

**Магистерская диссертация  
на тему**

**«Анализ кинематики лептонов и потерянной  
поперечной энергии в распадах бозона хиггса по  
данным второго сеанса Большого адронного  
коллайдера»**

**Выполнил: Мордовец Иван, группа 213М**

**Научный руководитель: Смирнова Л.Н. и Цукерман И.И.**

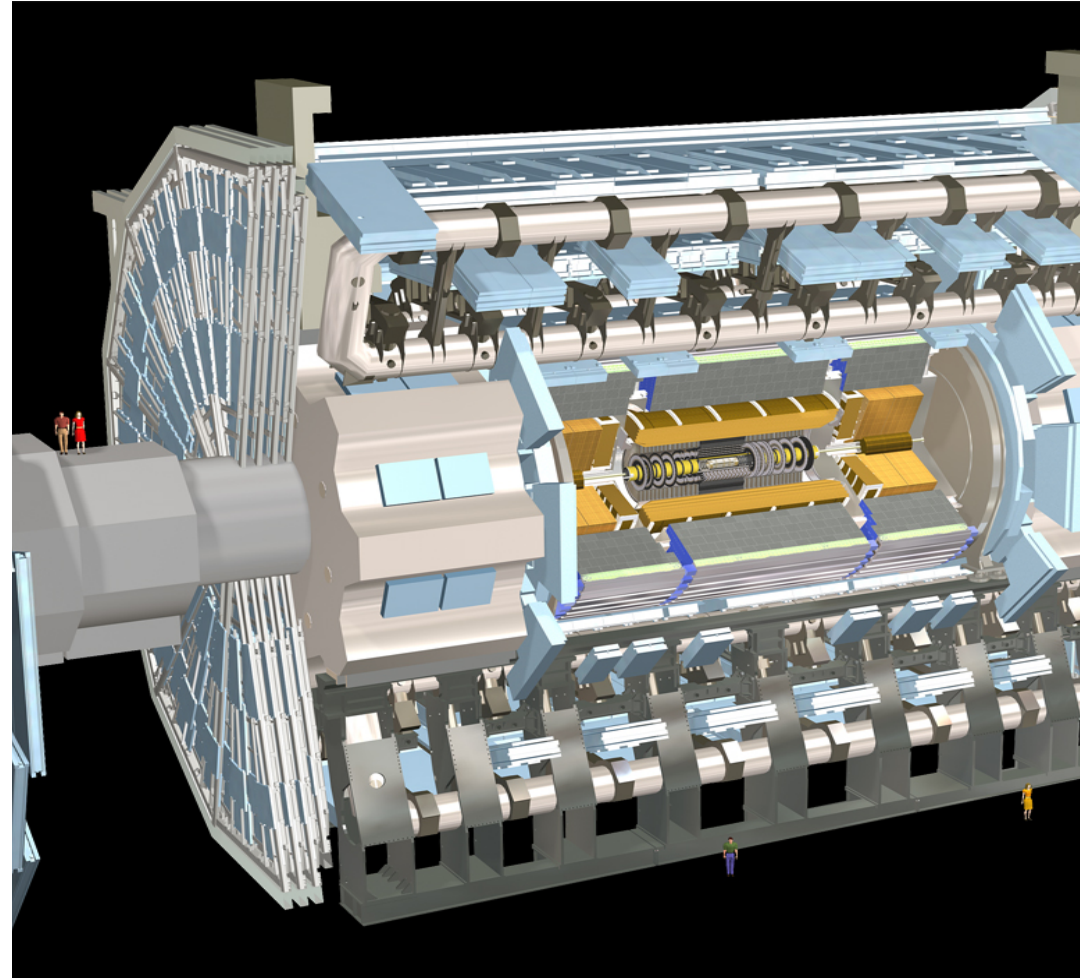
*2020 г.*

# Содержание

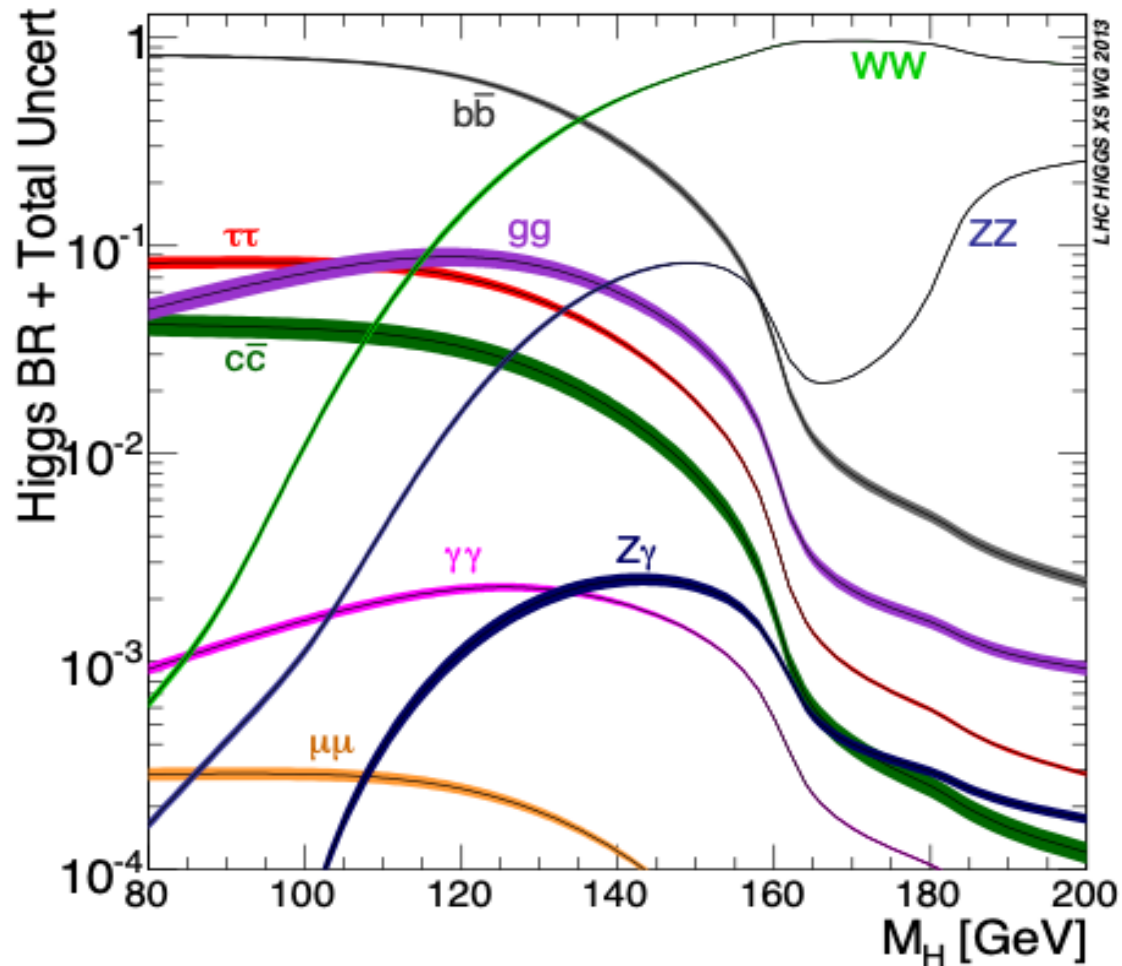
- Введение
- Отбор событий
- VBF  $E_T^{miss}$  анализ
  - MET гистограммы
  - Зависимость  $E_T^{miss}$  от событий наложения
  - Зависимость средней  $E_T^{miss}$  от числа взаимодействий ( $\mu$ )
- Анализ кинематики лептонов
- Заключение

# Эксперимент ATLAS

- 3 000 физиков из 182 институтов 38 стран
- Главная цель: бозон Хиггса, проверка Стандартной модели и поиск Новой физики



# Каналы распада бозона Хиггса СМ



Канал распада	BR, %	Мода, удобная для экспериментального наблюдения
$h \rightarrow bb$	$57.8 \pm 1.9$	Рождение в механизмах $VH$ , $ttH$
$h \rightarrow WW^*$	$21.6 \pm 0.9$	Распад обоих $W$ в лептон и нейтрино
$h \rightarrow gg$	$8.56 \pm 0.86$	Очень сложен для наблюдения, нет экспериментальной сигнатуры
$h \rightarrow \tau\tau$	$6.30 \pm 0.36$	Рождение в механизме VBF
$h \rightarrow cc$	$2.90 \pm 0.35$	Очень сложен для наблюдения
$h \rightarrow ZZ^*$	$2.67 \pm 0.11$	Распад обоих $Z$ в лептоны, идеальная сигнатура
$h \rightarrow \gamma\gamma$	$0.228 \pm 0.011$	Очень большие фоны, чистая сигнатура
$h \rightarrow Z\gamma$	$0.155 \pm 0.014$	Распад $Z$ в лептоны

# $h \rightarrow WW^* \rightarrow \ell\nu\ell\nu$ : текущий статус

Сила сигнала в единицах СМ  
по механизмам рождения:

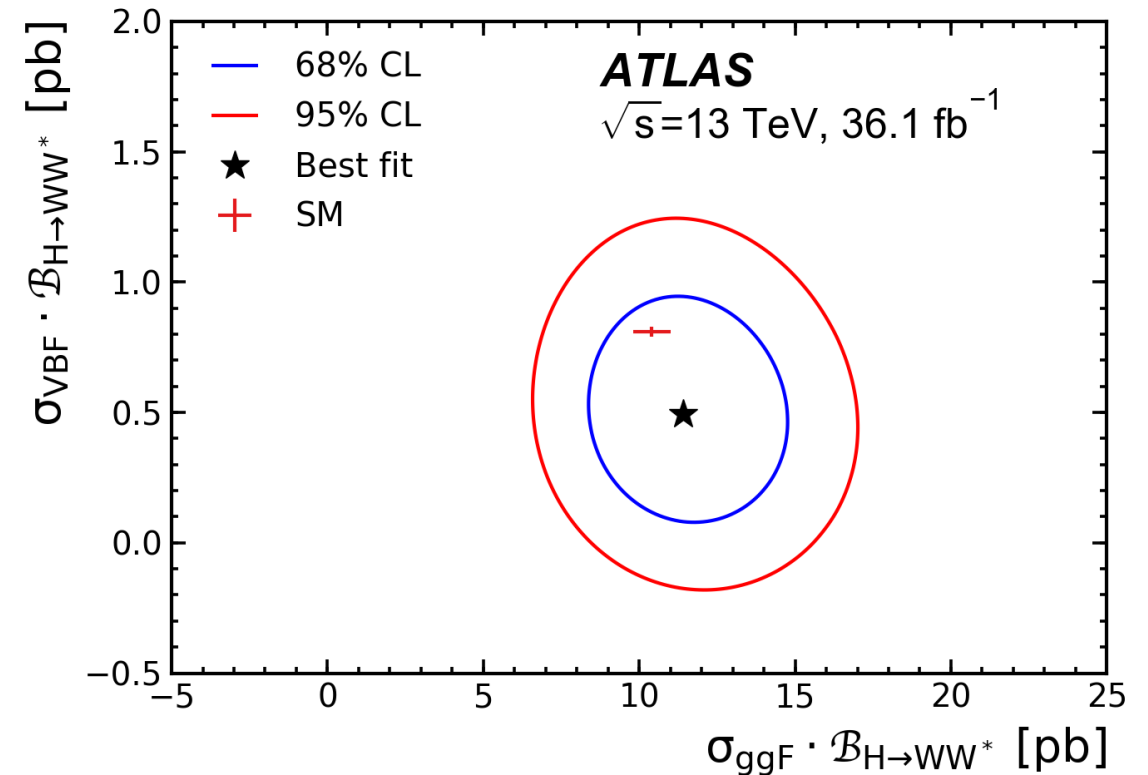
$$\mu_{ggF} = 1.10^{+0.21}_{-0.20}, \mu_{VBF} = 0.62^{+0.37}_{-0.36}$$

$$\sigma_{ggF} = 11.4 \pm 2.2 \text{ пб (10.4 пб)}$$

$$\sigma_{VBF} = 0.5 \pm 0.3 \text{ пб (0.81 пб)}$$

В скобках – сечение в СМ.

Сигнал четко виден в канале  $h \rightarrow WW^* \rightarrow \ell\nu\ell\nu$  при 13 ТэВ и наблюдаемое число событий соответствует СМ.



Двумерные контуры максимального правдоподобия на 68%-ном и 95%-ном уровнях достоверности для  $\sigma_{ggF} \times BR(H \rightarrow WW^*)$  в зависимости от  $\sigma_{VBF} \times BR(H \rightarrow WW^*)$  в сравнении с предсказаниями СМ.

# Зачем нужно измерять $E_T^{miss}$ в $h \rightarrow WW^* \rightarrow \ell\nu\ell\nu$

Из-за наличия двух нейтрино восстановить массу бозона Хиггса в канале распада  $h \rightarrow WW^* \rightarrow \ell\nu\ell\nu$  не представляется возможным. Но можно измерить т.н. «поперечную массу», которая определяется следующим образом:

$$m_T = \sqrt{(E_T^{\ell\ell} + E_T^{miss})^2 - |\mathbf{p}_T^{\ell\ell} + \mathbf{E}_T^{miss}|^2},$$

где  $E_T^{\ell\ell} = \sqrt{|\mathbf{p}_T^{\ell\ell}|^2 + m_{\ell\ell}^2}$

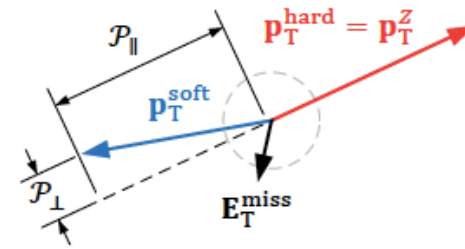
Поперечный импульс пары лептонов, который входит в указанную формулу, восстанавливается с довольно хорошей точностью. Критическим моментом является измерение вектора  $E_T^{miss}$ .

В идеальном герметичном детекторе величина модуля  $E_T^{miss}$  равна нулю, если в событиях нет частиц, слабо взаимодействующих с веществом установки (нейтрино). В реальном детекторе ATLAS ненулевой вклад в  $E_T^{miss}$  может быть связан как с адронными струями, летящими вне акцептанса ( $|\eta| > 4.9$ ), так и с ненулевым энергетическим или импульсным разрешением установки при восстановлении упомянутых «объектов» или неточностью калибровки соответствующих шкал энергий-импульсов.

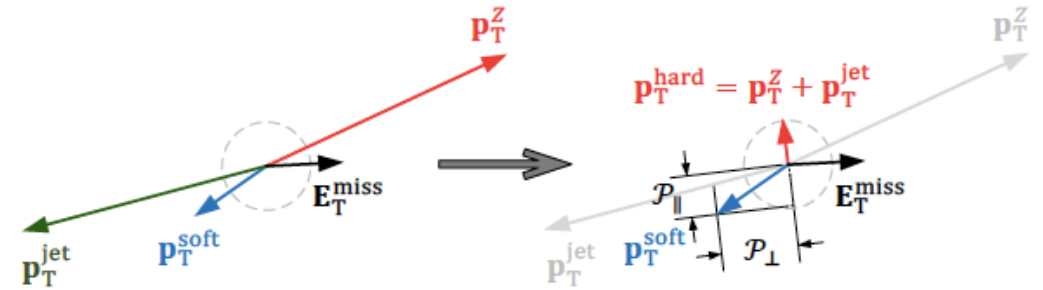
**Цель: сравнить данные и МС**

# Как измеряется $E_T^{miss}$

$E_T^{miss}$  представляет собой векторную сумму поперечных импульсов  $p_T$  всех зарегистрированных частиц, взятую с обратным знаком. Вклад в  $E_T^{miss}$  дают электроны, мюоны, фотоны, тау-лептоны и адронные струи. Кроме того, есть т.н. мягкая составляющая (soft term), которая не ассоциируется ни с одним из перечисленных «объектов» и требующая специальных алгоритмов для вычисления (по трекам).



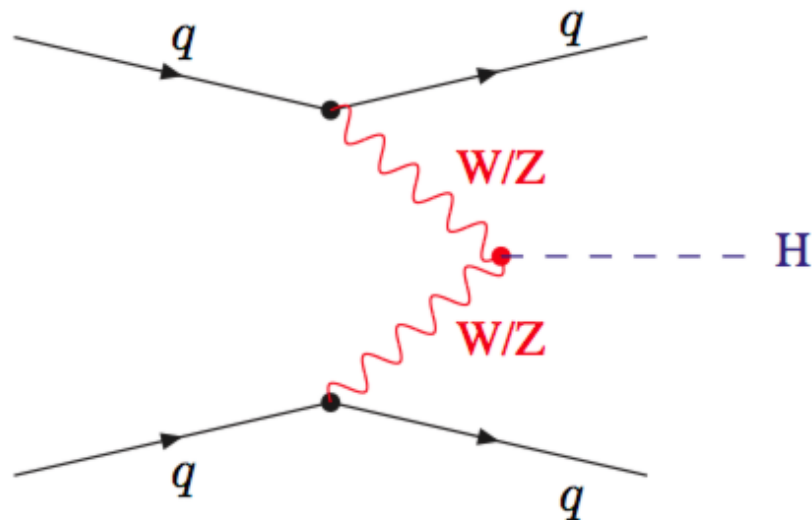
(a) Z + 0 jet topology



(b) Z + 1 jet topology

$$E_T^{miss} = - \underbrace{\sum_{\text{selected electrons}} p_T^e - \sum_{\text{accepted photons}} p_T^\gamma - \sum_{\text{accepted } \tau\text{-leptons}} p_T^{\tau\text{had}} - \sum_{\text{selected muons}} p_T^\mu - \sum_{\text{accepted jets}} p_T^{\text{jet}}}_{\text{hard term}} - \underbrace{\sum_{\text{unused tracks}} p_T^{\text{track}}}_{\text{soft term}}.$$

# Сигнал VBF и фоны в конечном состоянии $e\nu\mu\nu$



Сигнал от VBF

Фоны измеряются в кинематических контрольных областях, близких (но ортогональных) к области сигнала, а затем пересчитываются на область сигнала с помощью МС.

## Основные фоны:

$WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$  - парное рождение  $WW^*$

$t\bar{t} \rightarrow WbWb \rightarrow e\nu\mu\nu + bb$  - рождение пар топ-кварков

$Wt \rightarrow WWb \rightarrow e\nu\mu\nu + b$  - рождение одиночного топ-кварка с W-бозоном

$Z^{(*)} \rightarrow tt + X \rightarrow e\mu + Y$  - процесс Дрелла-Яна

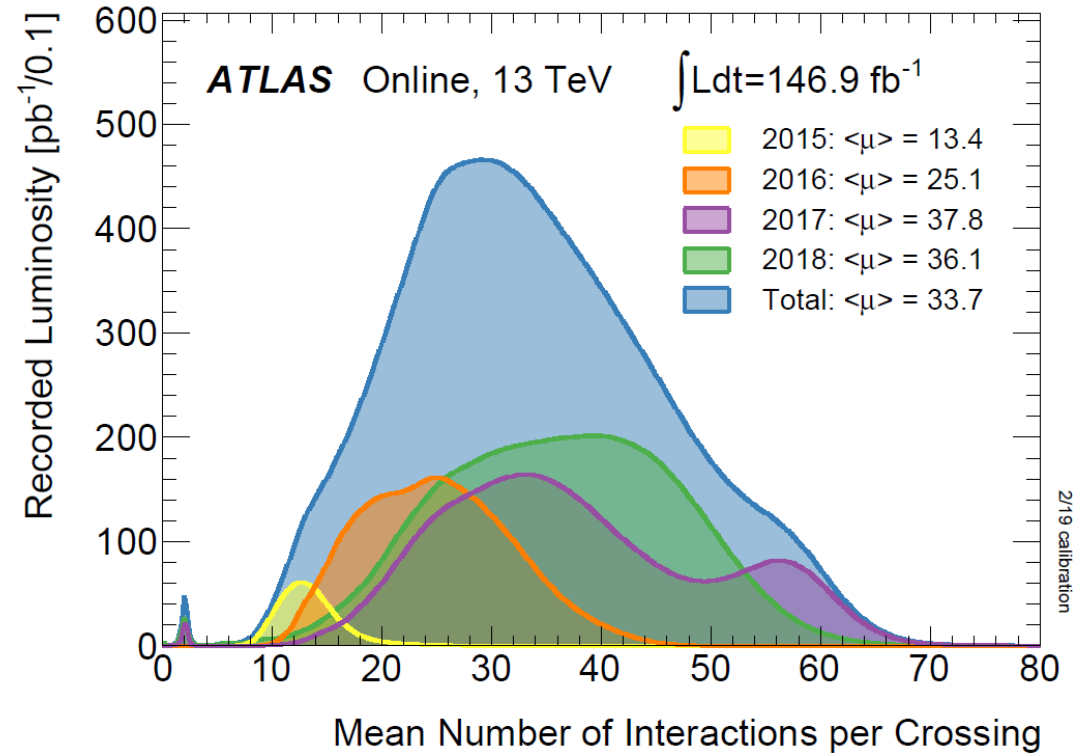
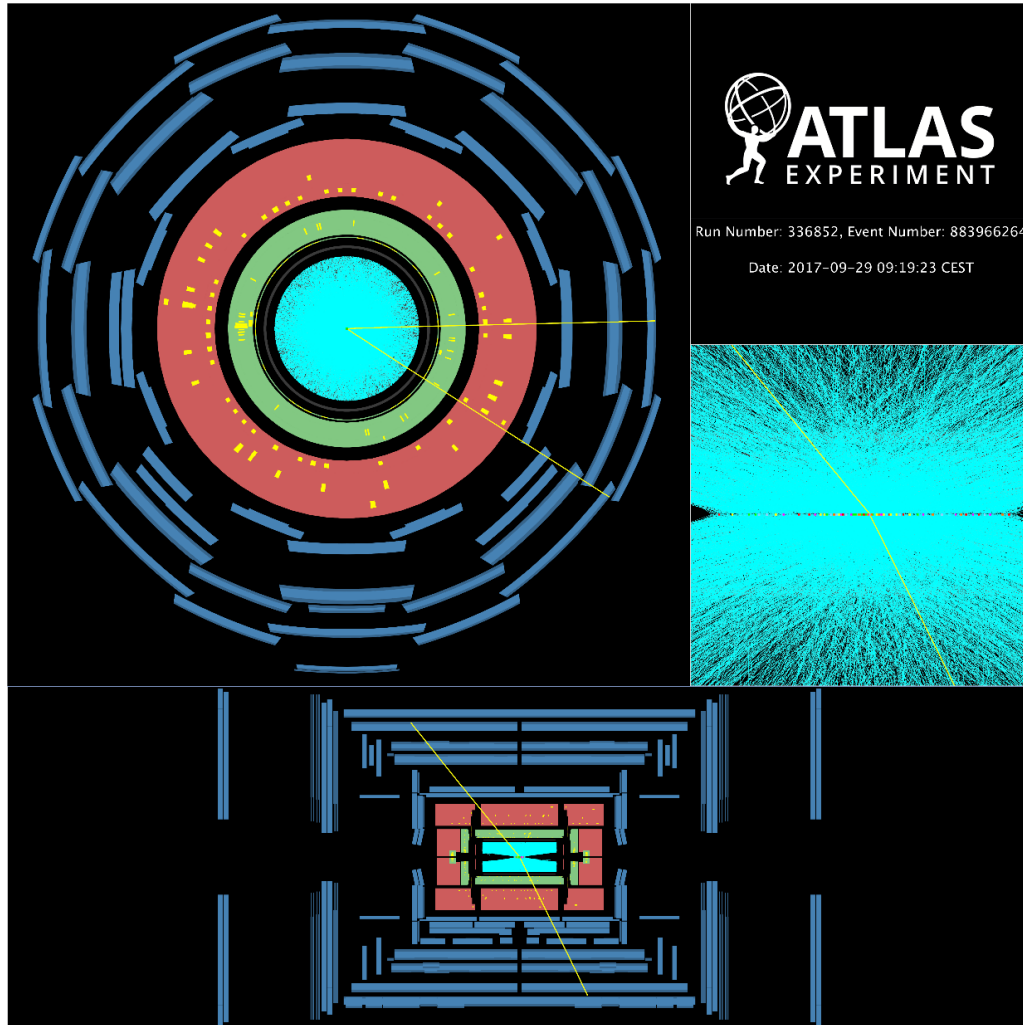
$ggF h \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$  - рождение бозона Хиггса в (основном) механизме  $ggF$

## Дополнительный фон:

$W + \text{jets} \rightarrow e\nu/\mu\nu + \text{fake } e/\mu$  из струи



# Эффект pile-up



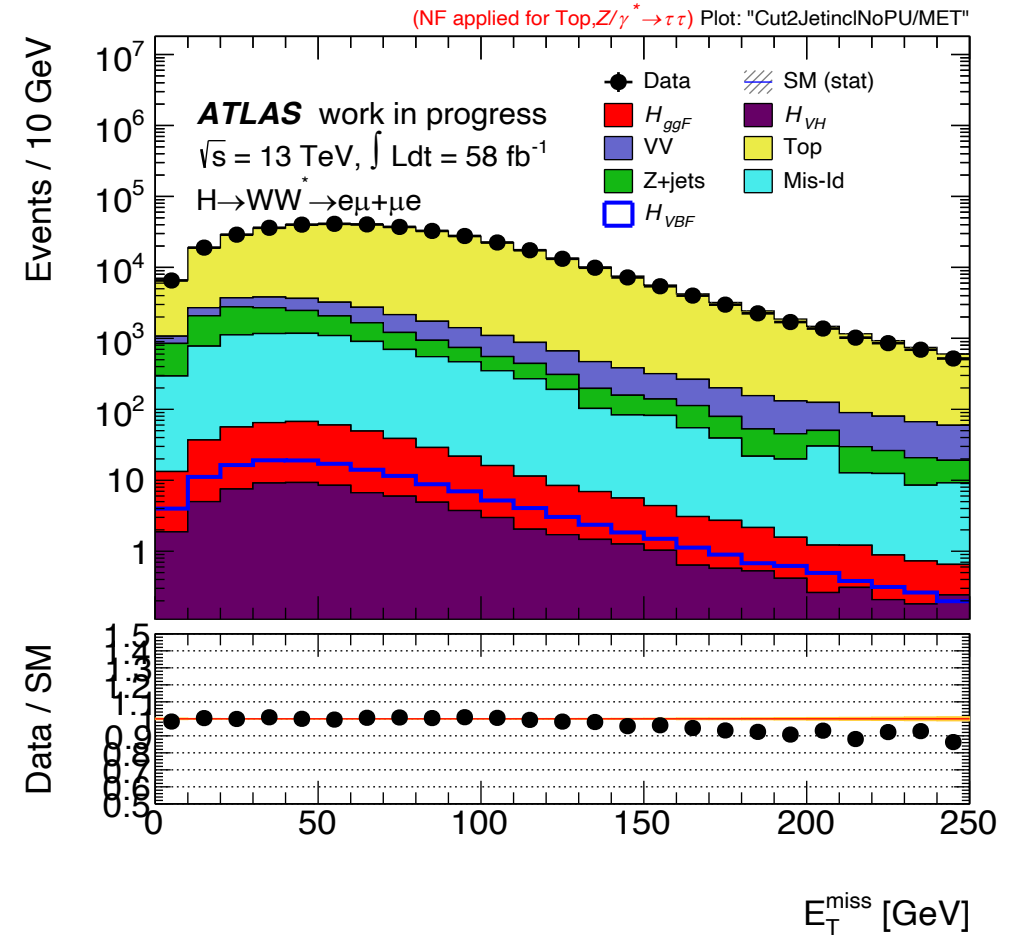
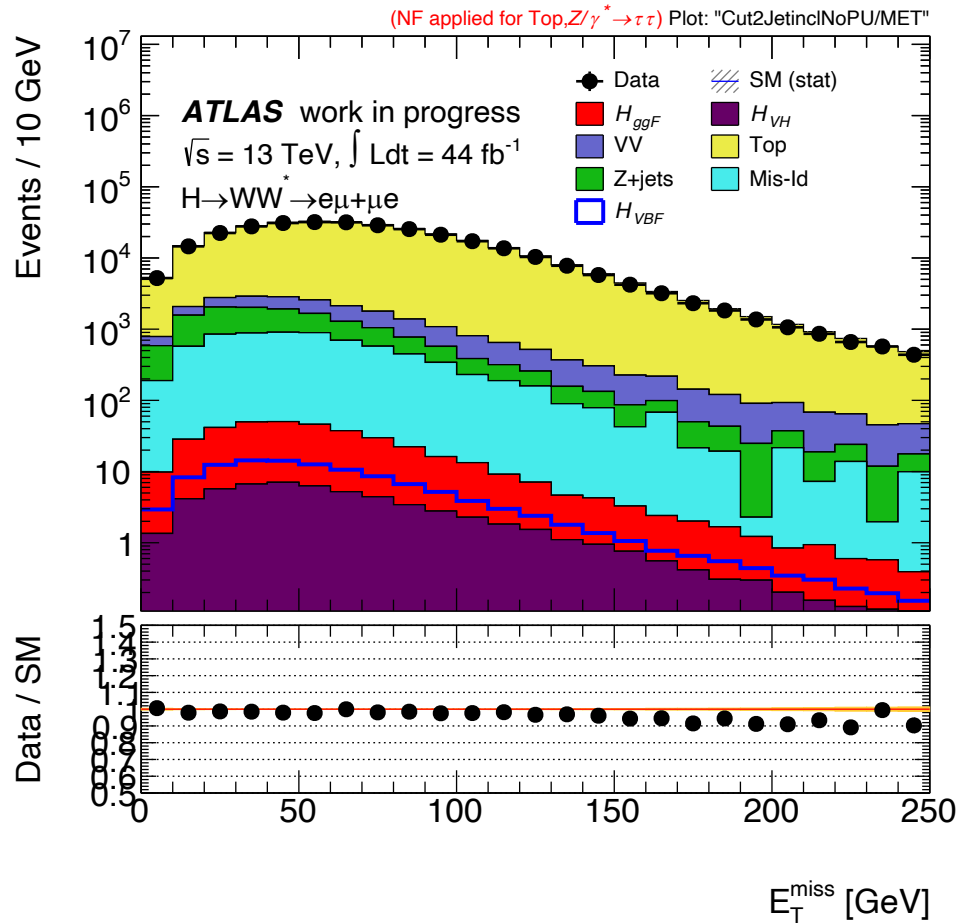
Среднее количество взаимодействий в одном пересечении пучков по годам набора статистики.

В 2017 году в канале  $Z \rightarrow \mu\mu$  было зафиксировано 65 столкновений в одной вершине!

# Распределение по $|E_T^{miss}|$ в событиях с двумя и более струями

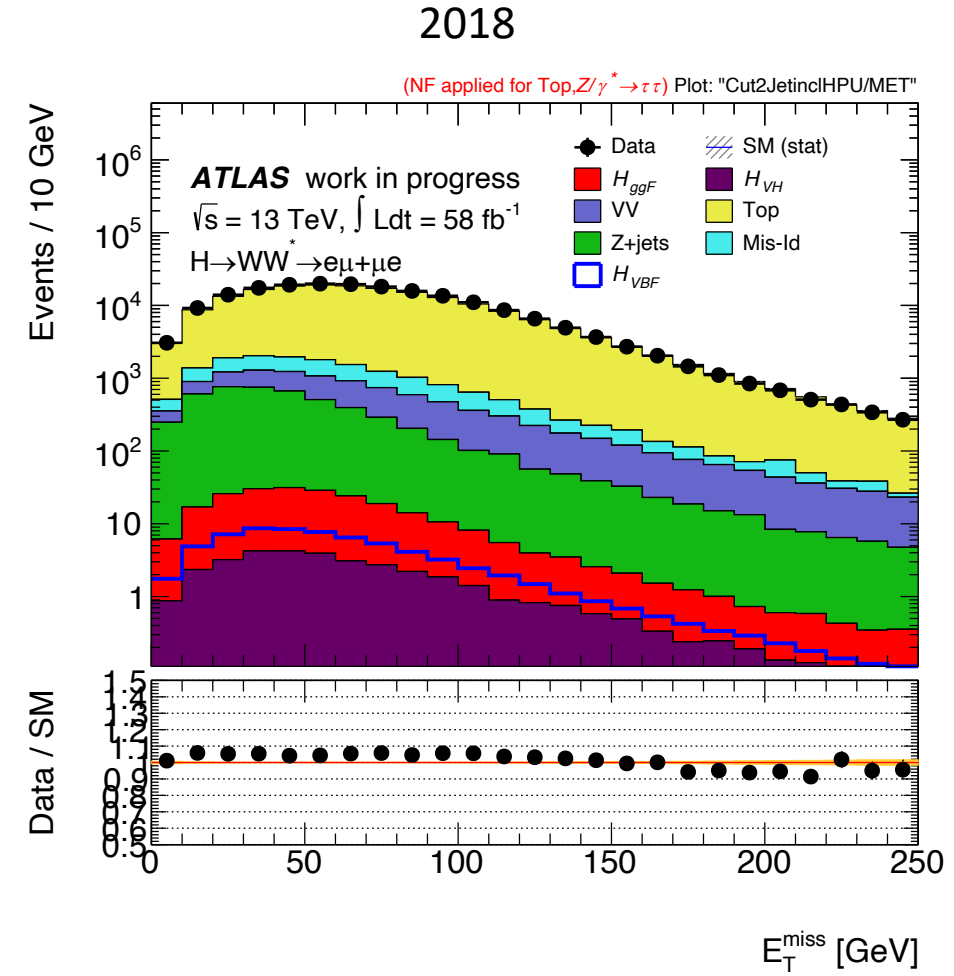
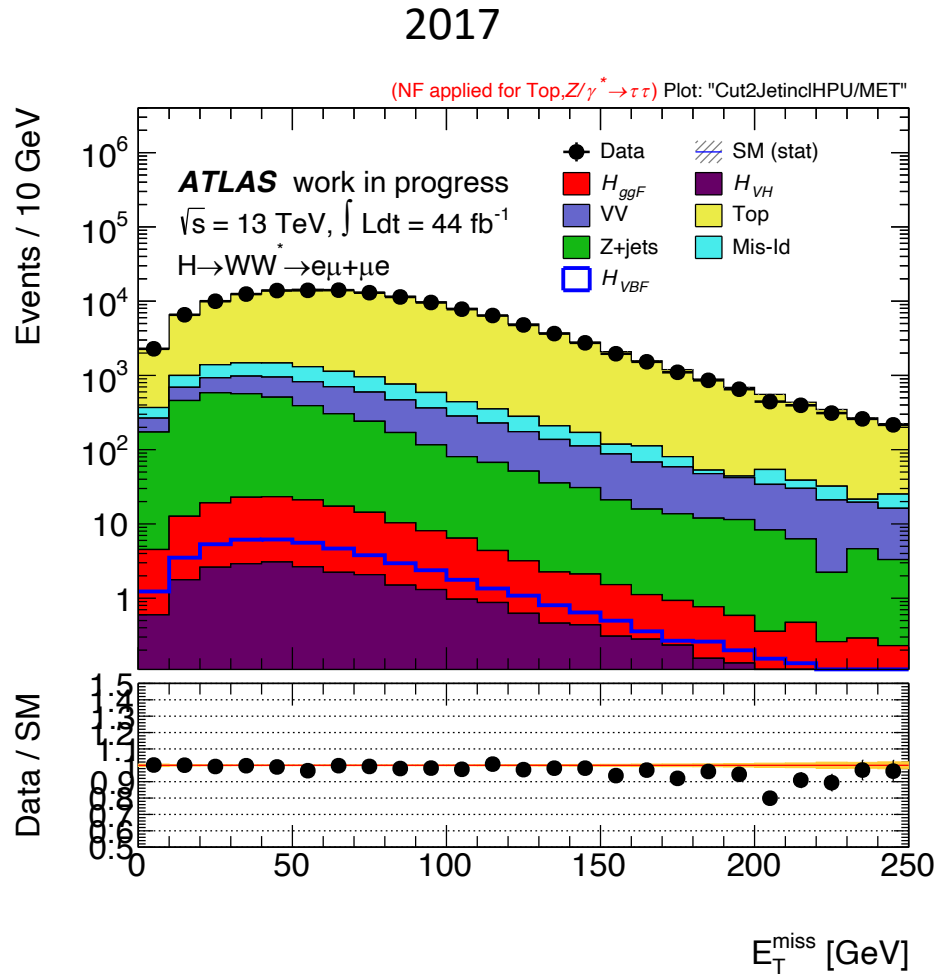
2017

2018



В области до 100-150 ГэВ наблюдается хорошее согласие данных и МС; при больших величинах  $|E_T^{miss}|$  отношение data/SM уменьшается до 0,9 - 0,95

# Распределение по $|E_T^{miss}|$ в событиях с двумя и более струями с значением $\mu > 36$

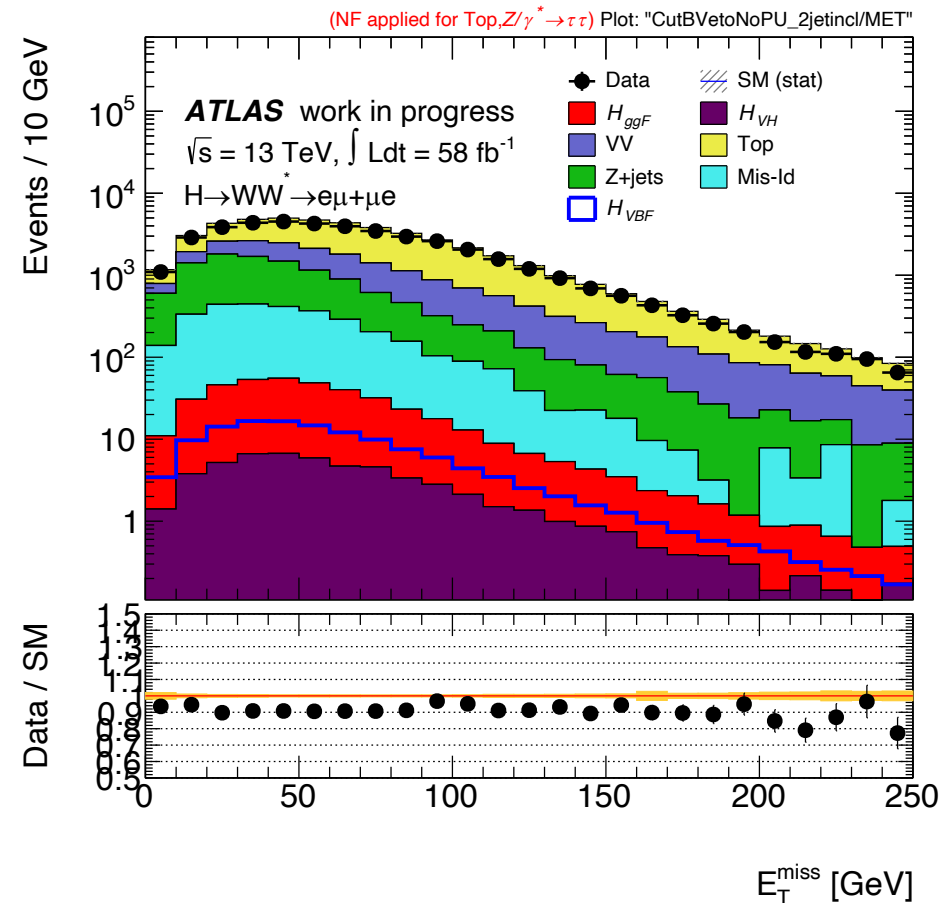
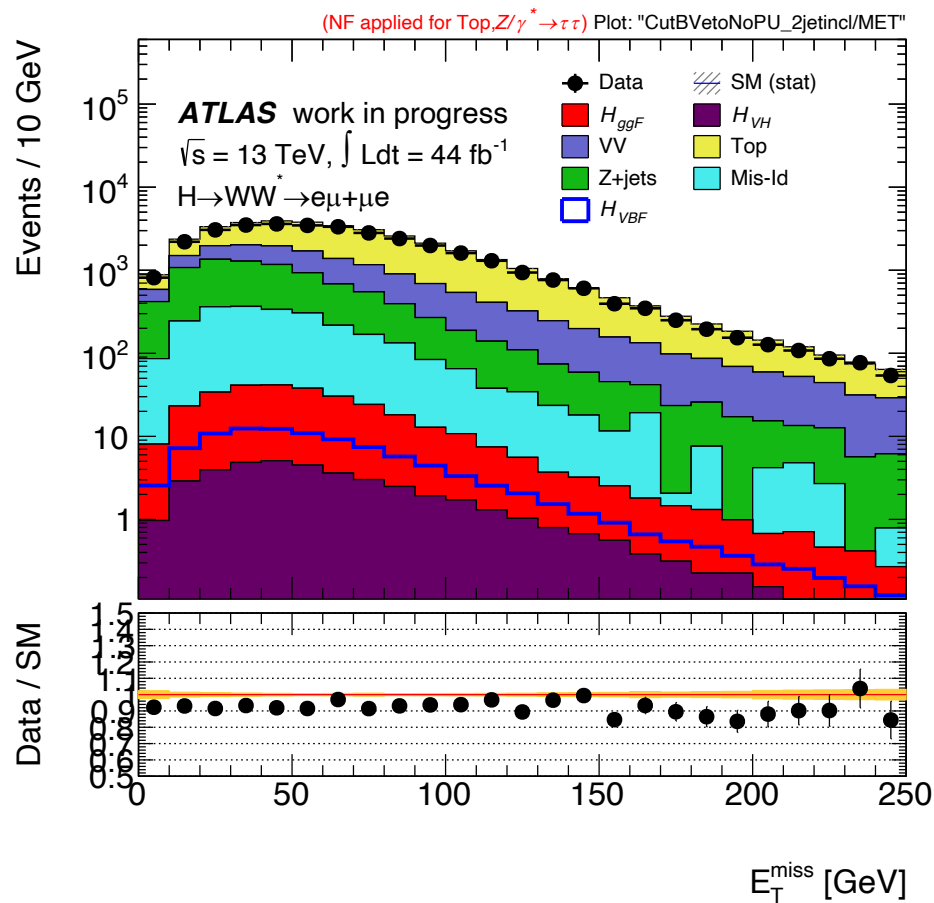


Данные и Монте-Карло моделирование находятся в согласии до 150 ГэВ

# Распределение по $|E_T^{miss}|$ в событиях с двумя и более струями после подавления фона от $top$ -кварка

2017

2018

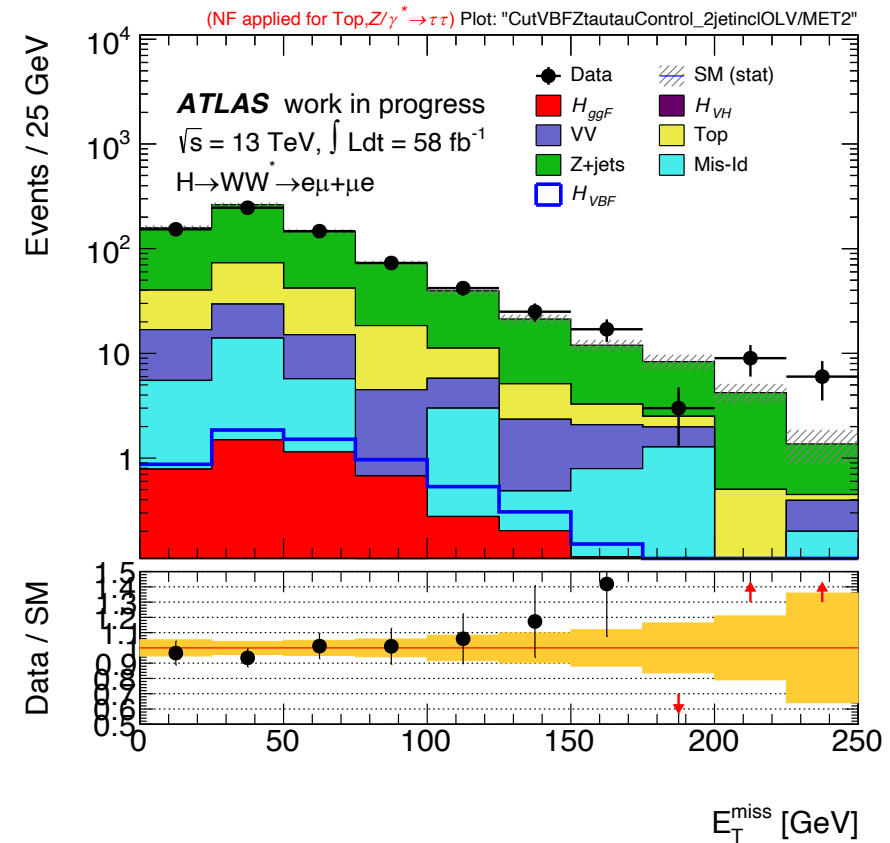
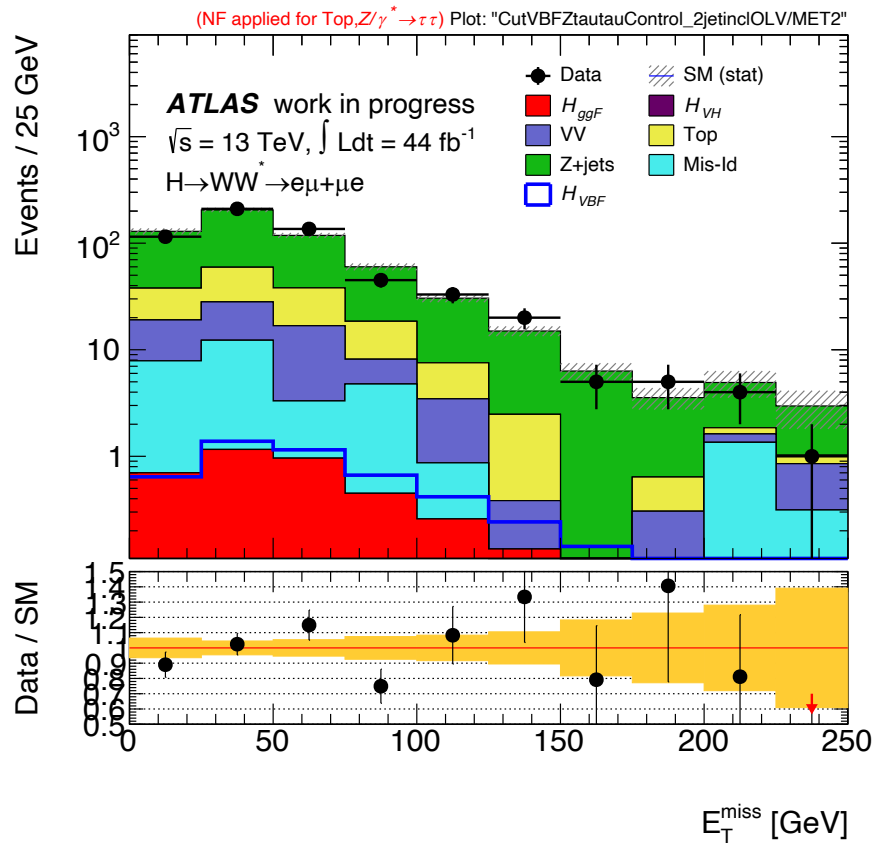


Наблюдается интегральный дефицит данных в 5-7%

# Распределение по $|E_T^{miss}|$ в событиях с двумя и более струями в контрольной области фона от $Z \rightarrow \tau\tau$

2017

2018

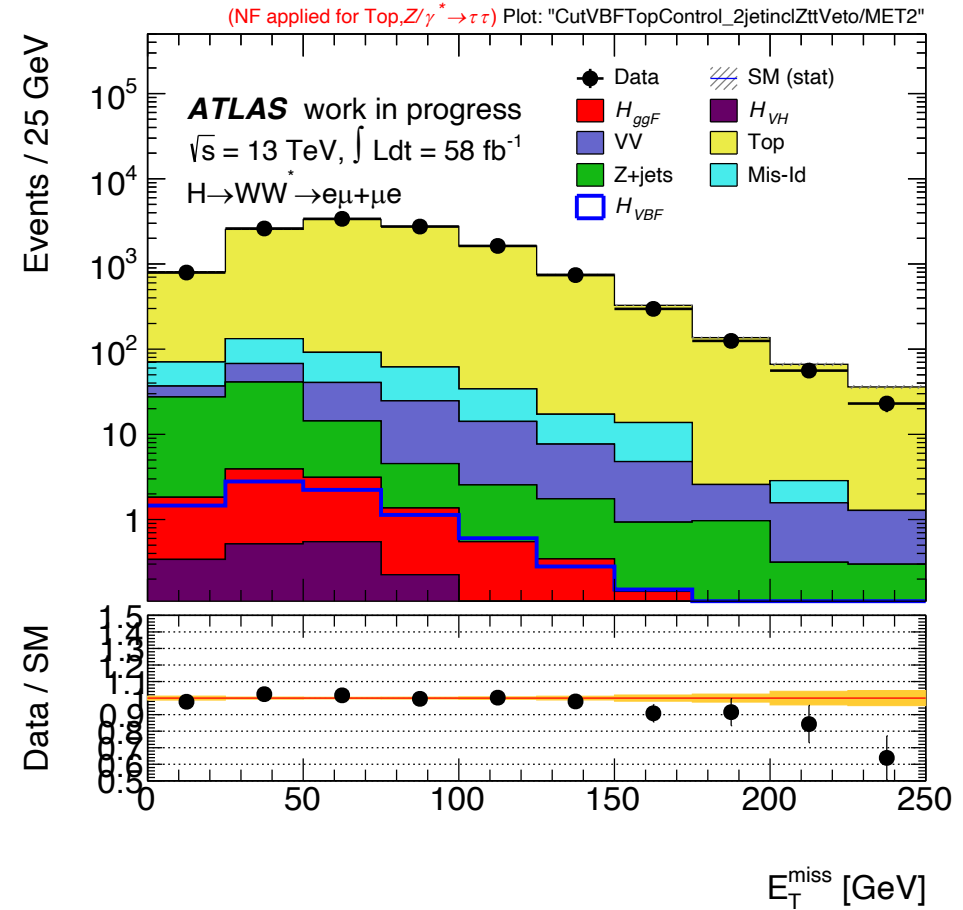
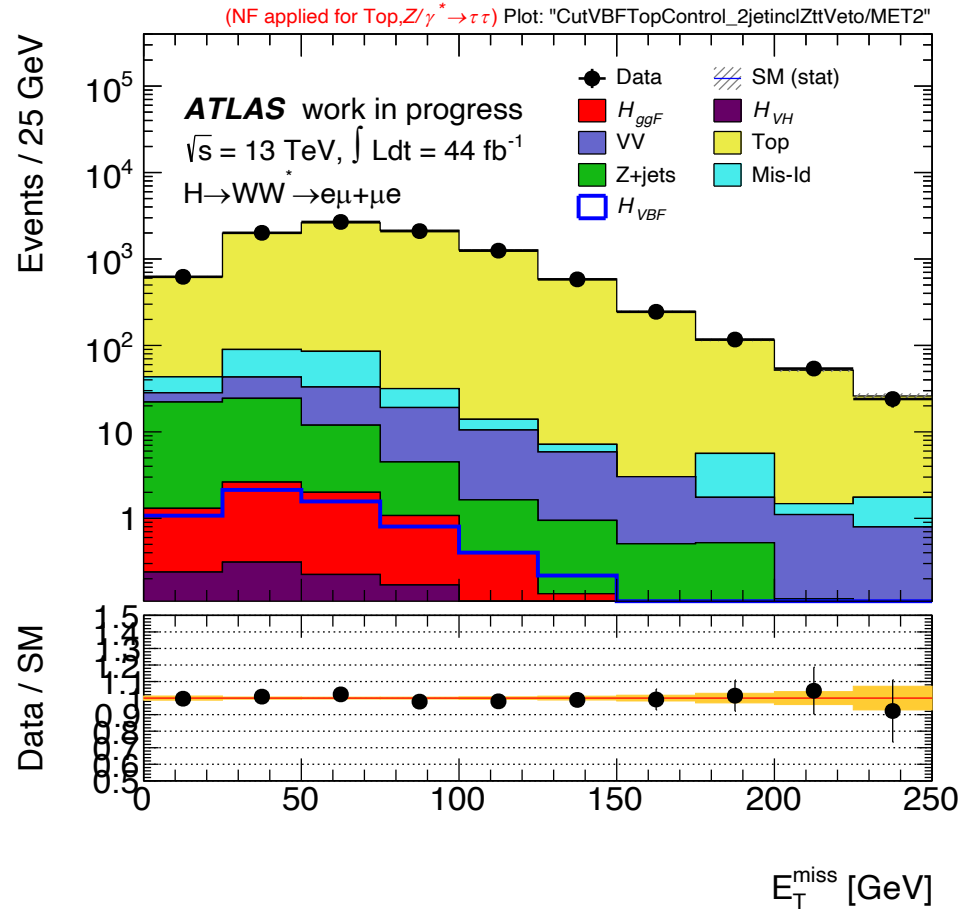


Удовлетворительное согласие данных и Монте-Карло моделирования

# Распределение по $|E_T^{miss}|$ в событиях с двумя и более струями в контрольной области $top$ -кварка

2017

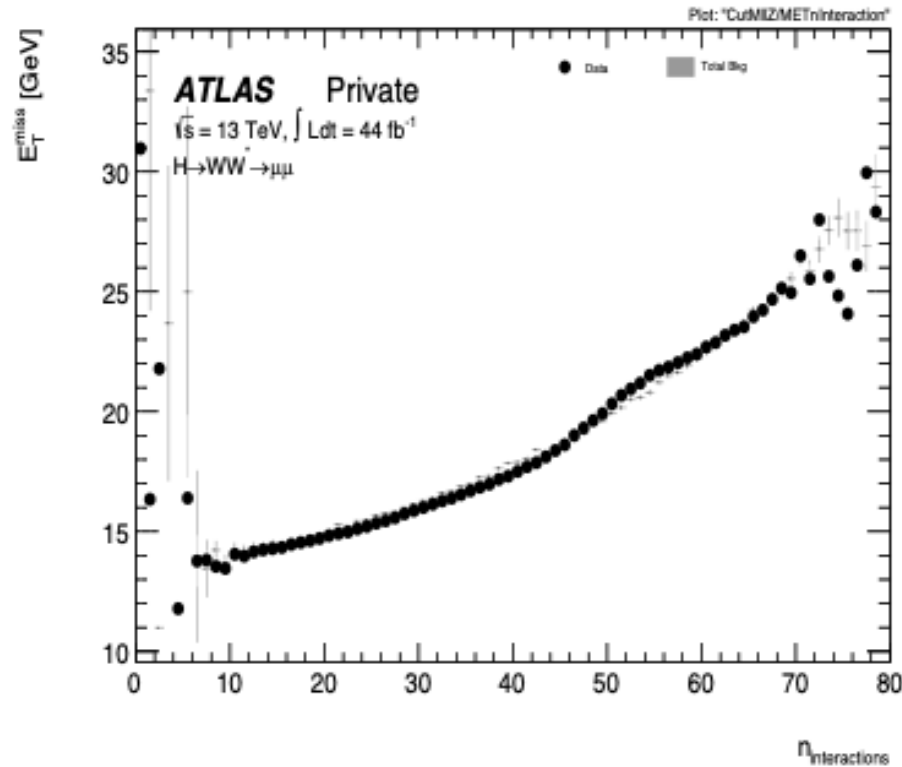
2018



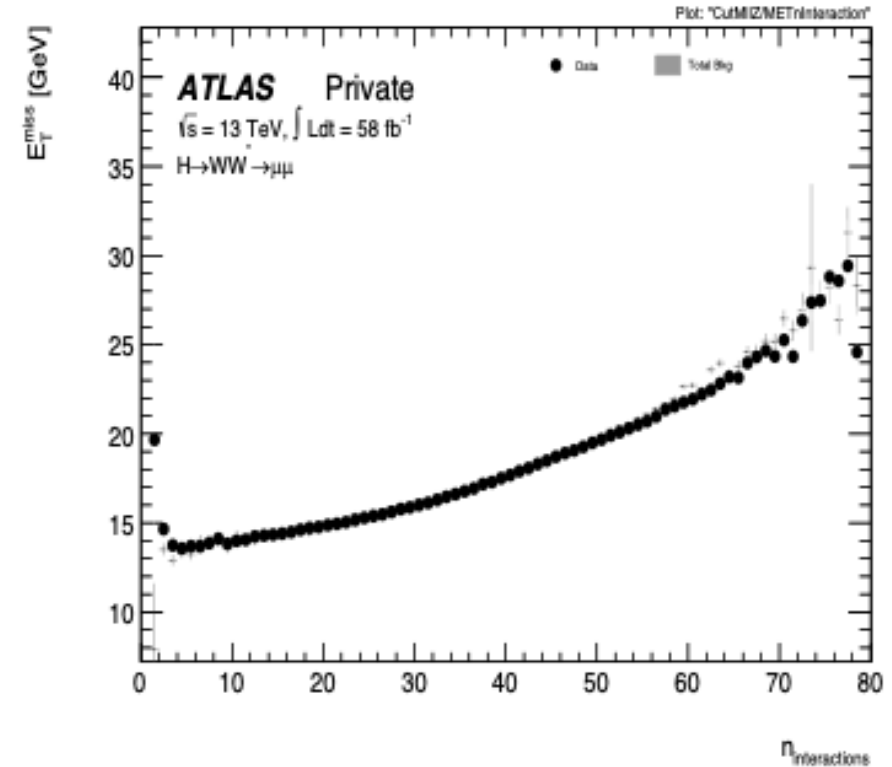
Видно, что вклад этого фона на 2 порядка превышает вклад от других процессов, что говорит о правильности выбора данной области

# Зависимость среднего значения модуля вектора недостающего поперечного импульса от числа взаимодействий $\mu$ в $Z$ CR с мюонами в конечном состоянии

2017



2018



МС удовлетворительно описывает реальные данные. Было замечено, что при  $\mu \approx 50$  для данных 2017 г. есть точка перегиба. Это связано с выравниванием светимости на LHC в 2017 г.

## Виды $E_T^{miss}$

Существуют различные способы вычисления  $E_T^{miss}$ . Они отличаются по методике вычисления мягкой компоненты (soft term) и по используемому инструментарию.

**CST  $E_T^{miss}$ .** Soft term рассчитывается по энергосодержаниям в калориметрах, которые не ассоциируются с жесткими объектами. Используется стандартная методика подавления pile-up (для учета этого эффекта величину CST  $E_T^{miss}$  необходимо домножить на специальный коэффициент).

**TST  $E_T^{miss}$ .** Вместо калориметров (как в CST) для подсчета soft term используется информация с трекера. Данный алгоритм работает только в области перекрытия трекера  $|\eta| < 2.5$ , однако гораздо лучше справляется с подавлением pile-up, чем алгоритм CST. По умолчанию под величиной  $E_T^{miss}$  подразумевают именно **TST  $E_T^{miss}$** .

**Track  $E_T^{miss}$ .** При восстановлении вектора недостающего поперечного импульса в этом варианте используется только информация с трекера.

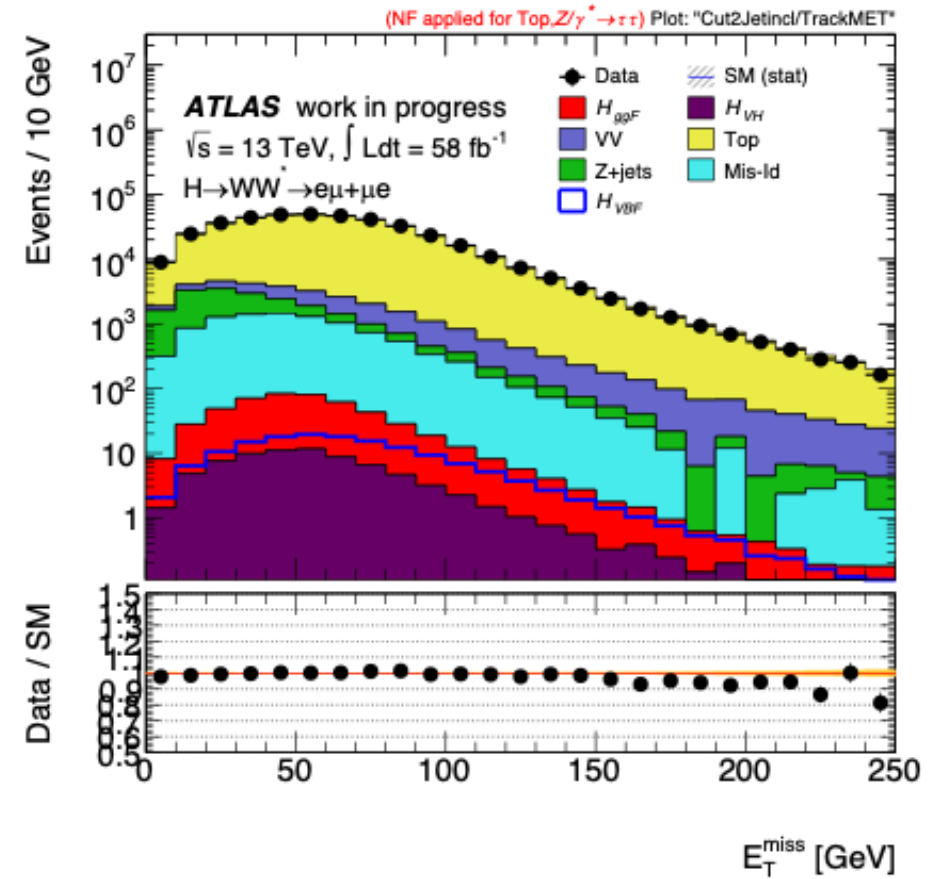
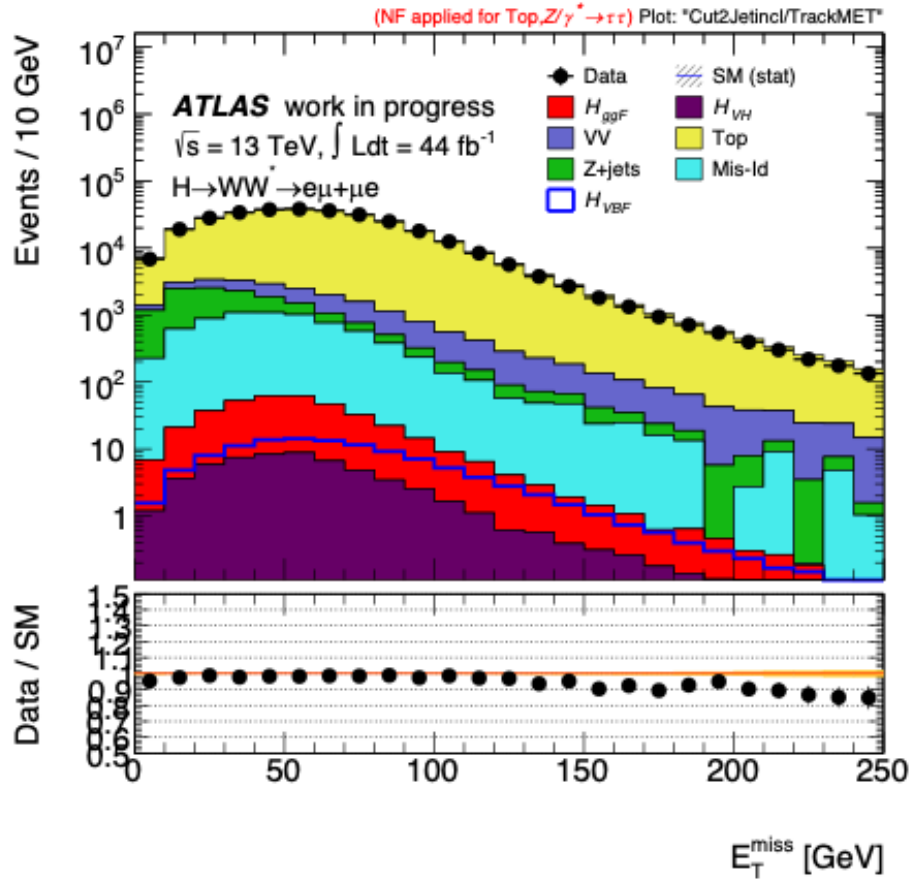
**Sig  $E_T^{miss}$ .** Показывает значимость отличия  $E_T^{miss}$  от нуля, с учётом величины реконструированного  $E_T^{miss}$  и разрешения импульсов объектов, вошедших в определение  $E_T^{miss}$  в данном событии.



# Распределение по $|E_T^{miss}|$ Track $E_T^{miss}$ в событиях с электроном и мюоном в конечном состоянии

2017

2018

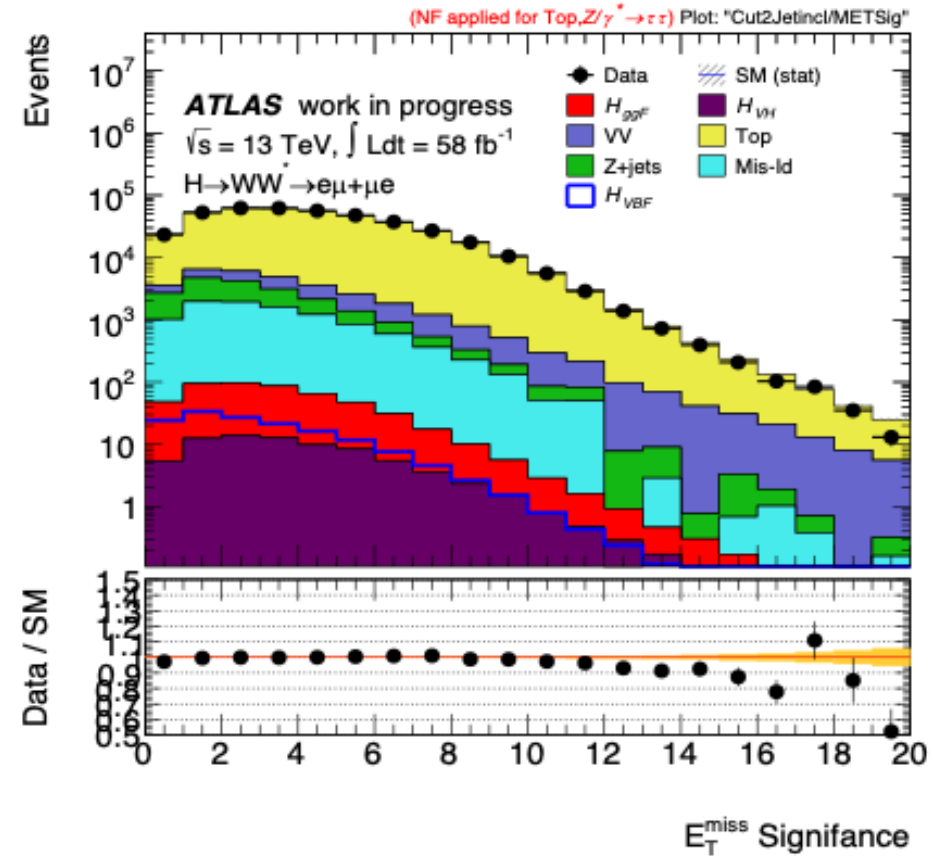
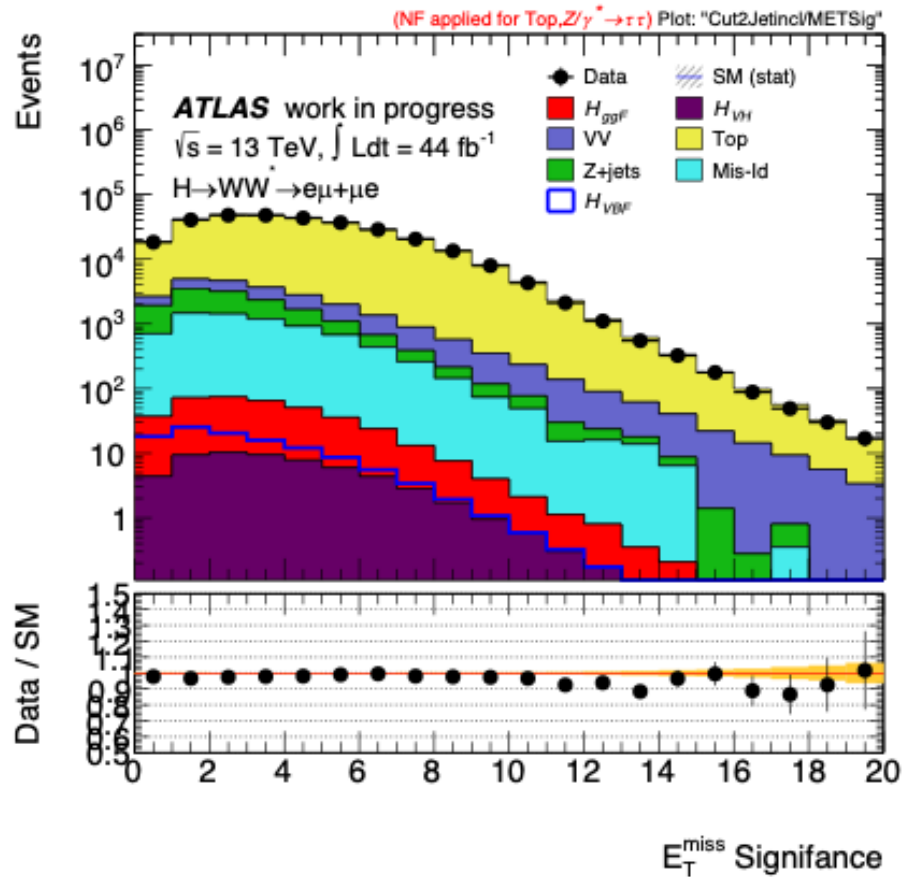


Наблюдается хорошее согласие данных и МС-моделирования в диапазоне от 0 до 120-150 ГэВ

# Распределение значимости $E_T^{miss}$ по сравнению с флуктуациями фона

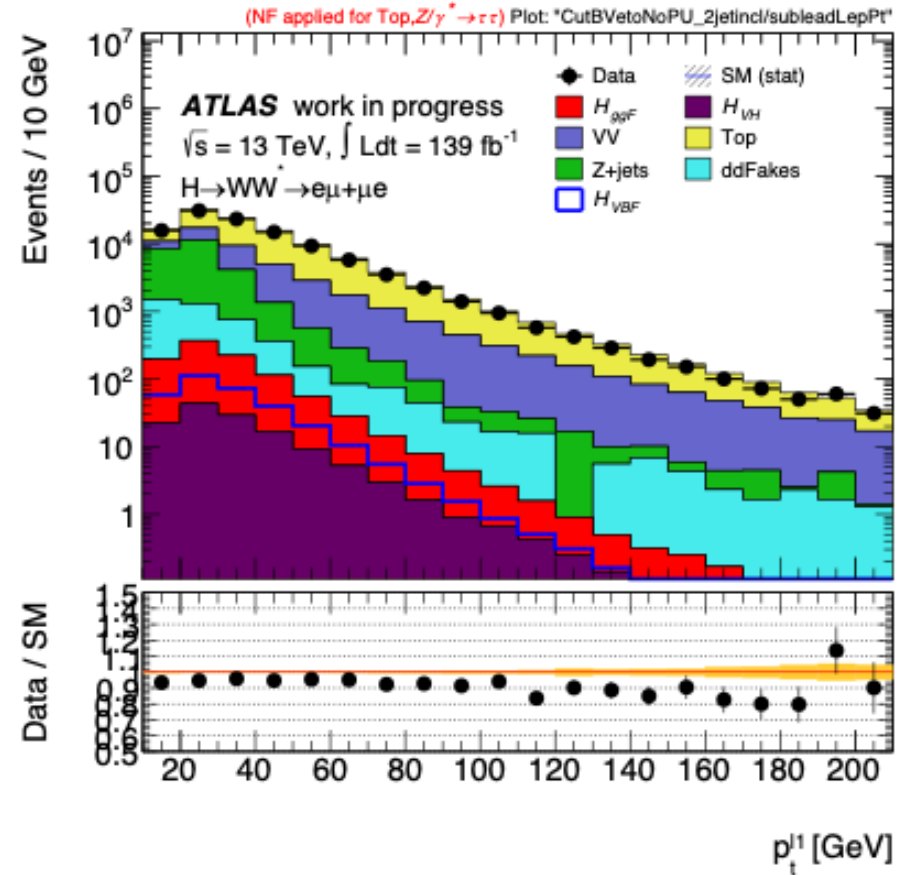
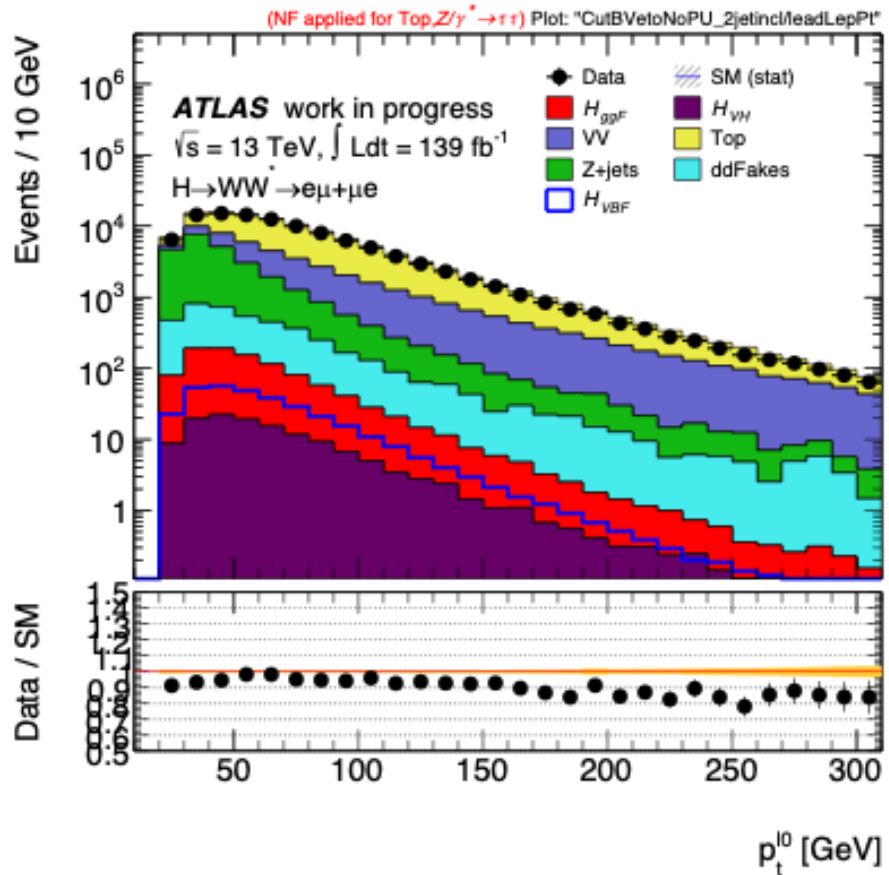
2017

2018



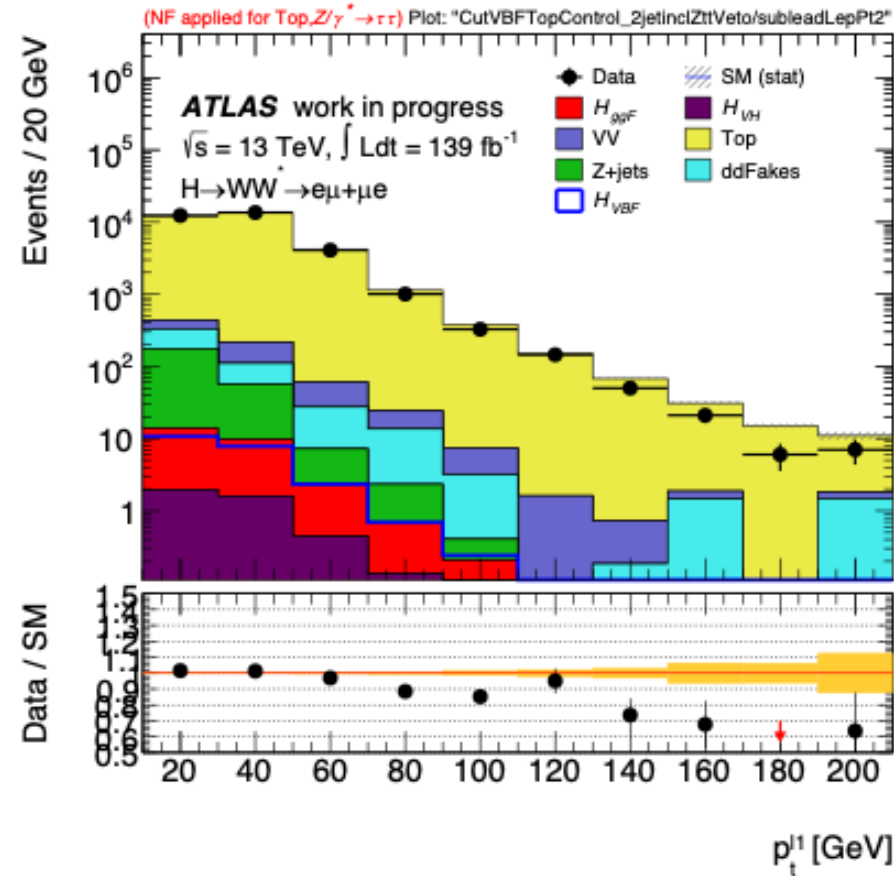
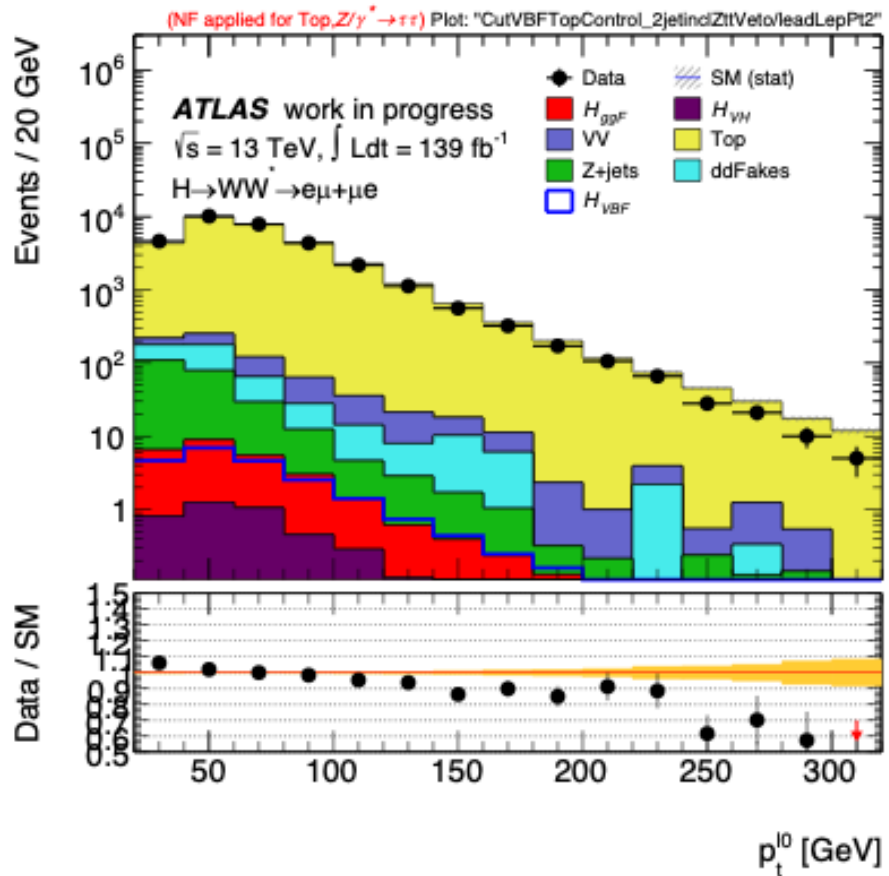
Удовлетворительное согласие данных и МС

# Распределение по поперечному импульсу лидирующего и сублидирующего лептонов в событиях с двумя и более струями после подавления фона от $top$ -кварков



Наблюдается небольшой дефицит в данных, который приводит к среднему отношению  $\text{Data}/\text{SM} \approx 0.9\text{-}0.92$

# Распределение по поперечному импульсу лидирующего и сублидирующего лептонов в событиях с двумя и более струями в контрольной области $top$ -кварка



Обнаружены некоторые расхождения между данными и МС в контрольной области фона от  $top$ -кварков. Это расхождение связано с недостатками физического генератора событий с парным рождением  $top$ -кварков и будет учтено в окончательном анализе данных в ATLAS

# Заключение

Изучение распределений по недостающему поперечному импульсу  $E_T^{miss}$  и кинематических характеристик лептонов является критически важным моментом для определения «поперечной массы» стандартного бозона Хиггса в канале распада  $h \rightarrow WW^* \rightarrow \ell\nu\ell\nu$ . Они рассматривались как в области сигнала в механизме слияния векторных бозонов (SR), так и в контрольных кинематических областях (CR) для измерения фонов.

Получены следующие результаты:

1) По распределениям  $E_T^{miss}$  и производным от нее величинам:

- в SR на начальных стадиях отбора формы распределений по модулю  $E_T^{miss}$  отличаются мало и можно говорить об удовлетворительном их согласии в целом;

- в контрольных областях фонов от  $top$ -кварков и  $Z \rightarrow \tau\tau$ , спектры неплохо описываются МС;

2) Монте-Карло в целом удовлетворительно описывает эффекты, связанные с pile-up, в частности, рост средней величины недостающего поперечного импульса с числом взаимодействий в одном пересечении пучков, который наиболее заметен в Z CR;

3) Для варианта  $E_T^{miss}$ , основанного целиком на трекаре, наблюдается лучшее согласие с МС, чем для стандартного варианта, основанного на трекаре и калориметрах, включая Z CR, поэтому его целесообразно использовать для отбора событий сигнала в канале  $h \rightarrow WW^* \rightarrow \ell\nu\ell\nu$ , где нижнее ограничение необходимо для подавления фона от процессов Дрелла-Яна. Перспективно также использовать переменную, означающую значимость  $E_T^{miss}$ .

4) По кинематике лептонов:

- в SR и top CR большая часть спектров достаточно хорошо воспроизводятся моделированием, расхождения в указанных распределениях связаны с недостатками физического МС-генератора для парного рождения  $top$ -кварков.

**Благодарю за внимание!**