

семинар ЛТФ ОИЯИ 16.05.2024

доклад по теме защиты кандидатской диссертации по специальности 1.3.15. –

«Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий»

Исследование канала распада бозона Хиггса

$H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow \ell\nu\ell\nu$ на установке ATLAS

Гаврилюк Александр Александрович

Дубна — 2024

Научный руководитель:

доктор физ.-мат. наук

Цукерман Илья Ильич

Содержание

- Введение
- Бозон Хиггса на LHC
- **Исследование качества восстановления адронных струй в событиях с двумя лептонами в конечном состоянии**
 - Развитие модуля профильных гистограмм
 - Изучение событий $Z \rightarrow ee$ и $Z \rightarrow \mu\mu$ в данных 2015 – 2016 гг.
 - Сравнение двух алгоритмов восстановления адронных струй
 - Анализ данных 2017 – 2018 гг.
- **Изучение рождения бозона Хиггса SM в канале распада $H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$**
 - Анализ, основанный на данных эксперимента ATLAS за 2015 – 2016 гг.
 - Анализ, основанный на данных эксперимента ATLAS за 2015 – 2018 гг.
- **Поиски тяжёлого бозона Хиггса и других бозонных резонансов**
 - Конечное состояние с электроном и мюоном
 - Канал одинакового аромата лептонов конечного состояния

Цель и задачи работы

- Измерение констант связи стандартного бозона Хиггса, а также поиск дополнительных резонансов (включая тяжёлый бозон Хиггса) в канале распада $H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow \ell\nu\ell\nu$ с использованием полного набора данных с эксперимента ATLAS при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ

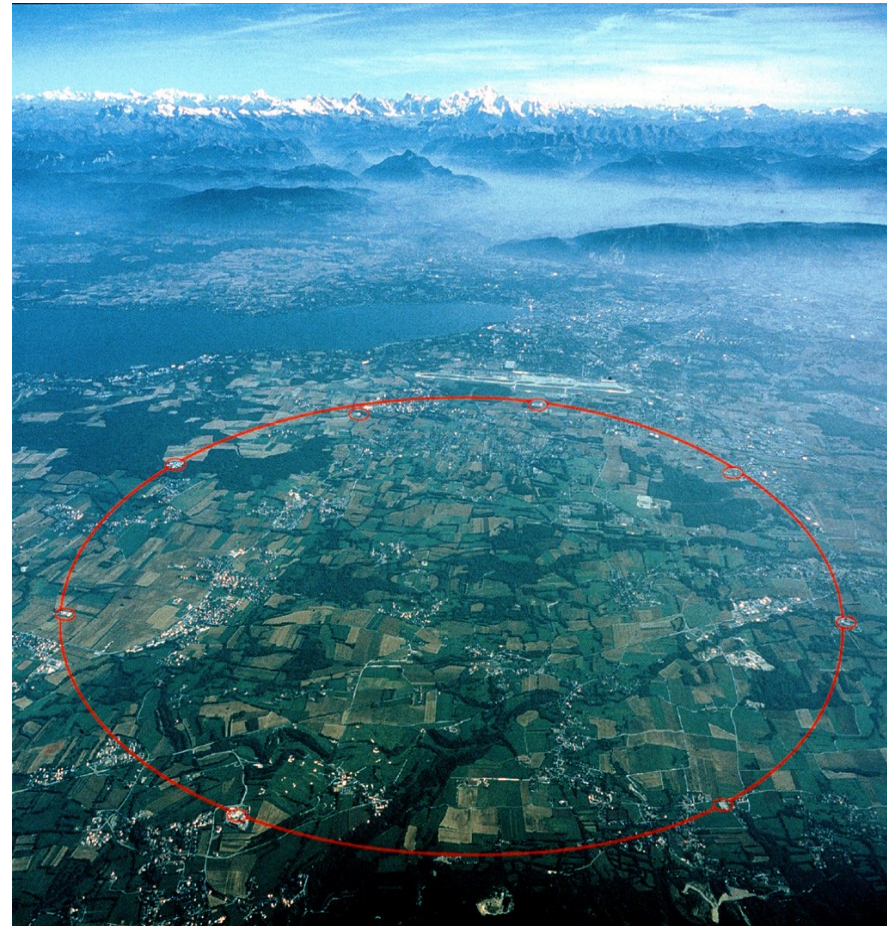
Для этого были решены следующие **задачи**:

1. Исследование свойств адронных струй на основе данных 2015–2016 г. с двумя лептонами в конечном состоянии;
 2. Расширение этого исследования на экспозиции 2017–2018 гг. при условиях повышенной светимости LHC;
 3. Измерение сечения рождения бозона Хиггса SM в механизме ggF на полной статистике событий с электроном и мюоном в конечном состоянии;
 4. Постановка верхних пределов на сечение рождения тяжёлых резонансов для того же конечного состояния и изучение не использованных ранее каналов распада $R \rightarrow WW \rightarrow e\nu e\nu$ и $R \rightarrow WW \rightarrow \mu\nu\mu\nu$.
- Работа выполнена в рамках участия НИЦ “Курчатовский институт” в международном сотрудничестве ATLAS в составе рабочей группы HWW.

Большой Адронный Коллайдер (LHC)

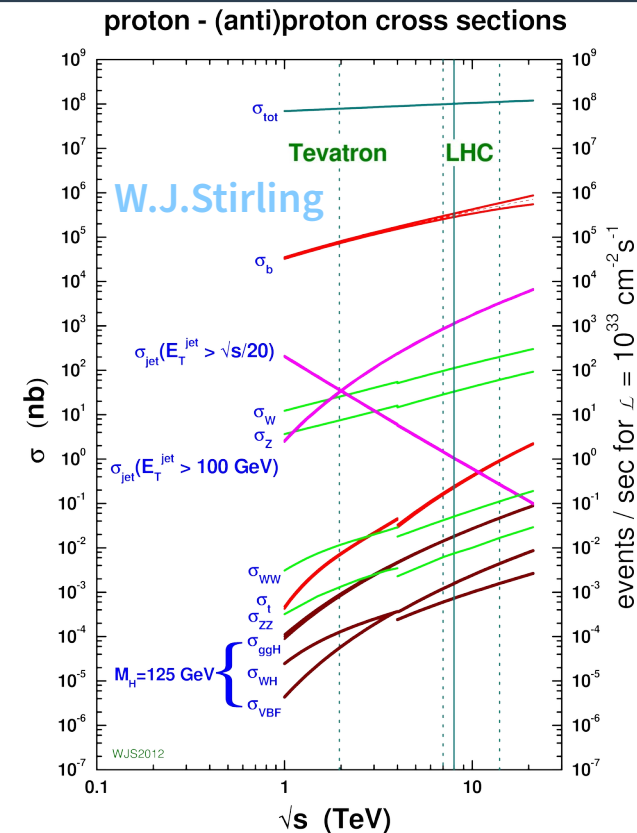
- LHC работал с протон-протонными столкновениями при энергии $\sqrt{s} = 7$ ТэВ в 2010-2011 (5.5 фб^{-1}) и при 8 ТэВ в 2012 (23.3 фб^{-1}), 50 нс между столкновениями;
- **После остановки в 2013-2014 возобновил работу при энергии 13 ТэВ в июне 2015 (146.9 фб^{-1})(25 нс с сентября)**
- После остановки в 2019-2021 продолжается работа при энергии 13.6 ТэВ (66 фб^{-1})
- Эксперименты: ATLAS, CMS, LHCb, ALICE – многоцелевые; также TOTEM, LHCf, MoEDAL
- $1 \text{ фб} = 10^{-15} \text{ барн} = 10^{-43} \text{ м}^2$

(JINST 3 (2008) S08001)



Бозон Хиггса в Стандартной Модели

- Взаимодействие с полем Хиггса обеспечивает фундаментальные частицы массами
- $m_H > 114.4$ ГэВ на 95% CL
Объединенные результаты экспериментов LEP
(PL B565 (2003) 61)
- Из прецизионного анализа электрослабых данных (lepewwg.web.cern.ch),
 $m_H = 94_{-24}^{+29}$ GeV т.е. $m_H < 152$ ГэВ на 95% CL
- **Обнаружен в экспериментах ATLAS**
(PL B716 2012 1) и **CMS** (PL B716 2012 30)



сечение рождения бозона Хиггса на 9-10 порядков меньше полного неупругого для pp

Модели для новых тяжёлых резонансов

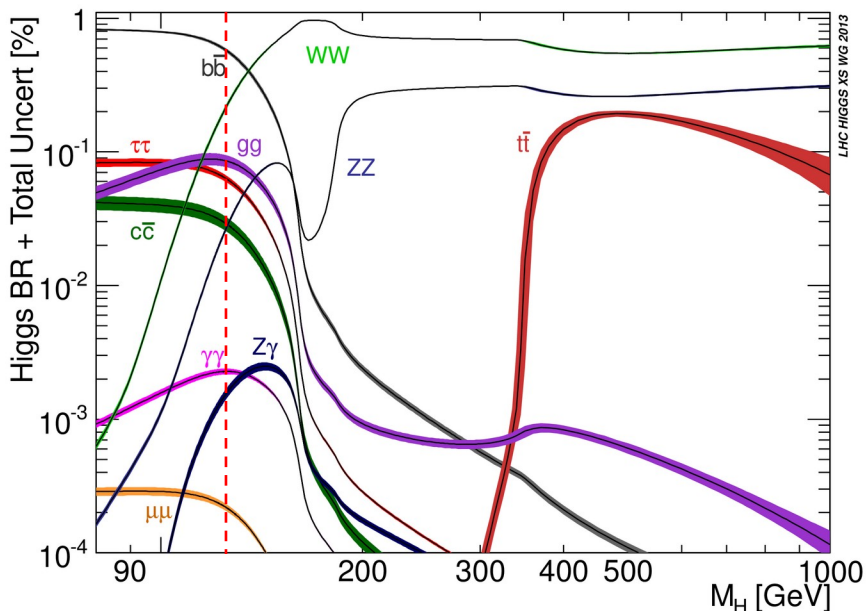
В рамках Стандартной Модели невозможно описать многие явления (тёмная материя и тёмная энергия, барионная асимметрия, своеобразная иерархия масс частиц и т. д.), поэтому необходимо развивать расширения СМ. В ATLAS рассматривались следующие модели:

1. **Narrow Width Approximation (NWA)**: тяжёлый двойник бозона Хиггса, но с фиксированной шириной $\Gamma=4$ МэВ, как у бозона Хиггса СМ с массой 125 ГэВ. Легко моделировать, интерференция с фоном очень мала
2. Модель **Georgi-Machacek**, предсказывающая 5 бозонов Хиггса: H^0 , H^\pm , $H^{\pm\pm}$. В специфических случаях у модели мало параметров
3. Модель **Randall-Sundrum (RS)** с дополнительными размерностями. Приводит к возбуждениям в виде **гравитонов Калуцы-Клейна** и скалярных **радионов**.
4. **Тяжёлый векторный триплет (HVT)**, в качестве нейтрального резонанса выступает Z'

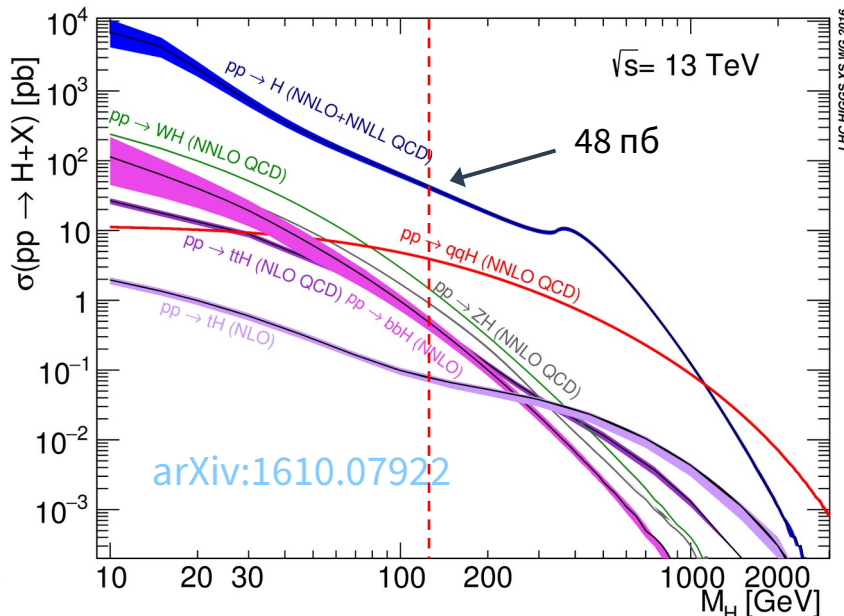
Канал $H \rightarrow WW \rightarrow \ell\nu\ell\nu$ ($\ell = e \mid \mu$, электрон или мюон)

У канала $H \rightarrow WW$ большая относительная вероятность распада (22% для SM H_{125} , >60% для тяжёлого NWA H).

$BR(WW \rightarrow \ell\nu\ell\nu) \approx 1/22$



Относительные вероятности распадов бозона Хиггса в СМ



Ожидаемые сечения рождения в СМ

Конечное состояние $\ell\nu\ell\nu$ наиболее удобно для экспериментального изучения, но восстановить массу бозона Хиггса невозможно из-за двух нерегистрируемых нейтрино. Вместо этого можно использовать поперечную массу

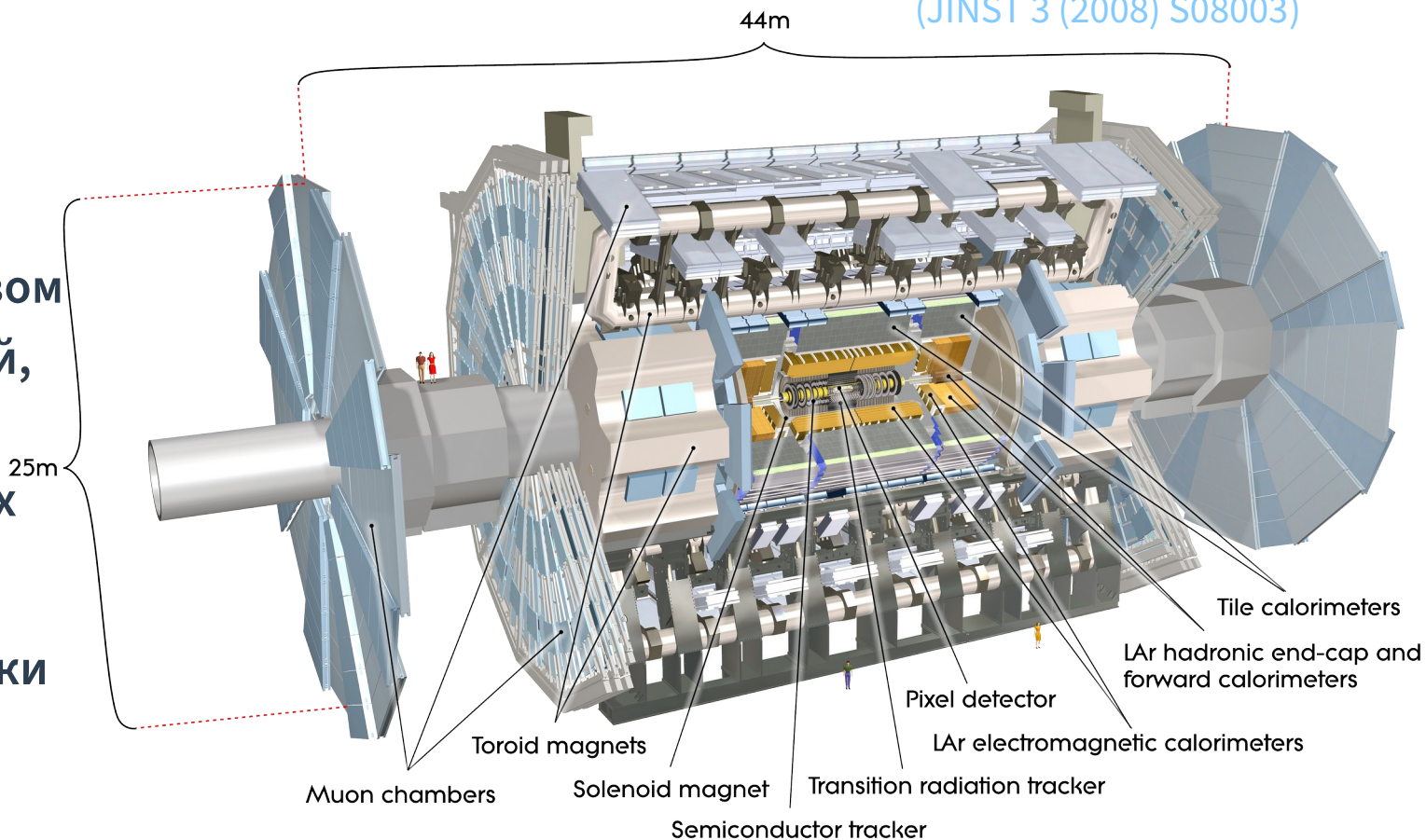
$$m_T = \sqrt{(E_T(\ell\ell) + E_T^{miss})^2 - |\vec{p}_T(\ell\ell) + \vec{E}_T^{miss}|^2} \quad E_T(\ell\ell) = \sqrt{|\vec{p}_T(\ell\ell)|^2 + m(\ell\ell)^2}$$

Детектор АТЛАС

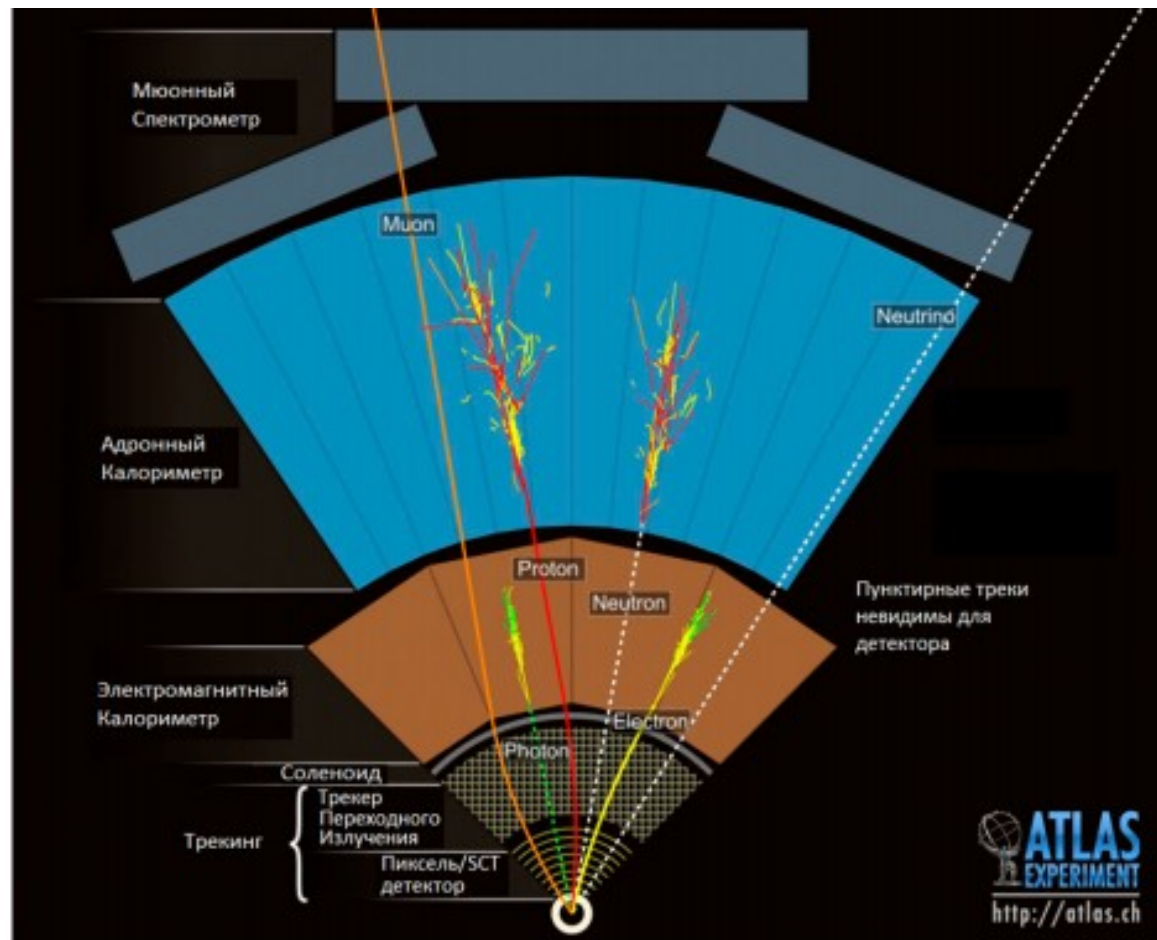
(JINST 3 (2008) S08003)

Цель эксперимента:

- изучение Стандартной Модели (СМ) в новом диапазоне энергий, прецизионные измерения важных параметров
- поиск новой физики за пределами СМ



Восстановление объектов



Электроны – комбинация ID (треки и вершины) и ЭМ калориметра (энергетические кластеры)

Мюоны — согласованные треки из ID и MS

Струи – энерговыделение в калориметрах, для заряженных адронов также информация из ID

E_{T}^{miss} (**недостающий поперечный импульс**) – комбинация всей доступной информации

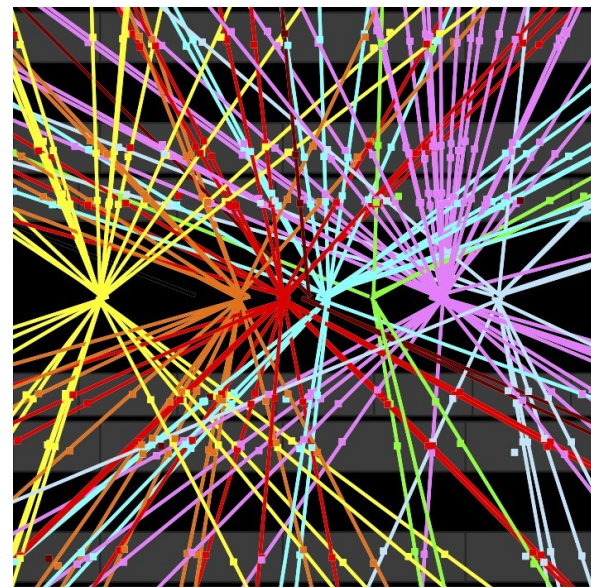
Вершины взаимодействия (первичные и вторичные) – информация из ID (треки заряженных частиц с $p_T > 0.4$ ГэВ)

ID – внутренний детектор

MS – мюонный спектрометр

Моделирование и реконструкция событий в установке ATLAS

- Моделирование редкого взаимодействия с большим переданным импульсом (жёсткого события) и наложенных мягких событий с использованием MC-генераторов;
- симуляция взаимодействия получившихся частиц с веществом установки с помощью GEANT4, оцифровка отклика;
- реконструкция событий, аналогичная проводимой для реальных данных. Энергия измеряется в калориметрах, импульсы заряженных частиц вычисляются по трекам внутреннего детектора в магнитном поле (для мюонов дополнительно в тороиде после калориметров), по трекам восстанавливаются первичные и вторичные вершины
- Серия калибровок, отборов событий по типу обнаруженных частиц, вычисления дополнительных переменных и отбрасывание ненужных в цепочке преобразования файлов



Наложение событий cds.cern.ch

Восстановление адронных струй

- EMТоро: восстановление на основе топологических кластеров из энерговыделений в ячейках калориметра. Струя считается восстановленной при превышении поперечной энергии кластера 7 ГэВ. Выполняется многоступенчатая процедура калибровки — коррекция на угол вылета, удаление энергии наложенных событий, калибровка по хорошо восстановленным Z или γ .
- EMРFlow: из калориметра удаляются кластеры, связанных с треками внутреннего детектора. Благодаря использованию информации о треках увеличивается чувствительность и улучшается точность.

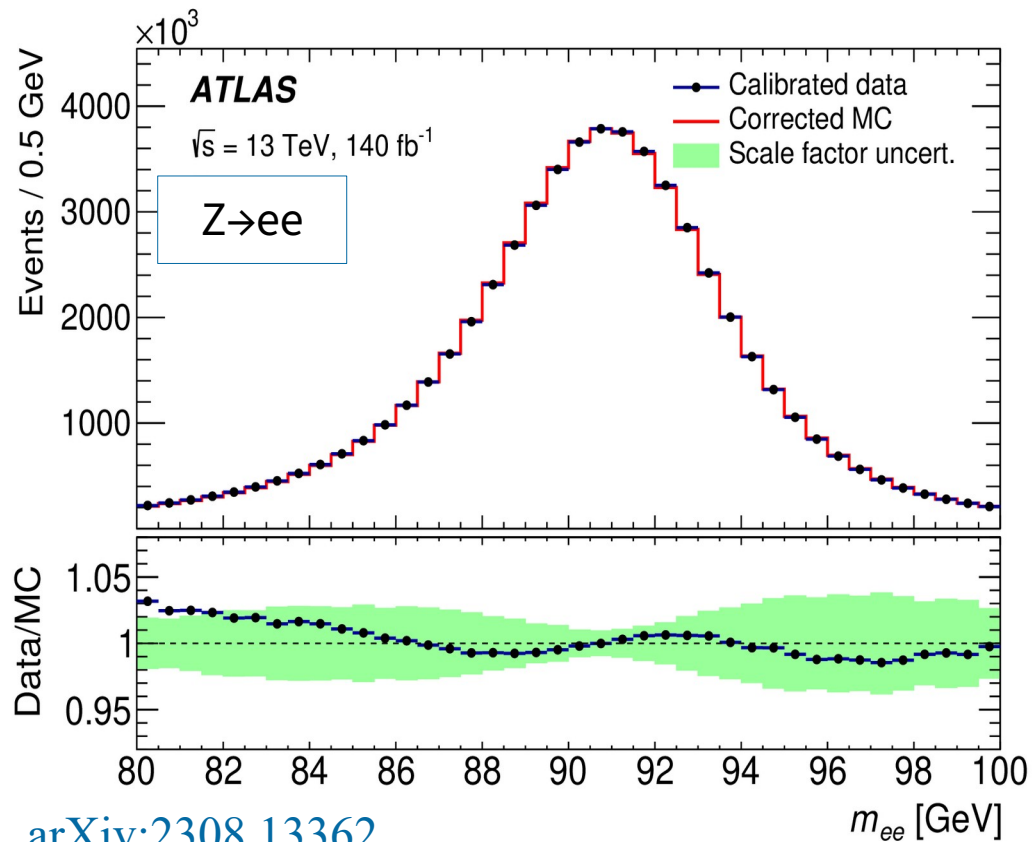
**Исследование качества восстановления адронных струй
в событиях с двумя лептонами в конечном состоянии**

События $Z \rightarrow \ell\ell$ и исследования $H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow \ell\nu\ell\nu$

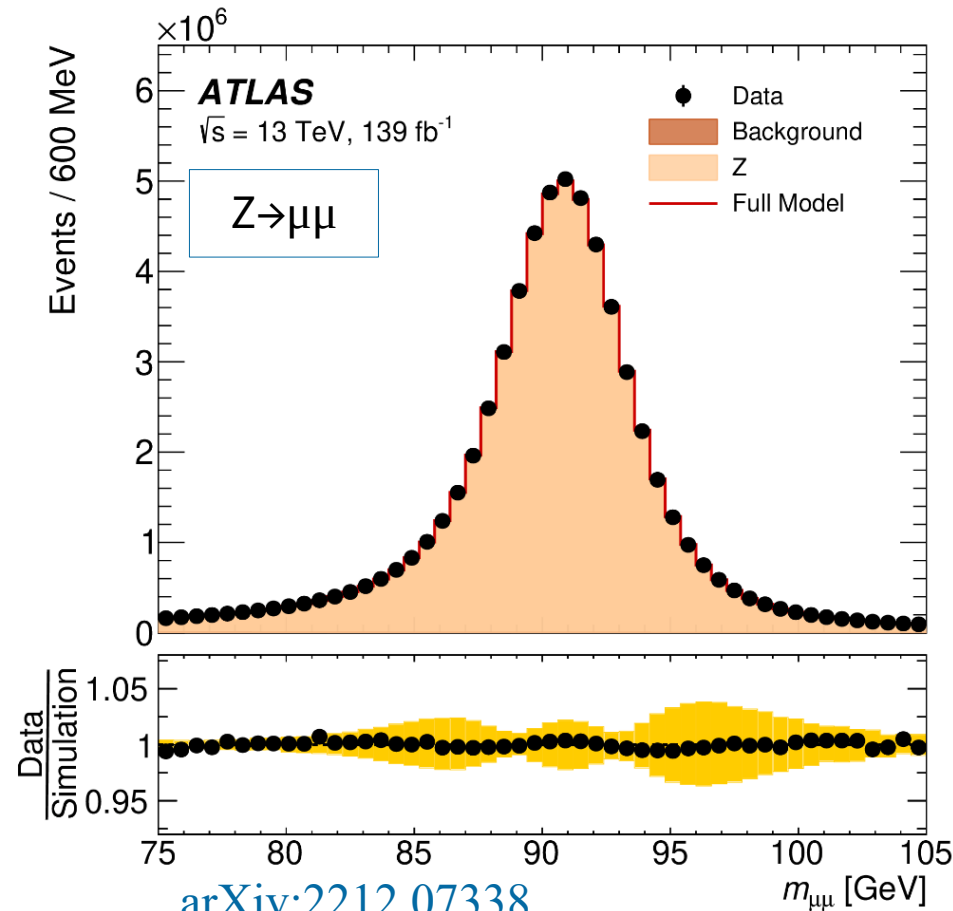
- ✓ $Z \rightarrow \ell\ell$: $O(100\text{M})$ событий), чистое состояние $ee/\mu\mu$, идеальное для изучения наложения событий.
- ✓ Является главным фоном к $H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow \ell\nu\ell\nu$ для случая $ee/\mu\mu$ и существенным для $e\nu\mu\nu$ (через $Z \rightarrow \tau\tau$)
- ✓ Это исследование одинаково применимо для изучения SM H и поиска тяжёлого H , т. к. отбор струй одинаковый ($p_T > 30 \text{ GeV}$ при всех $|\eta| < 4.5$)
- Изучение данных 2015–16 гг. с использованием алгоритма восстановления струй EMToro.
- Сравнение алгоритмов EMToro и EMPFlow в данных 2017–18 гг.

Отобраны события с двумя противоположно заряженными лептонами одинакового аромата ($p_T^{l,\text{lead}} > 22 \text{ GeV}$, $p_T^{l,\text{sublead}} > 15 \text{ GeV}$) с $|m_{\ell\ell} - m_Z| < 10 \text{ GeV}$

Восстановление $Z \rightarrow \ell\ell$ по инвариантной массе



[arXiv:2308.13362](https://arxiv.org/abs/2308.13362)

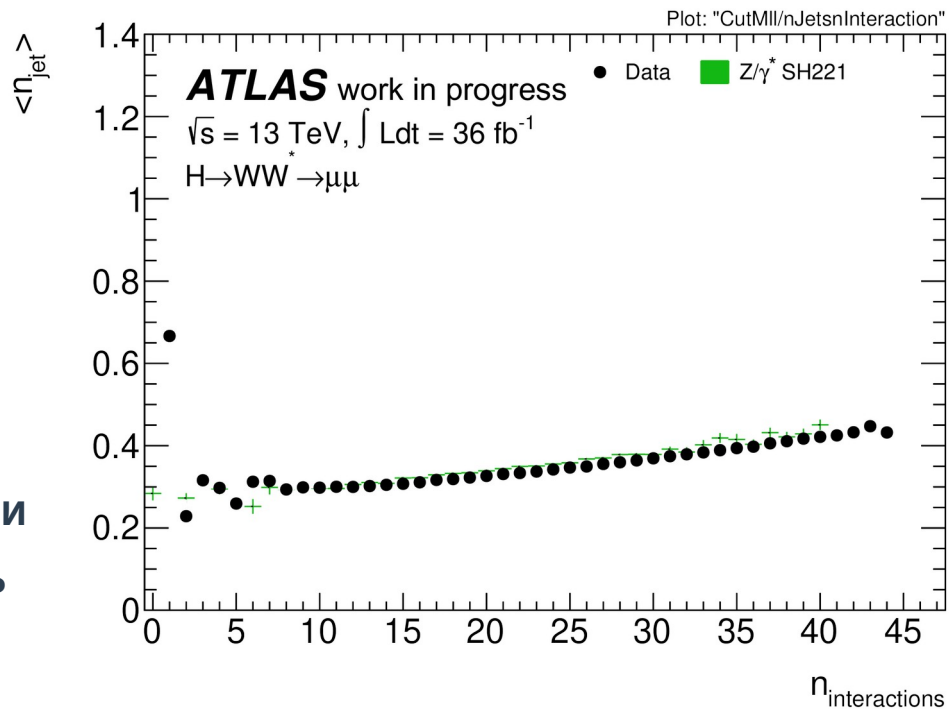


[arXiv:2212.07338](https://arxiv.org/abs/2212.07338)

Развитие модуля профильных гистограмм — на защиту

- Для информационной среды CAF автором добавлена поддержка профильных гистограмм, нужных для отображения зависимости среднего значения одной величины от другой, см. рисунок.
- Разработан алгоритм фильтрации значений с очень большими погрешностями для использования на гистограммах оптимального диапазона — см. пример после оптимизации на слайде 20.
- Получено Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ. Программный модуль “TQProfiles v1.1” / А. А. Гаврилюк, И. И. Цукерман;

№2020662440



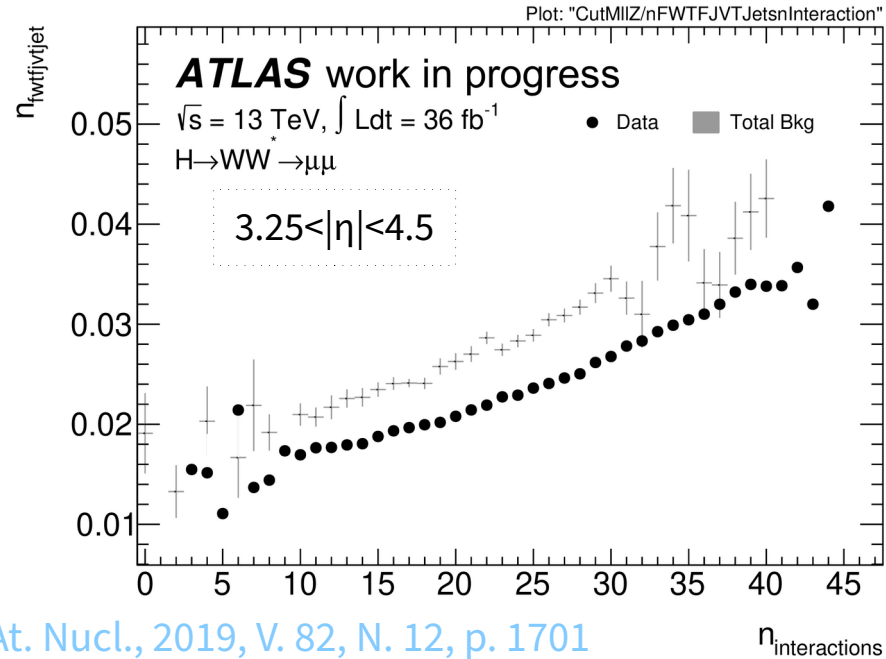
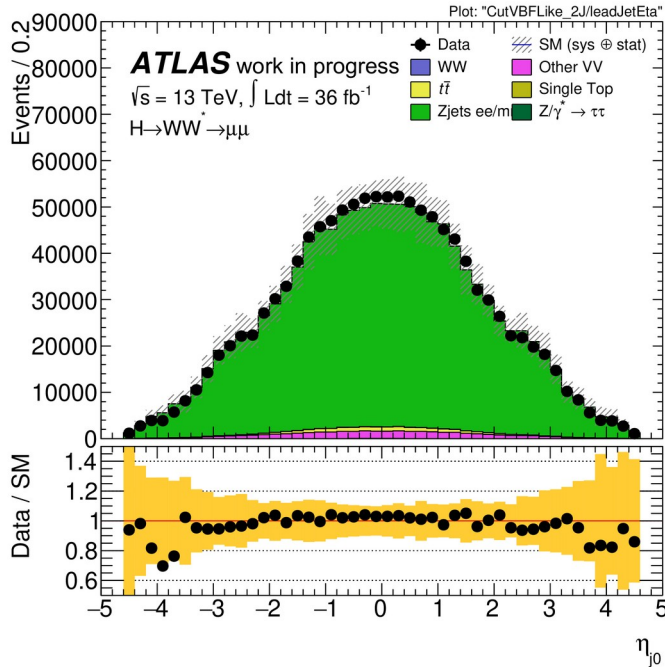
яд. физ. и инж., 2018, т9, N5, с497

Число $\mu\mu$ событий в тыс. с $|m_{ee} - m_z| \leq 10$ ГэВ в данных 2015–16 гг.

N_{jet}	WW	VV	Топ	$Z \rightarrow \mu\mu$	$Z \rightarrow \tau\tau$	Всего	Данные	Data/MC
Любое	5.6	204	22.4	17590	1.0	17823	18318	1.03
0	3.4	115	0.6	13413	0.7	13532	13984	1.03
1	1.4	53.2	4.2	3032	0.2	3091	3132	1.01
2	0.5	23.7	8.3	834	0.07	866	884	1.02
≥ 3	0.3	12.5	9.1	312	0.02	334	318	0.95

- ~99% отобранных событий связаны с Z-бозонами
- Было проверено, что почти 100% событий VV связаны с рождением $Z\gamma$
- Отношение числа реальных и смоделированных событий (data/MC) не сильно зависит от числа струй N_{jet} и близко к единице

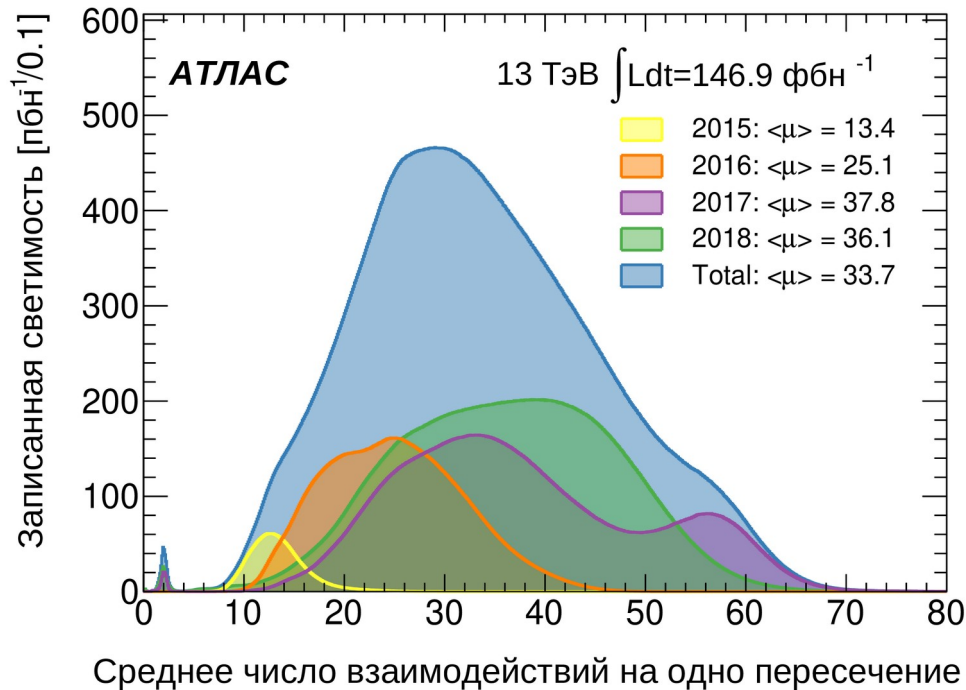
Адронные струи в событиях с Z для данных 2015–16 гг. – на защиту



Phys. of At. Nucl., 2019, V. 82, N. 12, p. 1701

- хорошее описание центральной области, некоторые расхождения (но в пределах систематики) - при малых углах.
- рост числа адронных струй с ростом числа взаимодействий ($\mu = n_{interactions}$) на малых углах хорошо описывается моделированием, но сама их множественность переоценена в MC.

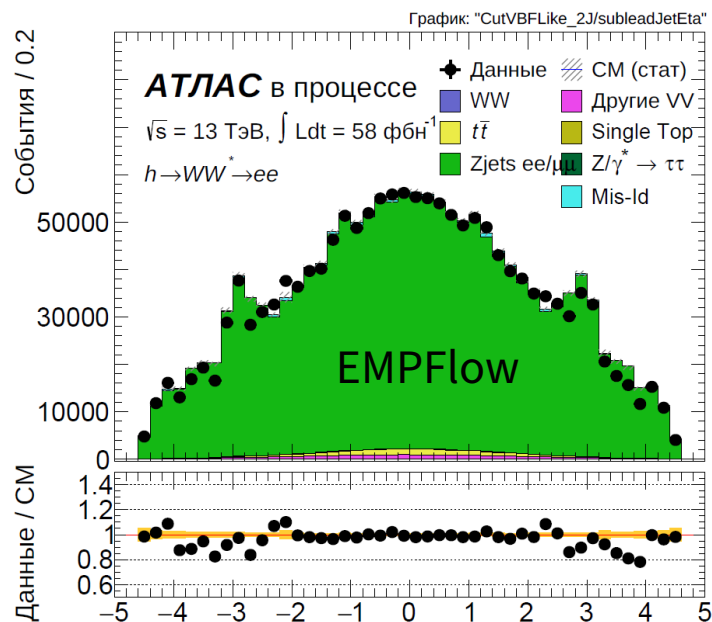
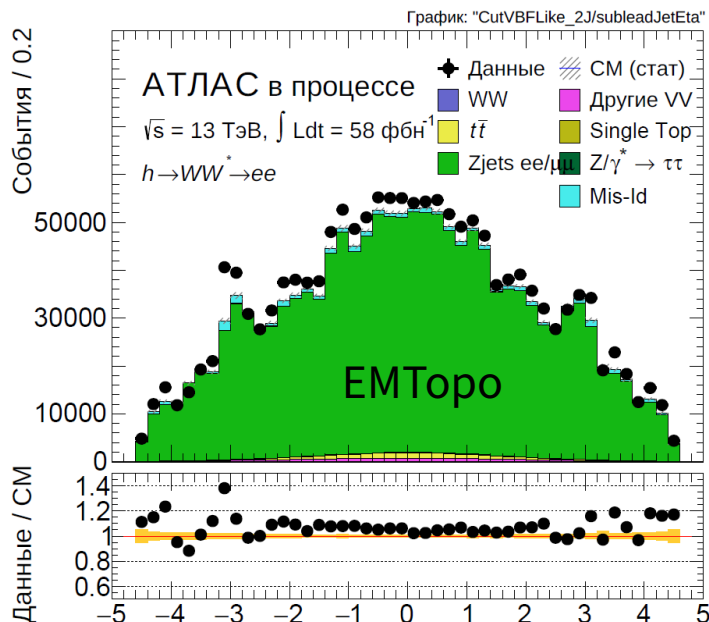
Наложение событий столкновения пар p-p в 2015–2018 гг.



ATLAS Luminosity

- Усложнение условий восстановления событий в 2017–2018 гг. — число наложенных “мягких” событий (μ) больше в полтора раза, чем в 2015–2016 гг.
- Для струй с $|\eta| < 2.5$ применяется алгоритм подавления ложных струй JVT (идущих не из первичной вершины) с помощью ID.
- Отдельно изучены несколько равнозаселённых областей
 $0 \leq \mu < 22$, $22 \leq \mu < 28$, $28 \leq \mu < 34$, $34 \leq \mu < 42$, $42 \leq \mu < 80$

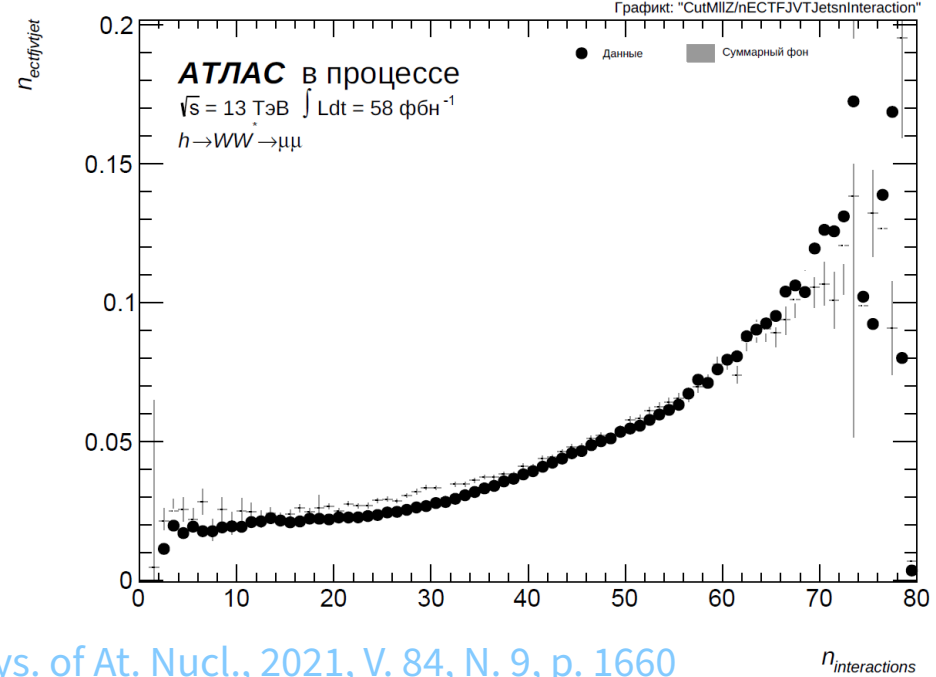
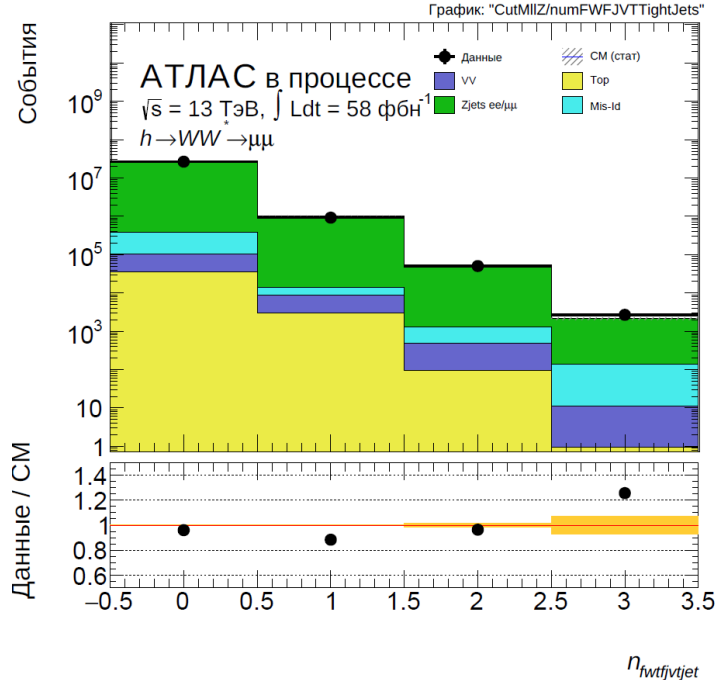
η второй струи в данных 2018 г., EMТоро/EMPFlow — на защиту



Phys. of At. Nucl., 2021, V. 84, N. 9, p. 1660

1. В области трекера $|\eta| < 2.5$ данные описываются хорошо обоими алгоритмами.
2. Проблемы с алгоритмом EMТоро для $|\eta| \approx 3$, плохое описание области $|\eta| > 4$.
3. Алгоритм EMPFlow лучше описывает данные, чем EMТоро, особенно в области $|\eta| > 2.5$. По этой причине сотрудничество АТЛАС выбрало алгоритм EMPFlow для использования в анализе полных данных 2015–18 гг.
4. Оставшиеся отклонения MC от данных при больших $|\eta|$ покрываются систематикой.

Число струй в области $|\eta| > 2.75$ в данных 2018 г. — на защиту

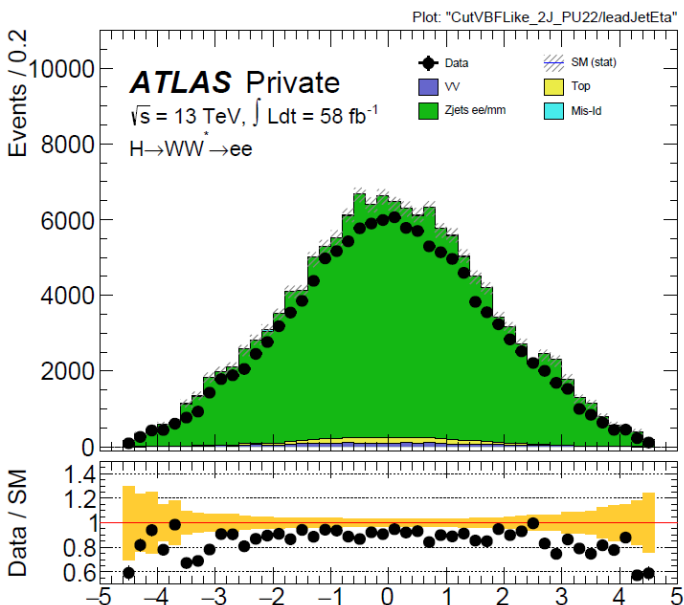


Phys. of At. Nucl., 2021, V. 84, N. 9, p. 1660

- В области $|\eta| > 3.25$ данные согласуются с расчетами с точностью не хуже 10% почти в 100% случаях.
- Наблюдается нелинейный рост среднего числа струй в области $2.75 < |\eta| < 3.25$ при увеличении числа наложений, описываемый моделированием

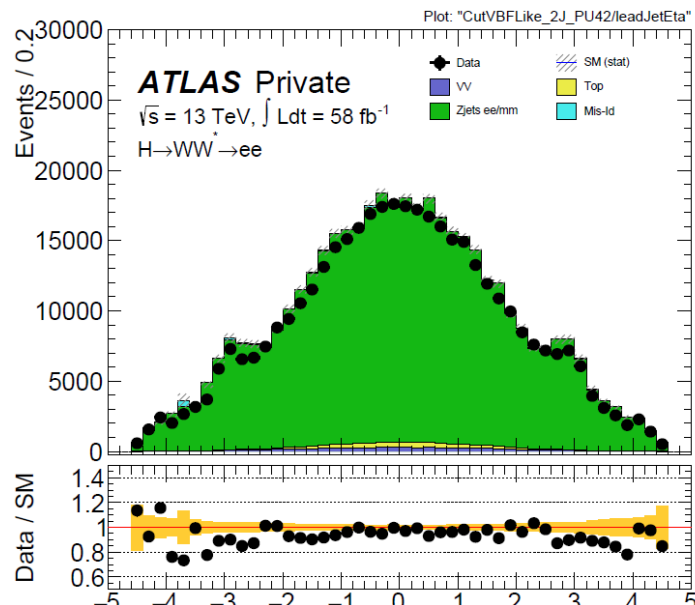
Псевдобыстрота адронных струй в данных 2018 г. при разных μ

Число взаимодействий $\mu < 22$



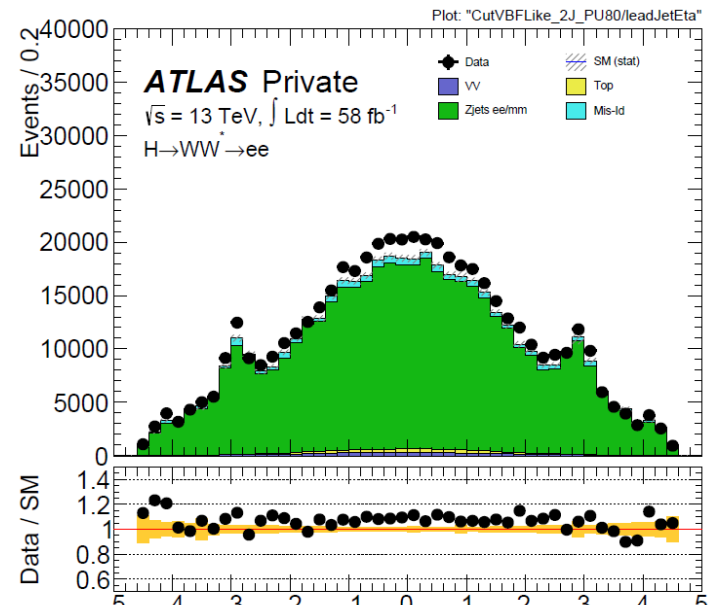
Отсутствие характерных структур около $|\eta|=2.9$

Число взаимодействий $34 \leq \mu < 42$



Появился вторичный максимум около $|\eta|=2.9$

Число взаимодействий $42 \leq \mu < 80$



Большой вторичный максимум при $|\eta|=2.9$; некоторый избыток событий при $|\eta| > 4$

Существенных расхождений между данными и результатами моделирования не наблюдается даже при большом μ

Выводы по моделированию адронных струй в $Z \rightarrow \ell\ell$

1. Нами показано, что новый алгоритм на основе потока частиц (EMPFLOW) лучше старого на основе топологических кластеров в калориметре (EMToro).
2. Весьма хорошее описание множественности струй и их поперечного импульса
3. Распределения струй по псевдобыстроте хорошо описываются в области $|\eta| < 2.5$, несколько хуже при бóльших $|\eta|$.
Структуры в области $|\eta| = 2.9$ на краю торцевого калориметра возникают из-за ложных струй с малым p_T , они хорошо воспроизводятся моделированием.
4. Нет причин ужесточать отбор струй по p_T для исследований бозона Хиггса в канале распада $H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow \ell\nu\ell\nu$, а также для решения других сходных задач АТЛАС.

**Изучение рождения бозона Хиггса Стандартной Модели в
канале распада $H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$**

- На данных 2015–2016 гг. изучались контрольные области основных фонов и по ним нормировался вклад фоновых процессов

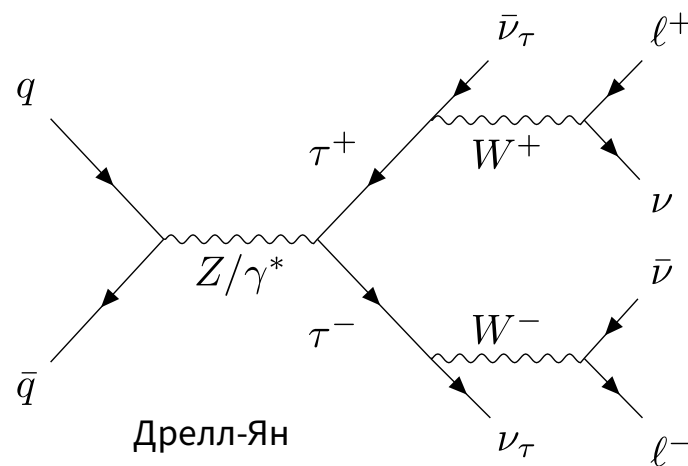
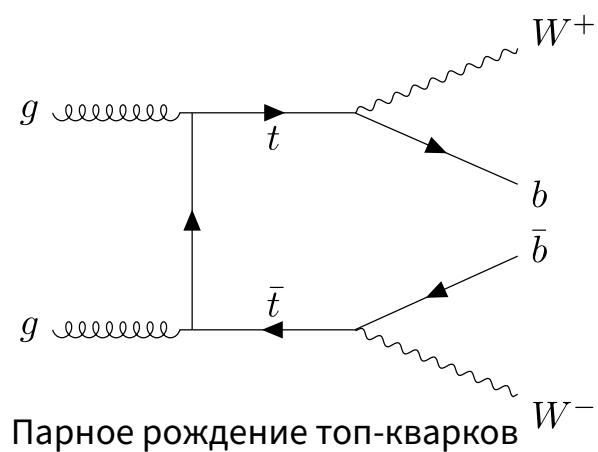
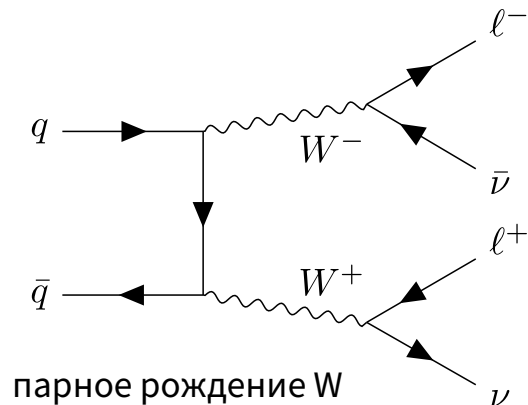
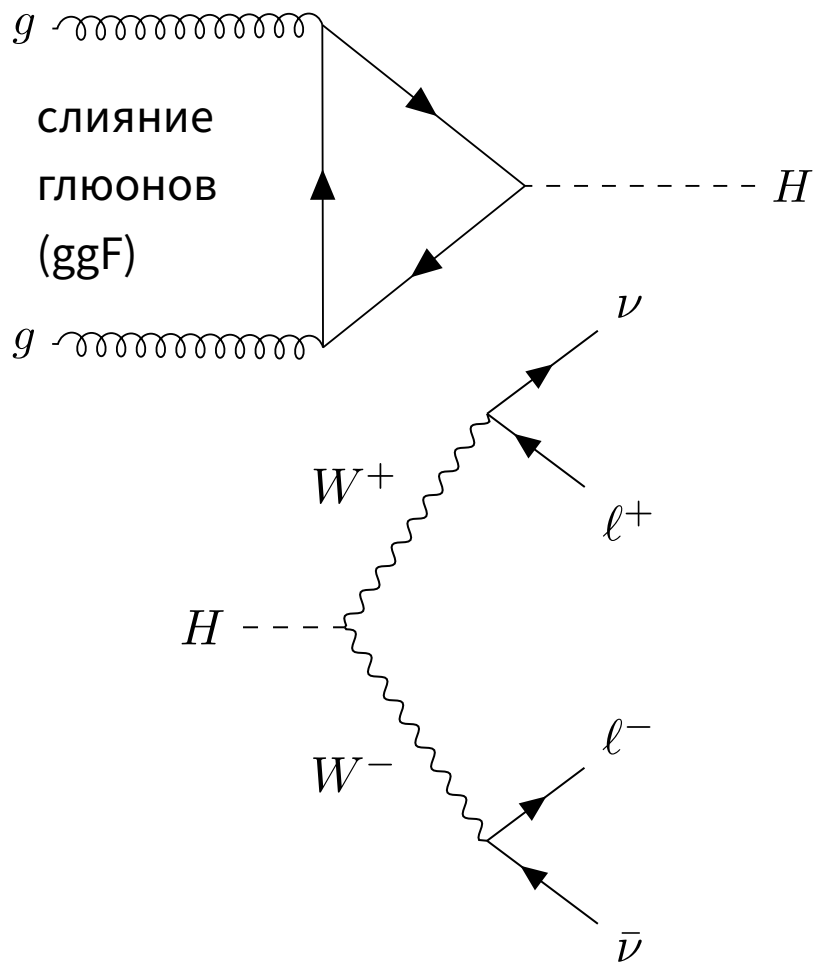
использовался алгоритм EMТоро для восстановления струй

- Это исследование расширено на данные 2015–2018 гг.

использовался алгоритм EMPFlow для восстановления струй, добавлена категория ggF с двумя струями

- Измерено число событий в данных 2015–18 гг. в сигнальных областях, изучены m_T -распределения и извлечено сечение рождения бозона Хиггса в механизме ggF.

Процессы сигнала и основных фонов



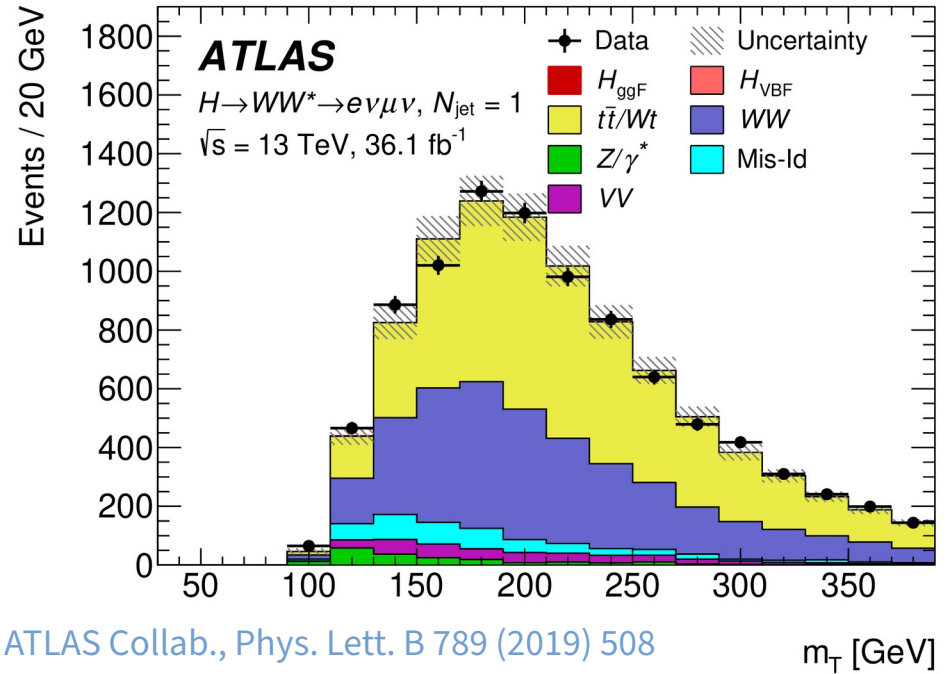
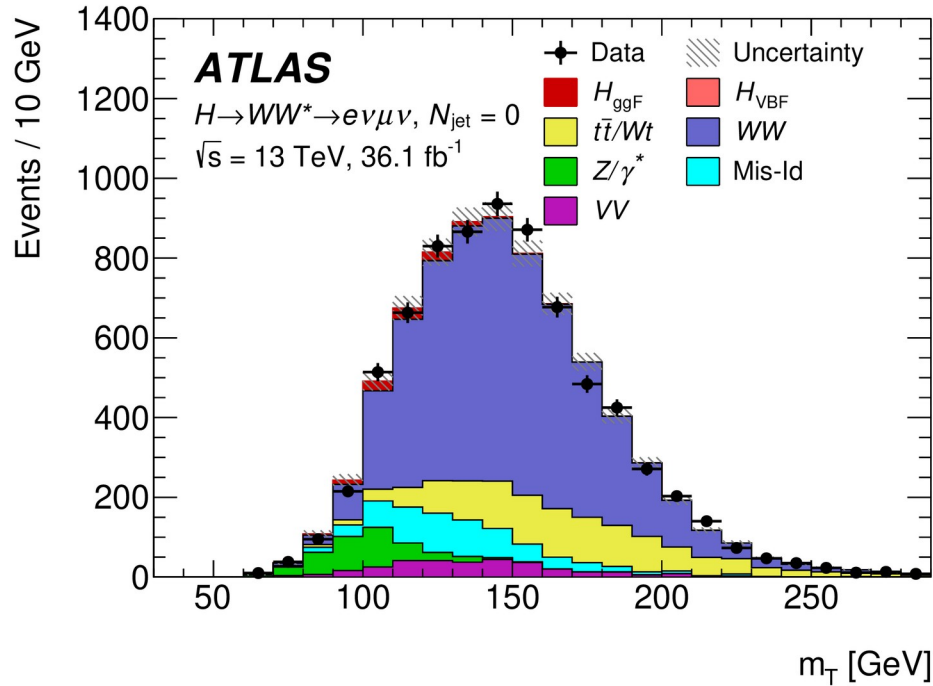
Отбор событий и нормировочные коэффициенты для 2015–16 гг.

- Отбираются события с двумя жёсткими лептонами и разделяются на категории в соответствии с числом струй.
- Проводится дальнейший отбор для подавления фона в сигнальных областях. Для нормировки фона применяются контрольные области со сходными критериями отбора, но некоторые из них ослаблены или инвертированы (например, для сигнала отбирается малый $m_{\ell\ell}$, большой для WW фона; запрет или мечение b-струй для $t\bar{t}/Wt$; $m_{\tau\tau}$ сравнивается с m_Z для Z^*/γ^*)

Фоновая Категория	$N_{\text{jet}} = 0$	$N_{\text{jet}} = 1$	$N_{\text{jet}} \geq 2$
WW	1.06 ± 0.09	0.97 ± 0.17	–
$t\bar{t}/Wt$	0.99 ± 0.17	0.98 ± 0.08	1.01 ± 0.01
Z^*/γ^*	0.84 ± 0.04	0.90 ± 0.12	0.93 ± 0.07

Учтены статистические и систематические неопределённости

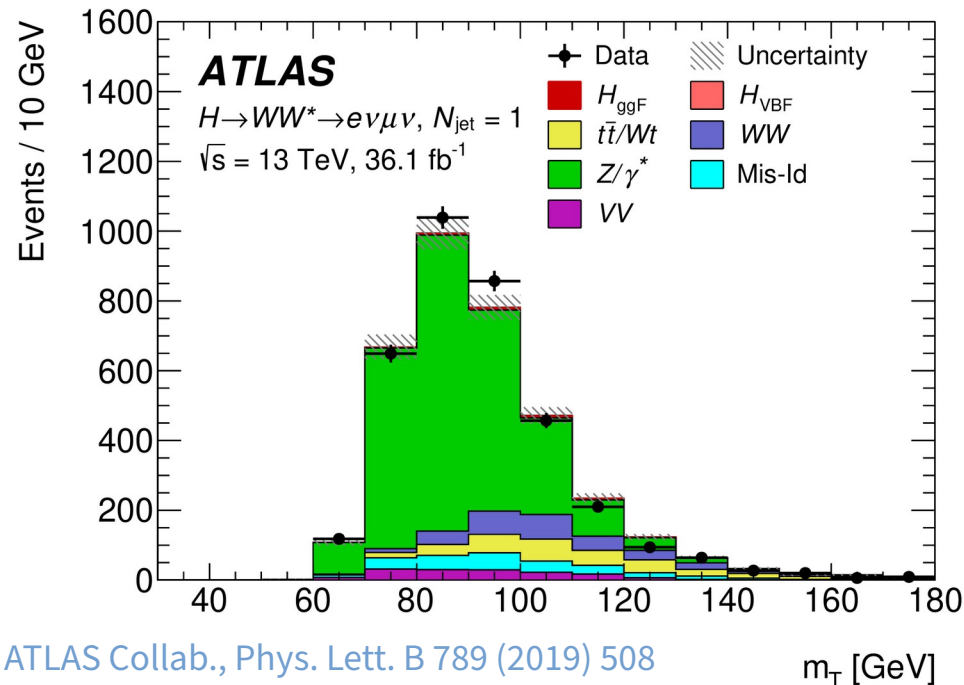
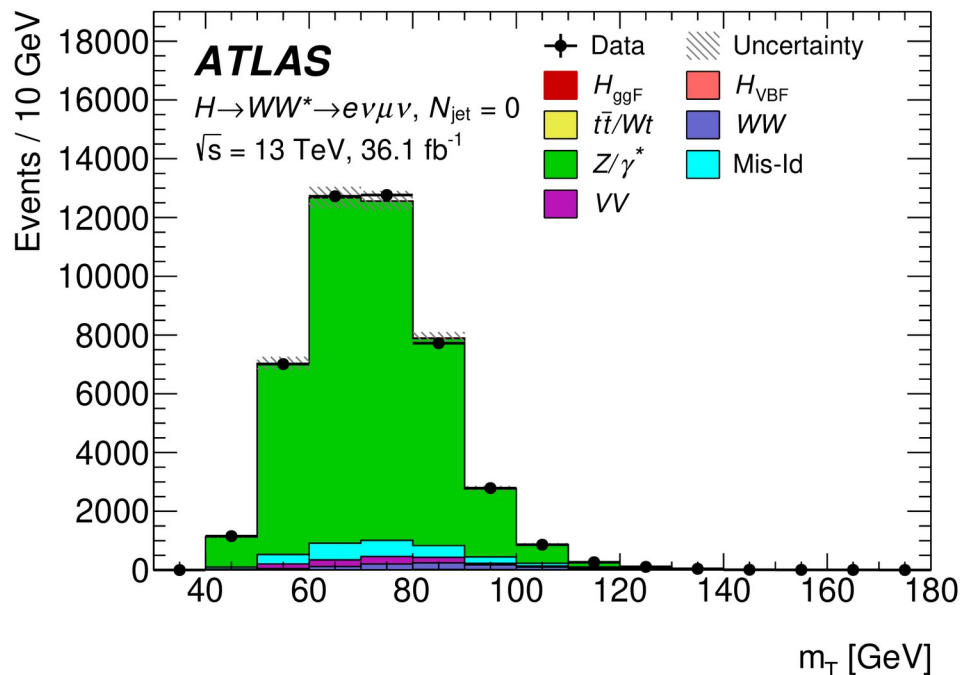
Контрольные области WW $N_{jet} = 0$ и $N_{jet} = 1$ для 2015–16 гг. – на защиту



ATLAS Collab., Phys. Lett. B 789 (2019) 508

- Распределения по m_T после подгонки в $N_{jet} = 0$ и $N_{jet} = 1$ CR для фона от WW
- Данные и результаты их моделирования согласуются в пределах неопределенностей

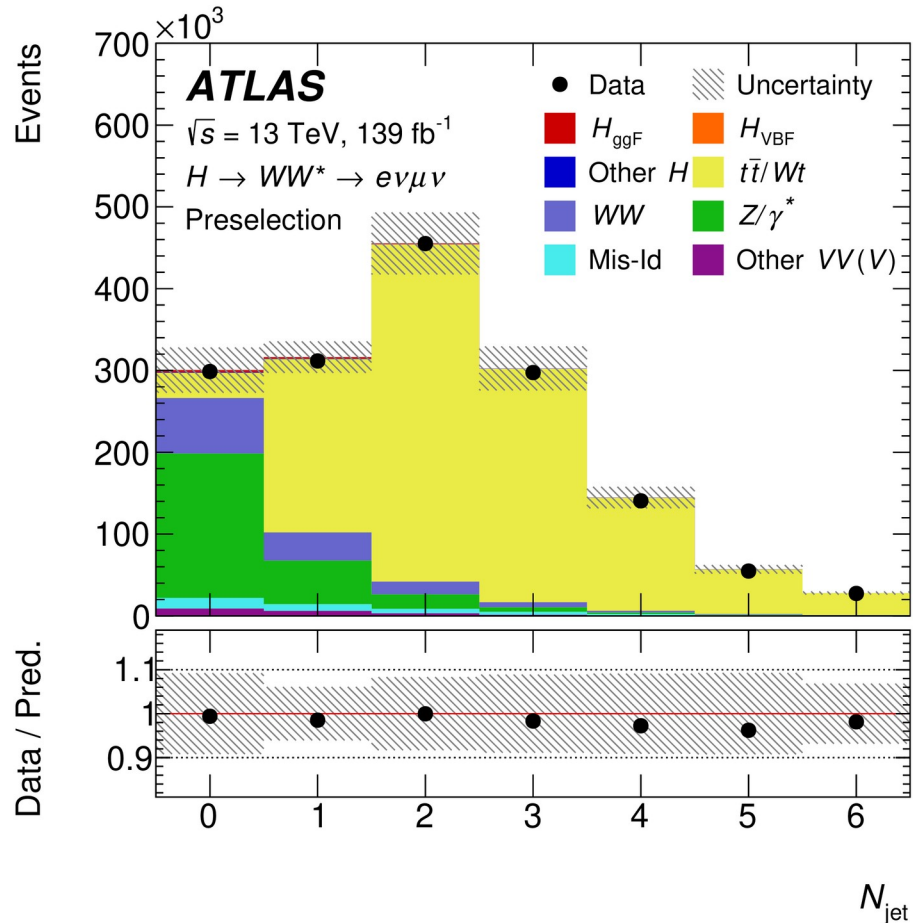
Контрольные области Z^*/γ^* $N_{\text{jet}} = 0$ и $N_{\text{jet}} = 1$ для 2015–16 гг. – на защиту



ATLAS Collab., Phys. Lett. B 789 (2019) 508

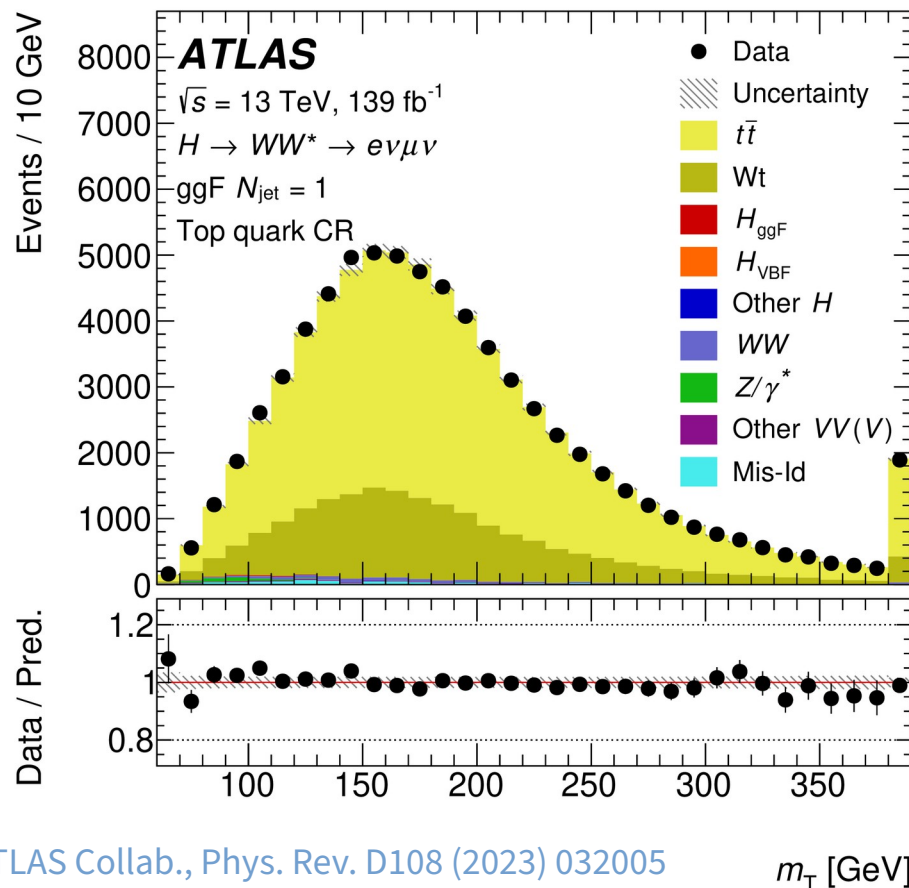
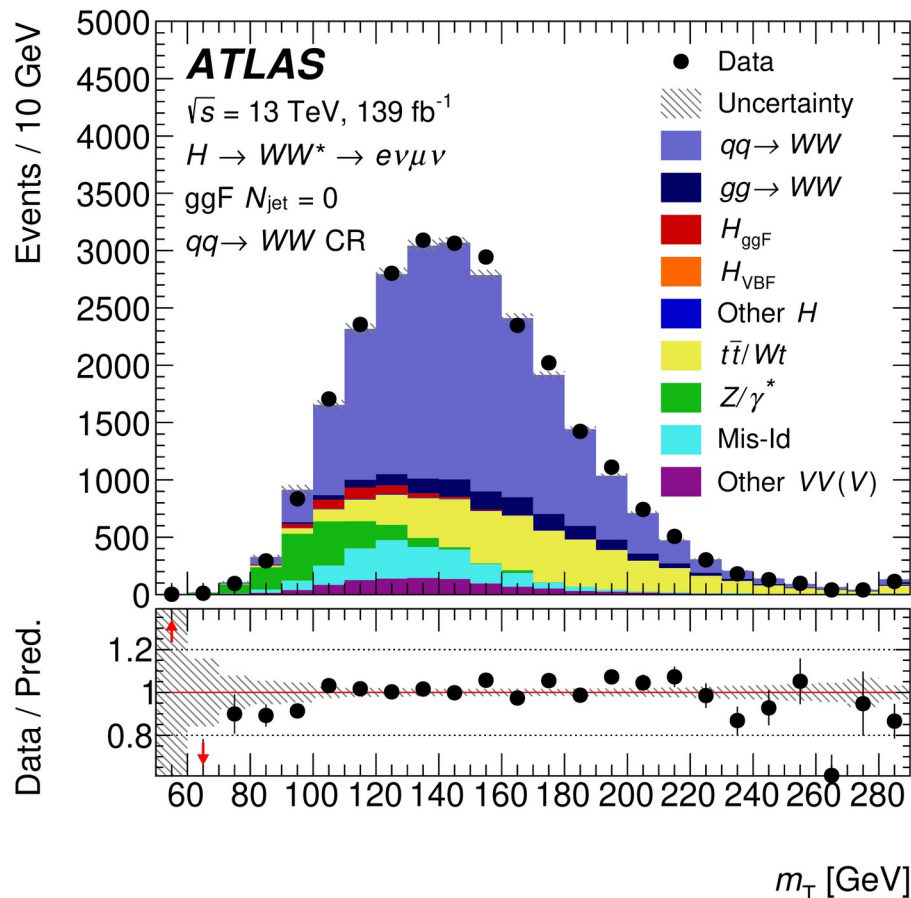
- Распределения по m_T после подгонки в $N_{\text{jet}} = 0$ и $N_{\text{jet}} = 1$ CR для фона от Z^*/γ^*
- Данные и результаты их моделирования согласуются в пределах неопределенностей

Множественность струй в данных за 2015–2018 гг. — на защиту



- Определены несколько сигнальных областей в соответствии с числом адронных струй в событии
 - $N_{\text{jets}}: 0, 1, 2+$
 - 0 и 1 струя — только ggF. Область 2+ поделена между механизмами рождения ggF и VBF (для VBF запрещены центральные струи и лептоны вне струй)
 - Данные хорошо описываются MC
- [ATLAS Collab., Phys. Rev. D108 \(2023\) 032005](#)

m_T в контрольных областях фонов от WW и топ-кварков — на защиту



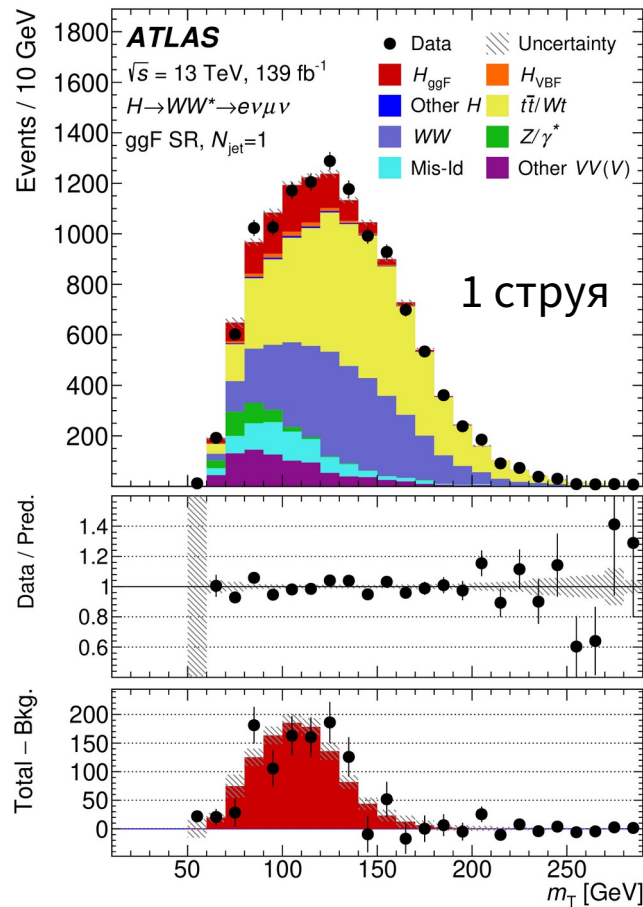
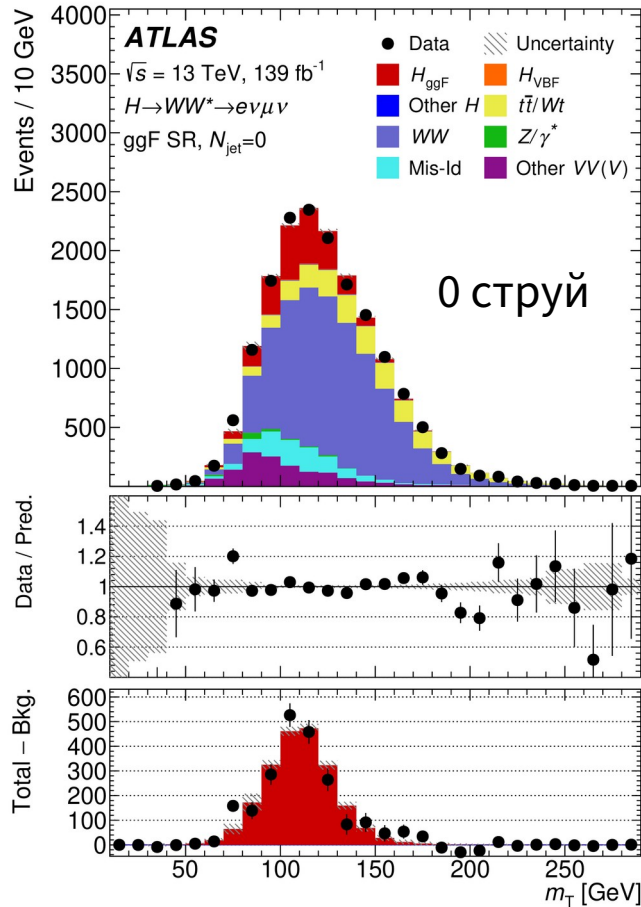
ATLAS Collab., Phys. Rev. D108 (2023) 032005

Данные хорошо описываются моделированием

Число событий после всех отборов - на защиту

Process	$N_{\text{jet}} = 0$ ggF	$N_{\text{jet}} = 1$ ggF	$N_{\text{jet}} \geq 2$ ggF	Other Higgs включают в себя механизмы рождения VH и $t\bar{t}H$
H_{ggF}	2100 ± 220	1100 ± 130	440 ± 90	Other VV включают в себя комбинации W, Z, γ
H_{VBF}	23 ± 9	103 ± 30	46 ± 12	
Other Higgs	40 ± 20	55 ± 28	55 ± 27	Данные хорошо описываются моделированием только при включении бозона Хиггса
WW	9700 ± 350	3500 ± 410	1500 ± 470	
$t\bar{t}/Wt$	2200 ± 210	5300 ± 340	6100 ± 500	
Z/γ^*	140 ± 50	280 ± 40	930 ± 70	
Other VV	1400 ± 130	840 ± 100	470 ± 90	
Mis-Id	1200 ± 130	720 ± 90	470 ± 50	
Total	$16\,770 \pm 130$	$11\,940 \pm 110$	$10\,030 \pm 100$	
Observed	16 726	11 917	9 982	ATLAS Collab., Phys. Rev. D108 (2023) 032005

Спектры по m_T для сигнала — на защиту

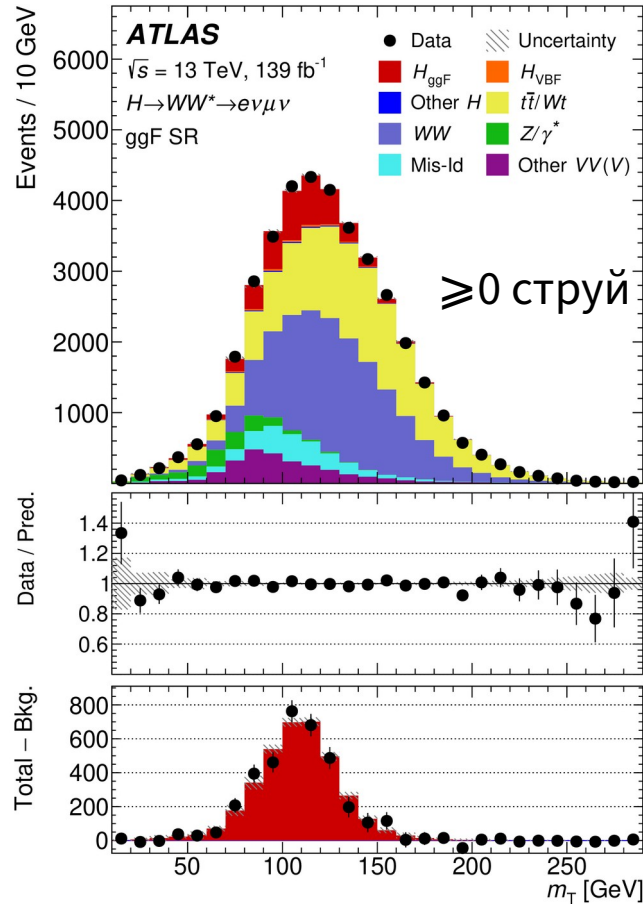
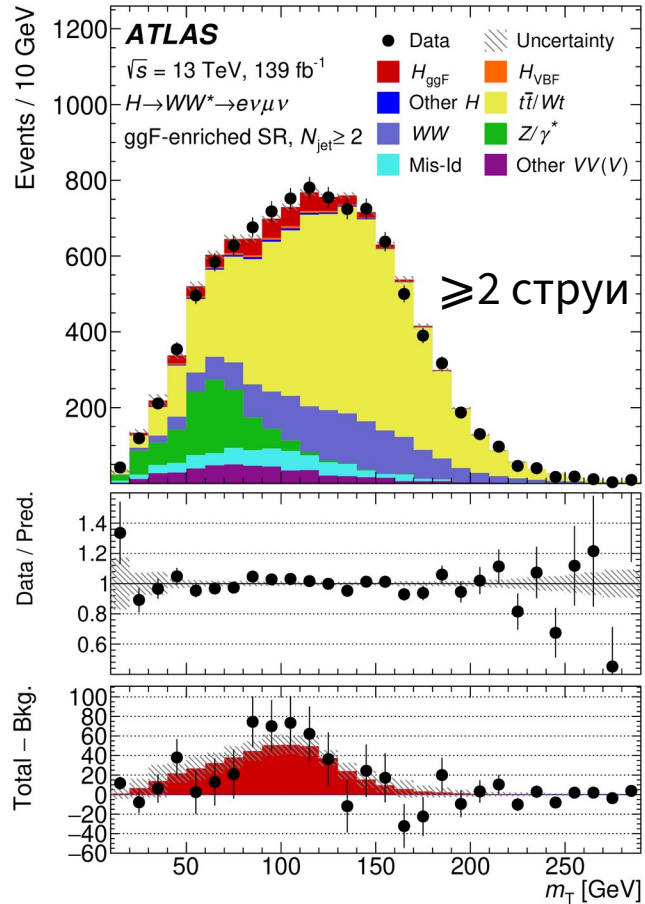


После вычитания фона
чётко виден сигнал.

Наблюдаемый
максимум довольно
широк из-за скромного
разрешения по m_T , в
основном
ограниченного
разрешением по E_T^{miss} .

ATLAS Collab., Phys. Rev.
D108 (2023) 032005

Спектры по m_T для сигнала — на защиту



После вычитания фона хорошо виден сигнал.

Наблюдаемый максимум довольно широк из-за скромного разрешения по m_T , в основном ограниченного разрешением по E_T^{miss} .

ATLAS Collab., Phys. Rev. D108 (2023) 032005

Измеренное сечение ggF — на защиту

$$\begin{aligned}\sigma_{ggF} \cdot \mathcal{B}_{H \rightarrow WW^*} &= 12.0 \pm 1.4 \text{ pb} \\ &= 12.0 \pm 0.6 \text{ (stat.)}_{-0.8}^{+0.9} \text{ (exp. syst.)}_{-0.5}^{+0.6} \text{ (sig. theo.)} \pm 0.8 \text{ (bkg. theo.) pb}\end{aligned}$$

Значение, предсказанное SM **10.4 ± 0.5 pb**

- **ATLAS Run1** [PRD 92 \(2015\) 012006](#)

включён канал eνeν/μνμν

$$\mu_{ggF} = 1.02_{-0.26}^{+0.29}$$

- **ATLAS Run2 36** fb^{-1} [Phys. Lett. B 789 \(2019\) 508](#)

$$\mu_{ggF} = 1.10_{-0.20}^{+0.21}$$

- **ATLAS Run2 139** fb^{-1} [Phys. Rev. D108 \(2023\) 032005](#)

Улучшение в 1.5 раза

$$\mu_{ggF} = 1.15_{-0.13}^{+0.14}$$

- **CMS Run1** [JHEP01 \(2014\) 096](#)

$$\mu_{ggF} = 0.76 \pm 0.21$$

- **CMS 138** fb^{-1} [arXiv:2206.09466](#)

включён канал eνeν/μνμν

$$\mu_{ggF} = 0.92_{-0.10}^{+0.11}$$

✓ Сечение измерено с ~12% точностью

Выводы

Был изучен канал распада $H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$ для измерения сечения рождения бозона Хиггса в механизме слияния глюонов.

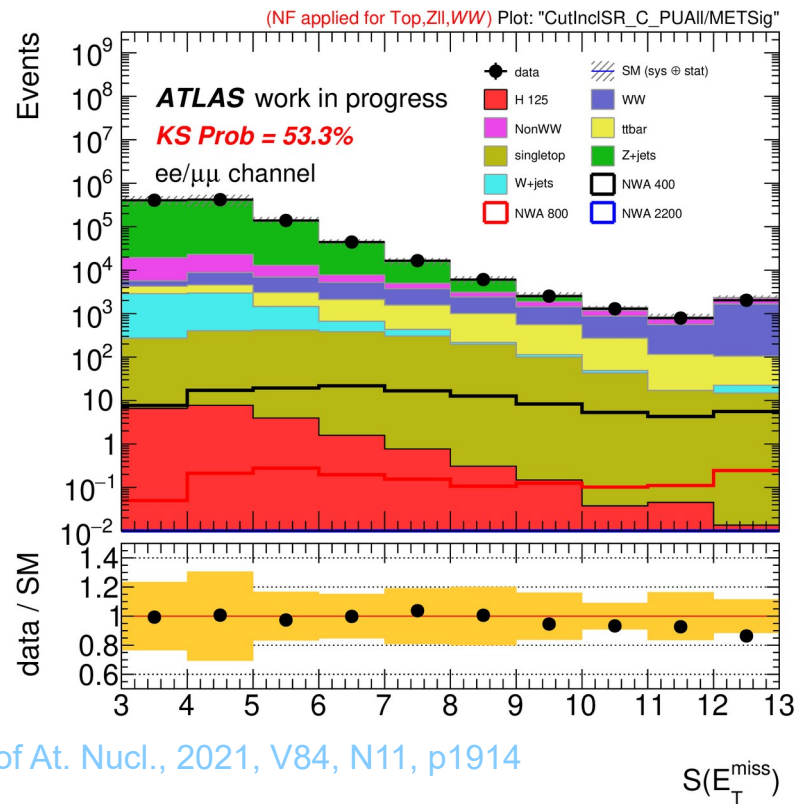
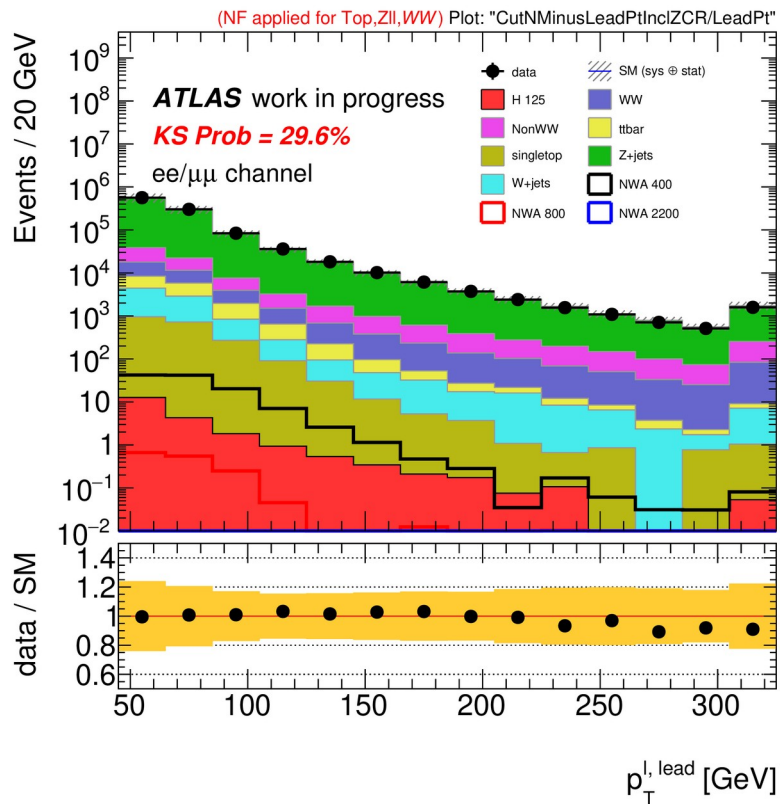
- 1) Сечение рождения в механизме ggF , помноженное на относительную вероятность распада $H \rightarrow WW^*$ составило 12.0 ± 1.4 пб, что согласуется с предсказанием Стандартной Модели 10.4 ± 0.6 пб.
- 2) Точность измерения в полтора раза лучше предыдущего результата ATLAS благодаря улучшениям в анализе в дополнение к большому набору данных, в частности, благодаря включению сигнальной области ggF с ≥ 2 струями.

Поиски тяжёлого бозона Хиггса и других бозонных резонансов

$R \rightarrow WW \rightarrow e\nu\mu\nu$ и $R \rightarrow WW \rightarrow e\nu e\nu/\mu\nu\mu\nu$

- Основные фоны — top , WW , $Z \rightarrow \tau\tau$
- В канале с одинаковым ароматом лептонов — огромный дополнительный Дрелл-Ян фон $Z \rightarrow \ell\ell + jets$
- Все события делятся на 3 категории в зависимости от характеристик адронных струй: VBF с ≥ 2 струями, VBF с одной струей и ggF
- В канале $e\nu\mu\nu$ для подавления фона отбираются события с жёсткими лептонами с большой инвариантной массой, без b -струй
- В канале $e\nu e\nu/\mu\nu\mu\nu$ в дополнение отбираются события с инвариантной массой лептонов вне Z -пика и с большой значимостью недостающего поперечного импульса, надёжно отделяющей события с инструментальным E_T^{miss} , измеренным с большой неопределённостью, от событий с нейтрино.
- Задача — оценить, насколько улучшатся ожидаемые пределы на сечения, если добавить канал $e\nu e\nu/\mu\nu\mu\nu$ к $e\nu\mu\nu$

ggF ZCR: $p_T^{\text{lead}}, S(E_T^{\text{miss}})$ — на защиту



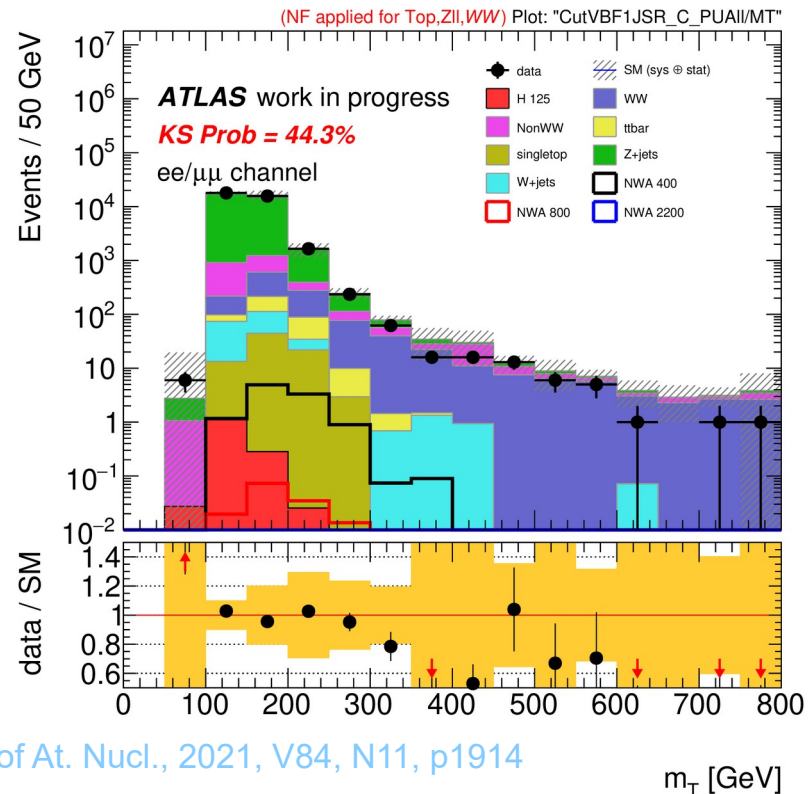
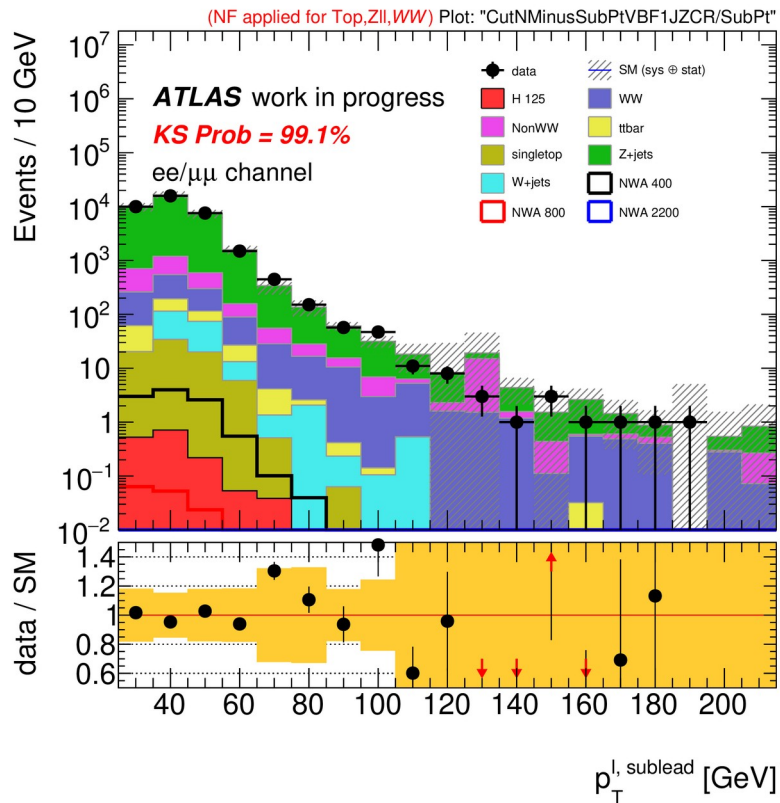
Phys. of At. Nucl., 2021, V84, N11, p1914

- Отличное описание данных

- Хорошее описание значимости E_T^{miss}

- Учтены экспериментальные систематические неопределённости

VBF1J ZCR: p_T^{sublead} , m_T — на защиту

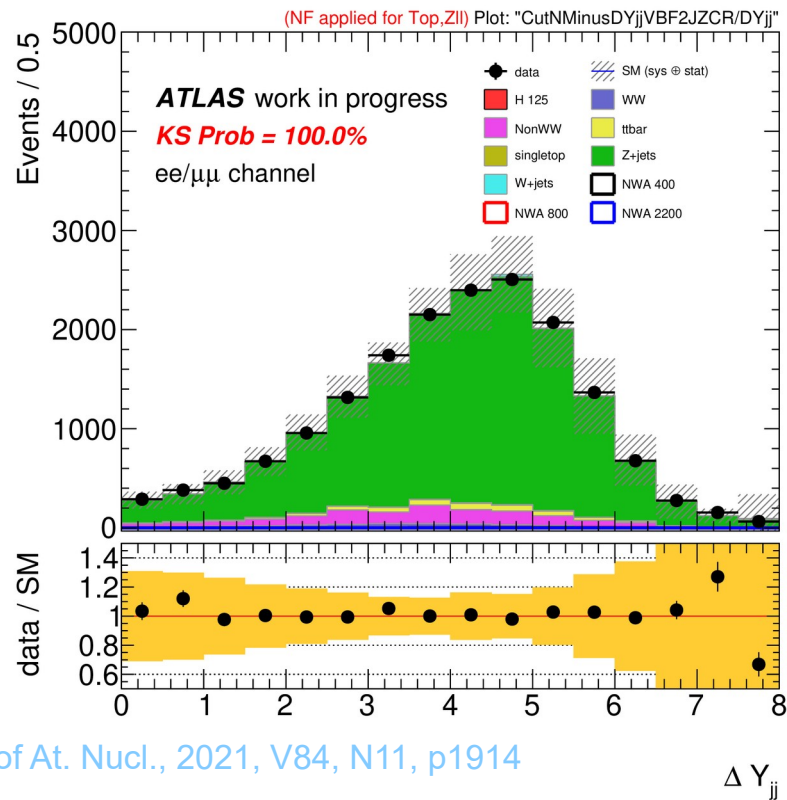
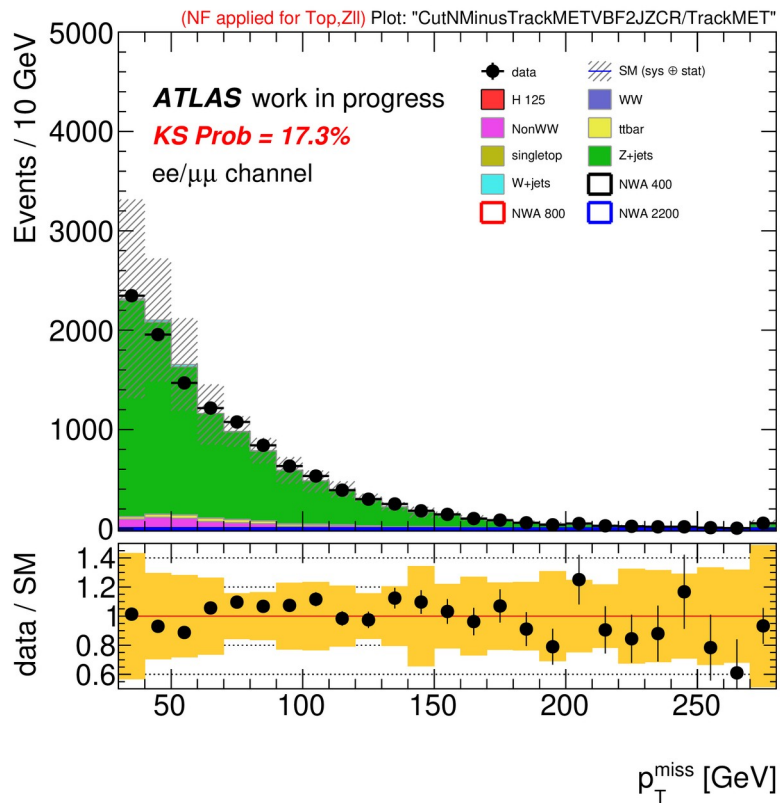


Phys. of At. Nucl., 2021, V84, N11, p1914

- Удовлетворительное описание данных

- Не наблюдается существенного вклада DY на больших m_T

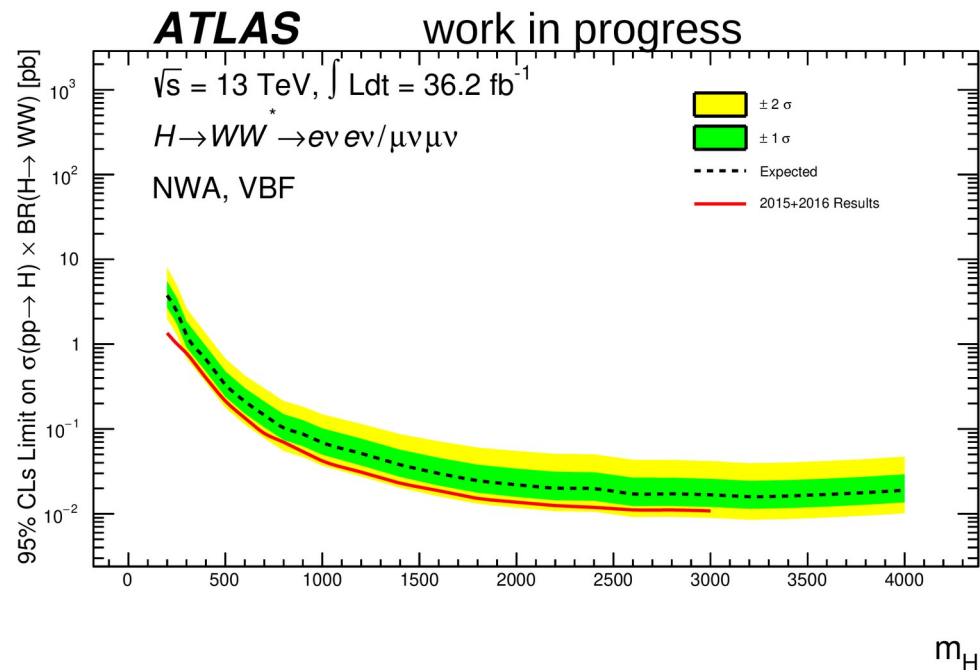
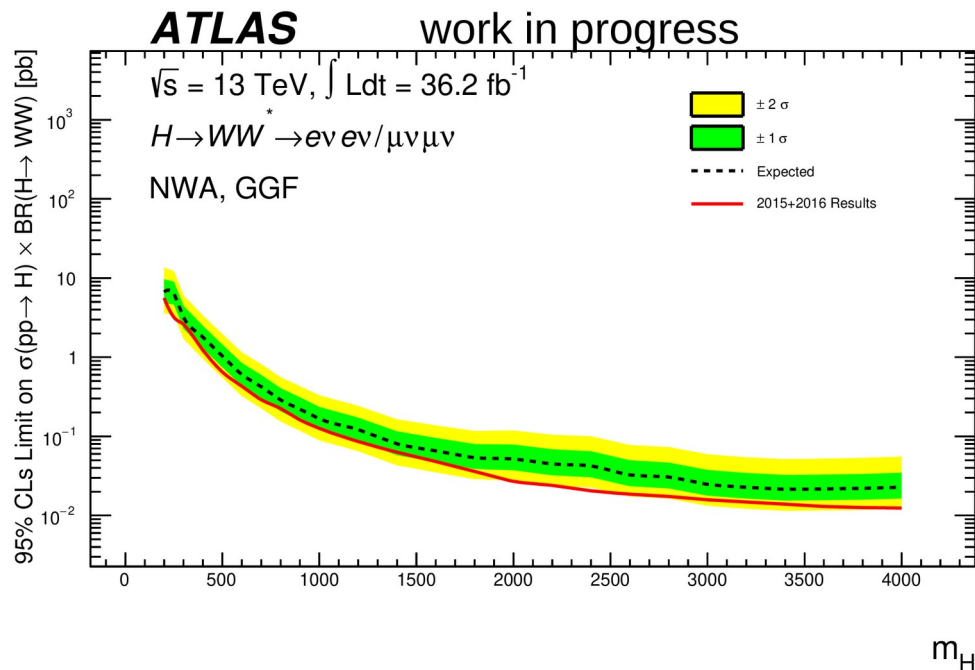
VBF2J ZCR: $p_T^{\text{miss}}, \Delta Y_{jj}$ — на защиту



Phys. of At. Nucl., 2021, V84, N11, p1914

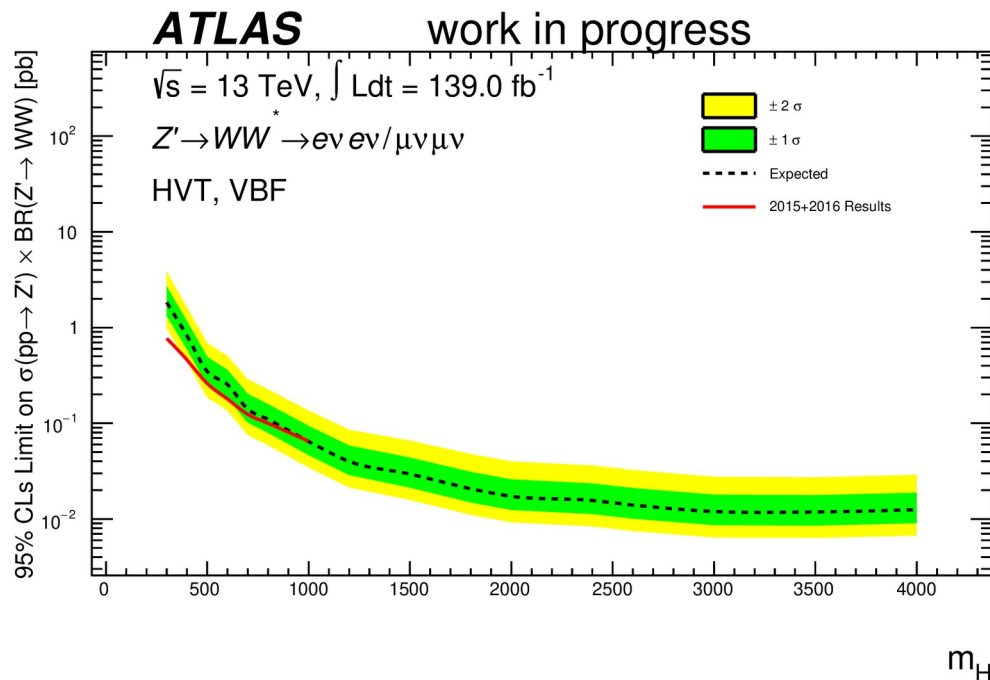
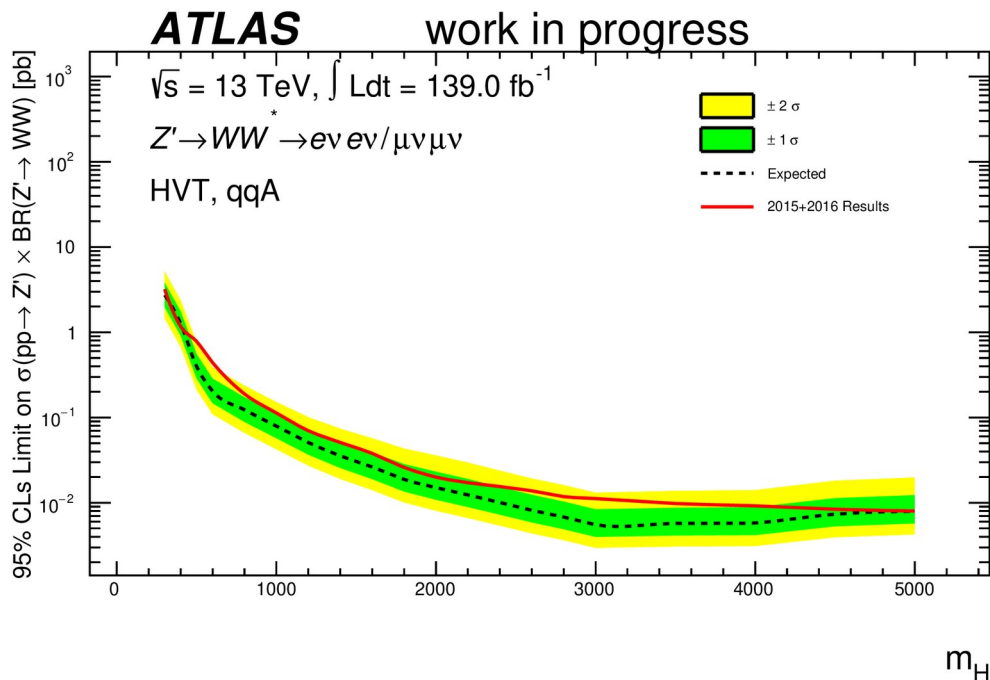
- Хорошее описание данных

Спин 0, NWA: 95% CL_s пределы $\sigma_R \times BR(H \rightarrow WW)$ — на защиту



- Сравниваются **ожидаемые** пределы в канале **$e\nu e\nu / \mu\nu \mu\nu$** , ограниченные статистикой 2015–2016 гг., лежащие в области 7 пб – 20 фб ggF / 4 пб – 20 фб VBF [Phys. of At. Nucl., 2021, V84, N11, p1914] с **ожидаемыми** пределами, поставленными ранее в канале **$e\nu \mu\nu$** [ATLAS Collaboration, Eur. Phys. J. C 78 (2018) 1 24]
- Статистическая комбинация обоих каналов позволит существенно улучшить получаемые ограничения на сечение

Спин 1, HVT: 95% CL_s пределы $\sigma_R \times BR(Z' \rightarrow WW)$ — на защиту



- Рассчитанные ограничения на сечение при использовании **полной статистики 2015–2018 гг.** лежат в области 3 пб – 8 фб qqA / 2 пб – 12 фб VBF, зачастую превосходя результат, достигнутый ранее в канале **$e\nu\mu\nu$** [ATLAS Collaboration, Eur. Phys. J. C 78 (2018) 24]
- Статистическая комбинация обоих каналов позволит существенно улучшить получаемые ограничения на сечение

Изучался канал $R \rightarrow WW \rightarrow e\nu e\nu/\mu\nu\mu\nu$ на полной статистике при 13 ТэВ в эксперименте ATLAS на LHC

1. Выработаны критерии отбора событий в области сигнала и контрольных областях фонов, оценены экспериментальные систематические ошибки
2. Рассчитаны ожидаемые верхние пределы, перспективные для объединения с каналом $R \rightarrow WW \rightarrow e\nu\mu\nu$
3. Эти пределы для различных моделей лежат в диапазоне от 3 пб до 1 фб в диапазоне масс тяжёлого резонанса от 300 ГэВ до 6 ТэВ.
4. Отличие пределов для разных моделей не превышает 2–2.5 раз, что в некоторой степени свидетельствует о модельной независимости анализа.

Основные результаты работы — заключение

1. Разработан и успешно применён пакет программ для работы с профильными гистограммами для изучения адронных струй в событиях сигнала от бозона Хиггса и фонов в рамках информационной среды рабочей группы HWW сотрудничества ATLAS.
2. Исследованы свойства адронных струй в событиях с Z-бозонами для задач изучения свойств бозона Хиггса SM и поиска тяжёлого бозона Хиггса на данных 2015–2016 г. при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ.
3. Это исследование расширено на данные 2017–2018 г., набранные при повышенной светимости LHC.
4. Получены спектры по поперечной массе, разнице быстрот адронных струй и нормировочные коэффициенты в контрольных областях фонов для канала распада бозона Хиггса $H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow e\nu\mu\nu$ на данных 2015–2016 гг.
5. Измерены распределения по числу струй, по инвариантной массе лептонов и разнице их азимутальных углов, получено полное число событий после отборов, распределения по поперечной массе в контрольных и сигнальных областях и сечение в канале распада $H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow e\nu\mu\nu$ на данных 2015–2018 гг. в основном механизме рождения.
6. Оценены ожидаемые верхние пределы на сечения рождения тяжёлых резонансов в канале распада $R \rightarrow WW \rightarrow e\nu e\nu$ и $R \rightarrow WW \rightarrow \mu\nu\mu\nu$ при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ с учётом экспериментальных систематических погрешностей с оптимизированными автором критериями отбора полезных событий.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Разработана методика анализа характеристик адронных струй в фоновых процессах к рождению бозона Хиггса и тяжёлых резонансов на основе анализа данных эксперимента ATLAS с Z-бозонами.
2. Измерены распределения по поперечной массе бозона Хиггса в распаде $H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow e\nu\mu\nu$ на основе анализа данных эксперимента ATLAS 2015 – 2016 гг.
3. Измерено сечение бозона Хиггса с точностью 12% в основном механизме рождения в канале распада $H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow e\nu\mu\nu$ на основе анализа данных эксперимента ATLAS 2015 – 2018 гг.
4. Рассчитаны ожидаемые верхние пределы на 95% уровне достоверности для сечения рождения тяжёлых резонансов в каналах распада $R \rightarrow WW \rightarrow eee\nu$ и $R \rightarrow WW \rightarrow \mu\nu\mu\nu$ в диапазоне масс от 200 до 5000 ГэВ с интерпретацией в рамках нескольких теоретических моделей на основе анализа данных эксперимента ATLAS 2015 – 2018 гг. с предложенными и оптимизированными автором критериями отбора событий.

Личный вклад автора

1. Принимал участие в регламентных работах по контролю качества данных в жидкоаргоновых калориметрах, занимался модернизацией программного обеспечения и стал полноправным соавтором всех публикаций сотрудничества АТЛАС с 2018 г.
2. Принимал участие в разработке и тестировании используемого группой пакета программ для анализа на основе информационной среды ROOT. Существенным вкладом автора было создание модуля для построения и анализа профильных гистограмм. Кроме того, им были адаптированы коды, использованные для анализа статистики 2015 – 2016 гг., для новой версии ПО АТЛАС с целью обработки полной статистики 2015 – 2018 гг., и запущен новый анализ.
3. Детально изучил адронные струи в ди-лептонных событиях с Z -бозоном при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ, что позволило понять их характеристики даже в наиболее сложных кинематических областях. Особое внимание уделялось струям, летящим под малыми углами при большой светимости LHC. Это исследование было важно не только для изучения стандартного бозона Хиггса и поиска тяжелого бозона Хиггса в канале распада на два W , но также и для других физических задач эксперимента АТЛАС.
4. Занимался производством смоделированных событий. Для канала с одинаковым ароматом лептонов разработал и применил схему фильтрации событий, десятикратно сокращающую размер входных файлов;
5. Внёс определяющий вклад в анализ каналов $R \rightarrow WW \rightarrow e\bar{e}\nu$ и $R \rightarrow WW \rightarrow \mu\nu\mu\nu$ на полной статистике 139 fb^{-1} при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ и повышенной светимости LHC.
6. Внёс существенный вклад в две публикации АТЛАС и определяющий – в 5 остальных.

1. *G. Aad..., A. Gavrilyuk [et al.] (ATLAS Collaboration)*. Measurements of gluon-gluon fusion and vector-boson fusion Higgs boson production cross-sections in the $H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$ decay channel in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector [Text] // Phys. Lett. B. – 2019. – Vol. 789. – P. 508.
2. *G. Aad..., A. Gavrilyuk [et al.] (ATLAS Collaboration)*. Measurements of Higgs boson production by gluon-gluon fusion and vector-boson fusion using $H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$ decays in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector [Text] // Phys. Rev. D. – 2023. – Aug. – Vol. 108, issue 3. – P. 032005.
3. *Гаврилюк А. А., Рамакоти Е. Н., Цукерман И. И.* Наложение адронных струй и поиск тяжелого бозона Хиггса в канале распада WW в pp столкновениях при 13 ТэВ в эксперименте АТЛАС на БАК [Текст] // Ядерная физика и инжиниринг. – 2018. – Т. 9, № 5. – С. 497.
4. *Gavrilyuk A. A., Ramakoti E. N., Tsukerman I. I.* Z-Boson Control Region and Search for a Heavy Higgs Boson in $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$ Decay Channel in Proton–Proton Collisions at 13 TeV with the ATLAS Experiment at LHC [Text] // Physics of Atomic Nuclei. – 2019. – Vol. 82, no. 12. – P. 1701.
5. *Gavrilyuk A. A., Ramakoti E. N., Tsukerman I. I.* Study of Events with Two Leptons in the Final State to Investigate Properties of the Standard Model Higgs Boson and Search for a Heavy Higgs Boson in the $h/H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow l\nu l\nu$ Decay in pp Collisions at 13 TeV with the ATLAS Detector at the LHC [Text] // Physics of Atomic Nuclei. – 2021. – Vol. 84, no. 9. – P. 1660.
6. *Gavrilyuk A. A., Ramakoti E. N., Tsukerman I. I.* Search for $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$ Decays of a Heavy Higgs Boson Produced in pp Collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV Using a 139-fb⁻¹ Event Sample Recorded by the ATLAS Experiment [Text] // Physics of Atomic Nuclei. – 2021. – Vol. 84, no. 11. – P. 1914.
7. *Gavrilyuk A. A., Ramakoti E. N., Tsukerman I. I.* Search for the Standard Model Higgs Boson and a Heavy Resonance in the $WW^* \rightarrow (e\nu e\nu + \mu\nu\mu\nu)$ Decay Channel in the ATLAS Experiment [Text] // Physics of Atomic Nuclei. – 2022. – Vol. 85, no. 9. – P. 1587.
8. *Гаврилюк А. А., Цукерман И. И.* Программный модуль “TQProfiles v1.1” // Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2020662440.

Апробация работы

- **International Conference on Particle Physics and Astrophysics (ICPPA)**
 - 2016 «Search for a high-mass Higgs boson decaying to a pair of W bosons in pp collisions at 13 TeV with the ATLAS detector»,
 - 2022 «Measurements of gluon fusion production of the Higgs boson in $H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$ decays in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector»
- **Moscow International School of Physics 2022 «Measurements of Higgs boson production by gluon–gluon fusion and vector-boson fusion using $H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$ decays in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector»**
- **International Conference on New Frontiers in Physics (ICNFP) 2023 «ATLAS LAr Calorimeter Commissioning for LHC Run-3»**
- **Курчатовская молодежная научная школа 2015 «Поиск бозона Хиггса в канале $H \rightarrow WW$ в эксперименте ATLAS на LHC»**
- **II Межинститутская молодежная конференция РАН и НИЦ КИ ИТЭФ «Поиск бозона Хиггса в канале $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$ в эксперименте ATLAS на LHC»**
- **Молодежные конференции по теоретической и экспериментальной физике**
 - 2016 «Поиск тяжёлого бозона Хиггса, распадающегося на пару W бозонов в pp столкновениях при 13 ТэВ на детекторе АТЛАС»
 - 2017 «Наложение адронных струй и поиск ТБХ в канале $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$ в эксперименте АТЛАС на БАК при энергии 13 ТэВ»
 - 2018 «Тяжёлый бозон Хиггса и контрольная область Z-бозона в эксперименте АТЛАС на БАК»
 - 2019 «Изучение событий с двумя лептонами для (исследования стандартного и) поиска тяжелого бозона Хиггса в канале распада $H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow \ell\nu\ell\nu$ в эксперименте АТЛАС на LHC»
 - 2020 «Поиск тяжелого бозона Хиггса в канале распада $H \rightarrow WW \rightarrow \ell\nu\ell\nu$ в событиях с двумя электронами или мюонами в эксперименте АТЛАС на LHC»
 - 2021 «Поиск тяжёлых бозонных резонансов в канале распада $R \rightarrow WW \rightarrow e\nu\nu/\mu\nu\nu$ в эксперименте АТЛАС на LHC.»

Спасибо за внимание

Введение — 54–57

Адронные струи — 59–60

SM H 2015–2016 — 62–64

SM H 2015–2018 — 65–83

Highmass — 85–108

Запасные слайды

Научная новизна

Все результаты, полученные в диссертационной работе, являются новыми. В экспериментах ATLAS и CMS ранее изучался бозон Хиггса SM в канале распада $H \rightarrow WW^* \rightarrow \ell\nu\ell\nu$ на полной статистике при $\sqrt{s} = 8$ ТэВ. Обоими сотрудничествами проведены измерения как на частичном, так и полном образце событий и при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ, причем в соответствующих исследованиях ATLAS принял непосредственное участие и автор. Что касается тяжёлого резонанса, распадающегося на это же конечное состояние, то поиски проводились в обоих экспериментах как при $\sqrt{s} = 8$ ТэВ, так и $\sqrt{s} = 13$ ТэВ, но сигнала от новой частицы найдено не было, и были поставлены верхние пределы на сечение её рождения. В указанных исследованиях при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ в эксперименте ATLAS принимал участие и сам автор. Кроме того, при этой энергии мы задействовали каналы с одинаковым ароматом пары лептонов в конечном состоянии. Предыдущее исследование в ATLAS, где были использованы такие каналы, было осуществлено на статистике данных 2012 г. при энергии $\sqrt{s} = 8$ ТэВ.

Практическая значимость

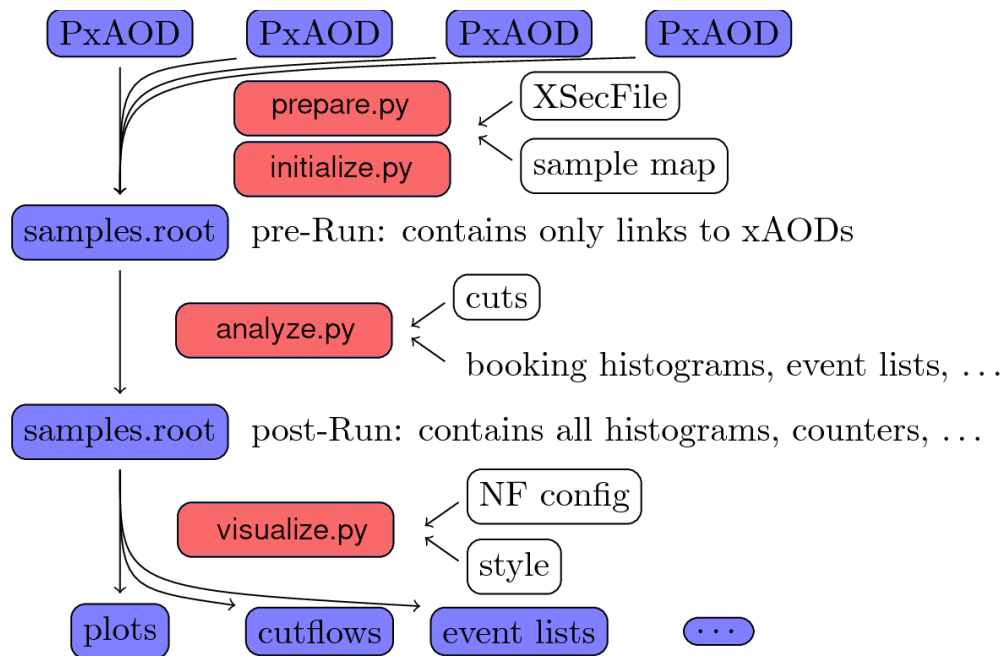
В диссертационной работе подтверждается надёжность работы подсистем установки ATLAS и алгоритмов восстановления адронных струй, в частности, при рекордной светимости LHC. Содержащиеся в работе оценки применяются также в задачах изучения других каналов распада бозона Хиггса и процессов Стандартной Модели. Полученные в диссертации результаты были использованы для улучшения точности измерения в эксперименте ATLAS сечения рождения H в механизме слияния глюонов и для постановки верхних пределов на сечение рождения гипотетических тяжёлых резонансов, распадающихся на пару W , а разработанные алгоритмы используются (и будут использоваться) при анализе последующих экспозиций на LHC для изучения бозона Хиггса и поиска подобных ему нестандартных частиц, в том числе и при работе при сверхвысокой светимости на модернизированном коллайдере LHC (HL-LHC).

Запасные слайды по введению

Анализ событий в ATLAS на примере $H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow \ell\nu\ell\nu$

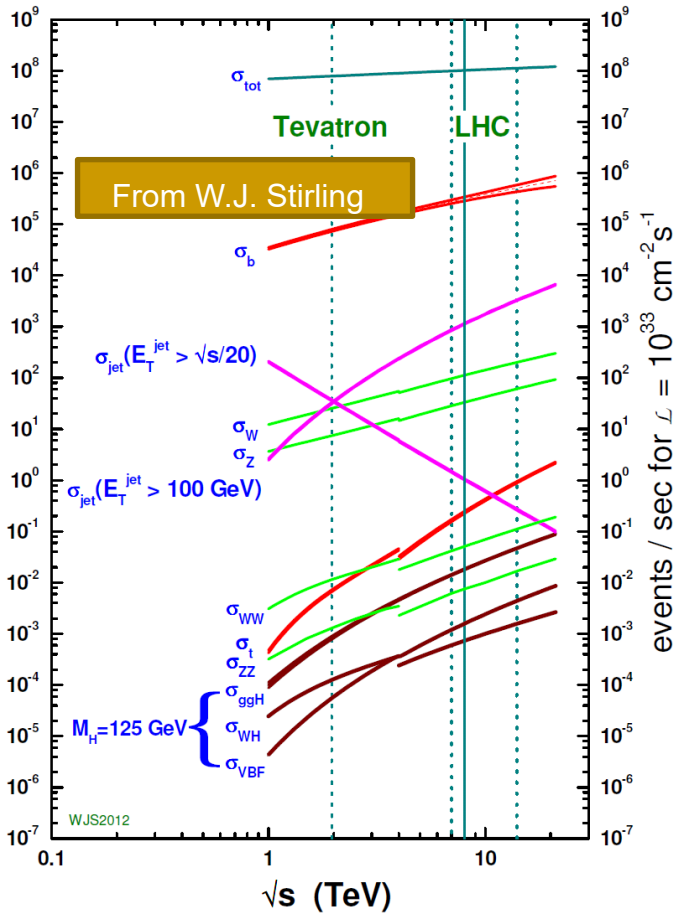
В рамках информационной среды CAF, используемой во многих физических исследованиях в ATLAS, используется многоступенчатая обработка данных:

- prepare.py. Создаётся базовая структура;
- initialize.py. Прочитывается полный набор входных файлов, вычисляются нормировки процессов;
- analyze.py. События, содержащиеся во входных файлах, прогоняются через всю структуру отборов. Прошедшие отбор события увеличивают счётчики и заполняют гistogramмы;
- visualize.py. Собранная информация представляется в виде набора файлов. Счётчики объединяются в таблицы, гistogramмы в графики. Возможно выполнение нормировки MC процессов.



Expected cross sections of physics processes vs E_{CM}

proton - (anti)proton cross sections



At LHC energies (7-8 TeV):

Total inelastic pp cross section: $\sigma \approx 100 \text{ mb}$

b production cross section: $\sigma \approx 100 \mu\text{b}$

Z boson production cross section $\sigma \approx 10 \text{ nb}$

Now we have $\approx 200 \text{ M}$ reconstructed $Z \rightarrow \ell\ell$ events

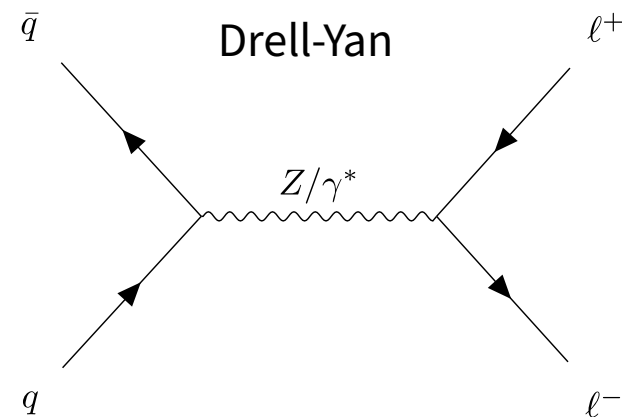
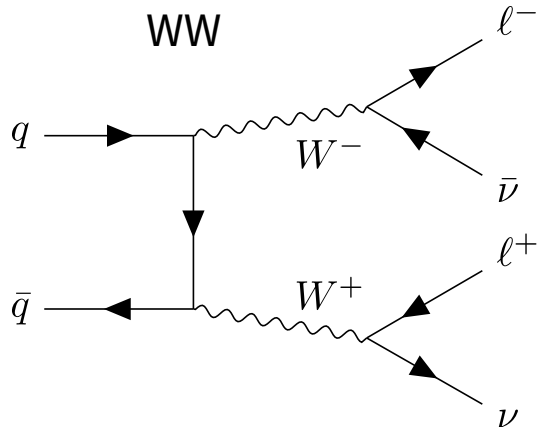
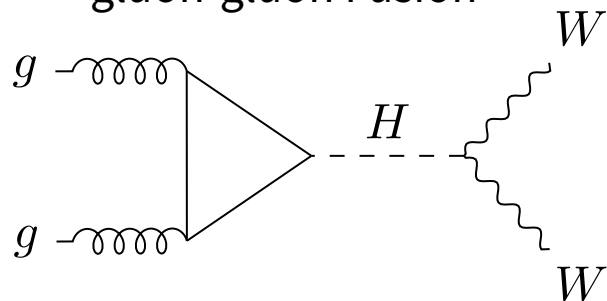
$t\bar{t}$ production cross section $\sigma \approx 100 \text{ pb}$

SM Higgs boson production cross section
($m_H = 125 \text{ GeV}$) $\sigma \approx 10 \text{ pb}$

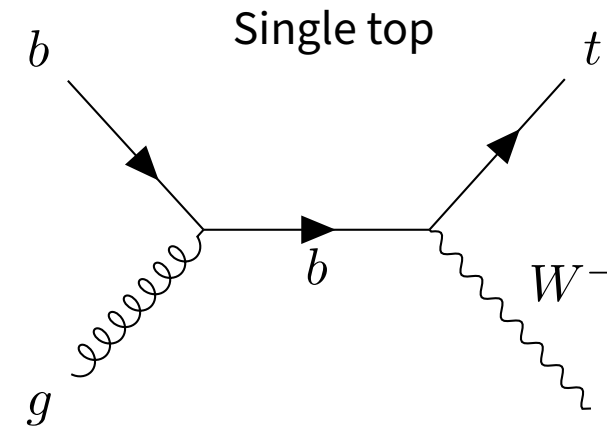
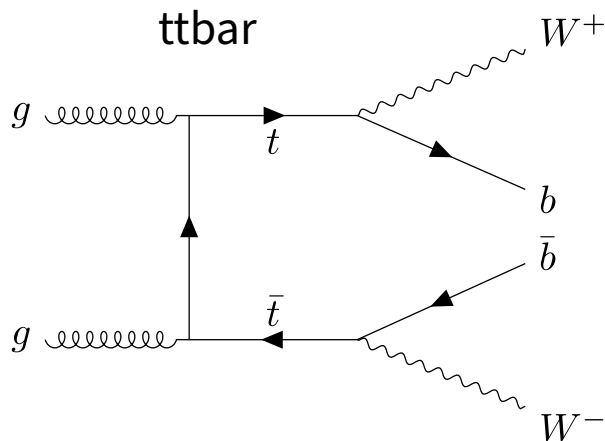
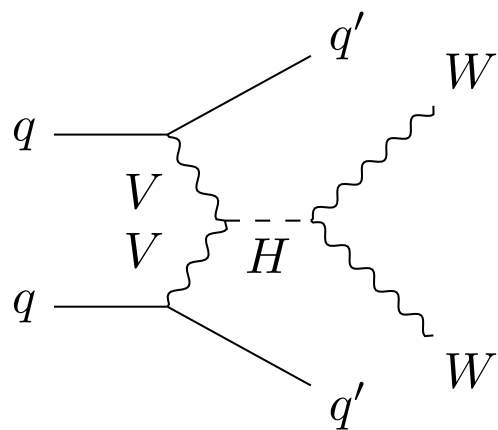
SM Higgs production cross section is expected to be NINE-TEN orders of magnitude smaller than total inelastic!

Основные процессы сигнала и фонов

gluon-gluon Fusion



Vector-Boson Fusion



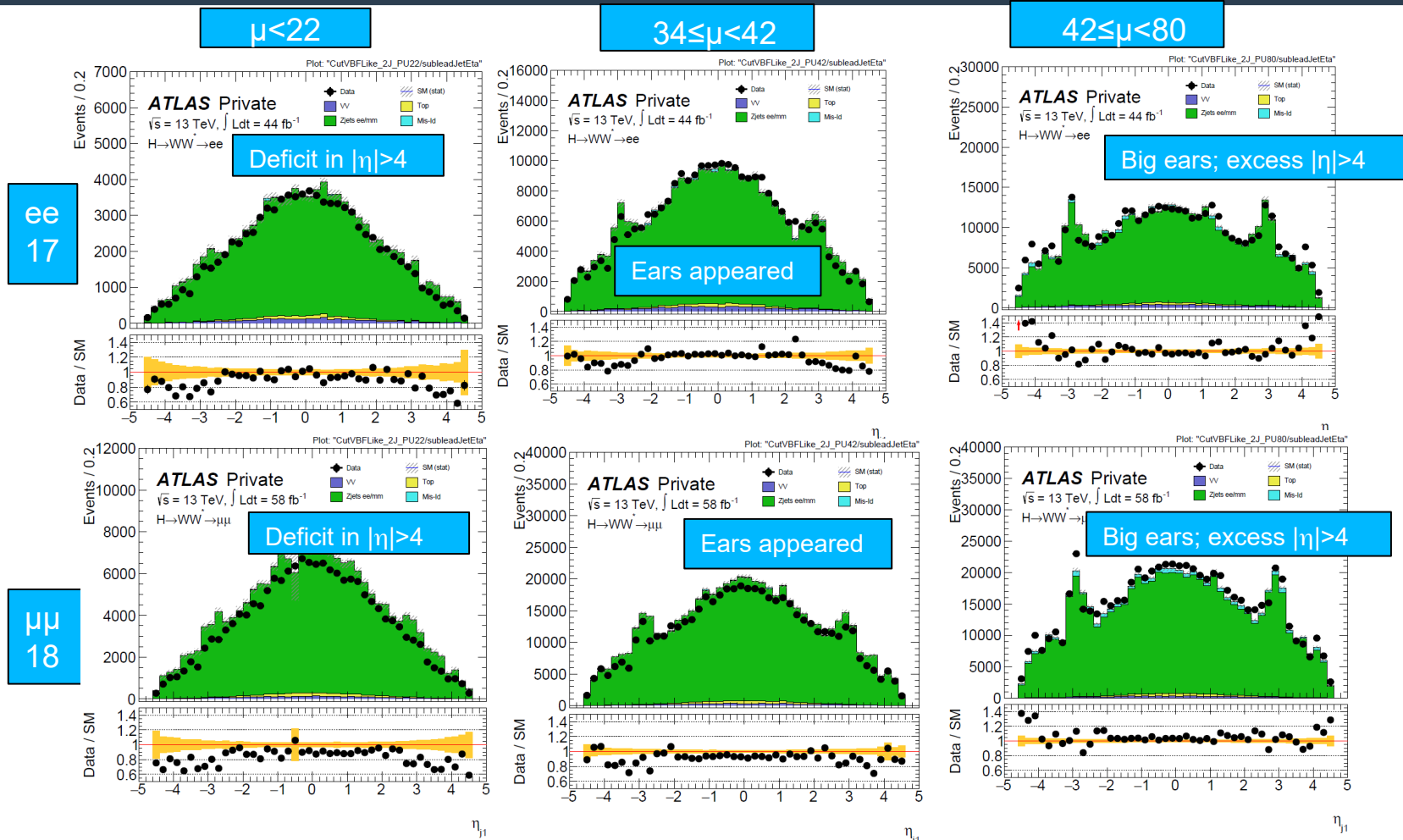
Запасные слайды по адронным струям

Число ee событий в тыс. с $|m_{ee} - m_z| \leq 10$ ГэВ в данных 2015–16 гг.

N_{jet}	WW	VV	Топ	$Z \rightarrow ee$	$Z \rightarrow \tau\tau$	Полный фон	Данные	Data/MC
Любое	4.4	156	19.0	12548	0.8	12728	13545	1.06
0	2.6	86.3	0.5	9456	0.6	9546	10221	1.07
1	1.1	40.6	3.6	2220	165	2265	2384	1.05
2	0.5	18.4	7.1	633	0.06	659	687	1.04
≥ 3	0.24	10.3	7.8	239	0.02	257	252	0.98

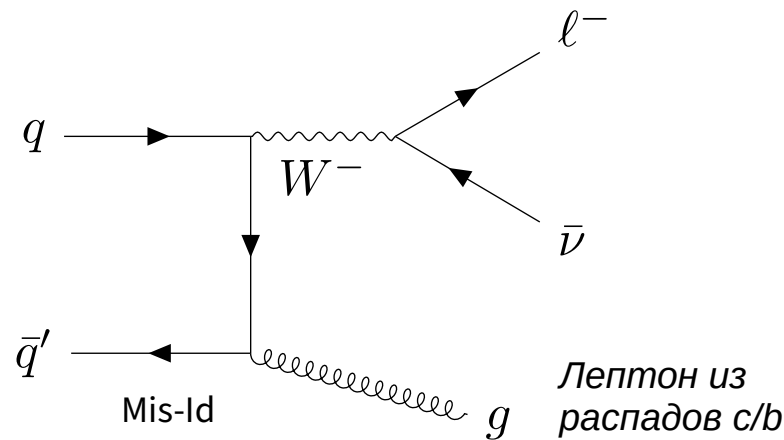
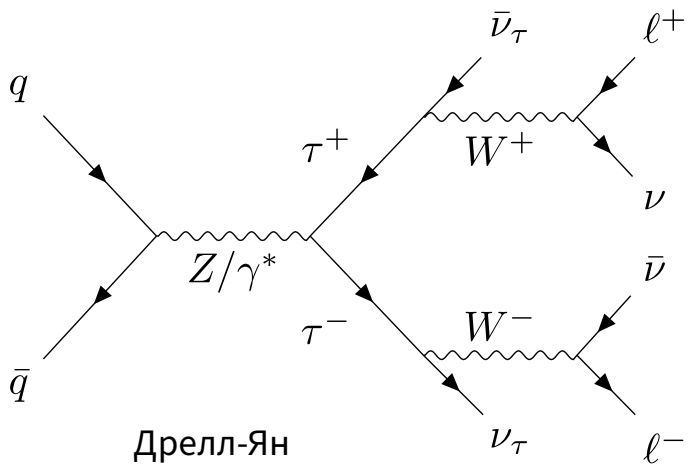
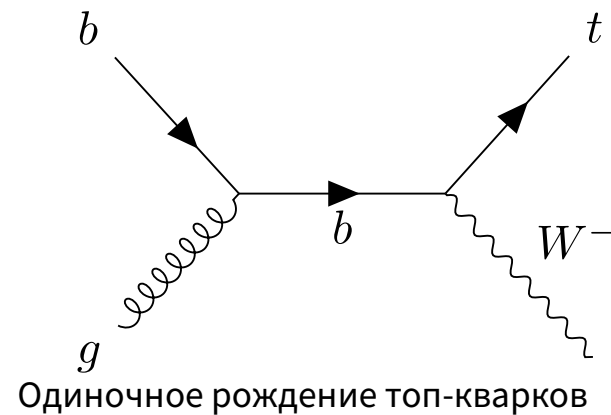
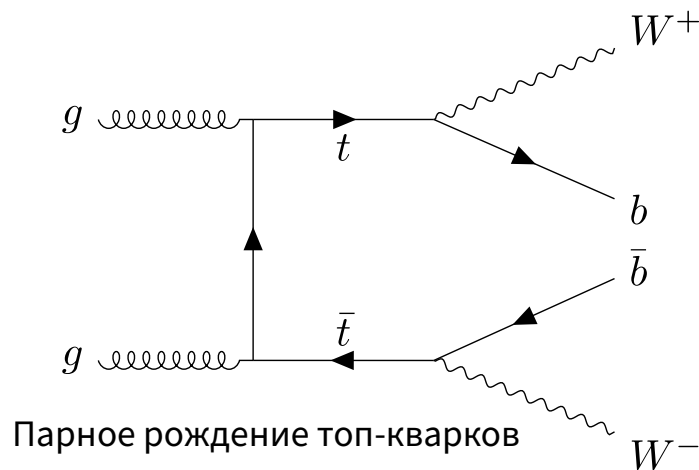
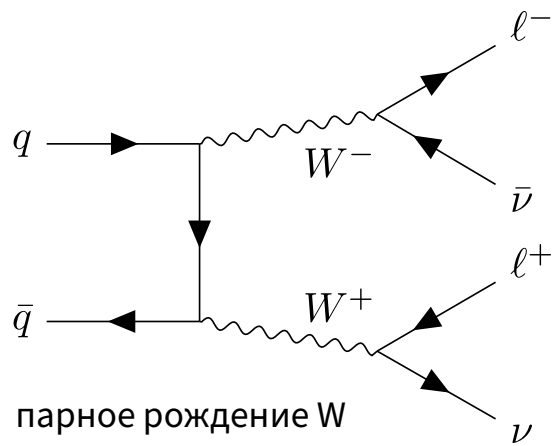
- Было проверено, что почти 100% событий VV связаны с рождением $Z\gamma$.
- Отношение числа реальных и смоделированных событий (data/MC) не сильно зависит от числа струй N_{jet} и составляет 1.06

Selection of >1 jet; second jet η vs pile-up



Запасные слайды по SM H

Основные фоновые процессы

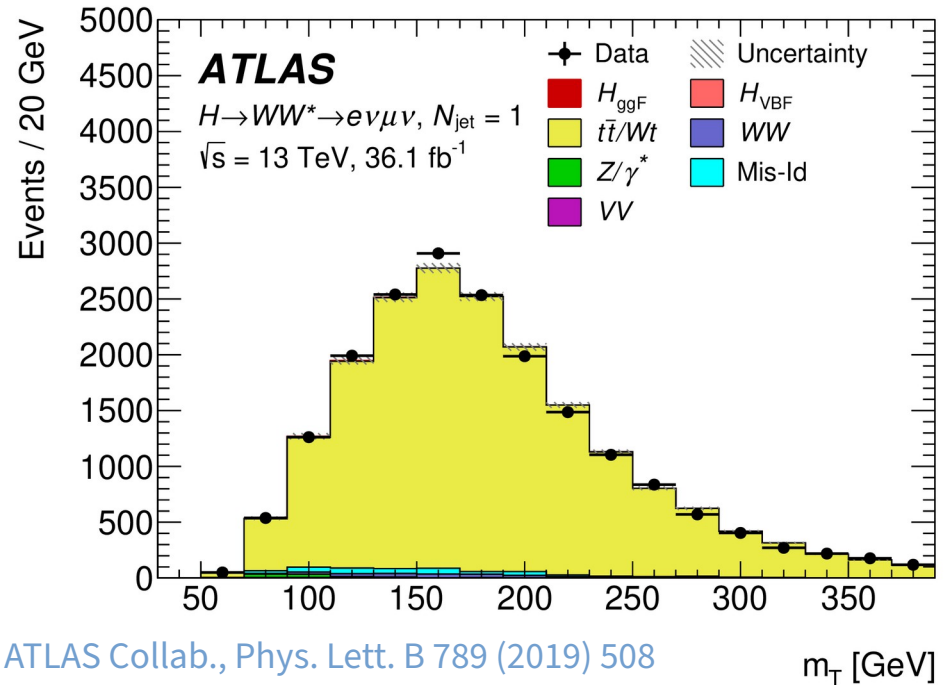
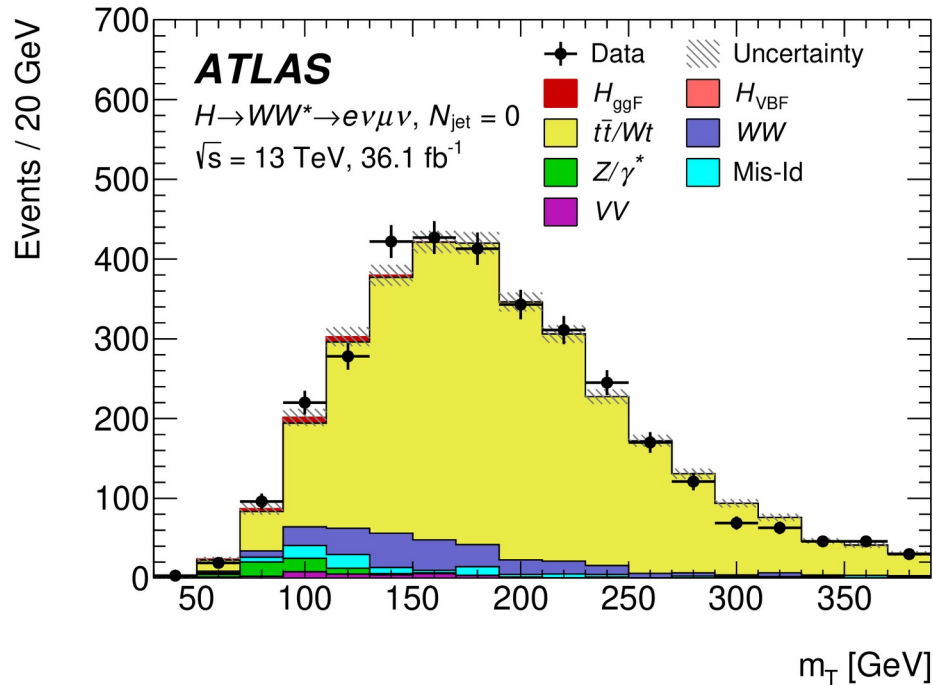


Контрольные области и нормировочные коэффициенты для 2015–16 гг.

CR	$N_{\text{jet}} = 0$ ggF	$N_{\text{jet}} = 1$ ggF	$N_{\text{jet}} \geq 2$ VBF
WW	$55 < m_{\ell\ell} < 110$ ГэВ	$m_{\ell\ell} > 80$ ГэВ	—
	$\Delta\phi_{\ell\ell} < 2.6$	$ m_{\tau\tau} - m_Z > 25$ ГэВ	
	$N_{\text{b-jet}} = 0$		
		$\max(m_{\tau^{\ell}}) > 50$ ГэВ	
$t\bar{t}/Wt$	$N_{\text{b-jet, подпор.}} > 0$	$N_{\text{b-jet, надпор.}} = 1, N_{\text{b-jet, подпор.}} = 0$	$N_{\text{b-jet}} = 1$
	$\Delta\phi(\ell\ell, E_{\tau^{\text{miss}}}) > \pi/2$	$\max(m_{\tau^{\ell}}) > 50$ ГэВ	запрет на центральную струю
	$p_{\tau^{\ell}} > 30$ ГэВ	$m_{\tau\tau} < m_Z - 25$ ГэВ	
	$\Delta\phi_{\ell\ell} < 2.8$		запрет на лептон вне струй
Z^*/γ^*	$N_{\text{b-jet}} = 0$		
	$m_{\ell\ell} < 80$ ГэВ		
	$p_{\tau^{\text{miss}}} > 0$ ГэВ		запрет на центральную струю
	$\Delta\phi_{\ell\ell} > 2.8$	$\max(m_{\tau^{\ell}}) > 50$ ГэВ	запрет на лептон вне струй
		$m_{\tau\tau} > m_Z - 25$ ГэВ	$ m_{\tau\tau} - m_Z \leq 25$ ГэВ

Категория	$N_{\text{jet}} = 0$	$N_{\text{jet}} = 1$	$N_{\text{jet}} \geq 2$
WW	1.06 ± 0.09	0.97 ± 0.17	—
$t\bar{t}/Wt$	0.99 ± 0.17	0.98 ± 0.08	1.01 ± 0.01
Z^*/γ^*	0.84 ± 0.04	0.90 ± 0.12	0.93 ± 0.07

Контрольные области $t\bar{t}/Wt$ $N_{\text{jet}} = 0$ и $N_{\text{jet}} = 1$, SM H 36 fb^{-1}



ATLAS Collab., Phys. Lett. B 789 (2019) 508

- Распределения по m_T после подгонки в $N_{\text{jet}} = 0$ и $N_{\text{jet}} = 1$ CR для фона от $t\bar{t}/Wt$
- Данные и результаты их моделирования согласуются в пределах неопределенностей

Отбор сигнальных событий для 2015–18 гг.

Category	$N_{\text{jet},(p_T>30 \text{ GeV})} = 0 \text{ ggF}$	$N_{\text{jet},(p_T>30 \text{ GeV})} = 1 \text{ ggF}$	$N_{\text{jet},(p_T>30 \text{ GeV})} \geq 2 \text{ ggF}$
Preselection	Two isolated, different-flavor leptons ($\ell = e, \mu$) with opposite charge $p_T^{\text{lead}} > 22 \text{ GeV}$, $p_T^{\text{sublead}} > 15 \text{ GeV}$ $m_{\ell\ell} > 10 \text{ GeV}$, $p_T^{\text{miss}} > 20 \text{ GeV}$		
Background rejection	$N_{b\text{-jet},(p_T>20 \text{ GeV})} = 0$		
	$\Delta\phi_{\ell\ell, E_T^{\text{miss}}} > \pi/2$ $p_T^{\ell\ell} > 30 \text{ GeV}$	$m_{\tau\tau} < m_Z - 25 \text{ GeV}$ $\max(m_T^\ell) > 50 \text{ GeV}$	
$H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$ topology	$m_{\ell\ell} < 55 \text{ GeV}$, $\Delta\phi_{\ell\ell} < 1.8$		
			fail central jet veto OR fail outside lepton veto $ m_{jj} - 85 > 15 \text{ GeV}$ OR $\Delta y_{jj} > 1.2$
Discriminating fit variable	m_T		

Анти-CJV (Central Jet Veto) и Анти-OLV (Outside Lepton Veto) обеспечивают ортогональность с VBF

Отбор событий для контрольных областей, SM Н 139 fb⁻¹

CR	$N_{\text{jet},(p_T>30 \text{ GeV})} = 0 \text{ ggF}$	$N_{\text{jet},(p_T>30 \text{ GeV})} = 1 \text{ ggF}$	$N_{\text{jet},(p_T>30 \text{ GeV})} \geq 2 \text{ ggF}$
$qq \rightarrow WW$	$N_{b\text{-jet},(p_T>20 \text{ GeV})} = 0$		
	$\Delta\phi_{\ell\ell, E_T^{\text{miss}}} > \pi/2$ $p_T^{\ell\ell} > 30 \text{ GeV}$ $55 < m_{\ell\ell} < 110 \text{ GeV}$ $\Delta\phi_{\ell\ell} < 2.6$	$m_{\ell\ell} > 80 \text{ GeV}$	
		$ m_{\tau\tau} - m_Z > 25 \text{ GeV}$	$m_{\tau\tau} < m_Z - 25 \text{ GeV}$
		$\max(m_T^\ell) > 50 \text{ GeV}$	$m_{T2} > 165 \text{ GeV}$
		fail central jet veto or fail outside lepton veto	
	$ m_{jj} - 85 > 15 \text{ GeV}$ or $\Delta y_{jj} > 1.2$		
Z/γ^*	$N_{b\text{-jet},(p_T>20 \text{ GeV})} = 0$		
	$m_{\ell\ell} < 80 \text{ GeV}$ no p_T^{miss} requirement		$m_{\ell\ell} < 55 \text{ GeV}$
	$\Delta\phi_{\ell\ell} > 2.8$	$m_{\tau\tau} > m_Z - 25 \text{ GeV}$	
		$\max(m_T^\ell) > 50 \text{ GeV}$	fail central jet veto or fail outside lepton veto
		$ m_{jj} - 85 > 15 \text{ GeV}$ or $\Delta y_{jj} > 1.2$	

Отбор событий для контрольных областей, SM Н 139 fb⁻¹

CR	$N_{\text{jet},(p_T>30 \text{ GeV})} = 0 \text{ ggF}$	$N_{\text{jet},(p_T>30 \text{ GeV})} = 1 \text{ ggF}$	$N_{\text{jet},(p_T>30 \text{ GeV})} \geq 2 \text{ ggF}$
$t\bar{t}/Wt$	$N_{b\text{-jet},(20<p_T<30 \text{ GeV})} > 0$ $\Delta\phi_{\ell\ell, E_T^{\text{miss}}} > \pi/2$ $p_T^{\ell\ell} > 30 \text{ GeV}$ $\Delta\phi_{\ell\ell} < 2.8$	$N_{b\text{-jet},(p_T>30 \text{ GeV})} = 1$ $N_{b\text{-jet},(20<p_T<30 \text{ GeV})} = 0$	$N_{b\text{-jet},(p_T>20 \text{ GeV})} = 0$
		$m_{\tau\tau} < m_Z - 25 \text{ GeV}$	
		$\max(m_T^{\ell}) > 50 \text{ GeV}$	$m_{\ell\ell} > 80 \text{ GeV}$ $\Delta\phi_{\ell\ell} < 1.8$ $m_{T2} < 165 \text{ GeV}$
			fail central jet veto or fail outside lepton veto
			$ m_{jj} - 85 > 15 \text{ GeV}$ or $\Delta y_{jj} > 1.2$

M_{T2} definition

$$m_{T2}^2 = \min_{\not{p}_1 + \not{p}_2 = \not{p}_T} \left[\max \{ m_T^2(p_T^a, \not{p}_1), m_T^2(p_T^b, \not{p}_2) \} \right]$$

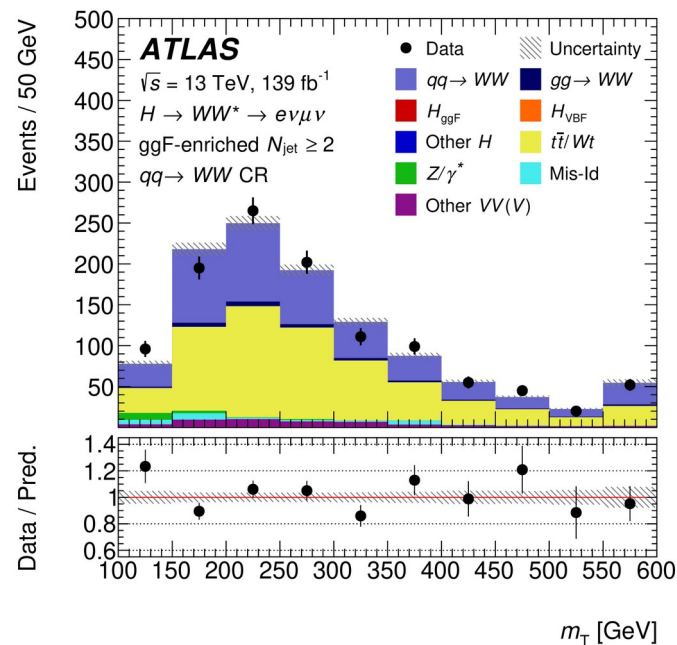
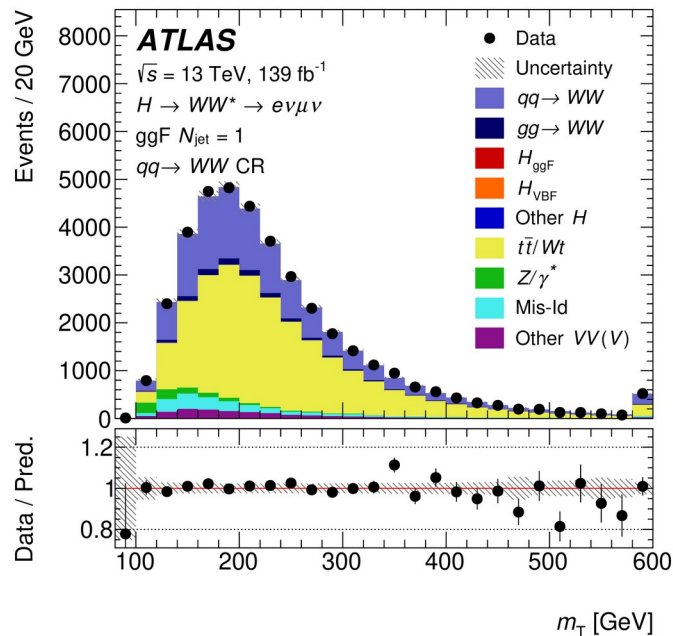
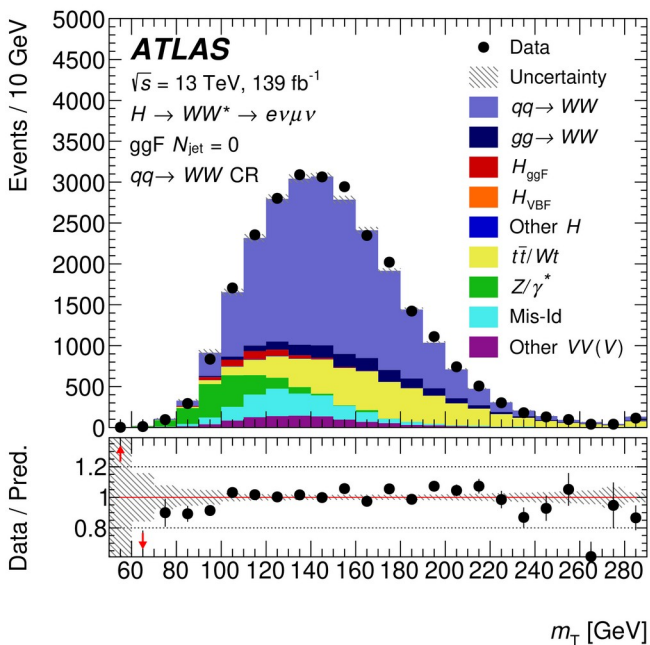
where the minimization is over all possible two-momenta, $\bar{p}_{1,2}$, such that their sum gives the observed missing transverse momentum \bar{p}_T , and where each of p_T^a and p_T^b is the combined transverse momentum of a charged lepton and a jet.

- $m_{T2}^2 \leq m_W^2$ (decay of a pair of W each with a single invisible particle)
- $m_T^2 \leq m_W^2$ (decay with single invisible particle)

normalization factors for backgrounds, SM H 139 fb⁻¹

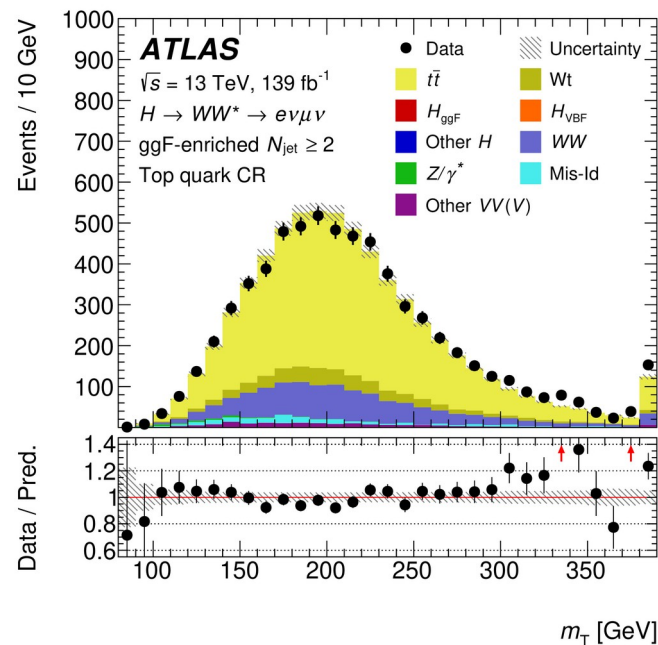
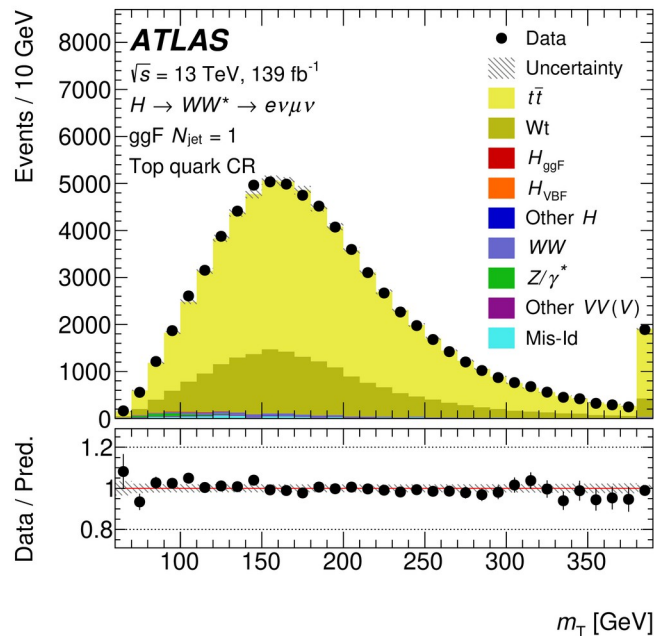
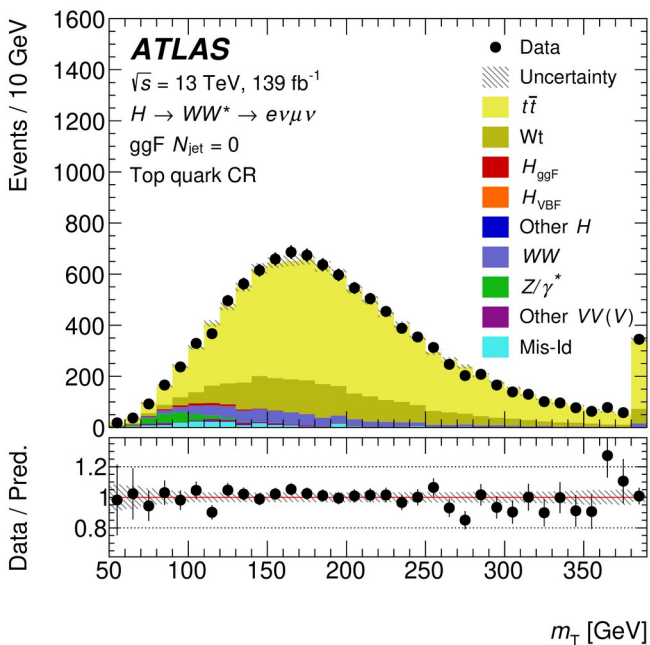
Category	WW	$t\bar{t}/Wt$	Z/γ^*
$N_{\text{jet}} = 0$ ggF	$1.02^{+0.07}_{-0.07}$	$0.93^{+0.22}_{-0.17}$	$0.96^{+0.07}_{-0.06}$
$N_{\text{jet}} = 1$ ggF	$0.85^{+0.16}_{-0.15}$	$1.05^{+0.19}_{-0.16}$	$0.98^{+0.10}_{-0.09}$
$N_{\text{jet}} \geq 2$ ggF	$0.81^{+0.34}_{-0.33}$	$0.96^{+0.23}_{-0.18}$	$0.98^{+0.18}_{-0.17}$

WW Control Regions m_T distributions, SM H 139 fb⁻¹



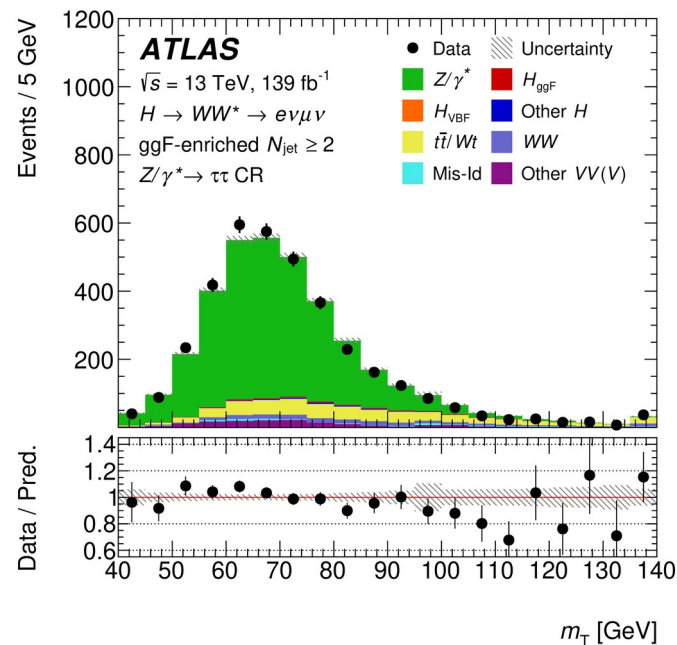
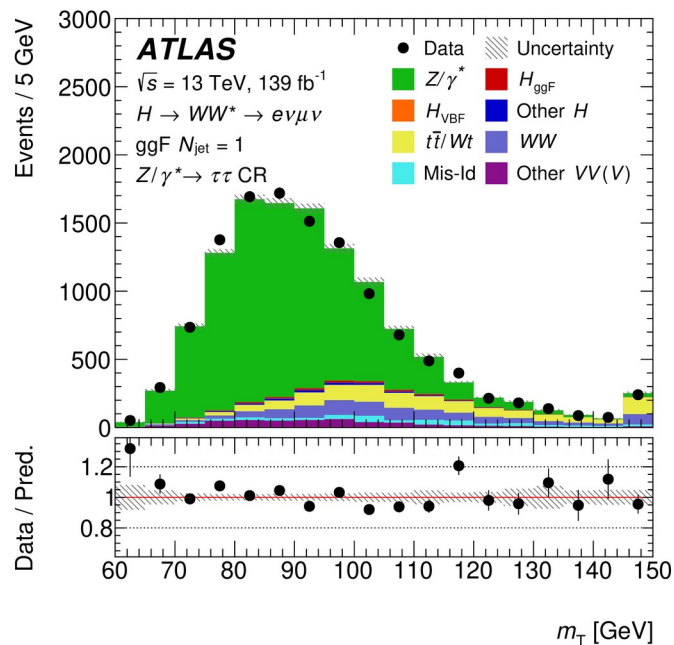
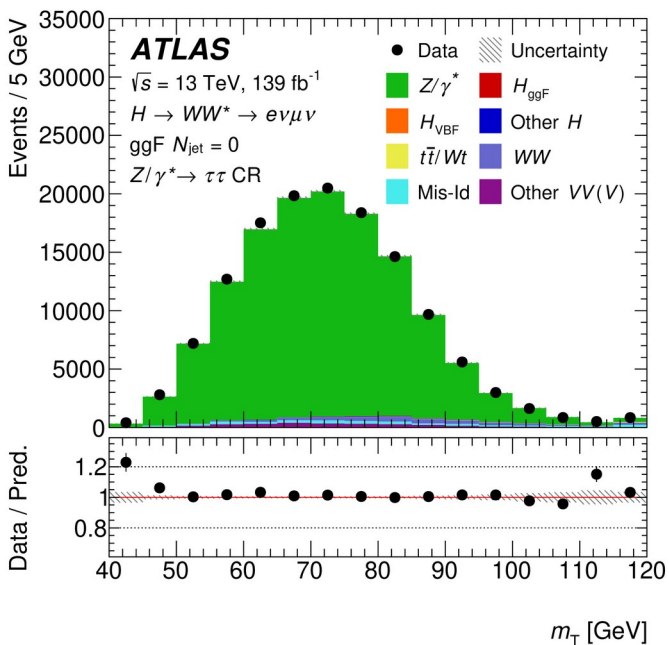
ATLAS Collab., Phys. Rev. D108 (2023) 032005

Top Control Regions m_T distributions, SM H 139 fb⁻¹



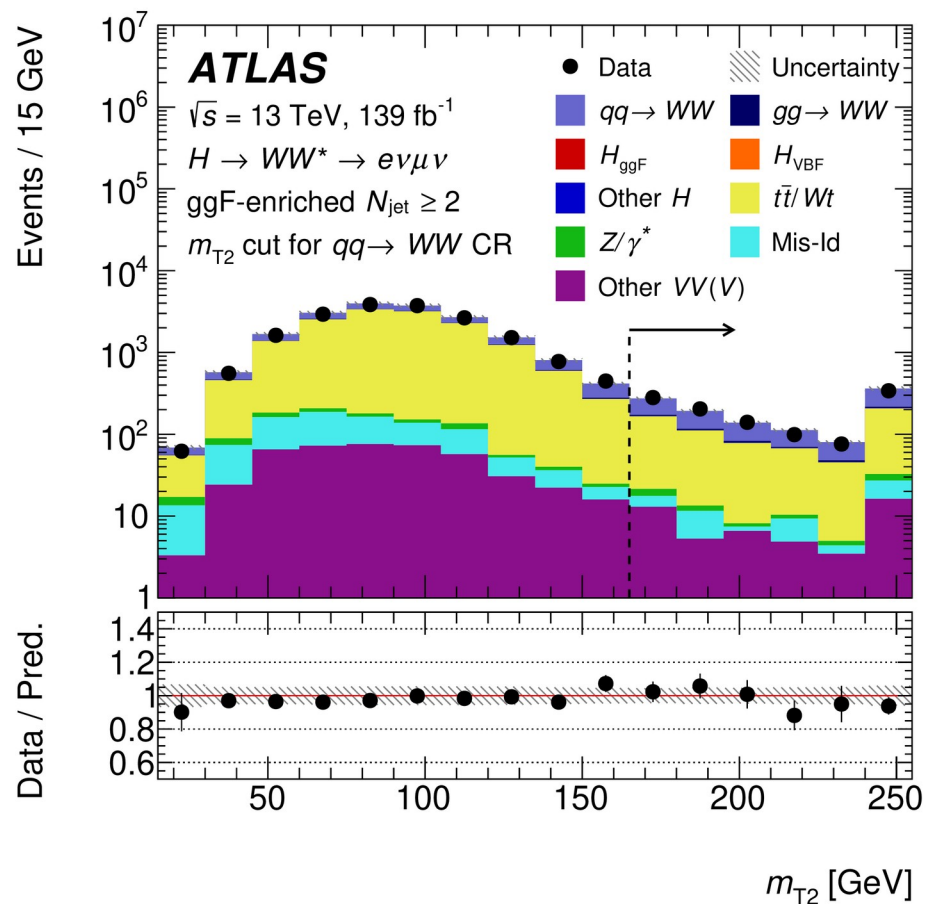
ATLAS Collab., Phys. Rev. D108 (2023) 032005

Z $\tau\tau$ Control Regions m_T distributions, SM H 139 fb $^{-1}$

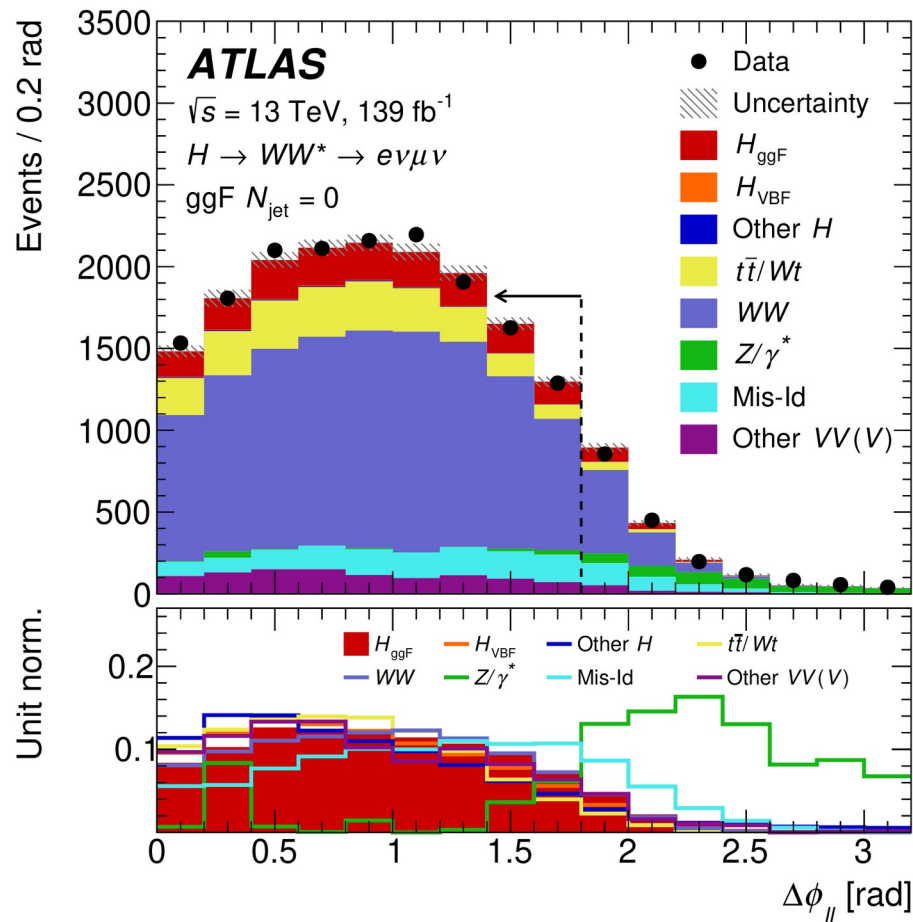
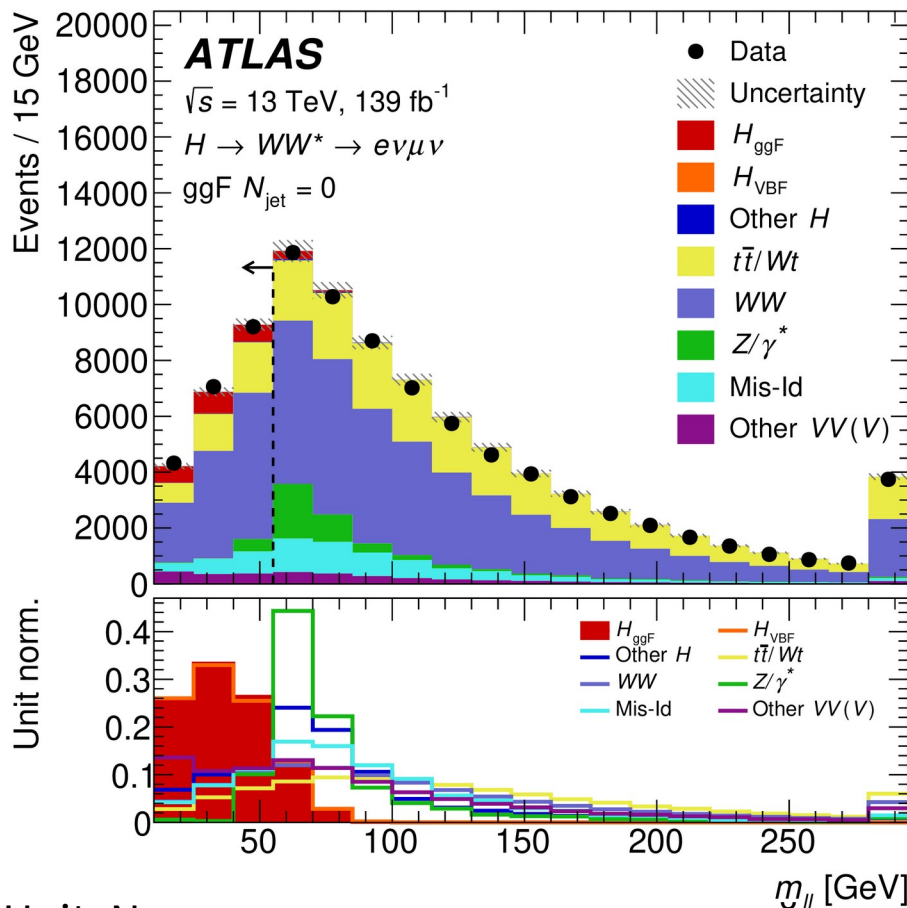


ATLAS Collab., Phys. Rev. D108 (2023) 032005

2 jet WW CR selection: m_{T2} , SM H 139 fb⁻¹

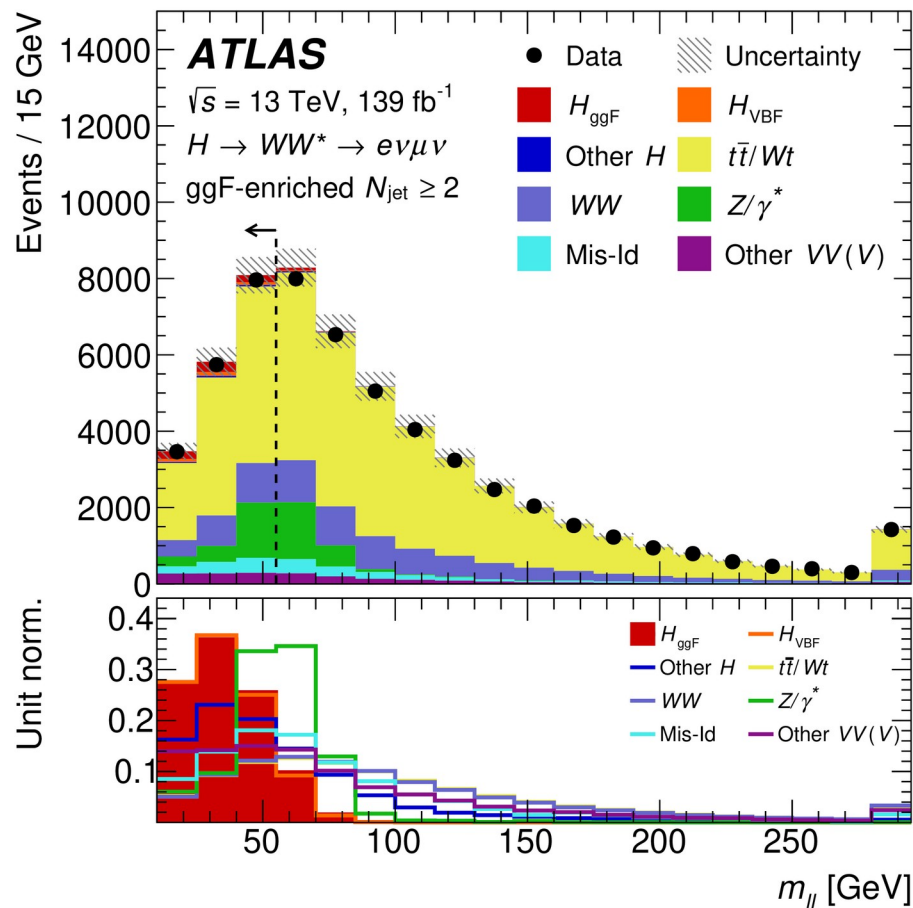
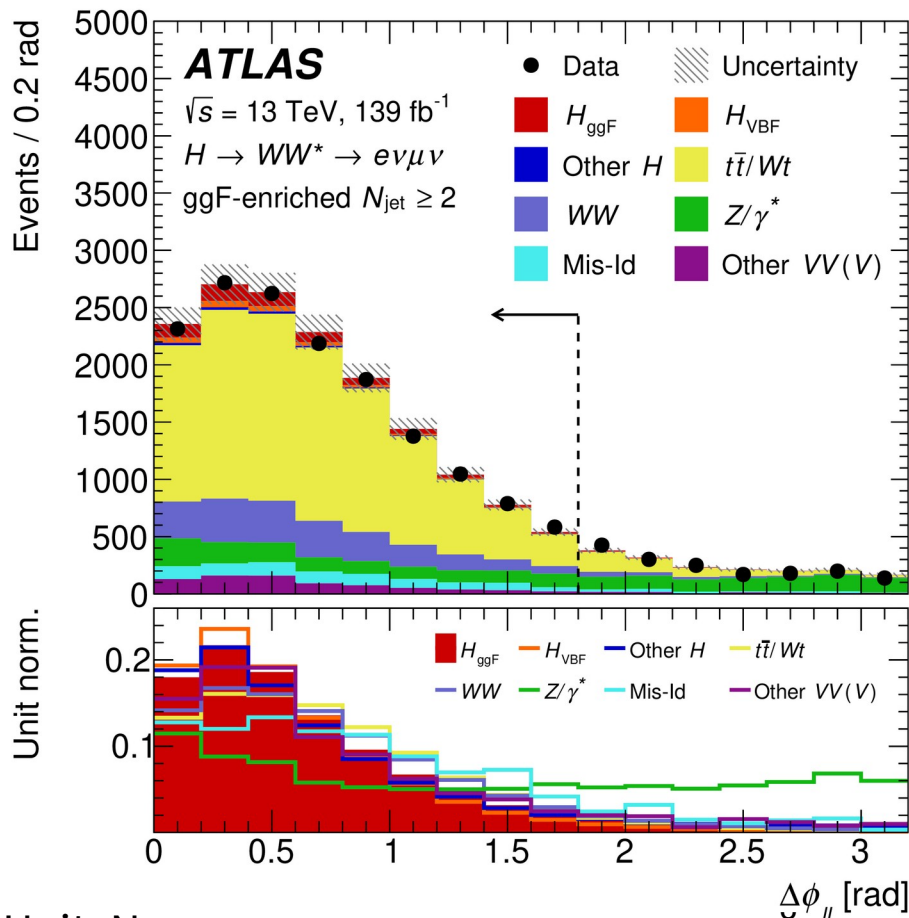


$m_{\ell\ell}$ and $\Delta\phi_{\ell\ell}$ selection for 0-jet category, SM H 139 fb⁻¹



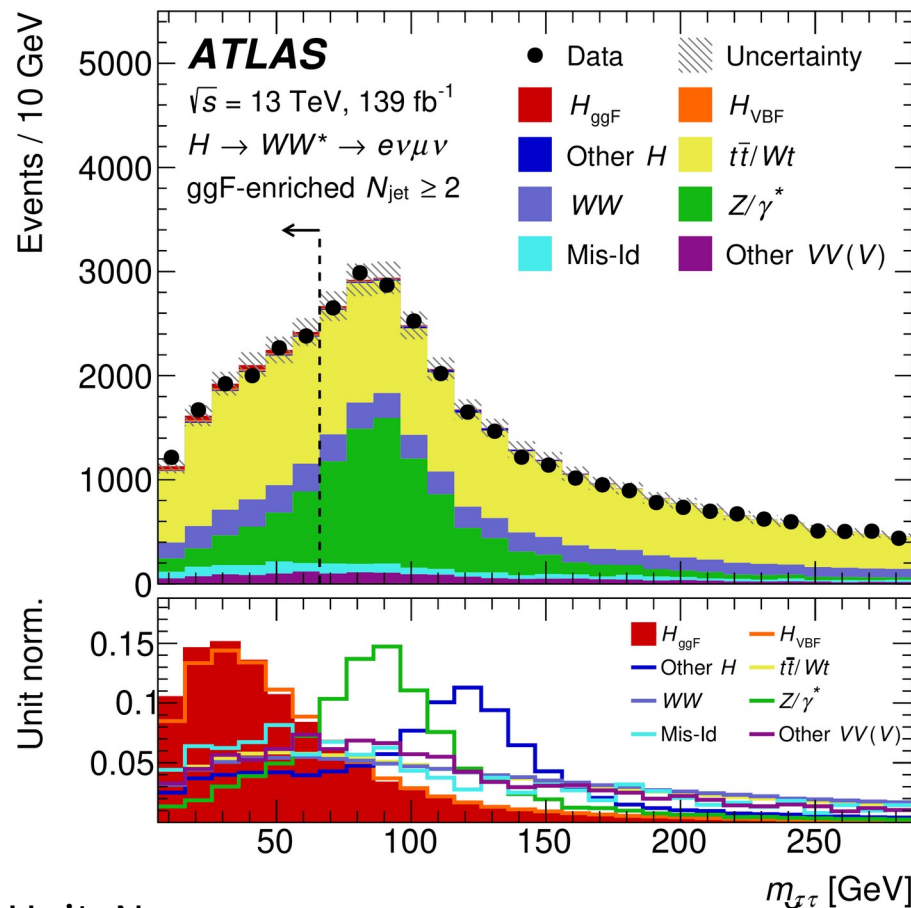
Unit. Norm. - интеграл распределений отнормирован к единице

$m_{\ell\ell}$ and $\Delta\phi_{\ell\ell}$ selection for 2-jet category, SM H 139 fb⁻¹



Unit. Norm. - интеграл распределений отнормирован к единице

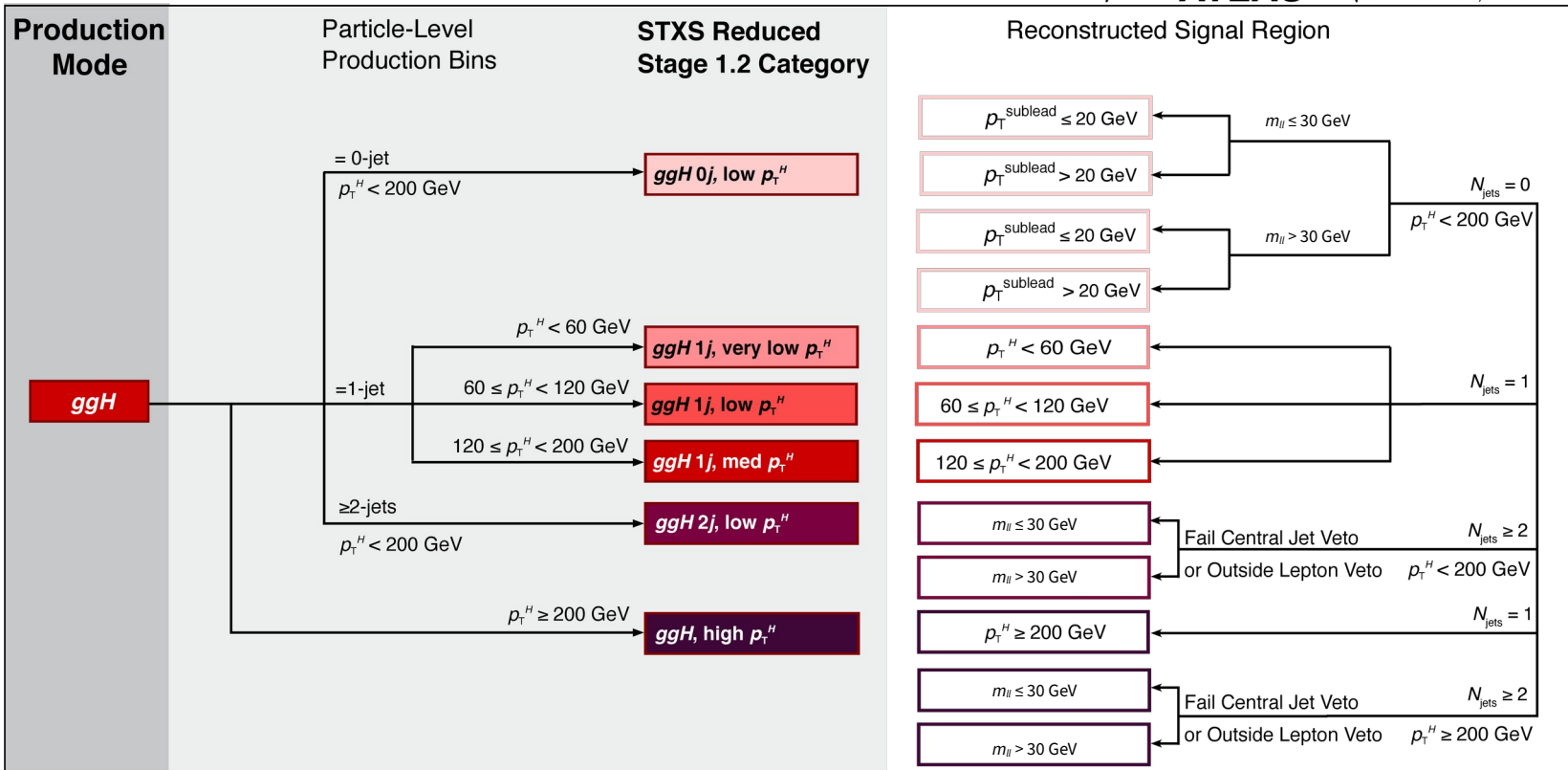
$m_{\tau\tau}$ selection for 2-jet category, SM H 139 fb⁻¹



Unit. Norm. - интеграл распределений отнормирован к единице

(Reduced) STXS Stage 1.2 (Simplified Template Cross Sections)

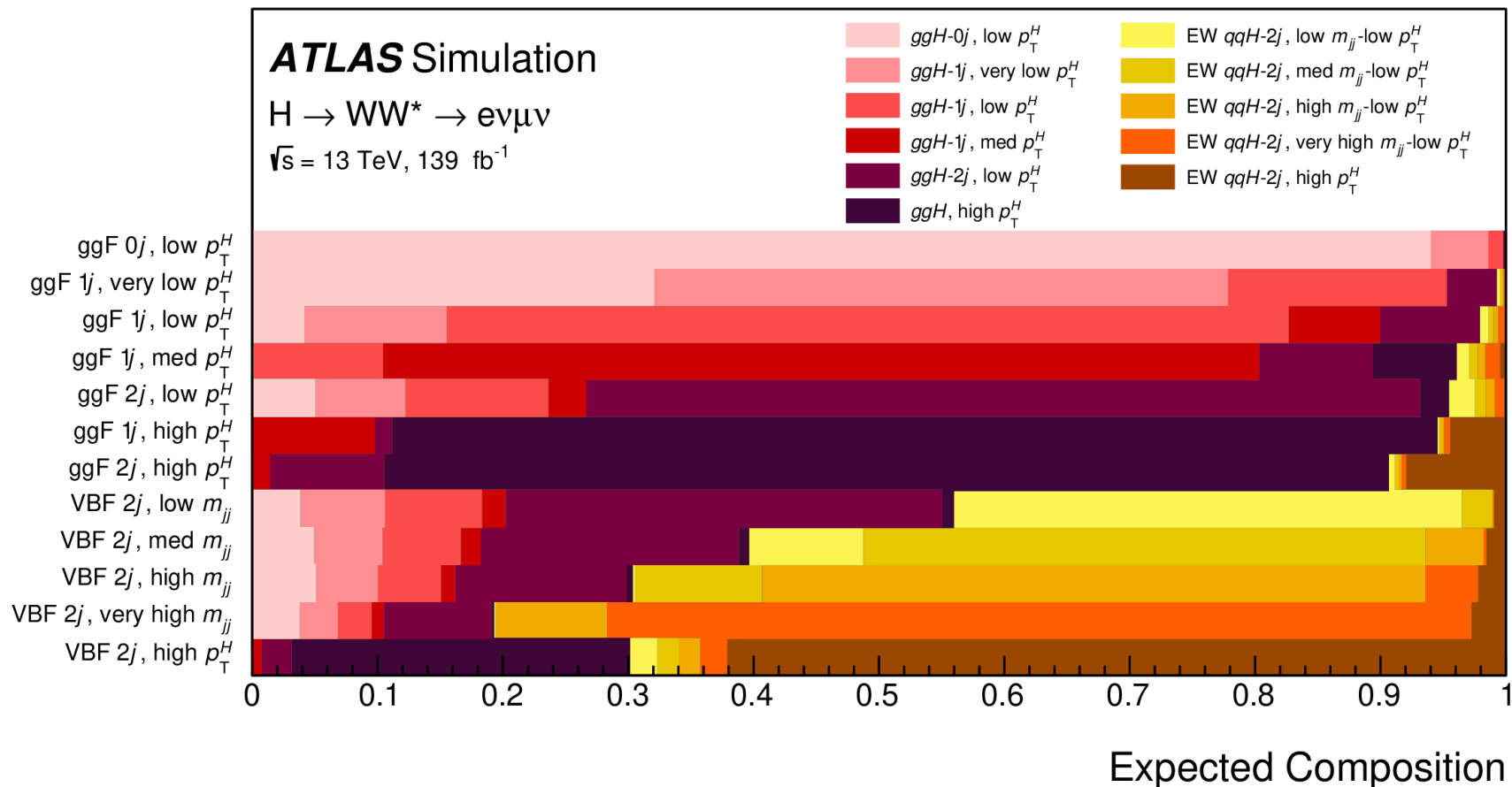
$H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$ **ATLAS** $\sqrt{s} = 13$ TeV, 139 fb⁻¹



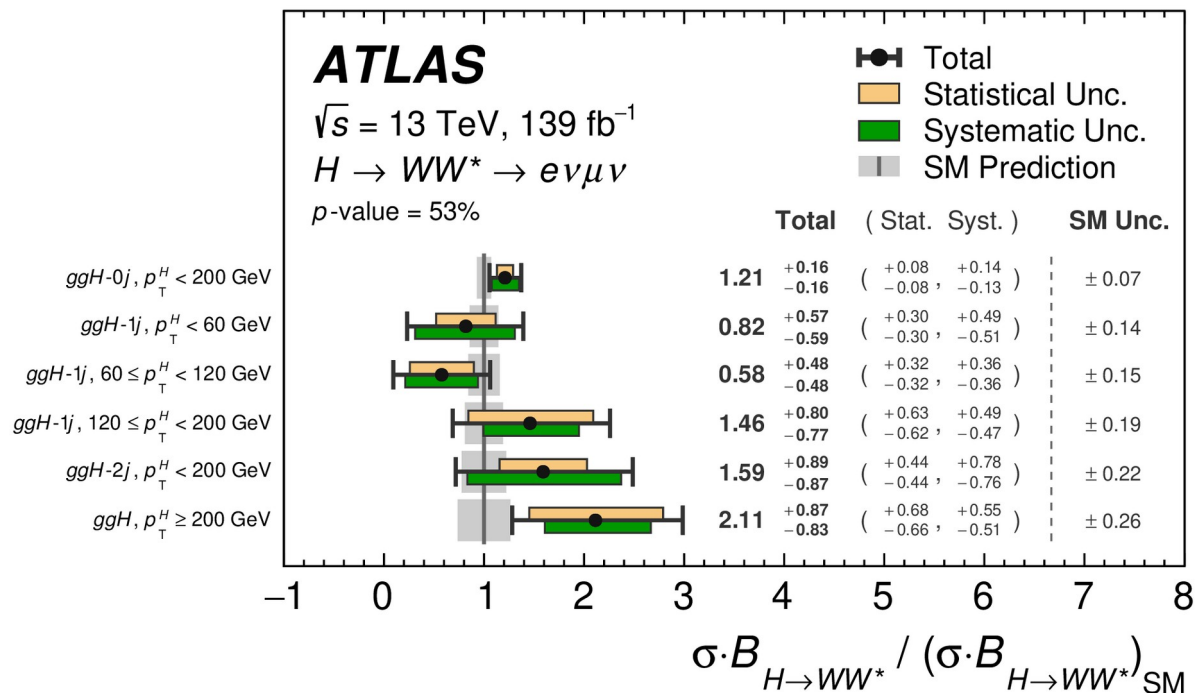
Each SR and corresponding CR is further divided providing independent XS measurements in kinematically different sub-regions

STXS Composition

Reconstructed Signal Region



Измеренное сечение ggF, полное и STXS



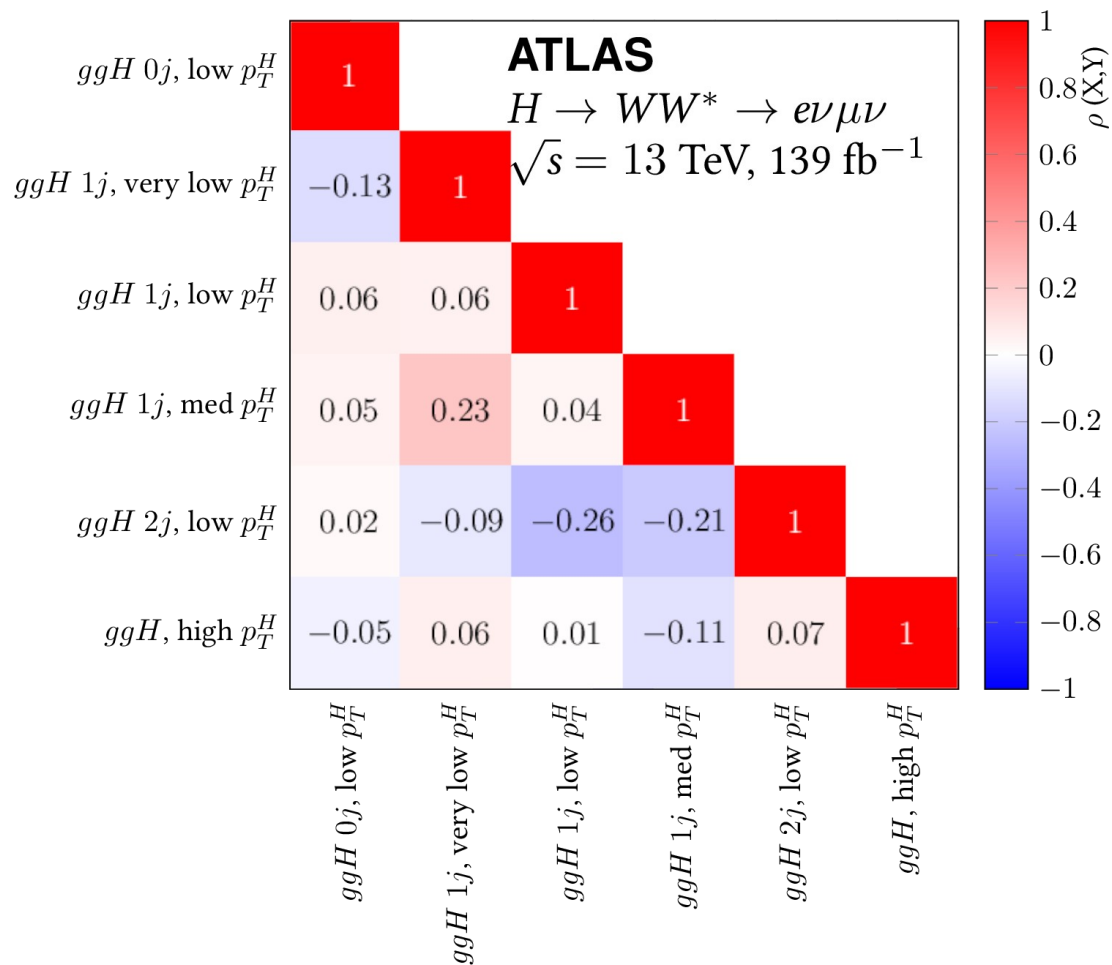
$$\begin{aligned} \sigma_{ggF} \cdot \mathcal{B}_{H \rightarrow WW^*} &= 12.0 \pm 1.4 \text{ pb} \\ &= 12.0 \pm 0.6 \text{ (stat.)}_{-0.8}^{+0.9} \text{ (exp. syst.)}_{-0.5}^{+0.6} \text{ (sig. theo.)} \pm 0.8 \text{ (bkg. theo.) pb} \end{aligned}$$

Значение, предсказанное СМ **$10.4 \pm 0.5 \text{ pb}$**

Breakdown of the main contributions to the total uncertainty, SM H 139 fb⁻¹

Source	$\frac{\Delta\sigma_{\text{ggF}} \cdot \mathcal{B}_{H \rightarrow WW^*}}{\sigma_{\text{ggF}} \cdot \mathcal{B}_{H \rightarrow WW^*}}$ [%]
Data statistical uncertainties	5.1
Total systematic uncertainties	11
MC statistical uncertainties	3.8
Experimental uncertainties	6.3
Flavor tagging	2.7
Jet energy scale	1.1
Jet energy resolution	2.4
E_T^{miss}	2.2
Muons	2.1
Electrons	1.6
Fake factors	2.4
Pileup	2.5
Luminosity	2.0
Theoretical uncertainties	7.8
ggF	4.3
VBF	0.7
WW	4.2
Top	3.8
Z $\tau\tau$	2.3
Other VV	2.9
Other Higgs	0.4
Background normalizations	4.5
WW	2.8
Top	2.3
Z $\tau\tau$	3.1
Total	12

Correlations between the cross-section measurements, SM H 139 fb⁻¹



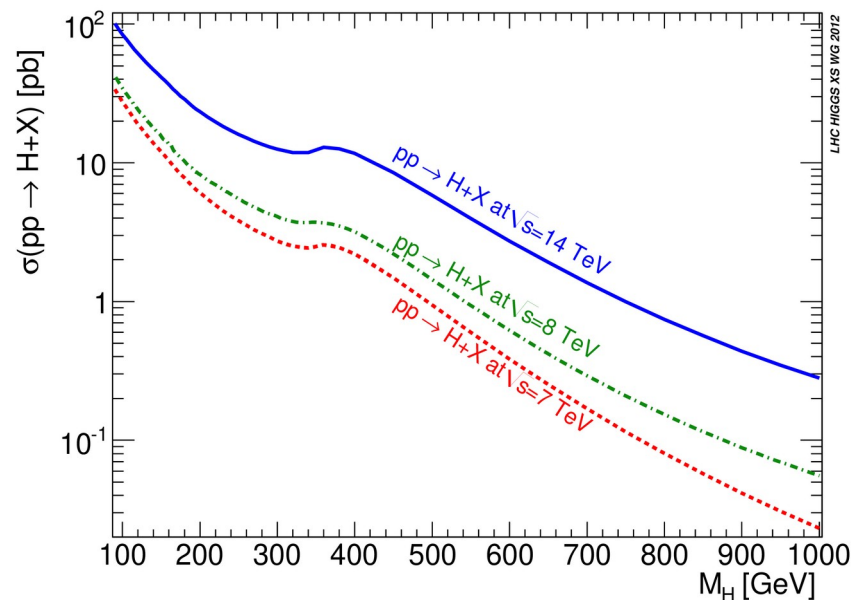
Process	Matrix element (alternative)	PDF set	UEPS model (alternative model)	Prediction order for total cross section
ggF H	PowHEG Box v2 [23–27] NNLOPS [26, 30, 43] (MG5_AMC@NLO) [49, 86]	PDF4LHC15NNLO [57]	PYTHIA 8 [28] (HERWIG 7) [48]	N ³ LO QCD + NLO EW [11, 33–42]
VBF H	PowHEG Box v2 [23–25, 43] (MG5_AMC@NLO)	PDF4LHC15NLO	PYTHIA 8 (HERWIG 7)	NNLO QCD + NLO EW [44–46]
VH excl. $gg \rightarrow ZH$	PowHEG Box v2	PDF4LHC15NLO	PYTHIA 8	NNLO QCD + NLO EW [52–56]
$t\bar{t}H$	PowHEG Box v2	NNPDF3.0NLO	PYTHIA 8	NLO [11]
$gg \rightarrow ZH$	PowHEG Box v2	PDF4LHC15NLO	PYTHIA 8	NNLO QCD + NLO EW [90, 91]
$qq \rightarrow WW$	SHERPA 2.2.2 [69] (Q_{cut})	NNPDF3.0NNLO [50]	SHERPA 2.2.2 [70, 71, 73–76] (SHERPA 2.2.2 [71, 72]; μ_q)	NLO [77, 78, 92]
$qq \rightarrow WWqq$	MG5_AMC@NLO [49]	NNPDF3.0NLO	PYTHIA 8 (HERWIG 7)	LO
$gg \rightarrow WW/ZZ$	SHERPA 2.2.2	NNPDF3.0NNLO	SHERPA 2.2.2	NLO [93]
$WZ/V\gamma^*/ZZ$	SHERPA 2.2.2	NNPDF3.0NNLO	SHERPA 2.2.2	NLO [94]
$V\gamma$	SHERPA 2.2.8 [69]	NNPDF3.0NNLO	SHERPA 2.2.8	NLO [94]
VVV	SHERPA 2.2.2	NNPDF3.0NNLO	SHERPA 2.2.2	NLO
$t\bar{t}$	PowHEG Box v2 (MG5_AMC@NLO)	NNPDF3.0NLO	PYTHIA 8 (HERWIG 7)	NNLO+NNLL [95–101]
Wt	PowHEG Box v2 (MG5_AMC@NLO)	NNPDF3.0NLO	PYTHIA 8 (HERWIG 7)	NNLO [102, 103]
Z/γ^*	SHERPA 2.2.1 (MG5_AMC@NLO)	NNPDF3.0NNLO	SHERPA 2.2.1	NNLO [79]

Prod. mode	Scenario	$\Delta_{\text{tot}}/\sigma_{\text{SM}}$	$\Delta_{\text{stat}}/\sigma_{\text{SM}}$	$\Delta_{\text{exp}}/\sigma_{\text{SM}}$	$\Delta_{\text{sig}}/\sigma_{\text{SM}}$	$\Delta_{\text{bkg}}/\sigma_{\text{SM}}$
ggF	Run 2, 36 fb ⁻¹	+0.191	+0.099	+0.112	+0.047	+0.092
		-0.189	-0.098	-0.110	-0.036	-0.096
	HL-LHC S1	+0.064	+0.010	+0.037	+0.040	+0.033
		-0.065	-0.010	-0.037	-0.039	-0.036
	HL-LHC S2	+0.046	+0.010	+0.030	+0.023	+0.025
		-0.044	-0.010	-0.029	-0.020	-0.025

Запасные слайды для Highmass

Введение

- До 2012 г. последней не обнаруженной на опыте фундаментальной частицей Стандартной модели был бозон Хиггса
- Однако в её рамках невозможно описать многие экспериментальные факты, например темную материю
- Продолжается работа над расширениями СМ, многие предсказывают существование тяжелого нейтрального бозона Хиггса
- Его обнаружение будет однозначно говорить о выходе за пределы СМ
- Рассматриваются также различные модели векторного и тензорного бозона, распадающегося на пару W-бозонов



Сечение рождения в зависимости от массы тяжёлого бозона Хиггса при различных энергиях сталкивающихся протонов в предположении верности СМ для него

Модели для интерпретации результатов

- Narrow Width Approximation (NWA): H со свойствами h , но $\Gamma(H)=\Gamma(h)=4$ МэВ
легко моделировать, интерференция с фоном $gg \rightarrow WW$ пренебрежимо мала
- Large Width Assumption (LWA): $\Gamma(H) \approx 5-15\% m(H)$
Интерференция оказала незначительное влияние на исключаемые пределы. Большие ширины исключаются косвенно по результатам Run 1.
ATLAS Collaboration, Eur. Phys. J. C 78 (2018) 24; ATLAS Collaboration, JHEP 11 (2015) 206
- разные модели типа 2HDM
Несколько параметров $m_H, m_A, m_{H^\pm}, \tan \beta, \alpha$; расчет по SusHi, 2HDMC
- модель Georgi-Machacek (GM) для механизма VBF
В специфических случаях у модели мало параметров
- Частица Radion в bulk модели Randall-Sundrum
- модель Heavy Vector Triplet (HVT), спин 1
- Kaluza-Klein гравитон в bulk модели RS, спин 2

R → WW → eνμν и R → WW → eνeν/μνμν

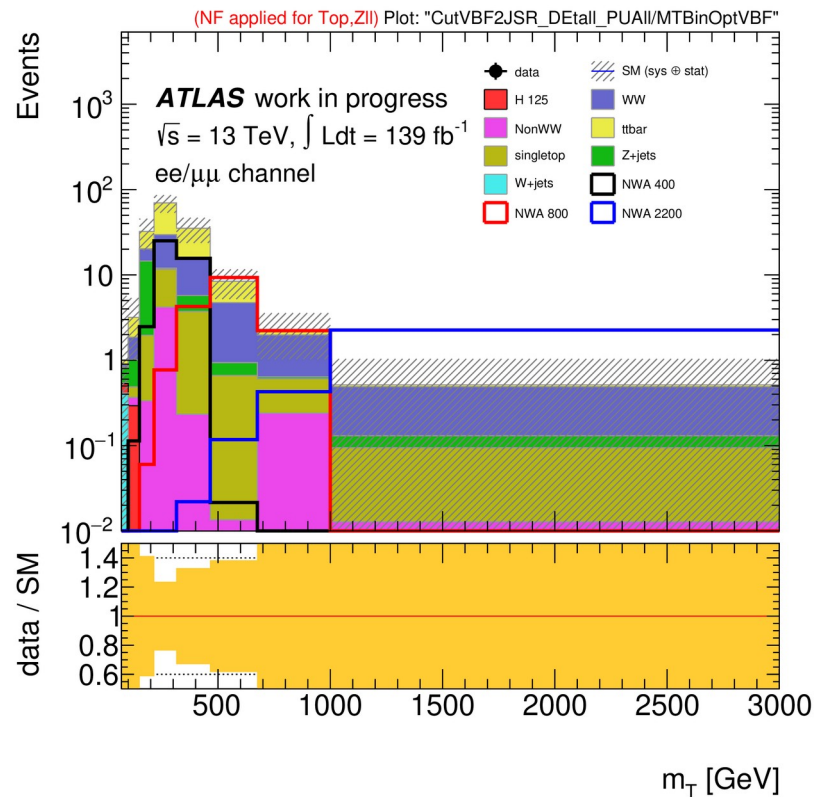
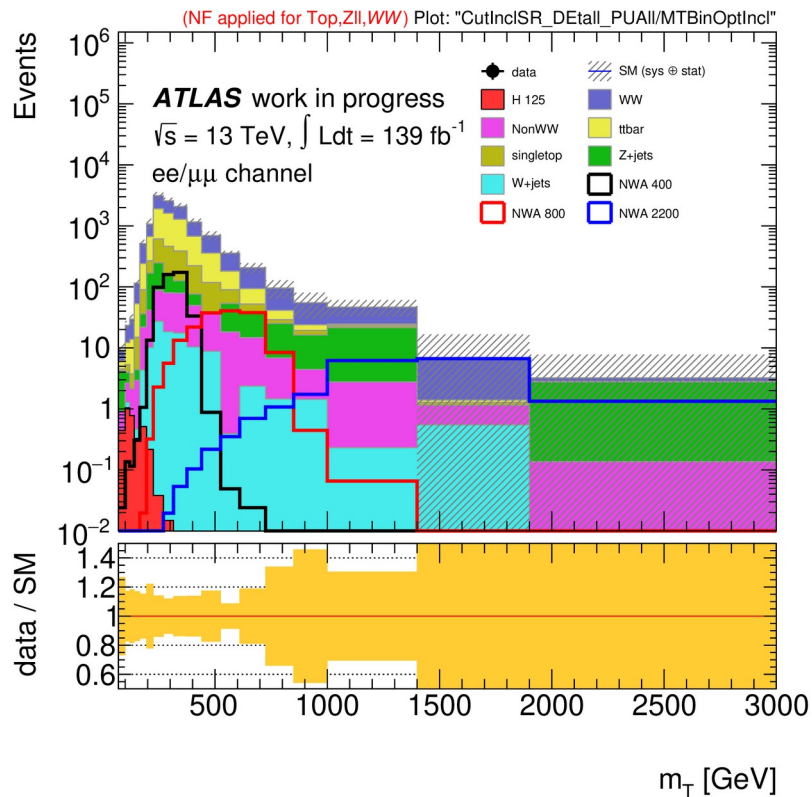
- Основные фоны — top, WW, Z→ττ
- В канале с одинаковым ароматом лептонов — огромный дополнительный Дрелл-Ян фон Z→ℓℓ+jets
- В дополнение к отбору, производимому в канале с разным ароматом лептонов, используются также $|m_{\ell\ell} - m_Z| > 25$ ГэВ, $S(E_T^{\text{miss}}) \geq 7/6/5$, $\Delta\Phi_{\ell\ell} > 1.8$, $p_T^{\text{tot}} < 50; 30; 20$
- $\vec{p}_T^{\text{tot}} = \vec{p}_T^{\ell 1} + \vec{p}_T^{\ell 2} + \vec{E}_T^{\text{miss}} + \sum \vec{p}_T^{\text{jets}}$
 $S(E_T^{\text{miss}})$ - значимость недостающего поперечного импульса
- Задача — оценить, насколько улучшатся ожидаемые пределы на сечения, если добавить канал eνeν/μνμν к eνμν

Pre-Selection		
Two Different Flavour, Opposite Sign Leptons, $p_T^{\ell} > 25$ GeV		
Third lepton veto, $p_T^{\ell} > 15$ GeV		
Common Selection		
$N_{b\text{-tag}} = 0$		
$ \Delta\eta_{\ell\ell} < 1.8$		
$m_{\ell\ell} > 55$ GeV		
$p_T^{\ell, \text{lead}} > 45$ GeV		
$p_T^{\ell, \text{sublead}} > 30$ GeV		
$\max(m_T^W) > 50$ GeV		
SC _{ggF}	SC _{VBF1J}	SC _{VBF2J}
Inclusive in N_{jet} but excluding SC _{VBF1J} and SC _{VBF2J}	$N_{\text{jet}} = 1$ and $ \eta_j > 2.4$, $\min(\Delta\eta_{j\ell}) > 1.75$	$N_{\text{jet}} \geq 2$ and $m_{jj} > 500$ GeV, $ \Delta y_{jj} > 4$

WW CR _{ggF}	Top CR _{ggF}	WW CR _{VBF1J}	Top CR _{VBF}
$N_{b\text{-tag}} = 0$	$N_{b\text{-tag}} = 1$	$N_{b\text{-tag}} = 0$	$N_{b\text{-tag}} \geq 1$
$ \Delta\eta_{\ell\ell} > 1.8$	$ \Delta\eta_{\ell\ell} < 1.8$	$(\Delta\eta_{\ell\ell} > 1.8$ or $10 \text{ GeV} < m_{\ell\ell} < 55 \text{ GeV})$	$ \Delta\eta_{\ell\ell} < 1.8$
$m_{\ell\ell} > 55$ GeV			$m_{\ell\ell} > 55$ GeV
$p_T^{\ell, \text{lead}} > 45$ GeV		–	$p_T^{\ell, \text{lead}} > 45$ GeV
$p_T^{\ell, \text{sublead}} > 30$ GeV		–	$p_T^{\ell, \text{sublead}} > 30$ GeV
$\max(m_T^W) > 50$ GeV		–	$\max(m_T^W) > 50$ GeV
METSigRatio > 0.8 GeV ⁻¹	–	–	–
Excluding VBF1/2J phase space		VBF1J phase space	VBF1/2J phase space

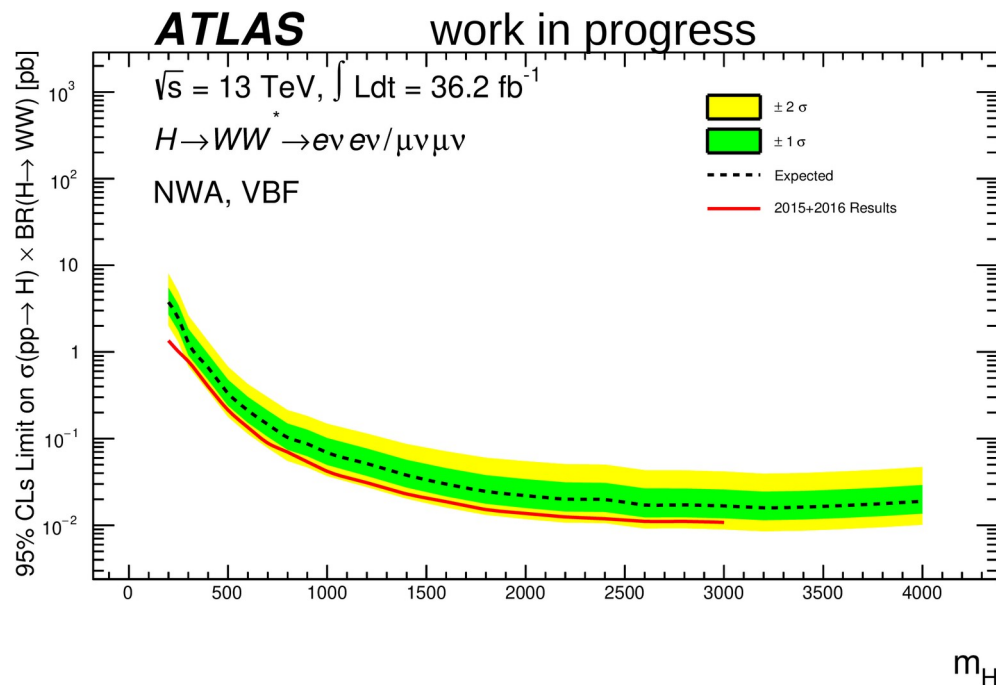
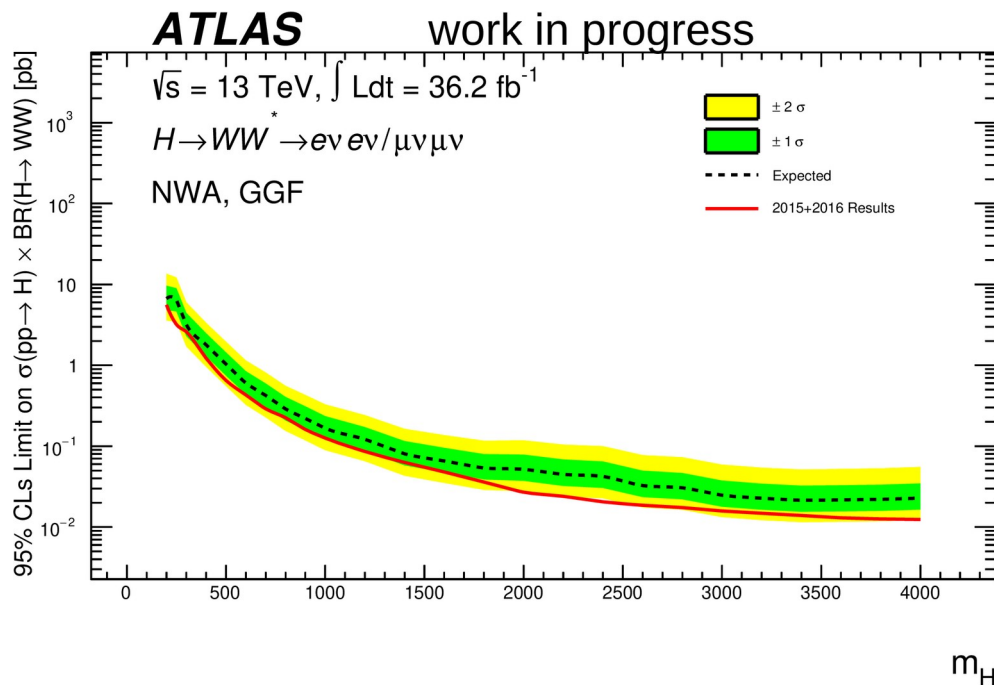
Отбор событий в канале R → WW → eνμν. Немного улучшены отборы предыдущего анализа данных 2015-16 гг. [ATLAS Collaboration, Eur. Phys. J. C 78 (2018) 1 24]

ggF/VBF2J SR: m_T

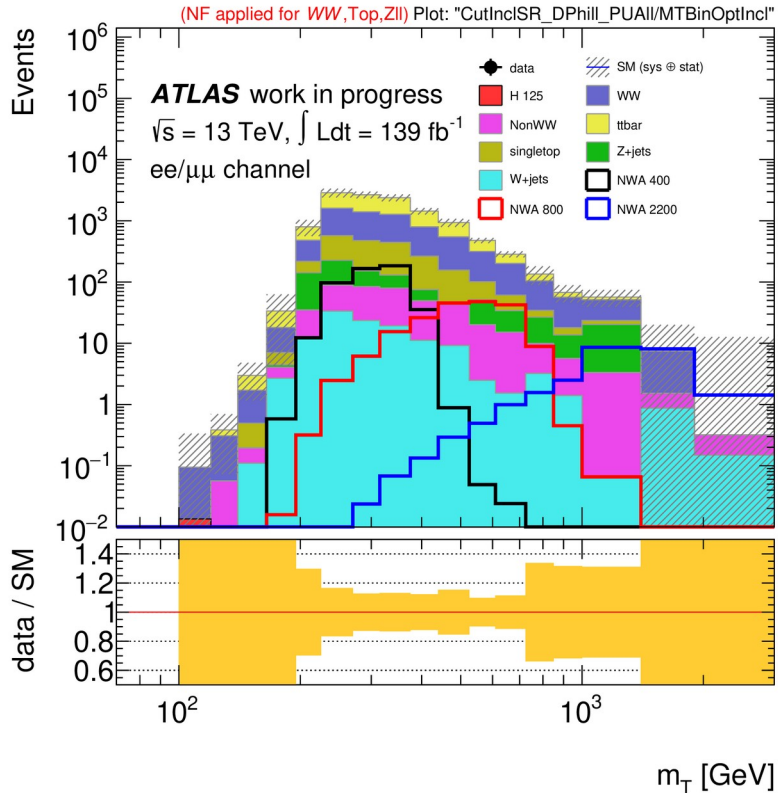


- Сечение сигналов с различным m_H приведено к значению поставленного ранее ограничения
- Каждый интервал даёт разный вклад в чувствительность в зависимости от m_H
- Не использован отбор $\Delta\Phi_{\ell\ell} > 1.8$

Ожидаемые верхние пределы $\sigma_H \times BR(H \rightarrow WW)$

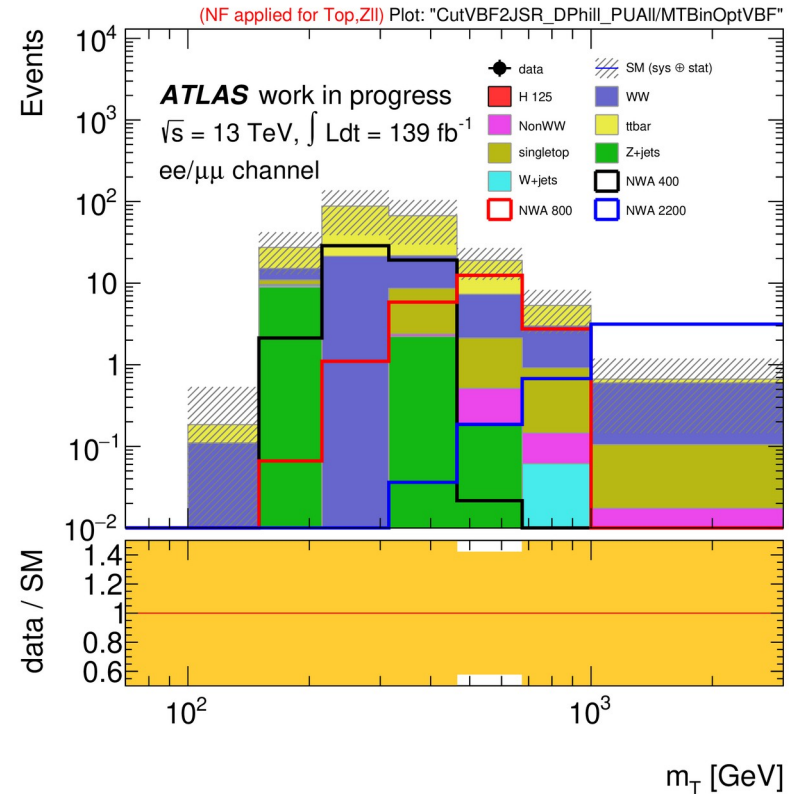
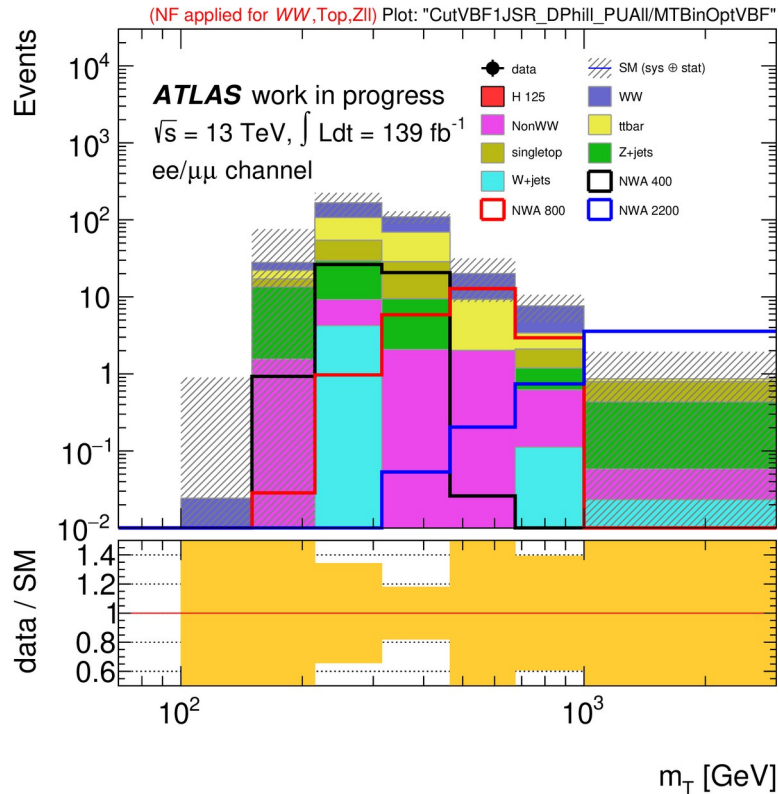


- В сравнении с каналом с разным ароматом лептонов $e\nu\mu\nu$, полученные пределы хуже менее чем в 2 раза
- Статистическая комбинация обоих каналов позволит существенно улучшить получаемые ограничения на сечение
- В данном сравнении не использован кат $\Delta\Phi_{ee} > 1.8$



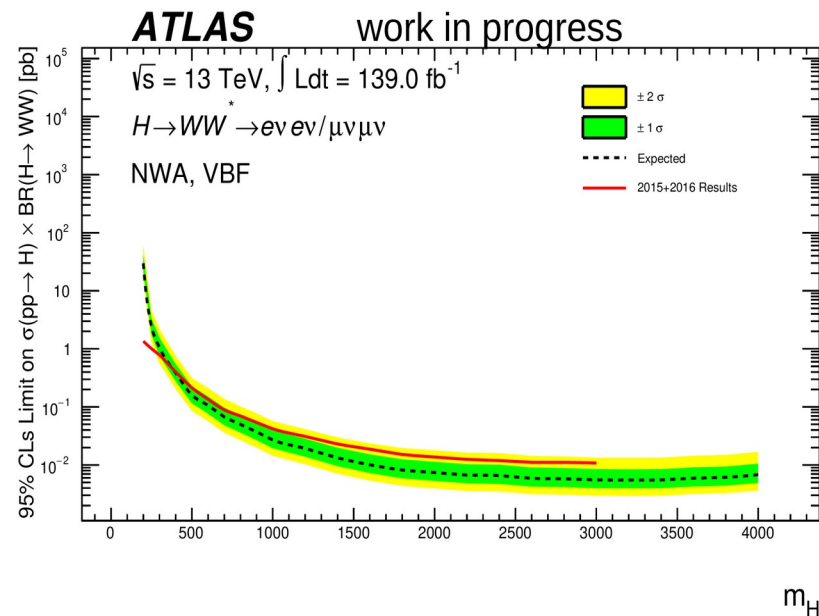
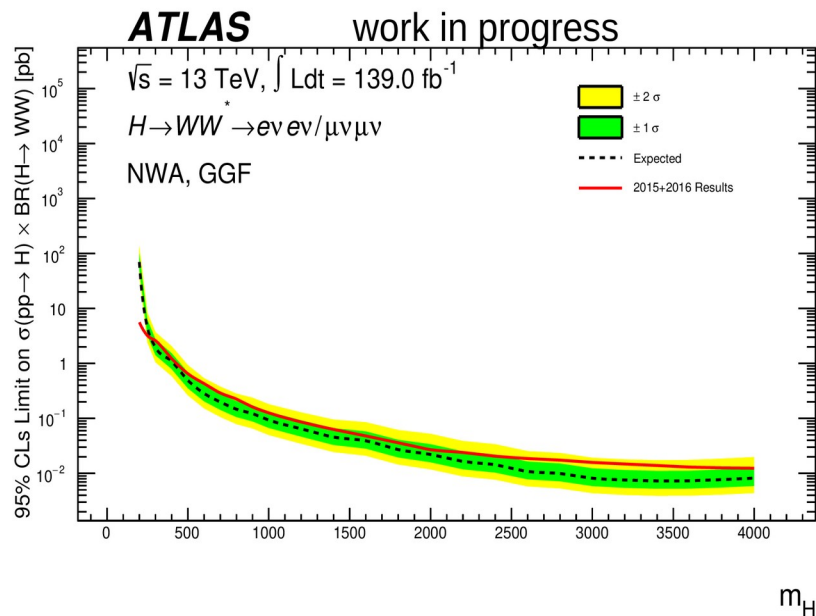
- Сечение сигналов с различным m_R приведено к значению поставленного ранее ограничения в канале $e\bar{\nu}\nu$ на статистике 36 fb^{-1}
 ATLAS Collaboration, Eur. Phys. J. C 78 (2018) 24
- Чувствительность нового анализа в канале $e\bar{\nu}\nu$ может быть улучшена путём комбинации с данным каналом $e\bar{e}\nu/\mu\bar{\nu}\nu$
- Производится подгонка m_T спектров в сигнальной области одновременно с подгонкой в контрольных областях основных фонов
- Каждый интервал даёт разный вклад в чувствительность в зависимости от m_R

VBF1J/VBF2J SR: m_T



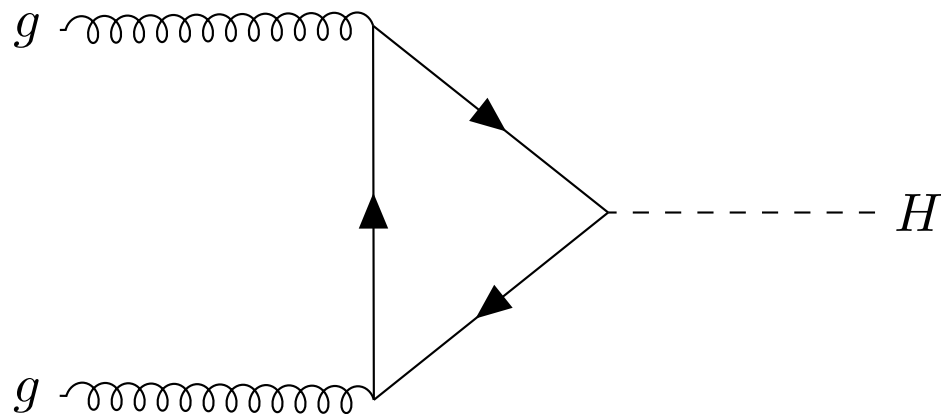
- Сечение сигналов с различным m_H приведено к значению поставленного ранее ограничения
- Каждый интервал даёт разный вклад в чувствительность в зависимости от m_H

Spin 0: NWA Limits $\sigma_R \times BR(H \rightarrow WW)$

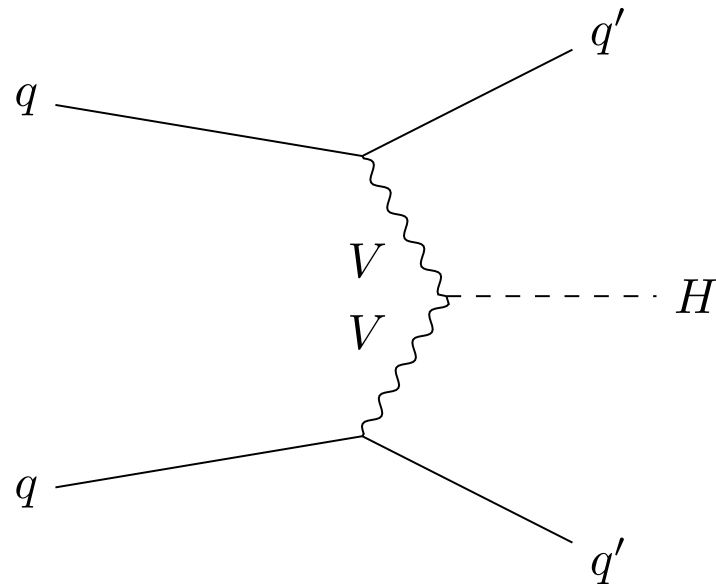


- Благодаря вчетверо большей статистике и эффективному подавлению фонов от процессов Дрелла-Яна ограничения, полученные для канала с одинаковым ароматом лептонов даже более сильные, чем для канала с электроном и мюоном, почти во всем диапазоне масс
- Статистическая комбинация обоих каналов позволит существенно улучшить получаемые ограничения на сечение

Narrow Width Approximation

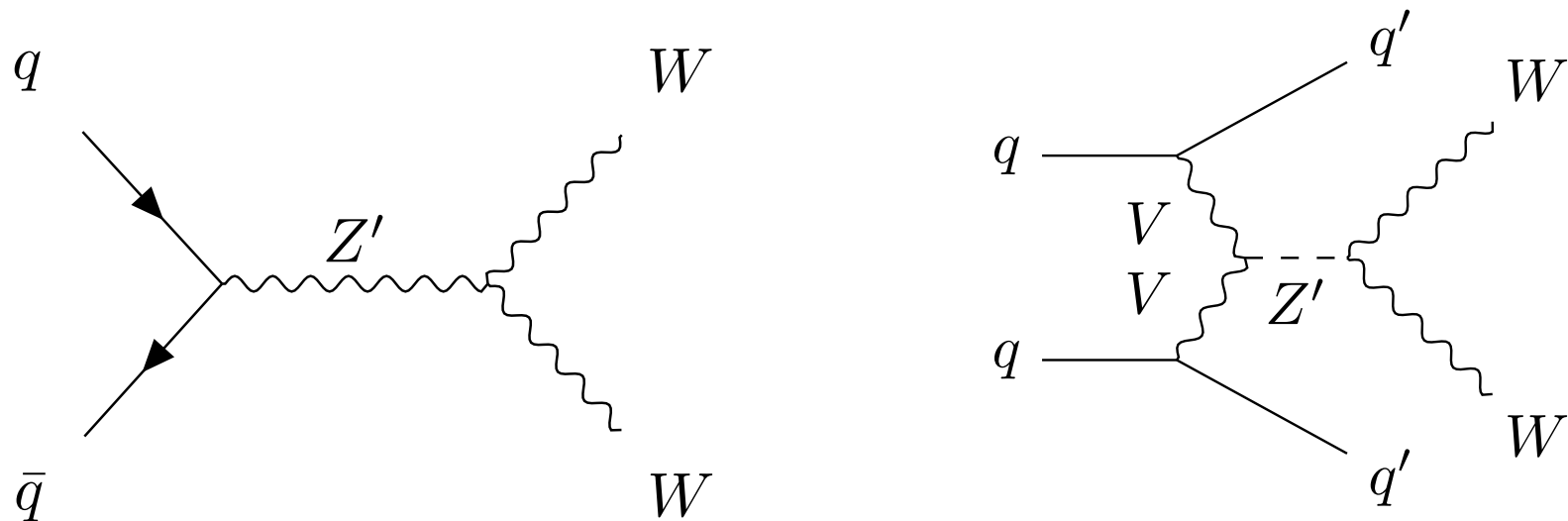


слияние глюонов (ggF)



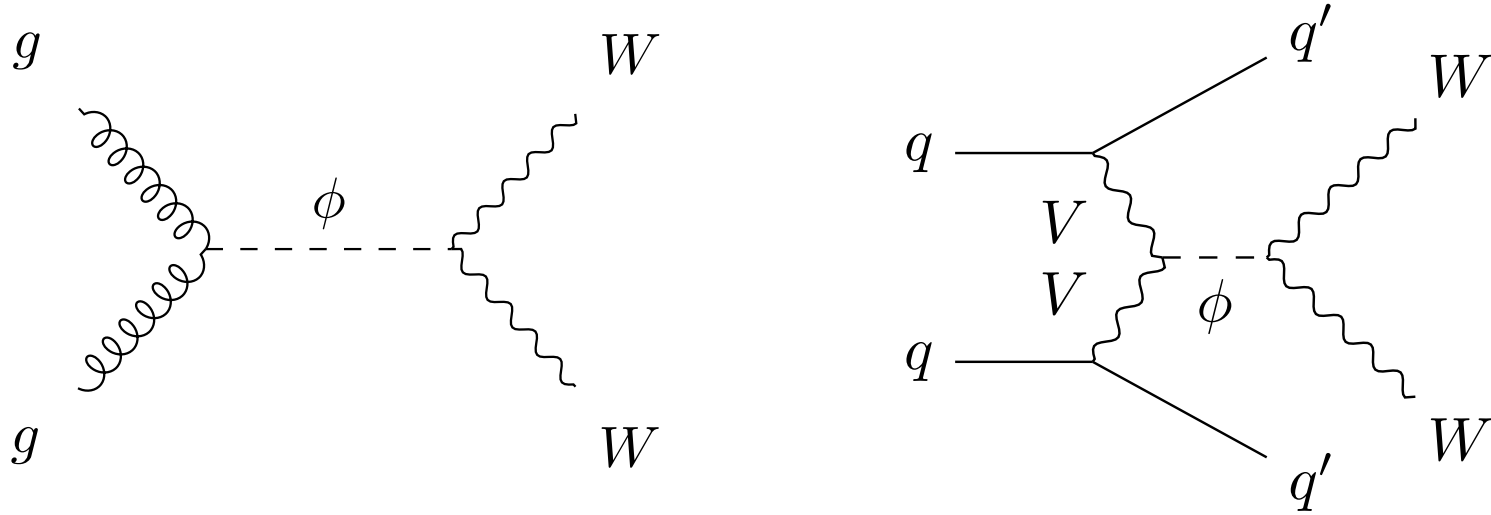
слияние векторных бозонов (VBF)

Heavy Vector Triplet



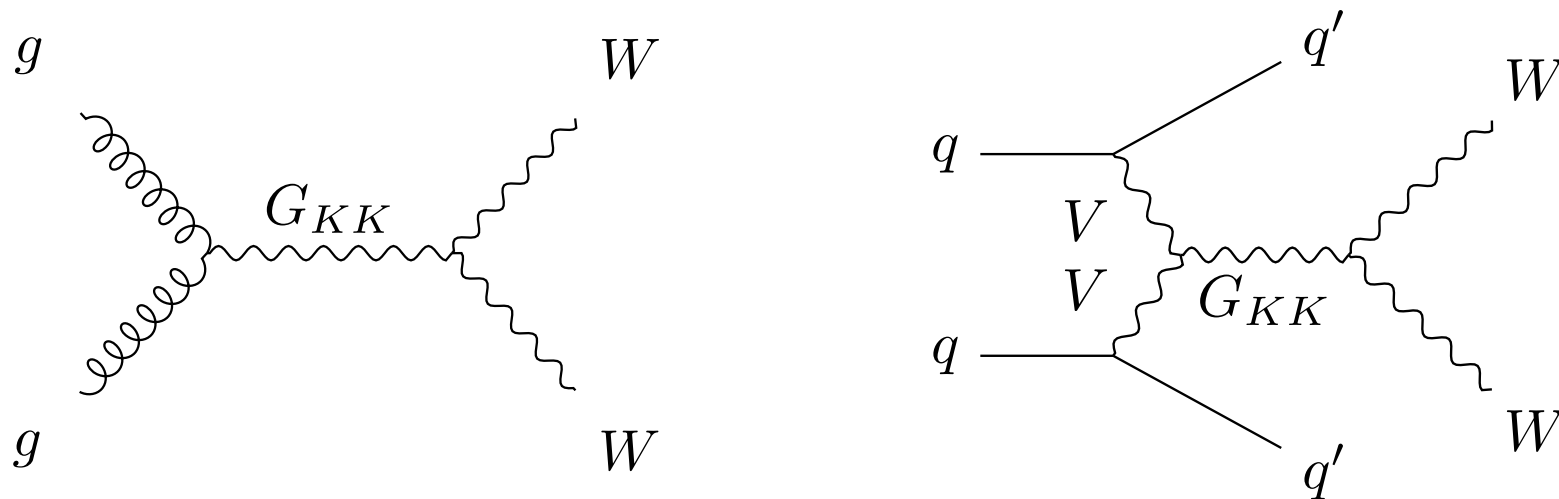
Частица со спином 1 (Z' и W') в модели HVT. Упрощённая параметризация лагранжиана позволяет новым тяжёлым бозонам смешиваться с калибровочными бозонами СМ. Мы рассматриваем и рождение через Дрелл-Ян аннигиляцию кварков, и через механизм VBF, для которого предполагается, что новые тяжёлые бозоны не связываются с фермионами

Radion particle in the Warped Extra Dimension model



Радион появляется в bulk модели Randall Sundrum как резонанс в s-канале, приобретая массу от стабилизации расстояния между двумя бранами в модели

Kaluza-Klein graviton в bulk модели Randall-Sundrum



Модель с дополнительными размерностями. Гравитон G_{KK} – первое Kaluza-Klein возбужденное состояние в модели RS. Взаимодействие с материей усиливается благодаря возможности распространения по дополнительному свёрнутому измерению.

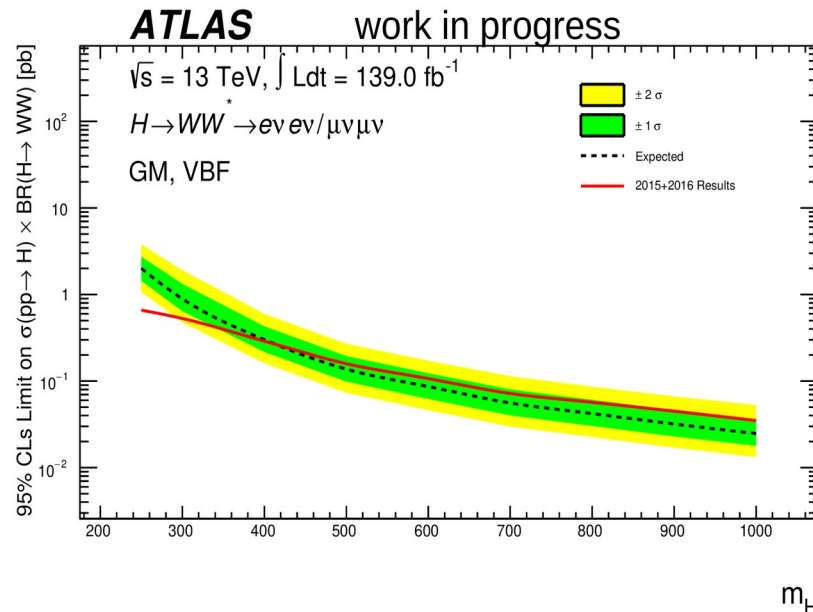
A. Oliveira, arXiv: 1404.0102 [hep-ph]

Спин 0, Georgi-Machacek: пределы $\sigma_R \times BR(H \rightarrow WW)$ — на защиту

Фермиофобный пятиплет бозонов Хиггса: $H_5^0, H_5^\pm, H_5^{\pm\pm}$, которые связываются, в основном, с векторными бозонами. По указанной причине эта модель менее ограничена, чем другие эталонные триплетные модели. В некоторых случаях у модели бывает один параметр $\sin^2\theta_H$ для связи с WW/ZZ

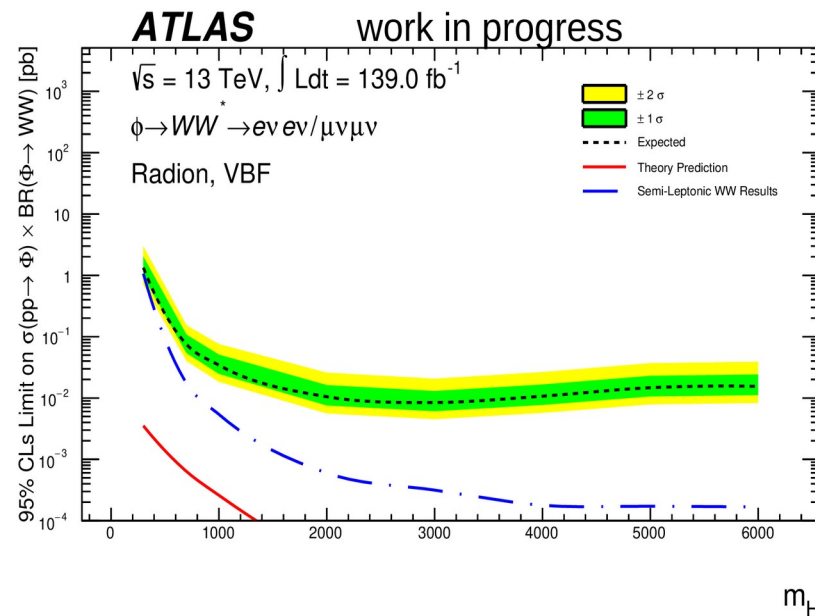
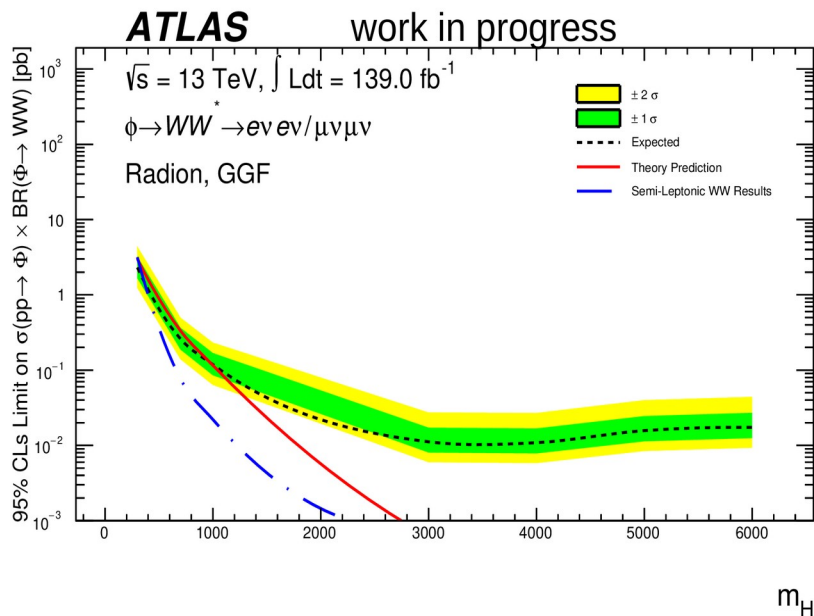
Мы рассматривали нейтральные состояния

- Полученные ограничения на сечение лежат в области 2 пб – 20 фб. Также показаны ожидаемые пределы, поставленными ранее в канале $e\nu\mu\nu$ [ATLAS Collaboration, Eur. Phys. J. C 78 (2018) 24]
- Статистическая комбинация обоих каналов позволит существенно улучшить получаемые ограничения на сечение



H. Georgi and M. Machacek, Nuclear Physics B 262 (1985) 463

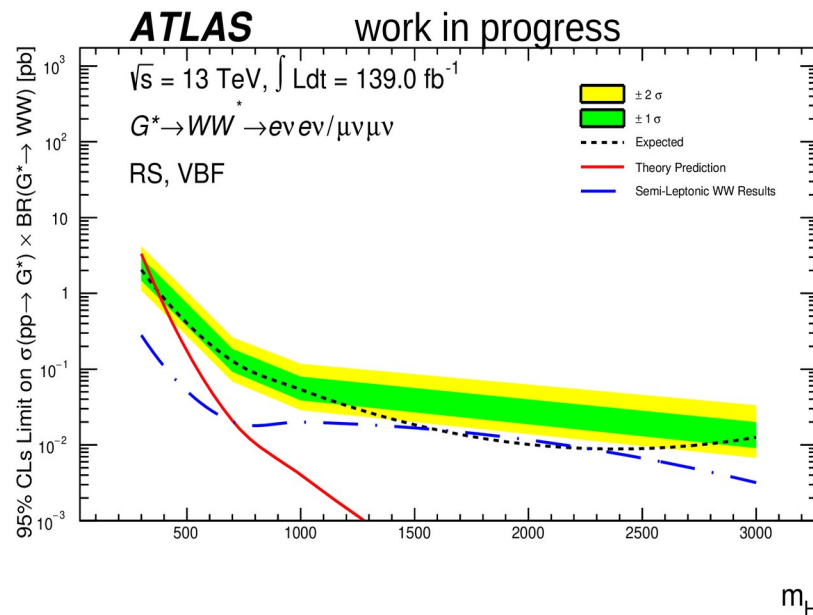
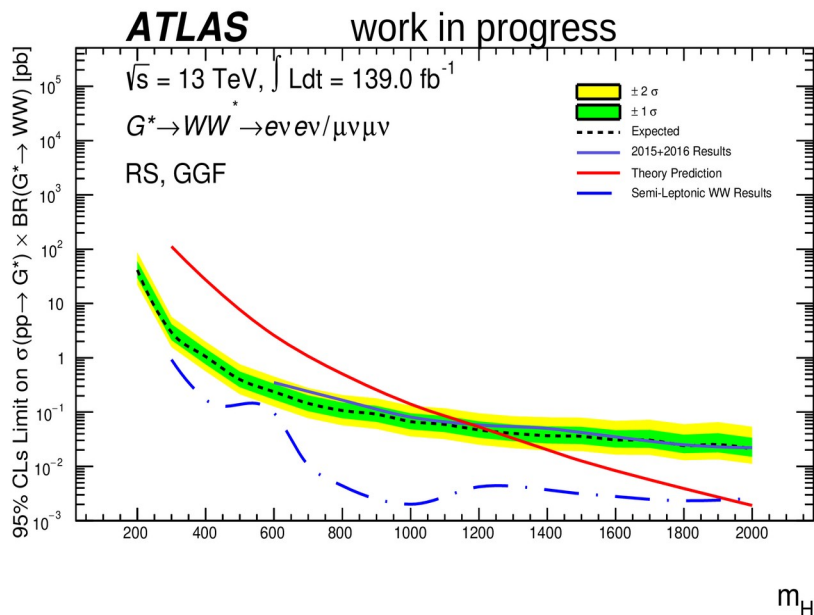
Spin 0: Radion Limits $\sigma_R \times BR(\phi \rightarrow WW)$



- Полученные ограничения на сечение лежат в области 2 пб – 10 фб
- Статистическая комбинация обоих каналов позволит существенно улучшить получаемые ограничения на сечение

A. Oliveira, arXiv: 1404.0102 [hep-ph]

Spin 2: RS Graviton Limits $\sigma_R \times BR(G^* \rightarrow WW)$



- Кроме самой низкой массы в 200 ГэВ, полученные ограничения на сечение лежат в области 40 пб – 20 фб ggF / 2 пб – 10 фб VBF
- Для ggF ограничения немного лучше старого результата (VBF ранее не рассматривался)
- Статистическая комбинация обоих каналов позволит существенно улучшить получаемые ограничения на сечение

Skimming importance for systematics samples

- Estimated unskimmed size is about 100 TB, we target reduction down to ~10 TB
- Missing E_T and $m_{\ell\ell}$ have a good separation for DY. $m_{\ell\ell}$ to be used for CR
- While $MET > 40$ keeps just 5% of physical events, the PxAOD reduction corresponds to raw mc events rather than weighted physical events. Raw mc reduction (w.r.t. preselection) is shown below

Cut	Kept ratio, %	Reduction
$MET > 40 \text{ GeV}$	25.4	3.94
$METSig > 3$	20.6	4.85
<u>$METSig > 4$</u>	12.2	<u>8.20</u>

H \rightarrow ZZ \rightarrow ℓℓνν contribution to H \rightarrow WW SF signal

- Let HZZ xsec be normalized to HWW according to known SM-like branching ratios and mc filter efficiencies, namely:

$$\text{XSec}(\text{HZZ}) \stackrel{\text{def}}{=} \text{XSec}(\text{HWW}) \times f.\text{eff}(\text{HWW}) / f.\text{eff}(\text{HZZ}) \times \mathcal{B}(\text{HZZ}) / \mathcal{B}(\text{HWW})$$

HZZ/HWW, %	ggf 300	ggf 1000	vbf 800	vbf 2400
Incl. GGF SR	7.97 ±0.42	6.38 ±0.16	7.62 ±0.62	6.62 ±0.72
$\Delta\phi_{\ell\ell} > 1.8$	4.50 ±0.31	0.31 ±0.03	0.80 ±0.18	0.03 ±0.03
VBF 1J SR	6.83 ±1.62	7.33 ±0.67	7.17 ±0.78	6.10 ±0.62
$\Delta\phi_{\ell\ell} > 1.8$	2.68 ±1.01	0.22 ±0.11	0.44 ±0.21	0.10 ±0.06
VBF 2J SR	2.42 ±1.50	5.58 ±0.81	6.84 ±0.61	6.60 ±0.62
$\Delta\phi_{\ell\ell} > 1.8$	2.52 ±1.57	0.08 ±0.08	0.40 ±0.14	0.04 ±0.04

- $\Delta\phi_{\ell\ell}$ cut has low impact on HWW signal and greatly reduces HZZ
 - Less true for the lowest mass
- Starting from 800 GeV, HZZ admixture becomes <1%
- For 300 GeV, HZZ admixture becomes just 4.5%

Breakdown of leading uncertainties, ggF/VBF, NWA 800 GeV

- **The dominant sources of experimental uncertainties:**
 - Jet Energy Scale and Resolution 8%/5% ggF/vbf
 - b-tagging efficiency 7%/3%
 - missing E_T resolution 4%/12%
 - muon momentum measured in ID 7%/2%
- **Additional sources of uncertainty include those on the scale and resolution of the reconstructed lepton energy and momentum, and the luminosity calibration.**
- **All experimental uncertainties are treated by varying the reconstructed object by using a particular uncertainty and then re-running the full analysis.**

