

**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.

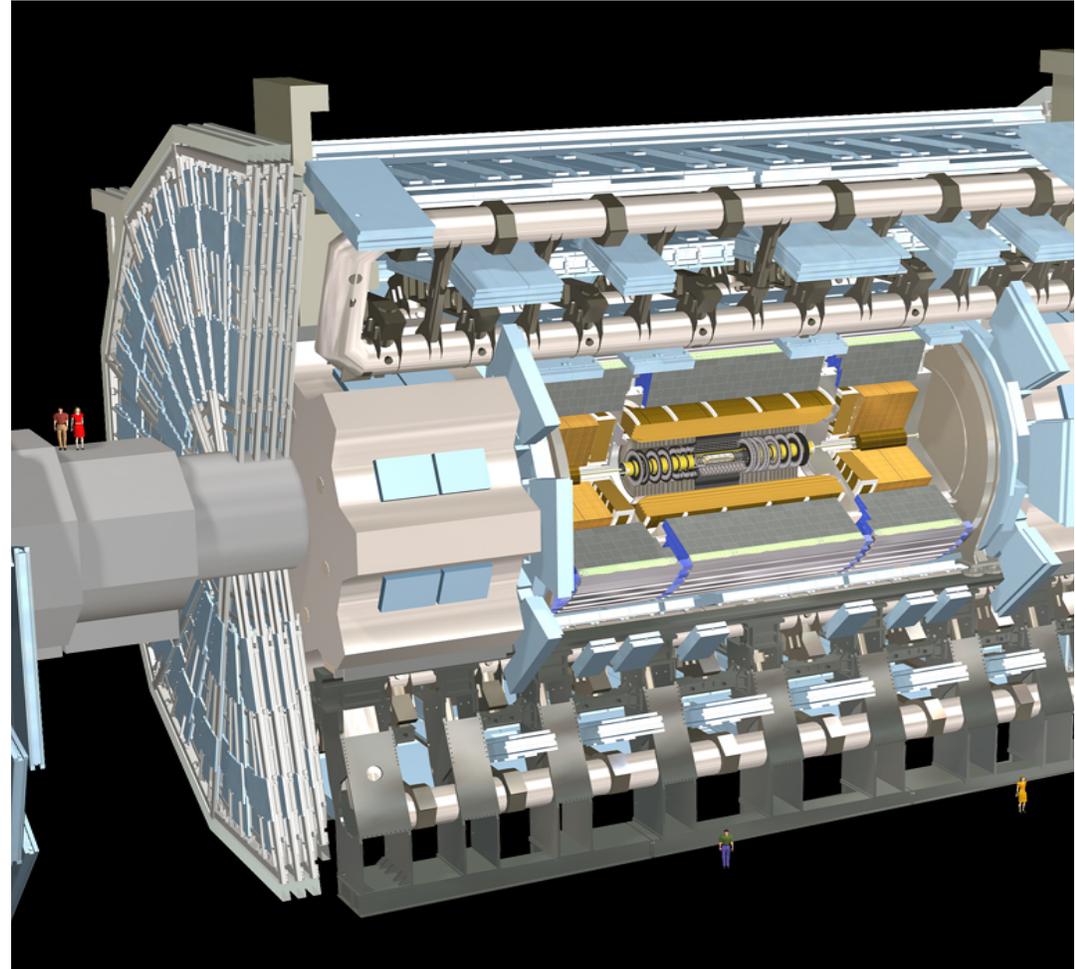
2020 г.

Содержание

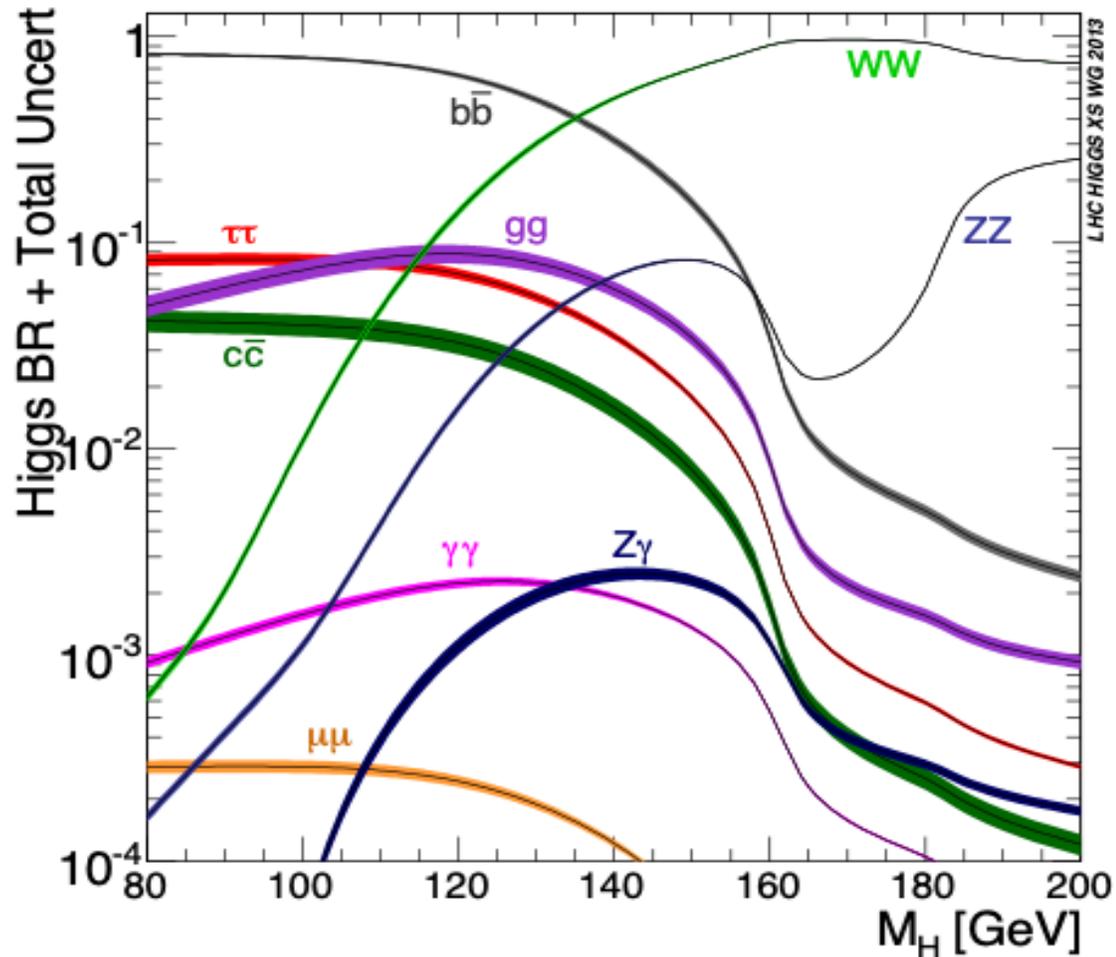
- Введение
- Отбор событий
- VBF E_T^{miss} анализ
 - MET гистограммы
 - Зависимость E_T^{miss} от событий наложения
 - Зависимость средней E_T^{miss} от числа взаимодействий (μ)
- Анализ кинематики лептонов
- Заключение

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
$h \rightarrow b\bar{b}$	57.8 ± 1.9	Рождение в механизмах VH , $t\bar{t}H$
$h \rightarrow WW^*$	21.6 ± 0.9	Распад обоих W в лептон и нейтрино
$h \rightarrow gg$	8.56 ± 0.86	Очень сложен для наблюдения, нет экспериментальной сигнатуры
$h \rightarrow \tau\tau$	6.30 ± 0.36	Рождение в механизме VBF
$h \rightarrow c\bar{c}$	2.90 ± 0.35	Очень сложен для наблюдения
$h \rightarrow ZZ^*$	2.67 ± 0.11	Распад обоих Z в лептоны, идеальная сигнатура
$h \rightarrow \gamma\gamma$	0.228 ± 0.011	Очень большие фоны, чистая сигнатура
$h \rightarrow Z\gamma$	0.155 ± 0.014	Распад Z в лептоны

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

Сила сигнала в единицах СМ
по механизмам рождения:

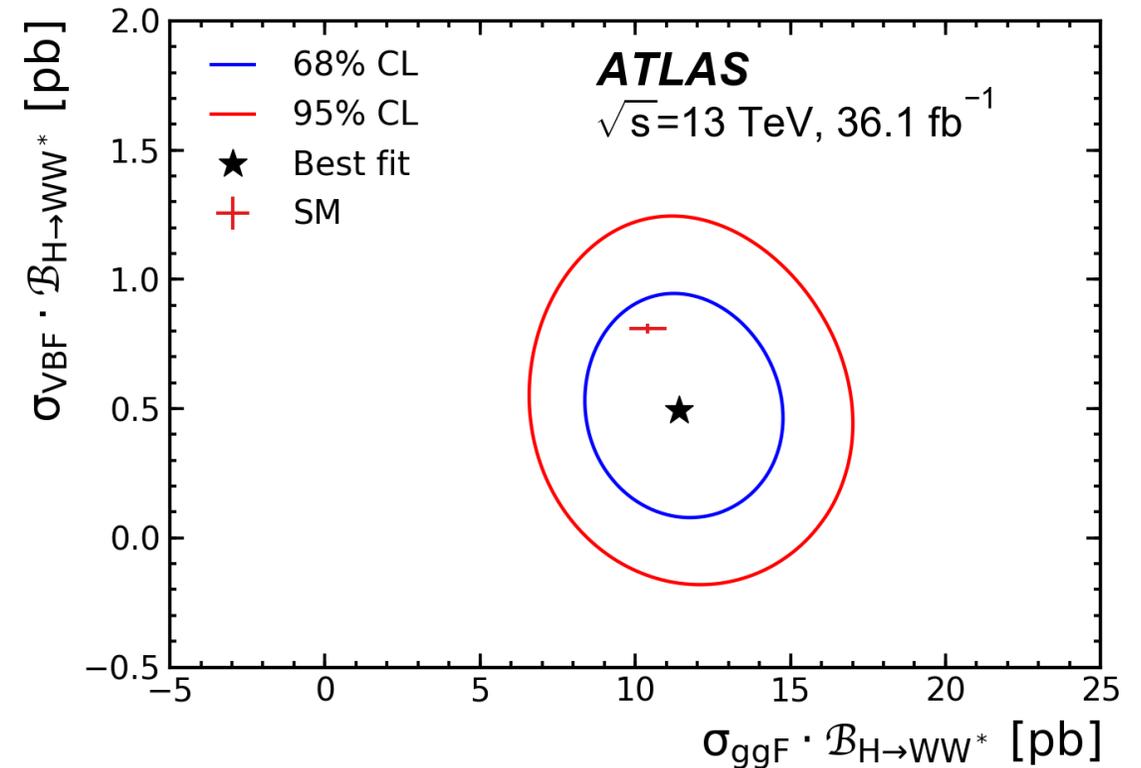
$$\mu_{ggF} = 1.10^{+0.21}_{-0.20}, \mu_{VBF} = 0.62^{+0.37}_{-0.36}$$

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

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

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

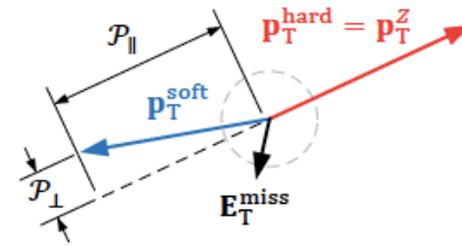
Поперечный импульс пары лептонов, который входит в указанную формулу, восстанавливается с довольно хорошей точностью. Критическим моментом является измерение вектора E_T^{miss} .

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 аксептанса ($|\eta| > 4.9$), так и с ненулевым энергетическим или импульсным разрешением установки при восстановлении упомянутых «объектов» или неточностью калибровки соответствующих шкал энергий-импульсов.

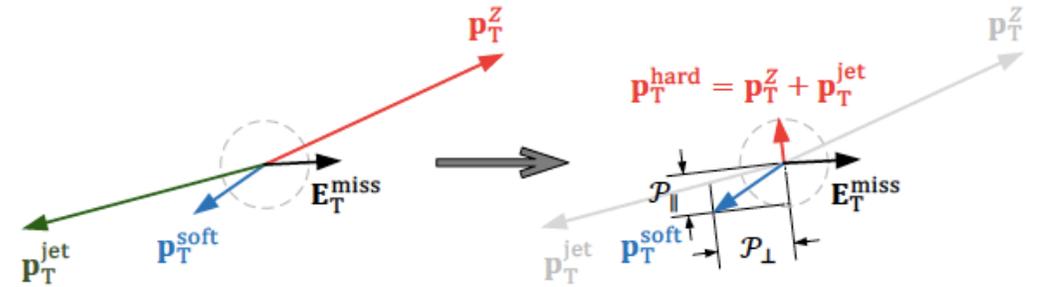
Цель: сравнить данные и МС

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).



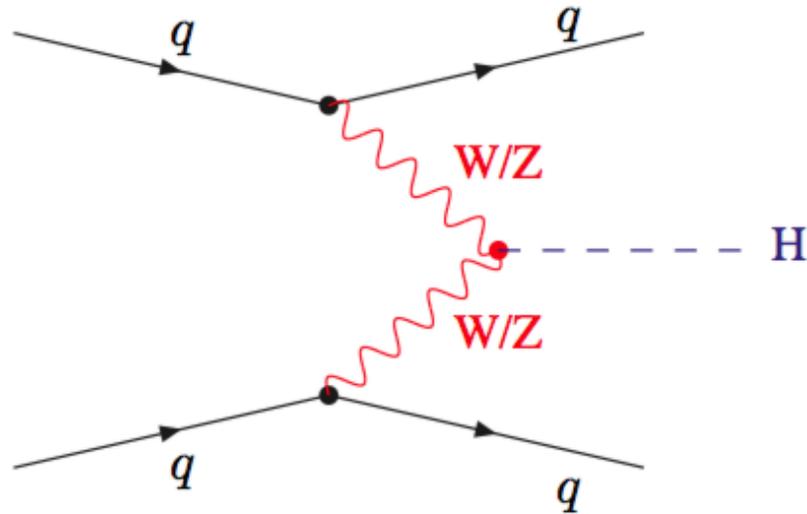
(a) Z + 0 jet topology



(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

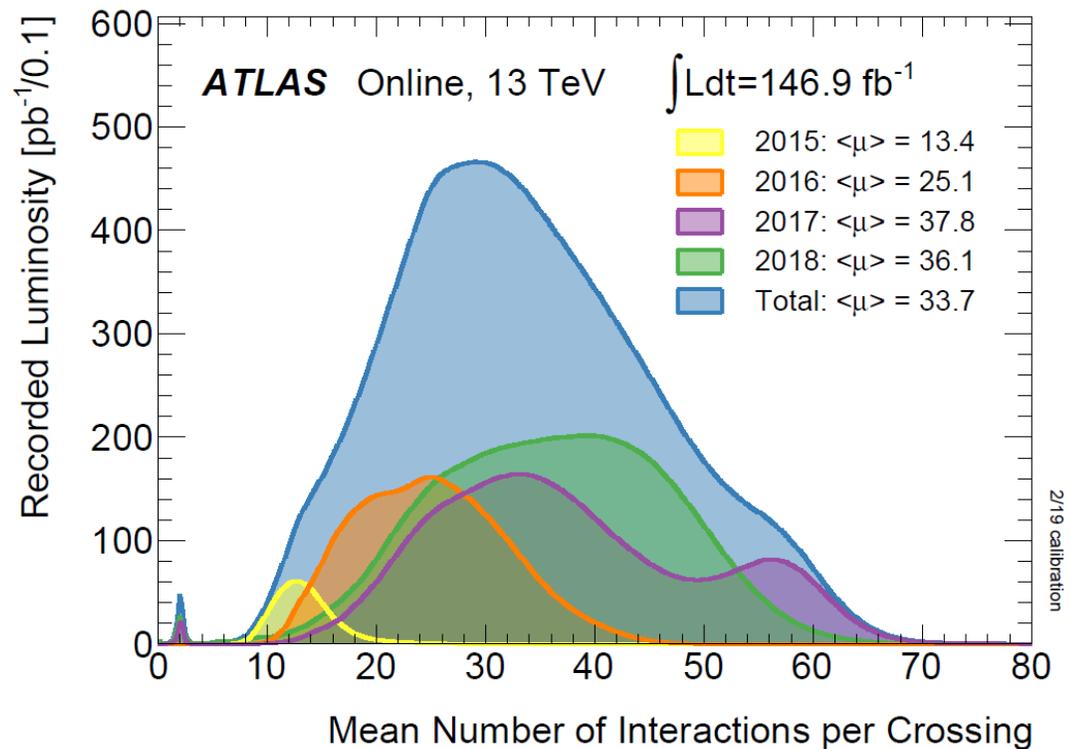
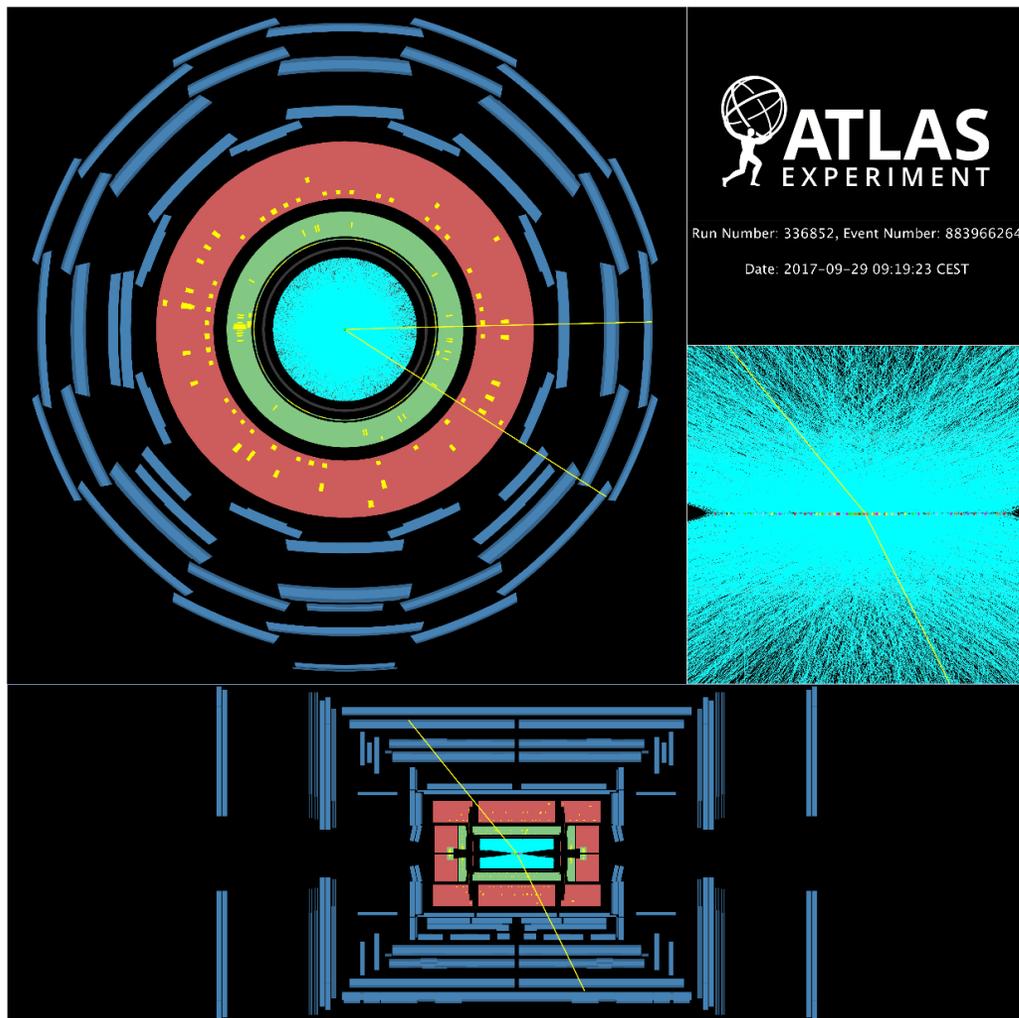
$Z^{(*)} \rightarrow tt + X \rightarrow e\mu + Y$ - процесс Дрелла-Яна

$ggF h \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$ - 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



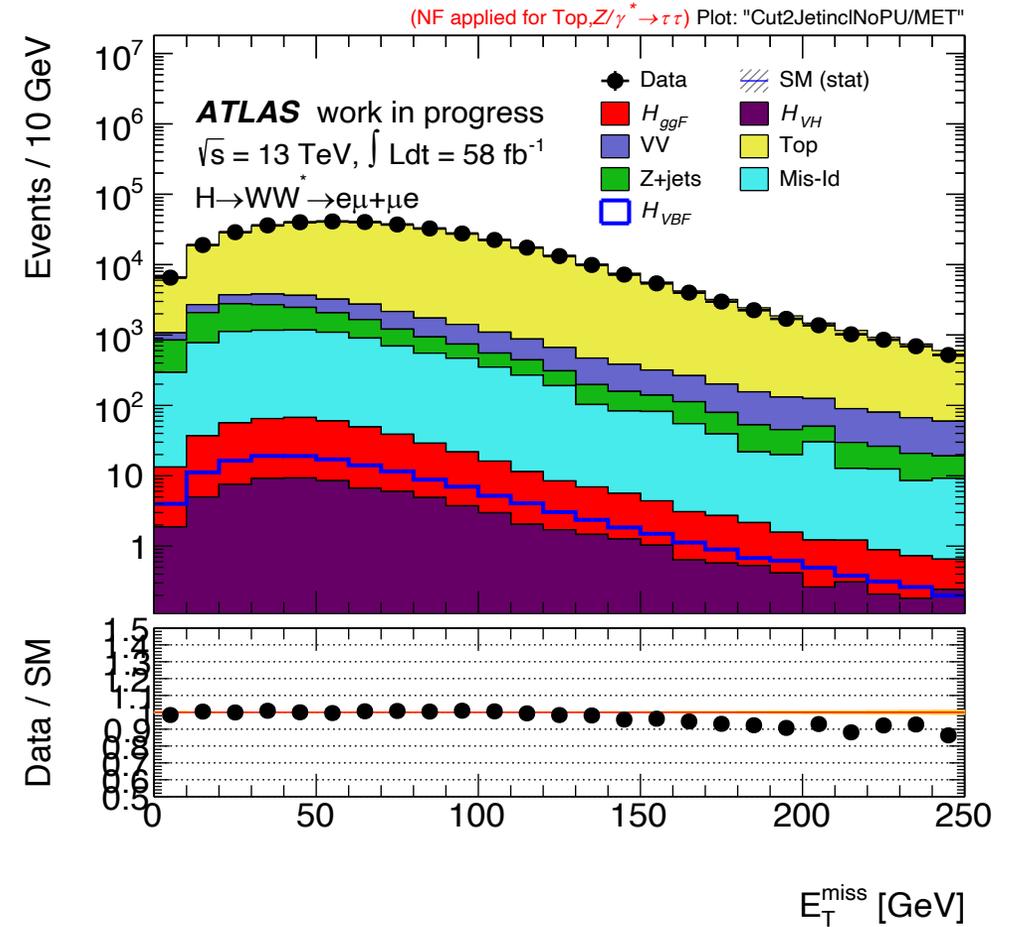
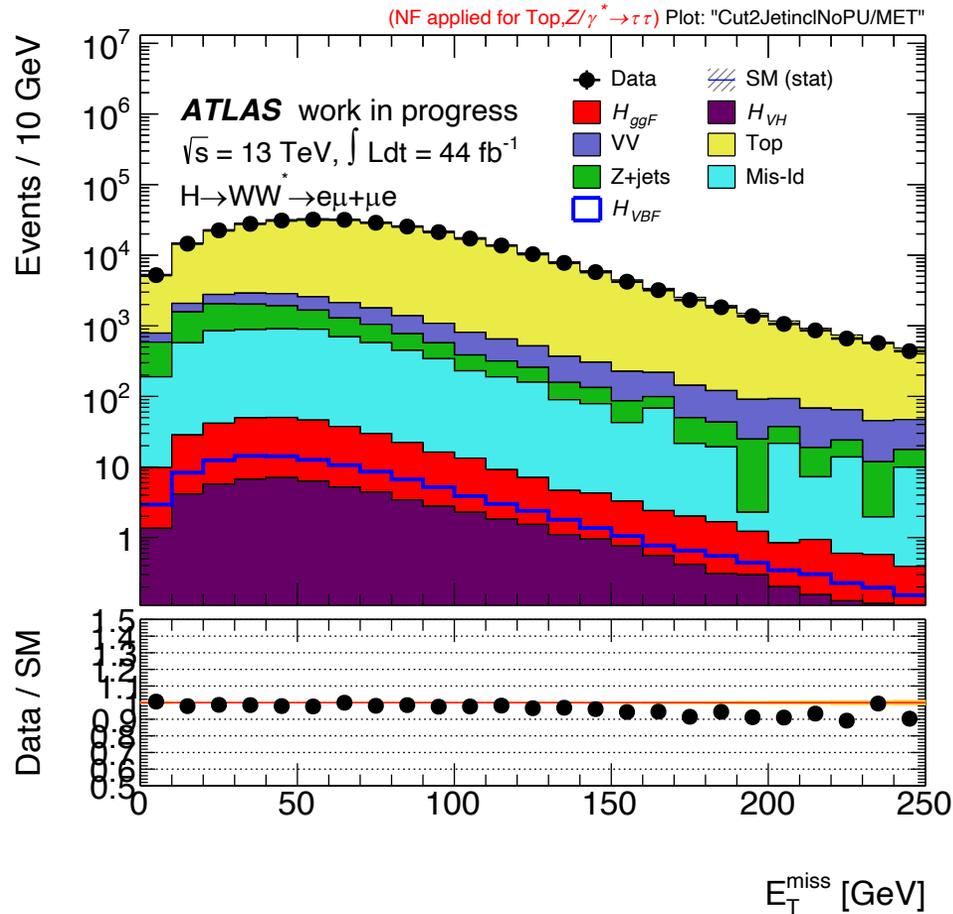
Среднее количество взаимодействий в одном пересечении пучков по годам набора статистики.

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

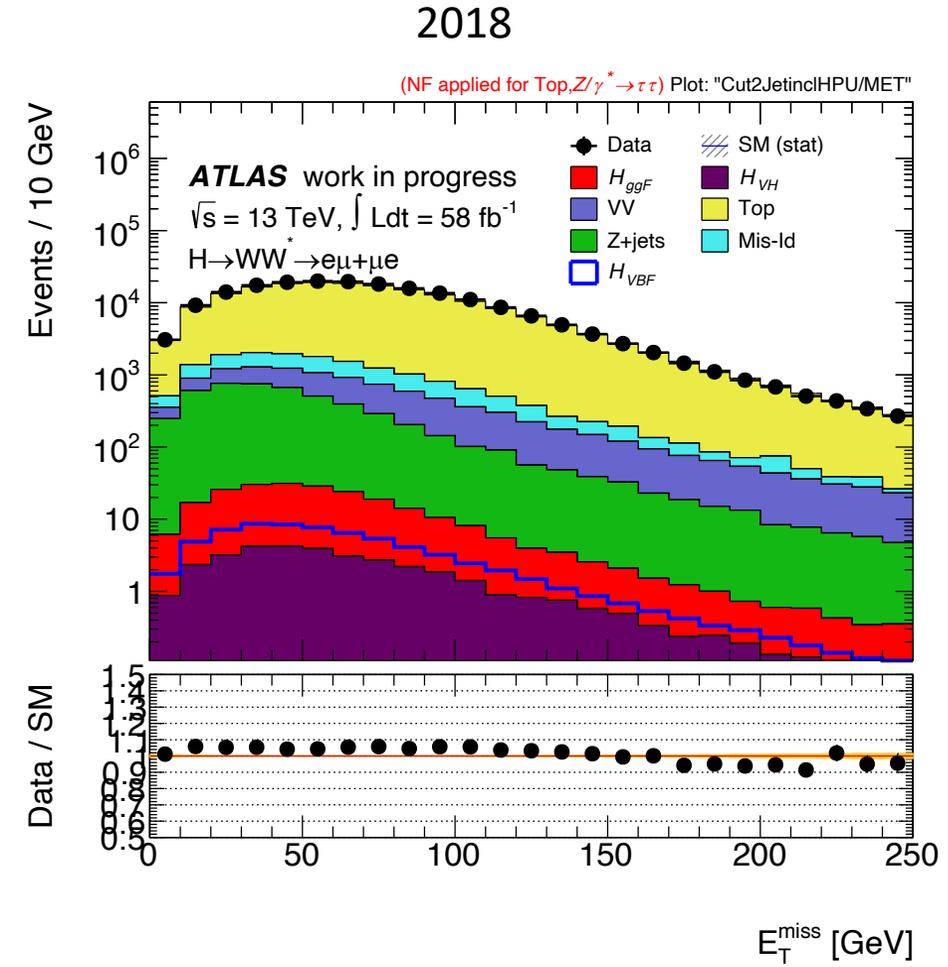
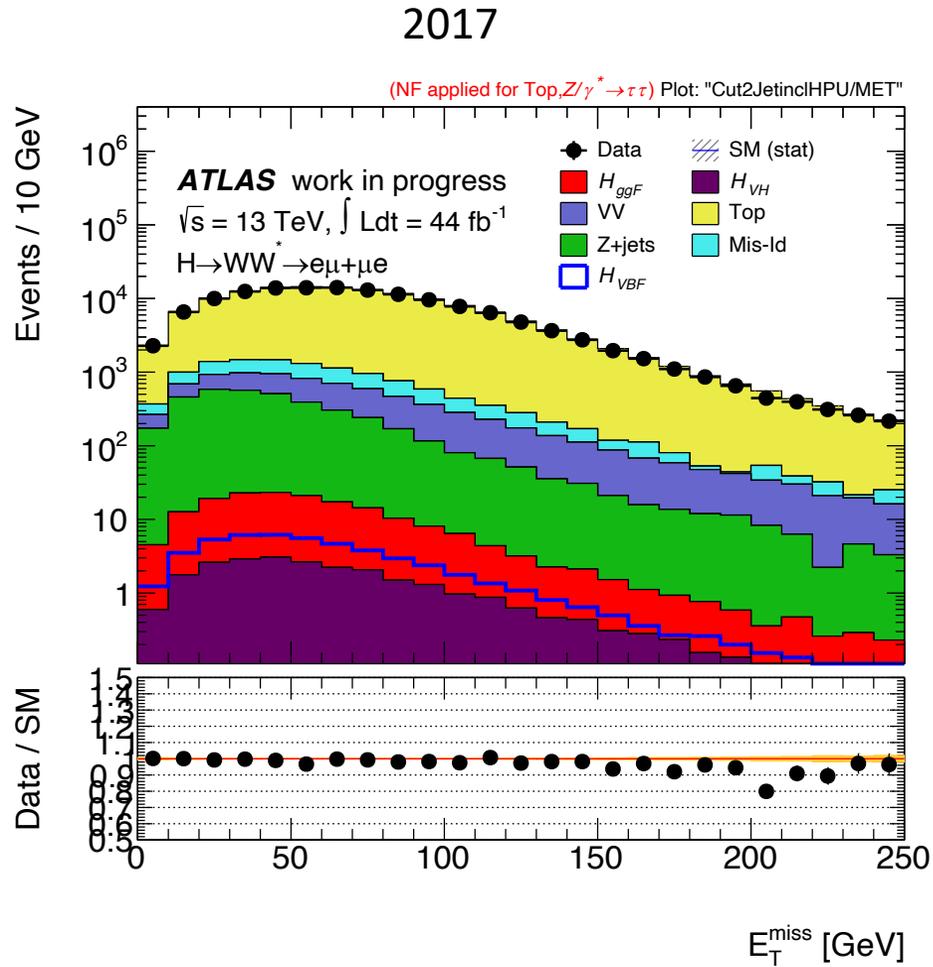
2017

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 $\mu > 36$

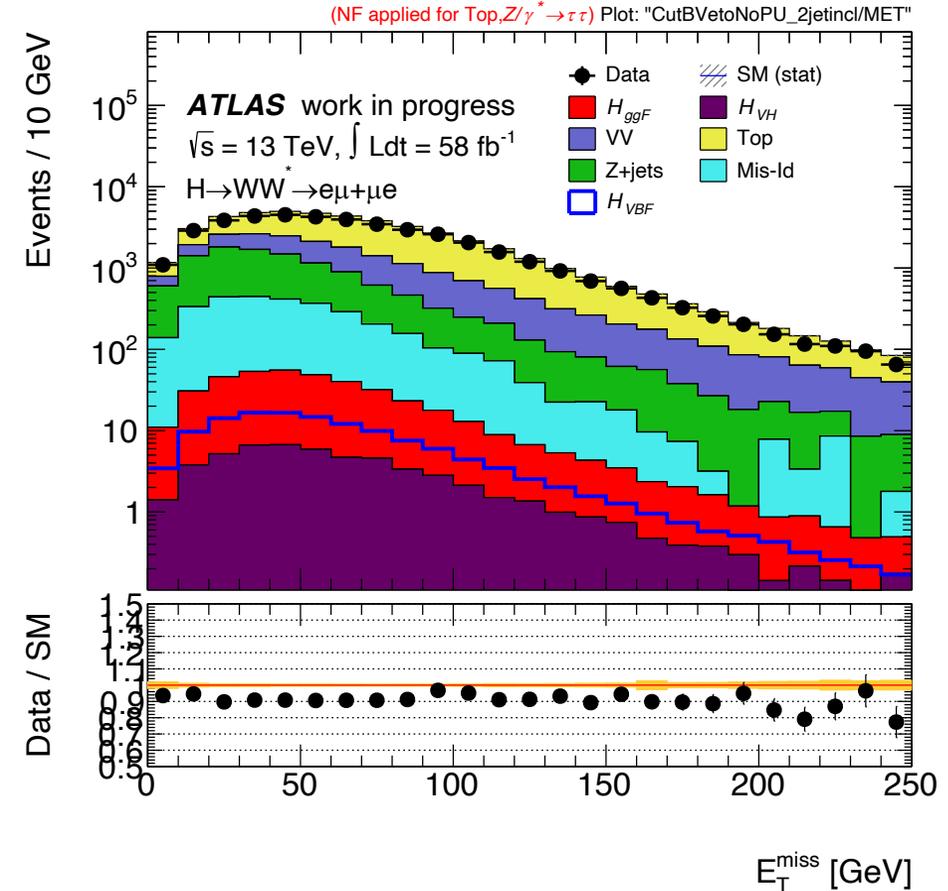
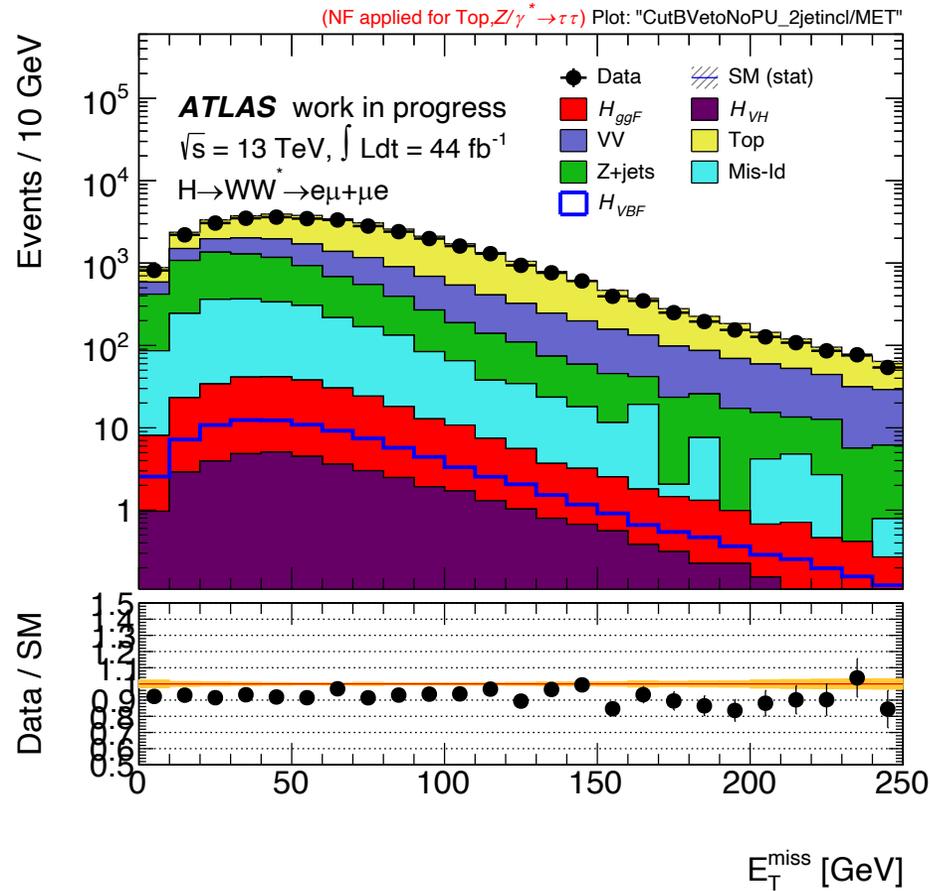


Данные и Монте-Карло моделирование находятся в согласии до 150 ГэВ

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

2017

2018

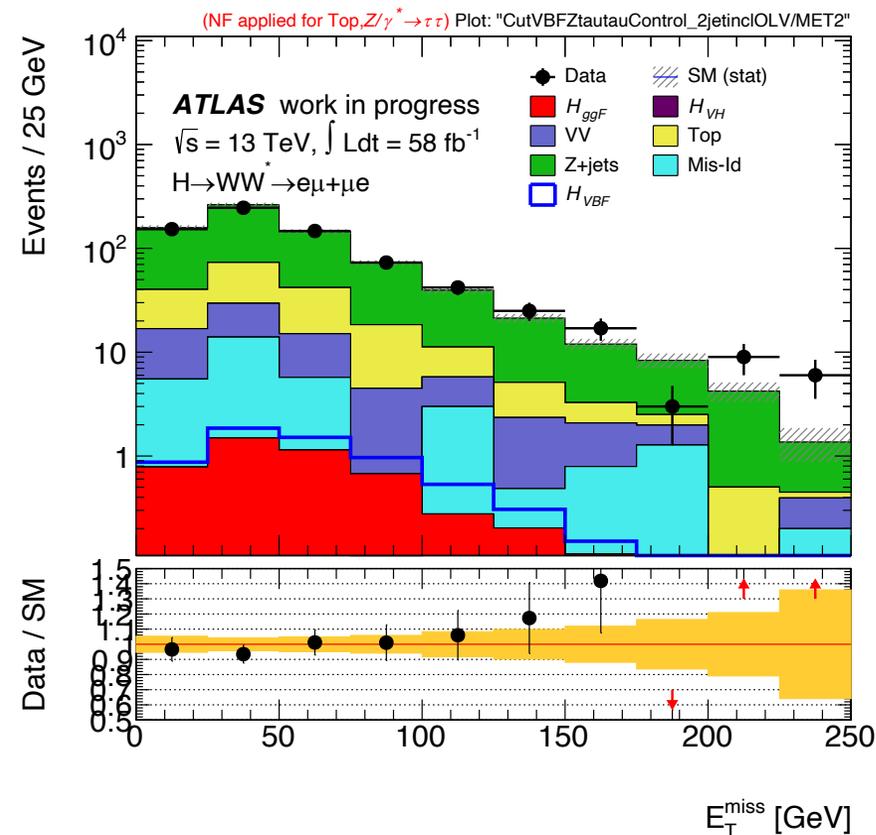
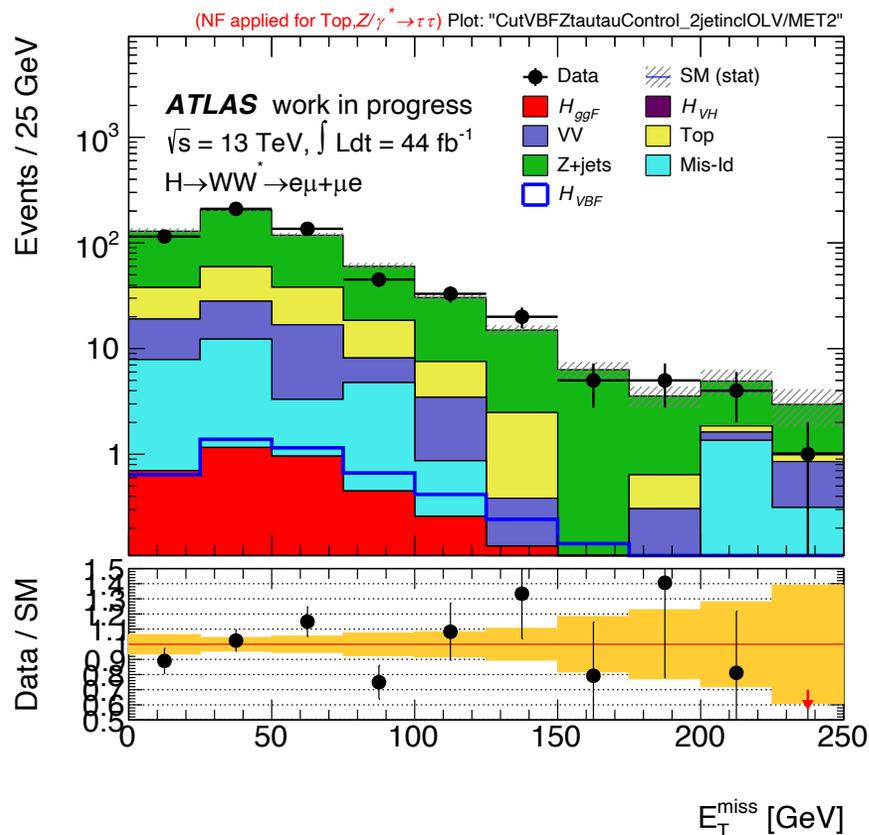


Наблюдается интегральный дефицит данных в 5-7%

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

2017

2018

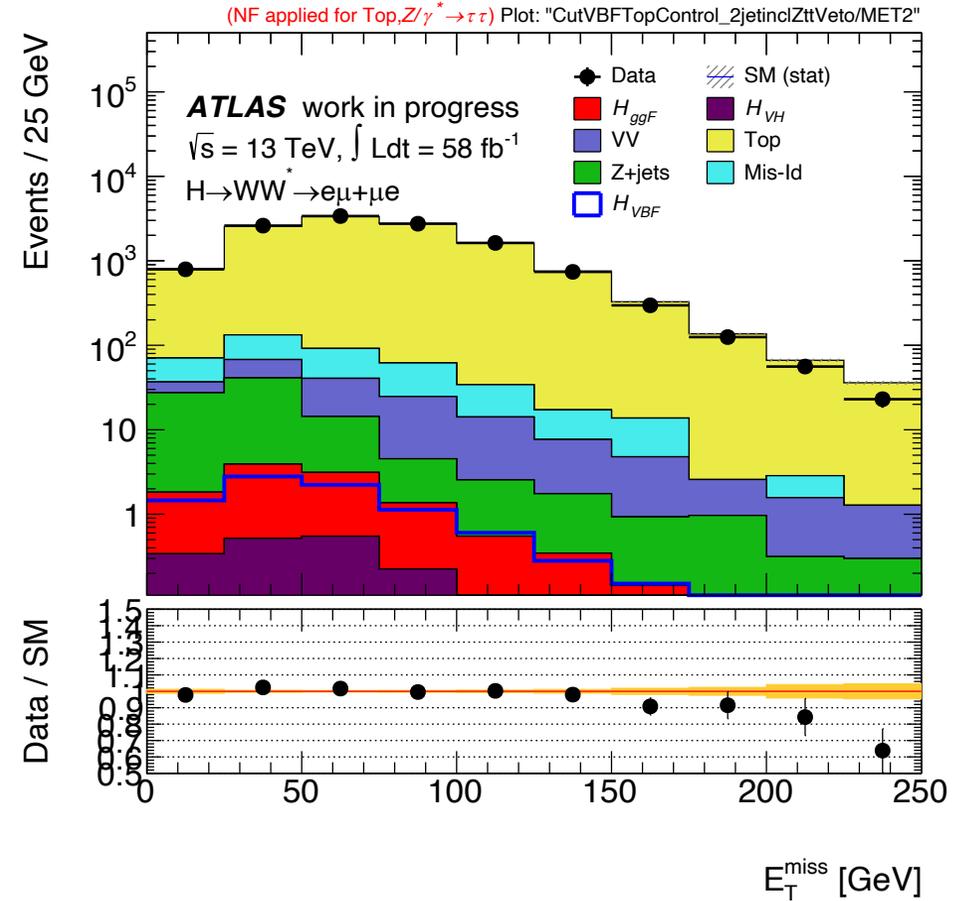
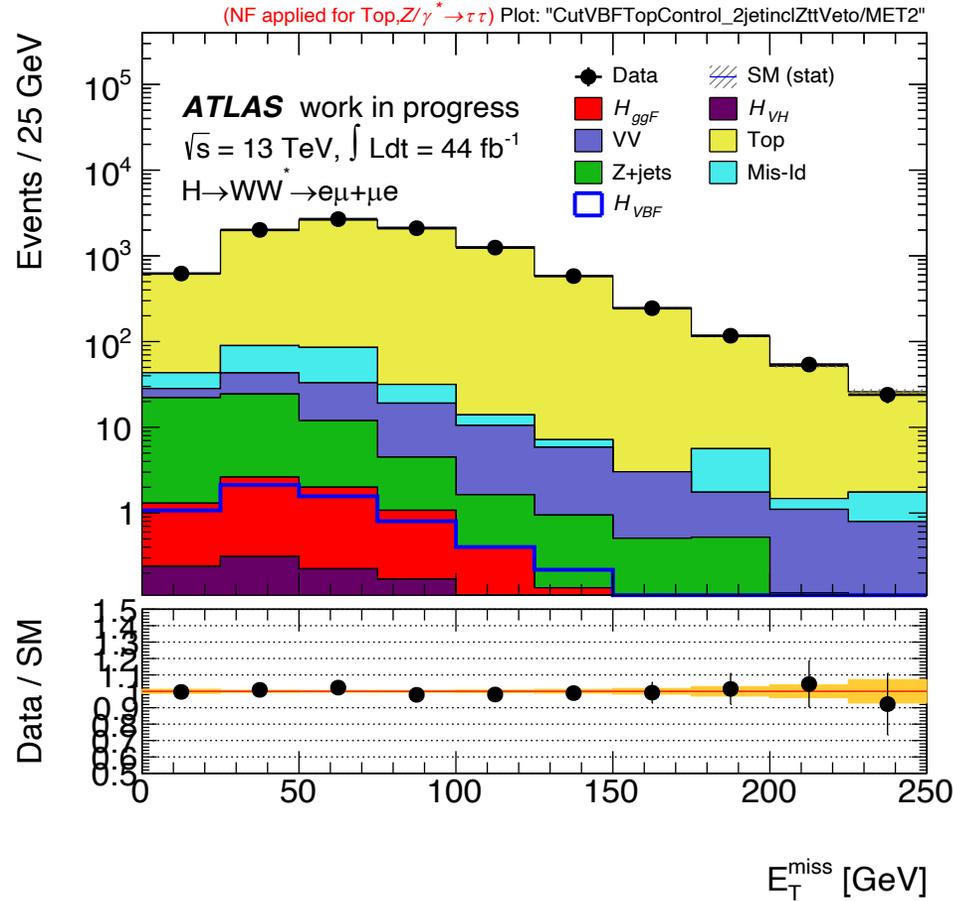


Удовлетворительное согласие данных и Монте-Карло моделирования

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

2017

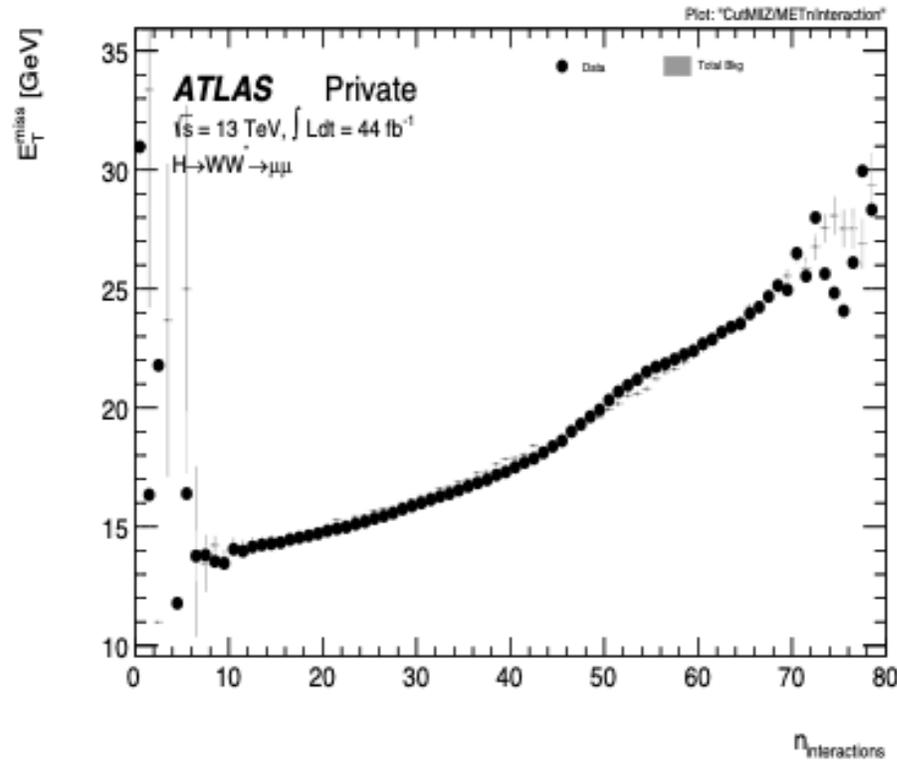
2018



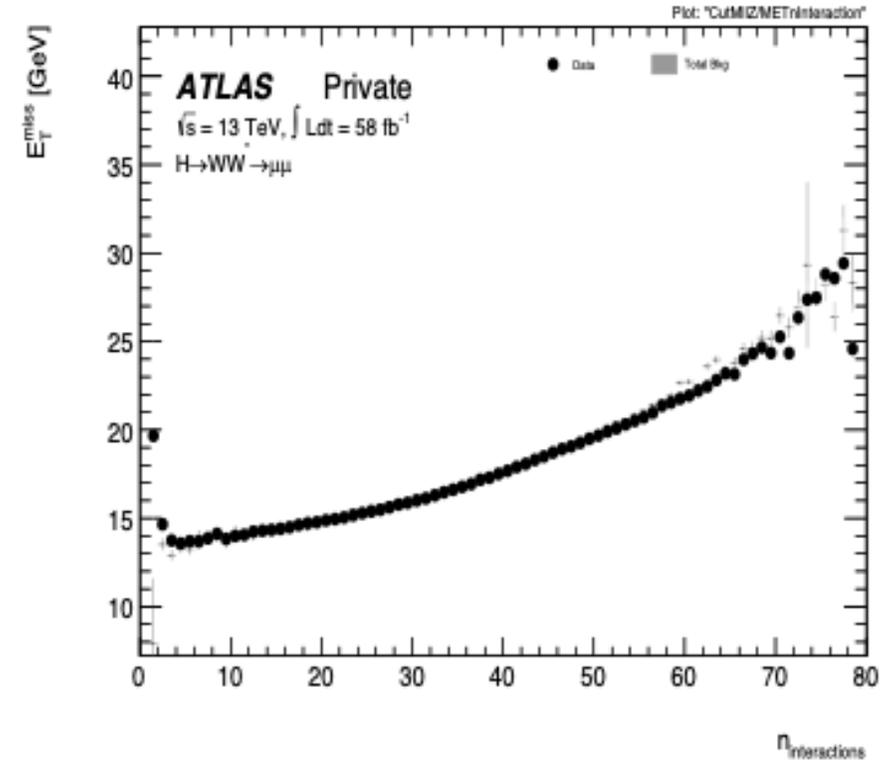
Видно, что вклад этого фона на 2 порядка превышает вклад от других процессов, что говорит о правильности выбора данной области

Зависимость среднего значения модуля вектора недостающего поперечного импульса от числа взаимодействий μ 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}** .

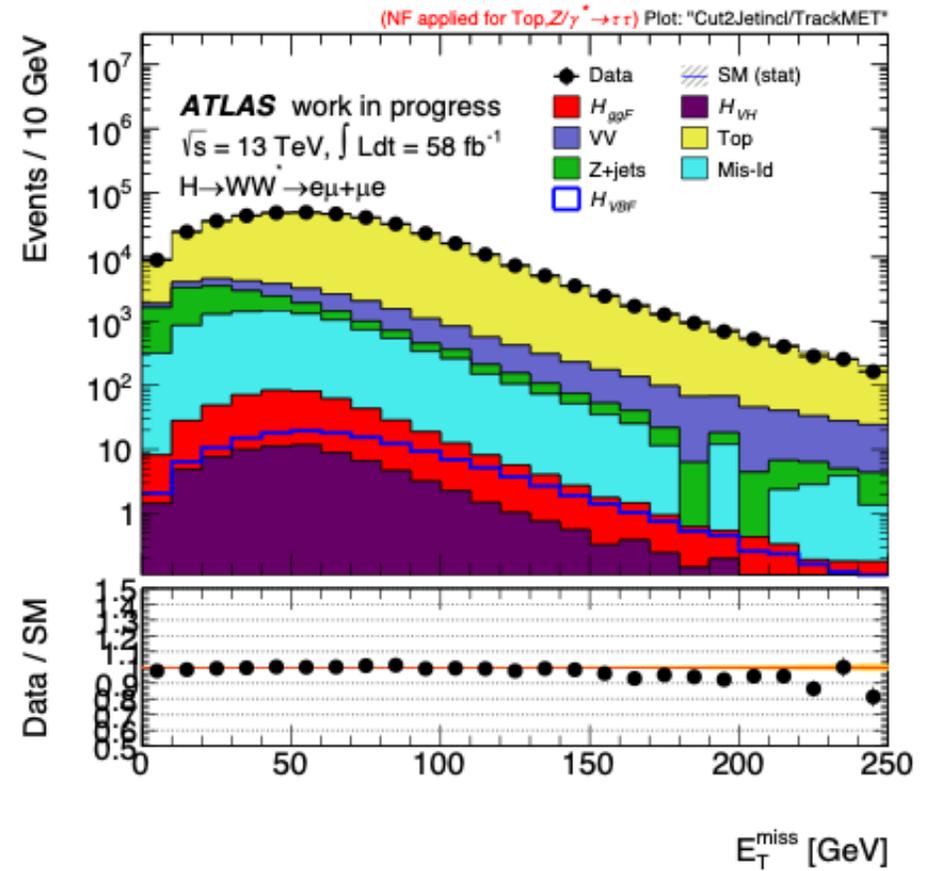
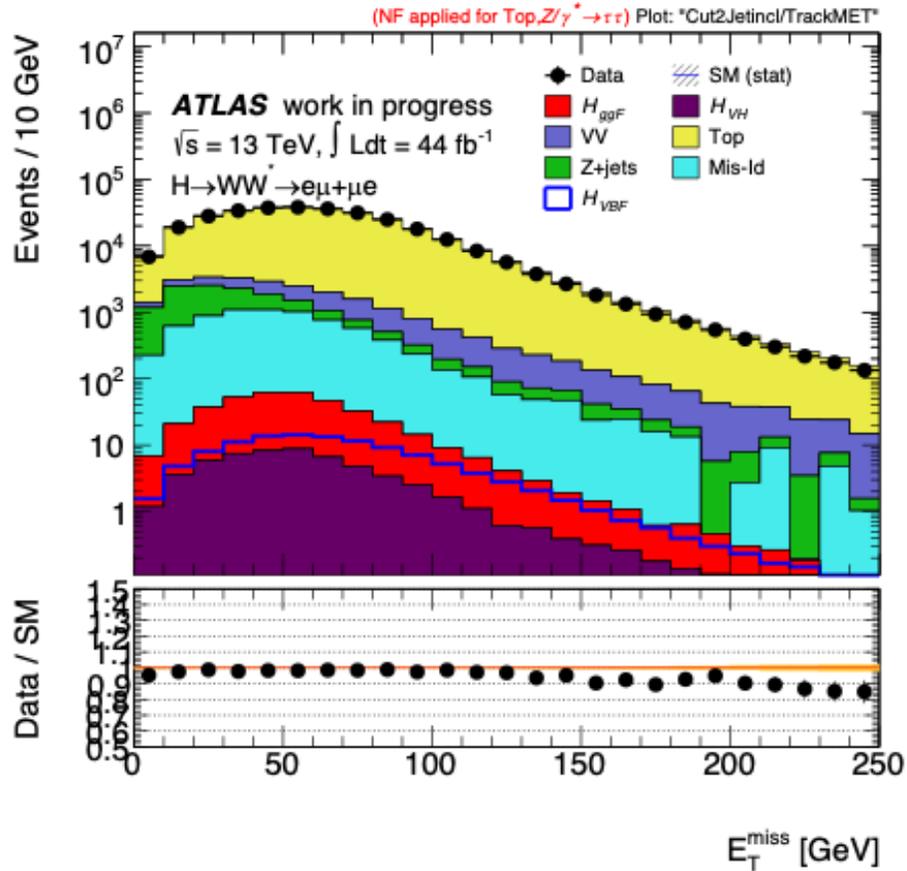
Track E_T^{miss} . При восстановлении вектора недостающего поперечного импульса в этом варианте используется только информация с трекера.

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

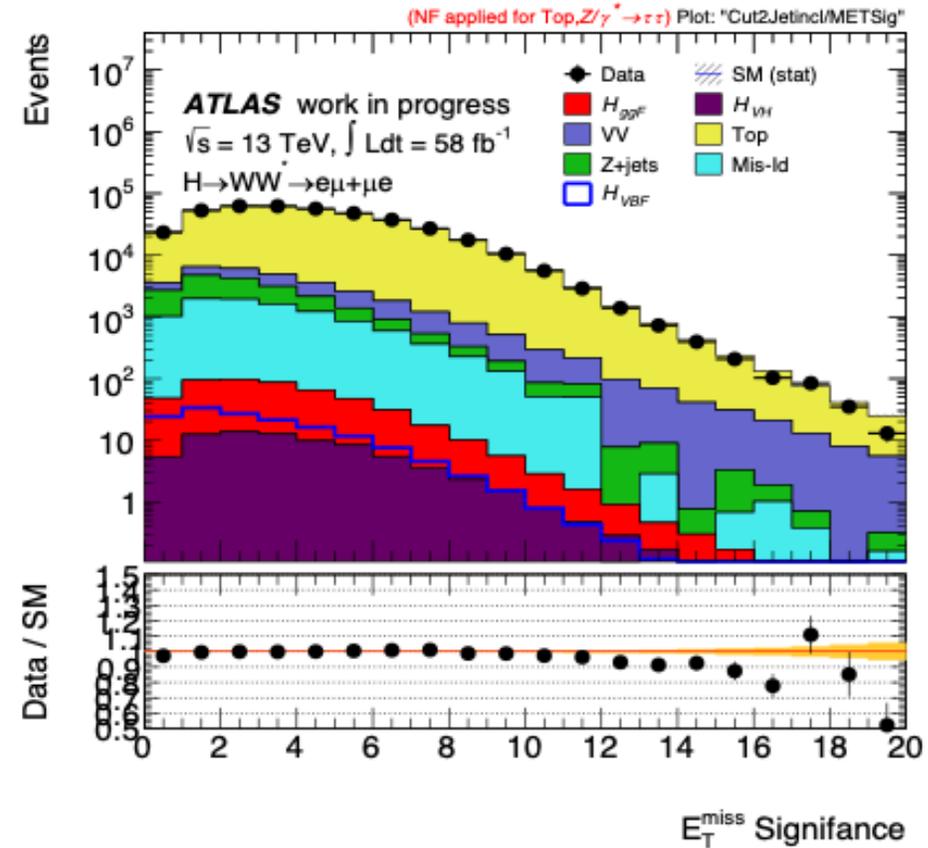
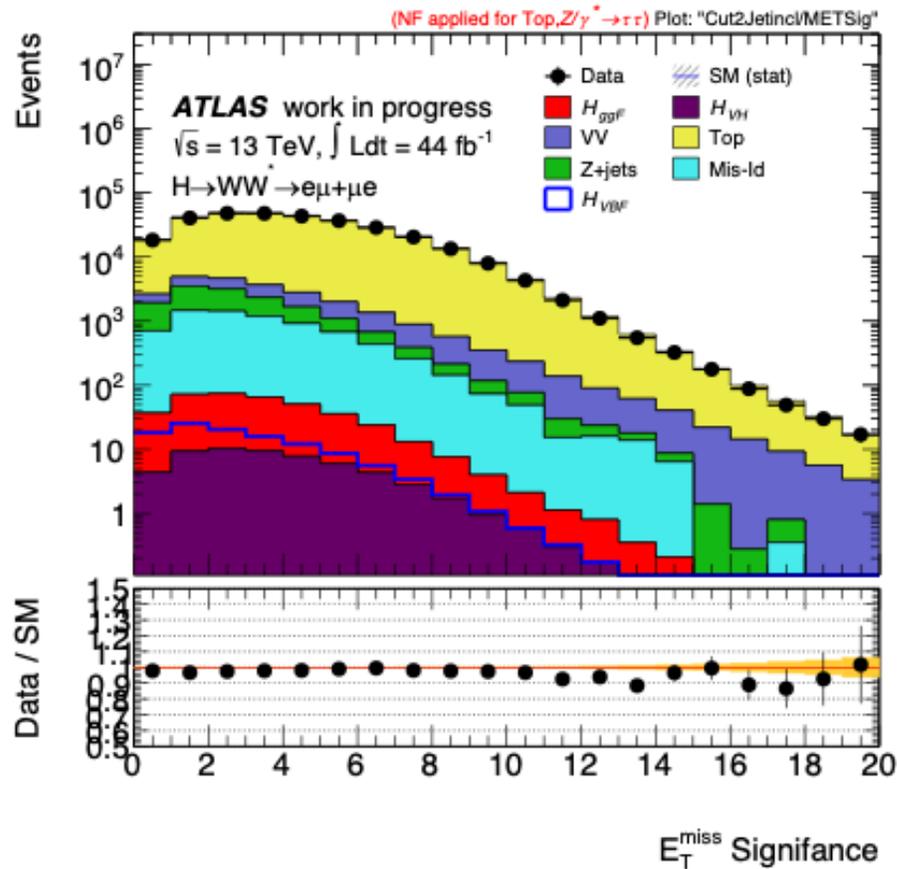


Наблюдается хорошее согласие данных и МС-моделирования в диапазоне от 0 до 120-150 ГэВ

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

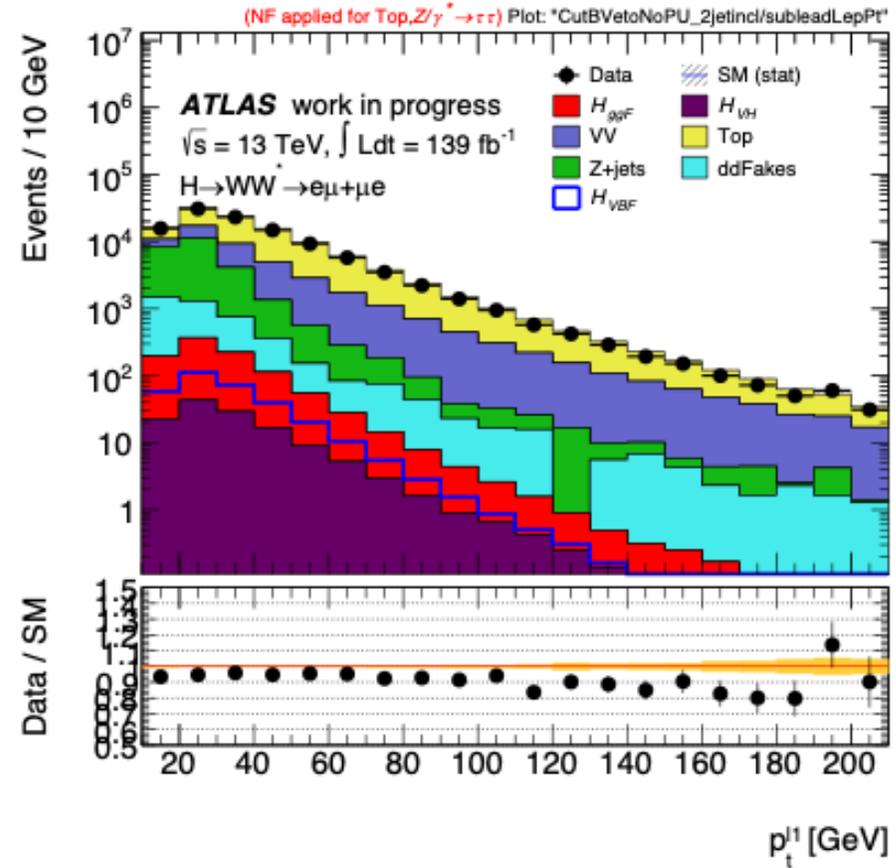
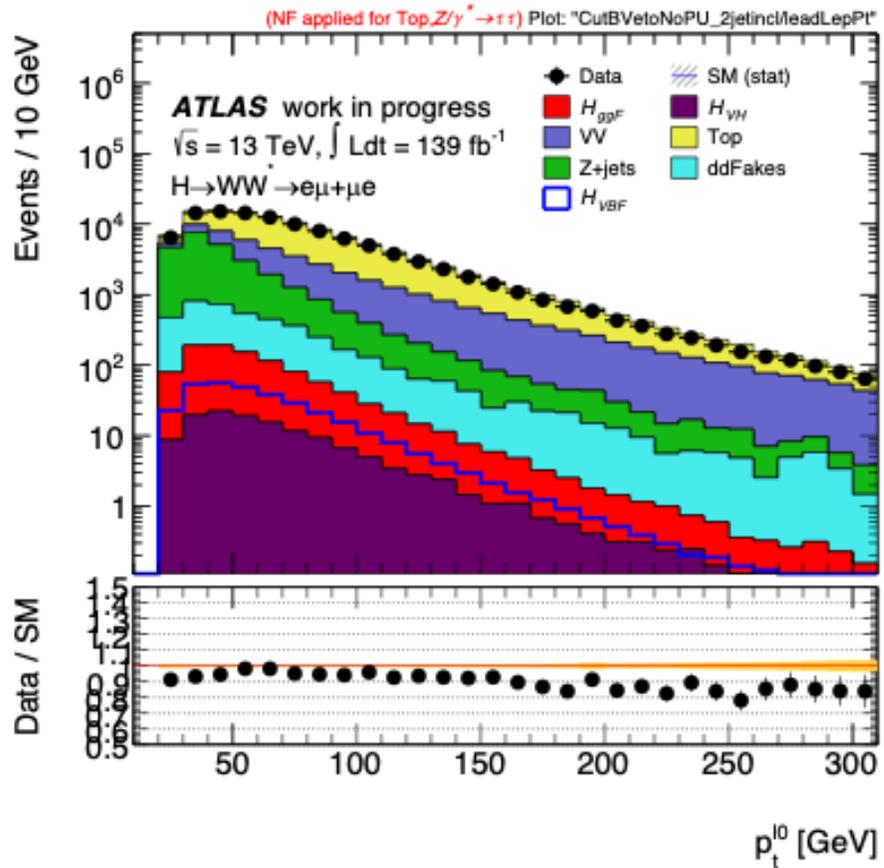
2017

2018



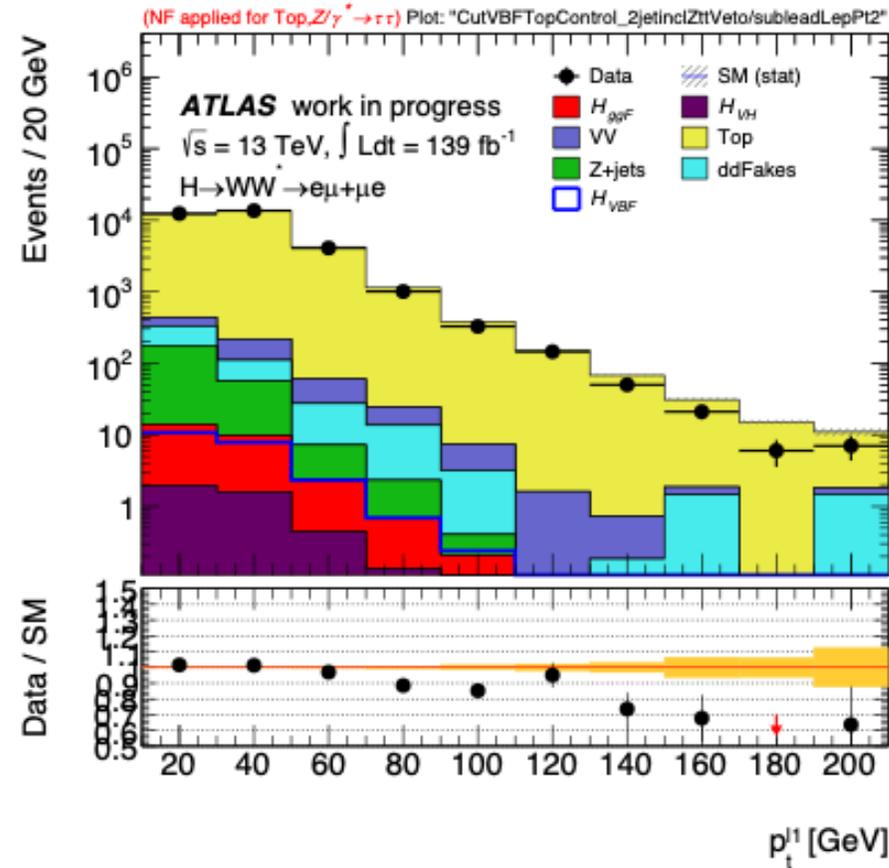
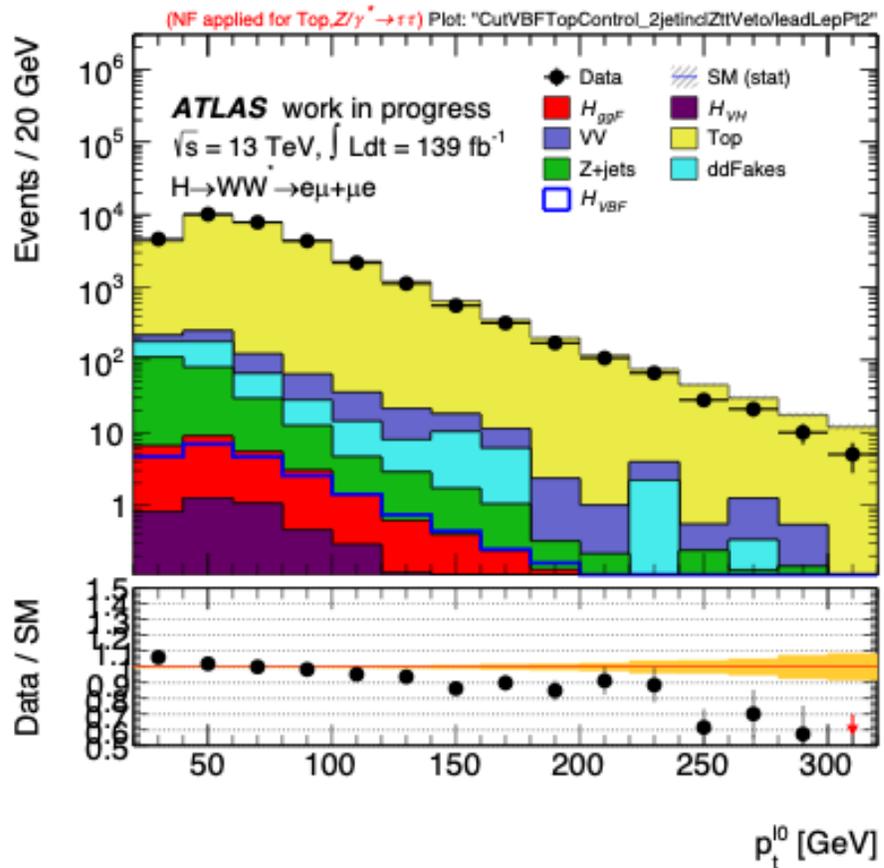
Удовлетворительное согласие данных и МС

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!