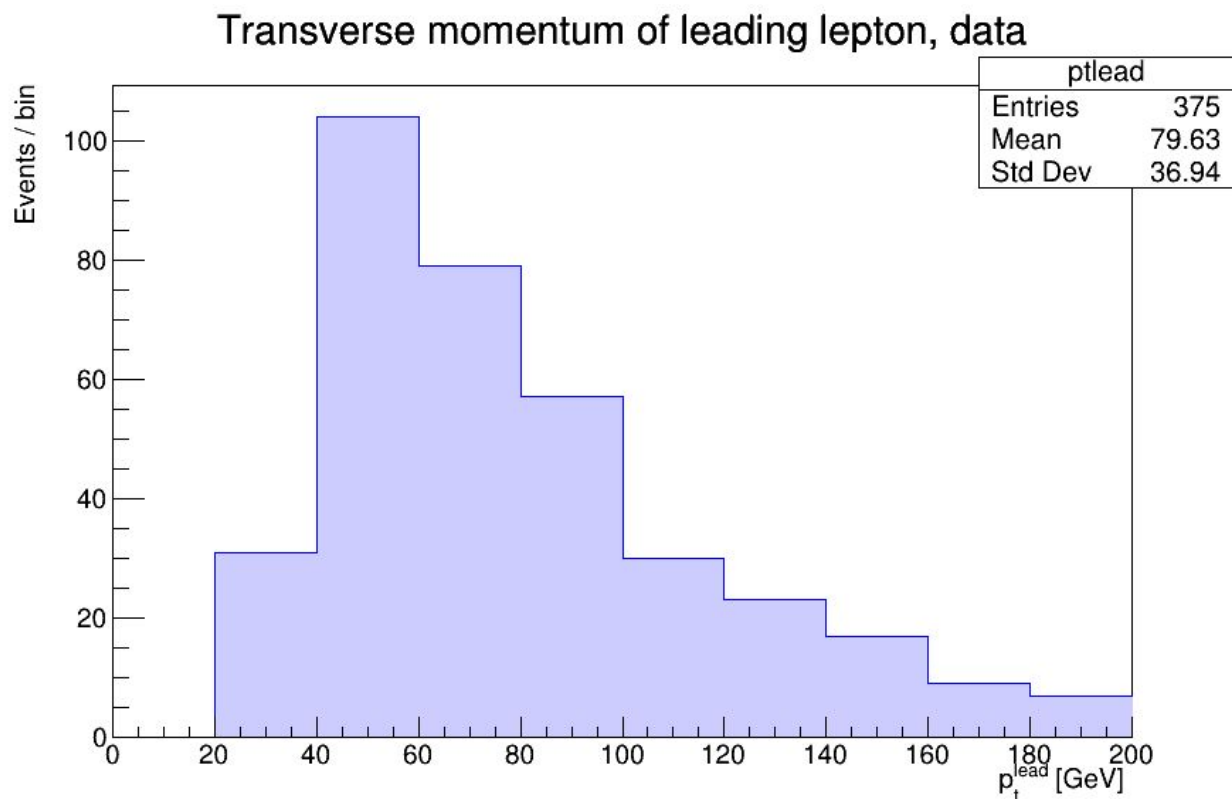


6j,2b

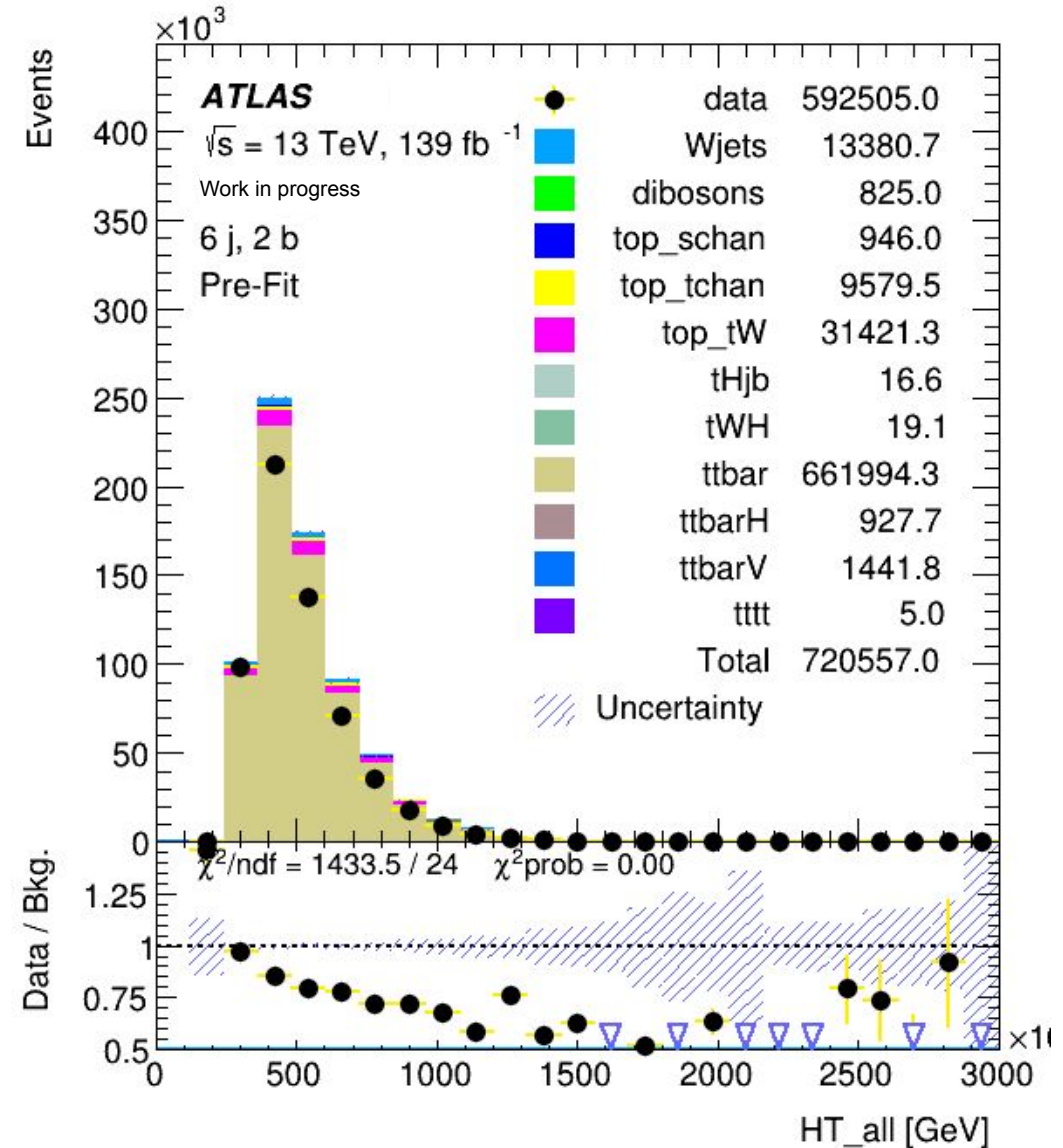
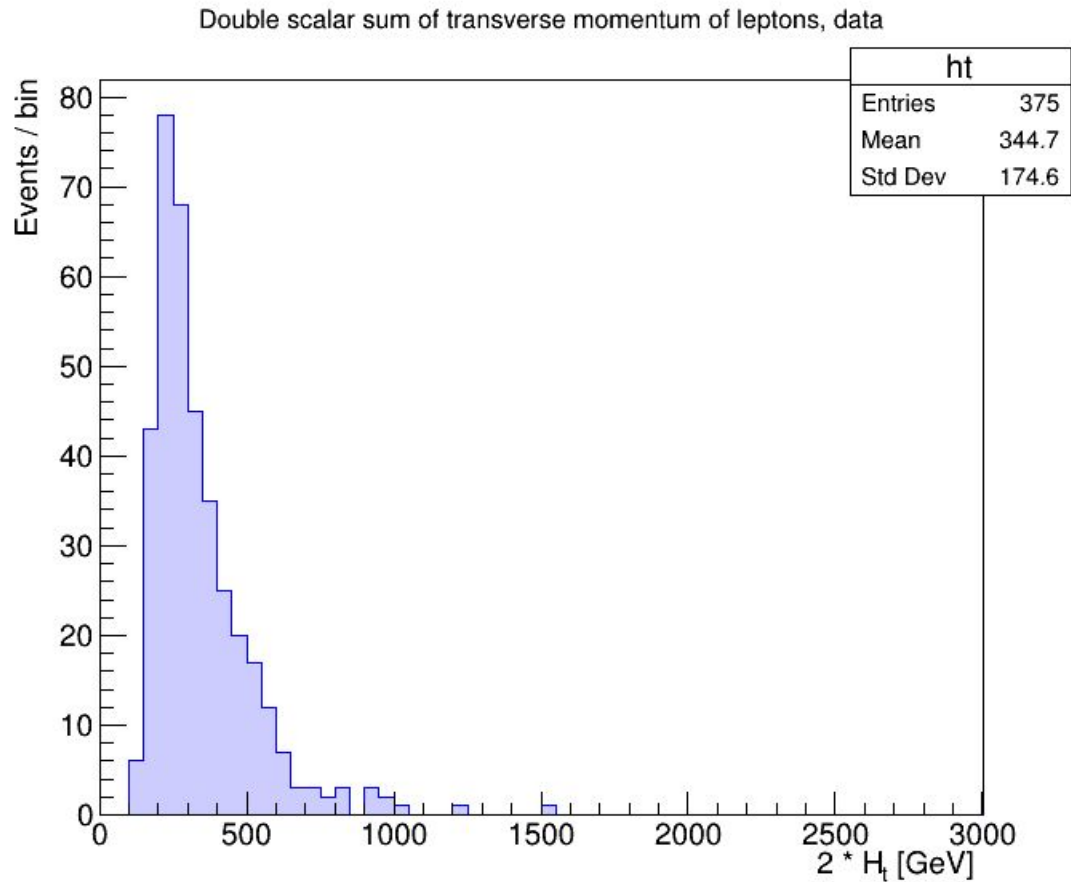


Относительные вклады различных фоновых каналов

# Распределения по рт лидирующих струй в фоновых событиях



# Распределения $H_t$ в фоновых событиях к рождению $WW$ в безнейтринных распадах



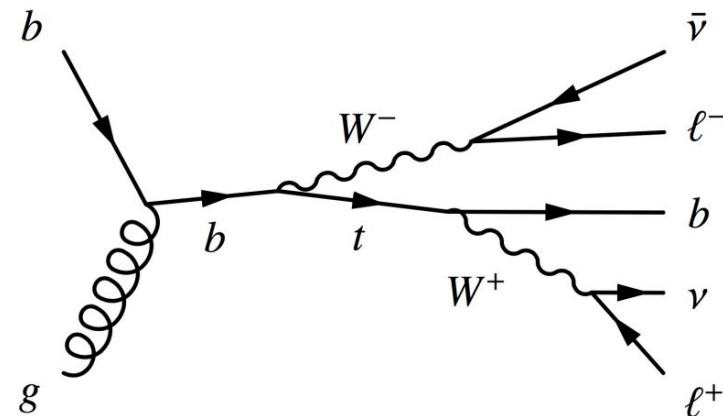


# Зарядовая асимметрия в рождении WWW

Количество событий с разными зарядовыми состояниям

$\Sigma q_l$	-1	+1	$\frac{N_{W^+}}{N_{W^-}}$
$N_{WZ}$	$672 \pm 26$	$924 \pm 30$	$1.375 \pm 0.098$
$N_{WWW}$	$186 \pm 14$	$189 \pm 14$	$1.016 \pm 0.151$
$A_c^{WZ}$	Eur. Phys. J. C (2019) 79:535		$1.47 \pm 0.05$

$$\frac{\sigma_{W^+}}{\sigma_{W^- \text{ incl}}} = 1.295 \pm 0.003 \pm 0.010$$



# Заключение

- Показана актуальность исследования процессов рождения трех массивных векторных  $V$  бозонов в  $pp$  соударениях
- Приведены результаты измерения одиночного и парного рождения  $V$  бозонов, измерения процесса рождения  $WWW$  бозонов в эксперименте ATLAS
- Выполнен анализ событий с тремя лептонами в открытых данных эксперимента ATLAS, кандидатов событий с тремя  $WWW$
- Показано подобие характеристик трех заряженных лептонов и  $E_T^{mis}$  в этих событиях, выполнено сравнение  $p_T$  спектров лептонов, спектров инвариантных масс различных комбинаций частиц, лептонов и  $E_T^{mis}$ , параметра  $H_T$ . Проведен анализ зарядовой асимметрии системы  $WWW$ .