

Изучение бозона Хиггса Стандартной модели в механизме рождения VBF в распаде $H \rightarrow WW^* \rightarrow \ell\nu\ell\nu$ в эксперименте ATLAS



Е.Н. Рамакоти

Научный руководитель: Цукерман И.И., д.ф.-м.н

Специальность 1.3.15. – Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий

Выступление на семинаре ОИЯИ

Москва, 16.05.2024



Защита диссертации

Научный руководитель: *Цукерман Илья Ильич*
доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории нейтринной физики Курчатовского комплекса теоретической и экспериментальной физики НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва.

Официальные оппоненты: *Друцкой Алексей Георгиевич*
доктор физико-математических наук, начальник лаборатории тяжелых кварков и лептонов Физического института имени П. Н. Лебедева Российской академии наук, г. Москва;

Кодолова Ольга Леонидовна
кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории сильных взаимодействий Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д. В. Скобельцына Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, г. Москва.

Ведущая организация: Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна.

Защита диссертации состоится **19 июня 2024 г.**, начало в 16 ч. 30 мин., на заседании диссертационного совета 02.1.003.05 на базе НИЦ «Курчатовский институт» по адресу: 123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д.1.

Цель и задачи

Целью данной работы является измерение константы связи бозона Хиггса СМ с W -бозонами в механизме рождения VBF в канале распада $H \rightarrow WW^* \rightarrow \ell\nu\ell\nu$ в эксперименте ATLAS, что ставит перед собой следующие **задачи**:

1. Проверка качества моделирования кинематики адронных струй в событиях с двумя лептонами в конечном состоянии в условиях повышенной светимости БАК.
2. Изучение влияния эффекта наложения событий в одном пересечении пучков на кинематические спектры адронных струй.
3. Оптимизация критериев отбора событий, их классификация по сигнальным и контрольным областям, оценка вкладов фоновых процессов и расчет ожидаемой значимости сигнала.
4. Разработка и применение глубокой нейронной сети в анализе для увеличения эффективности разделения сигнальных и фоновых событий.
5. Измерение полного сечения рождения бозона Хиггса в механизме слияния векторных бозонов с применением нейронной сети для улучшения точности.
6. Применение новой методики расчета дифференциальных сечений на основе независимых от канала распада вычислений для улучшенного согласования измеренных величин и теоретических предсказаний СМ.

1. Бозон Хиггса в СМ

Стандартная модель (СМ) – это теория Янга-Миллса с калибровочной группой симметрии: $SU(3)_C \otimes SU(2)_L \otimes U(1)_Y$

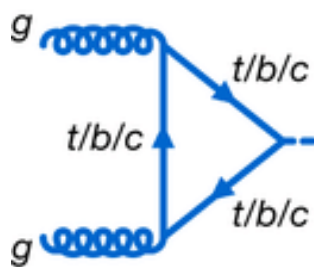
Механизм Браута-Энглерта-Хиггса – механизм спонтанного нарушения электрослабой симметрии, обеспечивает получение массовых членов для калибровочных бозонов (W^\pm , Z , γ , g) и фермионных полей (кварки и лептоны): $SU(2)_L \otimes U(1)_Y \rightarrow U(1)_{EW}$

Масса бозона Хиггса – единственный свободный параметр теории:

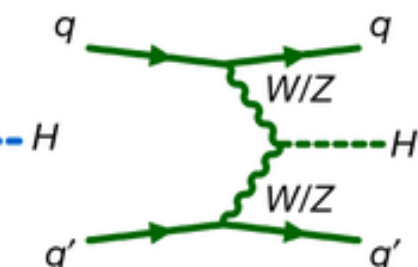
- Из теоретических соображений (пертурбативная унитарность): $m_H < 1 \text{ ТэВ}$
- Из объединенных результатов с 4-х экспериментов LEP: $m_H > 114.4 \text{ ГэВ}$ на 95% CL ([arXiv:0306033](https://arxiv.org/abs/0306033))
- Из прецизионного анализа электрослабых взаимодействий на LEP и Tevatron:
 - $m_H < 152 \text{ ГэВ}$ на 95% CL ([arXiv:1207.0449](https://arxiv.org/abs/1207.0449))
 - Бозон Хиггса должен иметь квантовые числа вакуума, т.е. $J^P = 0^+$

Открытие бозона Хиггса в 2012 г.: CMS ([arXiv:1207.7235](https://arxiv.org/abs/1207.7235)) и ATLAS ([arXiv:1207.7214](https://arxiv.org/abs/1207.7214)) на БАК: $m_H \approx 125 \text{ ГэВ}$

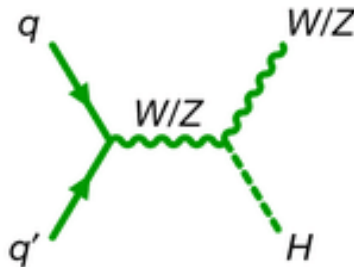
1. Механизмы рождения бозона Хиггса СМ на БАК



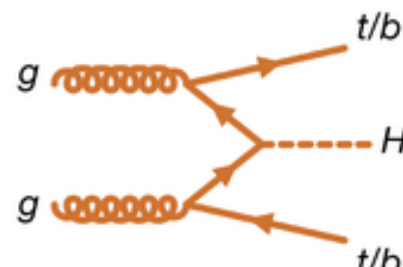
Слияние глюонов (ggF)



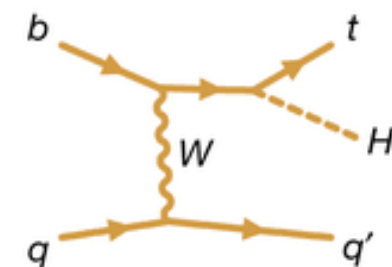
Слияние векторных бозонов (VBF)



Ассоциативное рождение с векторными бозонами (VH)



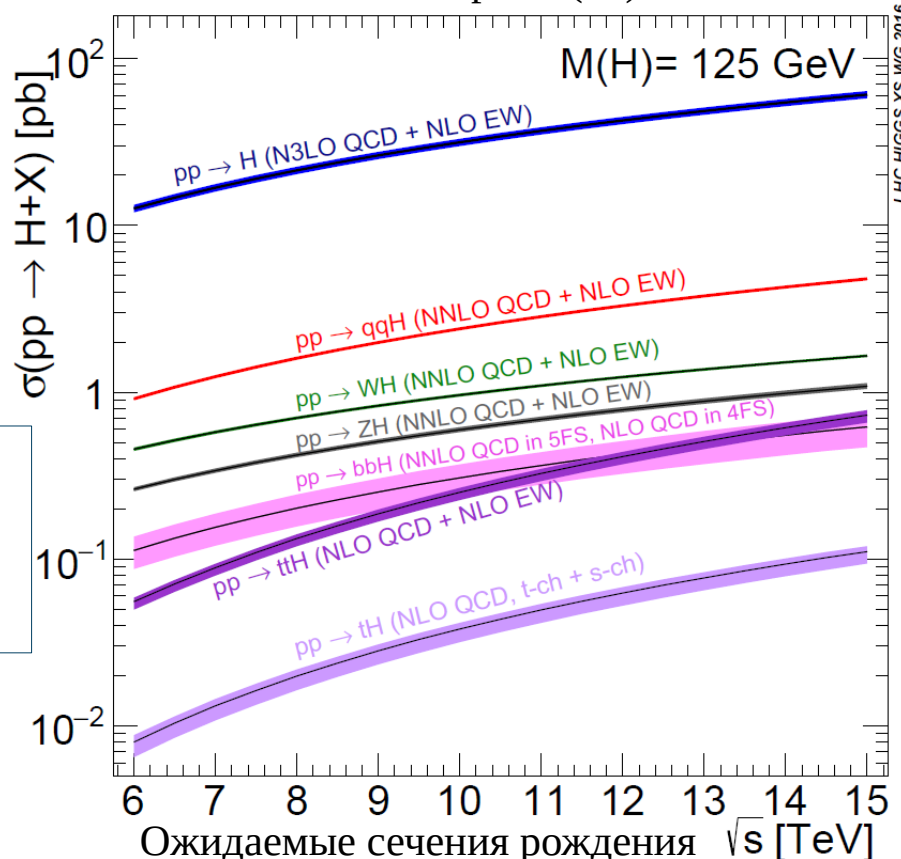
Ассоциативное рождение с парой t-кварков (t \bar{t} H) или b-кварков (b \bar{b} H) и с одиночным t-кварком (tH)



arXiv:2207.00092

Механизм рождения	Сечение, пб
ggF (слияние глюонов)	48.5 ^{+2.3} _{-3.1}
VBF (слияние бозонов)	3.78 ± 0.08
WH (ассоциативное)	1.37 ± 0.02
ZH (ассоциативное)	0.88 ± 0.01
bbH (ассоциативное)	0.49 ± 0.10
ttH (ассоциативное)	0.51 ^{+0.03} _{-0.05}
tH (ассоциативное)	0.074 ^{+0.004} _{-0.010}
Полное	55.6 ^{+2.3} _{-3.1}

На 10 порядков меньше полного сечения неупругого вз-я протонов



Сечения рождения H при $m_H = 125.09$ ГэВ

arXiv:1610.07922

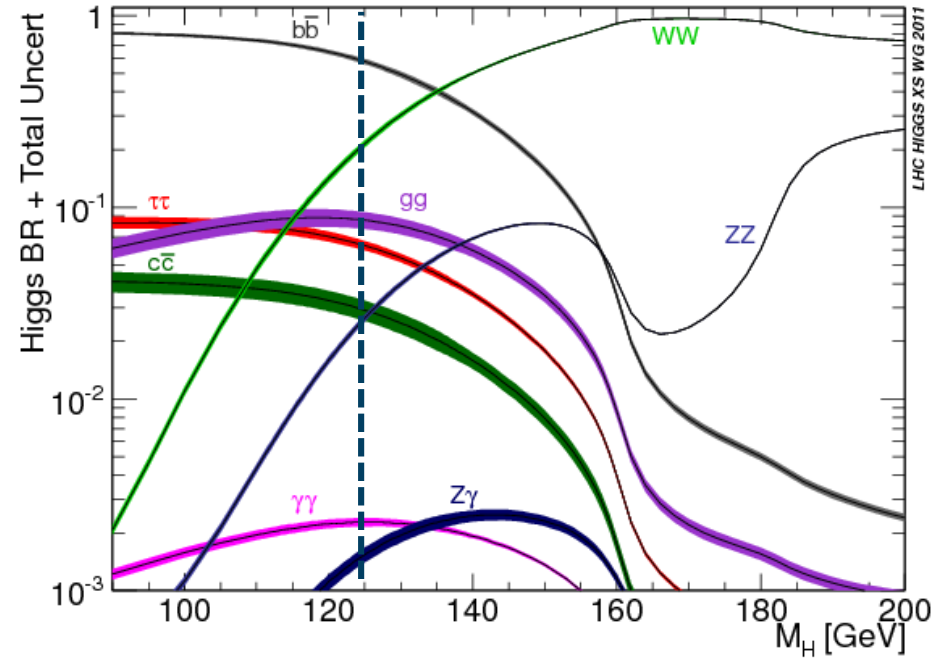
Ожидаемые сечения рождения бозона Хиггса СМ на БАК

1. Каналы распада бозона Хиггса СМ

arXiv:1610.07922

Распад	BR, %	Мода, удобная для экспериментального наблюдения
$H \rightarrow bb$	58.1 ± 1.2	Рождение в механизмах VH , ttH
$H \rightarrow WW^*$	21.6 ± 0.9	Распад обоих W в лептон и нейтрино
$H \rightarrow \tau\tau$	6.30 ± 0.36	Рождение в механизме VBF; события с большим p_T
$H \rightarrow ZZ^*$	2.67 ± 0.11	Распад обоих Z в лептоны, восстанавливают m_H
$H \rightarrow \gamma\gamma$	0.228 ± 0.011	Восстанавливают m_H
$H \rightarrow Z\gamma$	0.155 ± 0.014	Распад Z в лептоны, восстанавливают m_H
$H \rightarrow \mu\mu$	0.022 ± 0.001	Восстанавливают m_H

Ожидаемые моды распада бозона Хиггса при $m_H = 125$ ГэВ



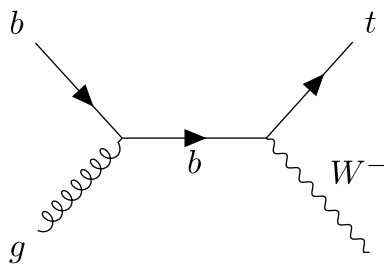
Относительные вероятности распада бозона Хиггса в различные конечные состояния

$m_H = 125$ ГэВ: $H \rightarrow WW^* \rightarrow \ell\nu\ell\nu$ где $\ell = e, \mu$

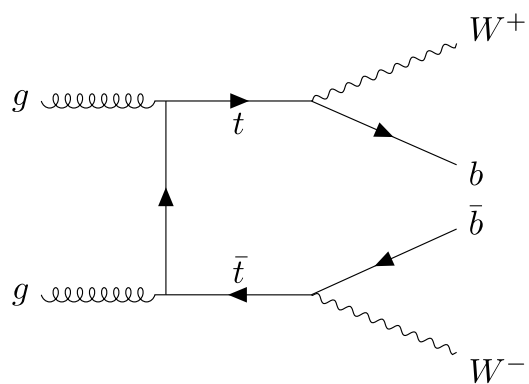
- BR ($W \rightarrow \ell\nu$) $\sim 22\%$, BR ($H \rightarrow WW^* \rightarrow \ell\nu\ell\nu$) $\sim 1\%$
- Чистое конечное состояние: два изолированных лептона с большим поперечным импульсом (p_T)
- В механизме VBF две адронные струи с большим p_T и с малыми полярными углами
- Восстановление поперечной массы (m_T):

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

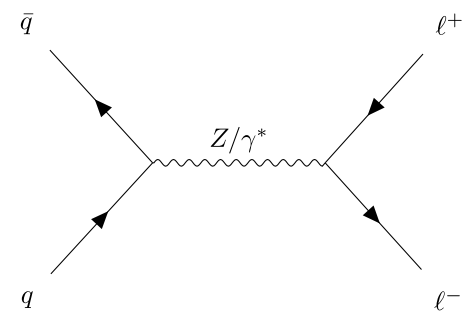
1. Основные фоновые процессы для $\ell\nu\ell\nu$



[1] $pp \rightarrow Wt+X \rightarrow \ell\nu\ell\nu b+X$

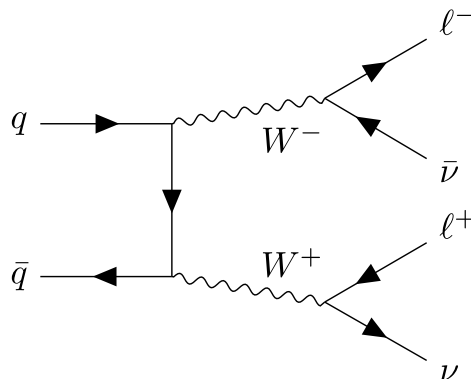


[2] $pp \rightarrow tt+X \rightarrow WWbb+X \rightarrow \ell\nu\ell\nu bb+X$

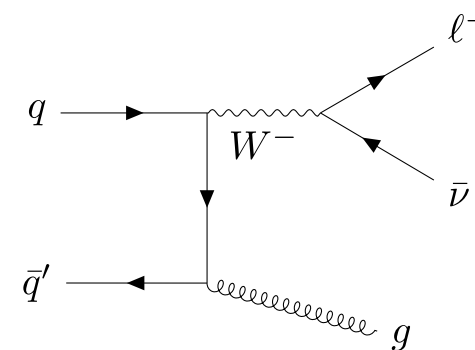


[3] $pp \rightarrow Z+X \rightarrow \ell\ell+Y+X$

SF: $Z/\gamma^* \rightarrow ee/\mu\mu$ преобладает
DF: $Z/\gamma^* \rightarrow \tau\tau$ преобладает



[4] $pp \rightarrow WW+X \rightarrow \ell\nu\ell\nu+X$



[5] $pp \rightarrow W+X+jets \rightarrow \ell\nu+jets+X$

Для конечного состояния $\ell\nu\ell\nu$ (DF: $e\nu\mu\nu/\mu\nu e\nu$; SF: $e\nu e\nu/\mu\nu\mu\nu$) фоновыми процессами являются:

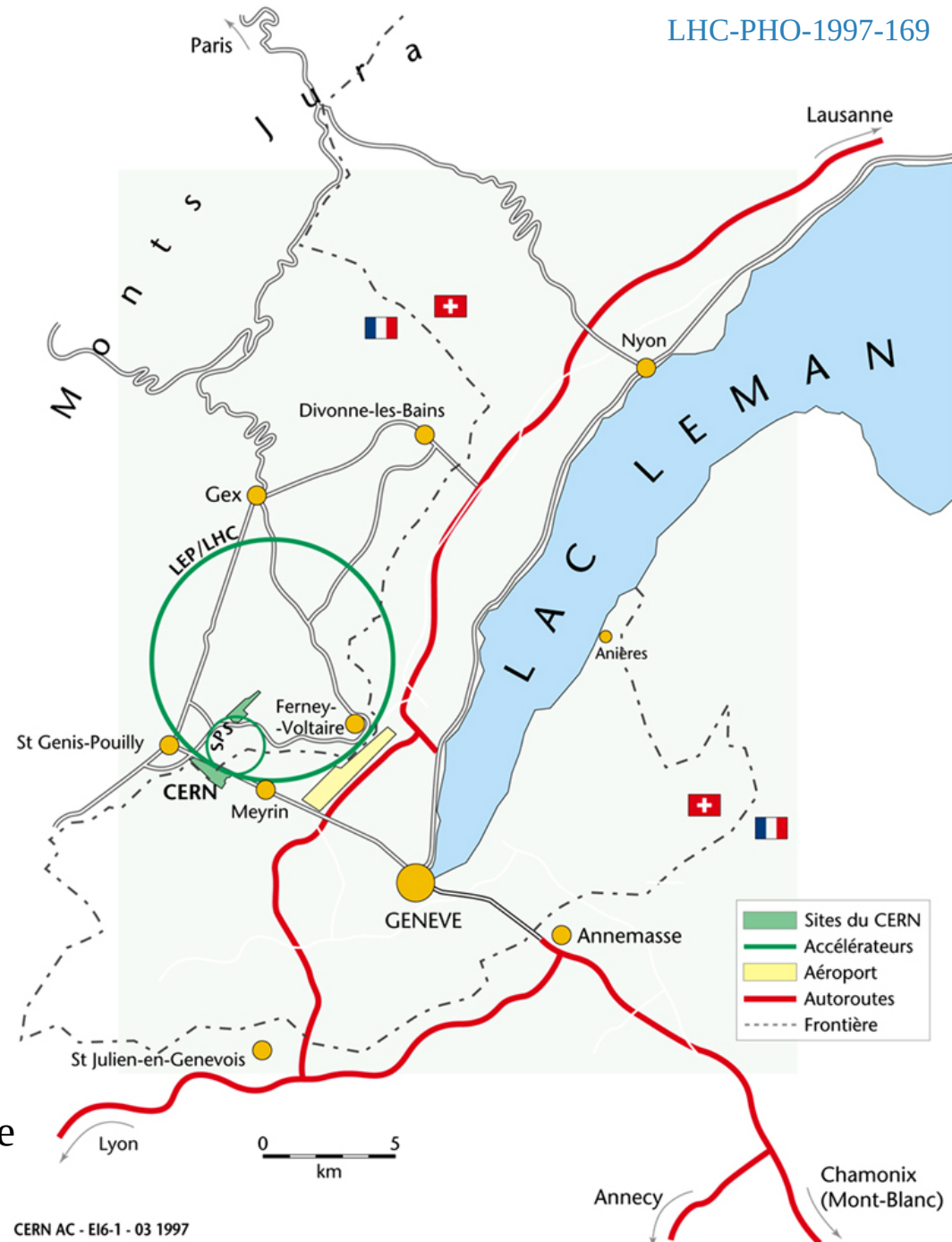
- Все процессы рождения бозона Хиггса, кроме vbf: ggF, VH, ttH (уже представлены на слайде 5)
- одиночное [1] и парное рождение t-кварка [2]
- процесс Дрелл-Яна [3]
- парное рождение векторных бозонов (VV, т.е. WW, WZ и ZZ) [4]
- процесс с ложным лептоном (если в струях присутствует дополнительный лептон от распада тяжелого кварка c/d) [5]

2. Большой Адронный Коллайдер (LHC или БАК)

LHC-PHO-1997-169

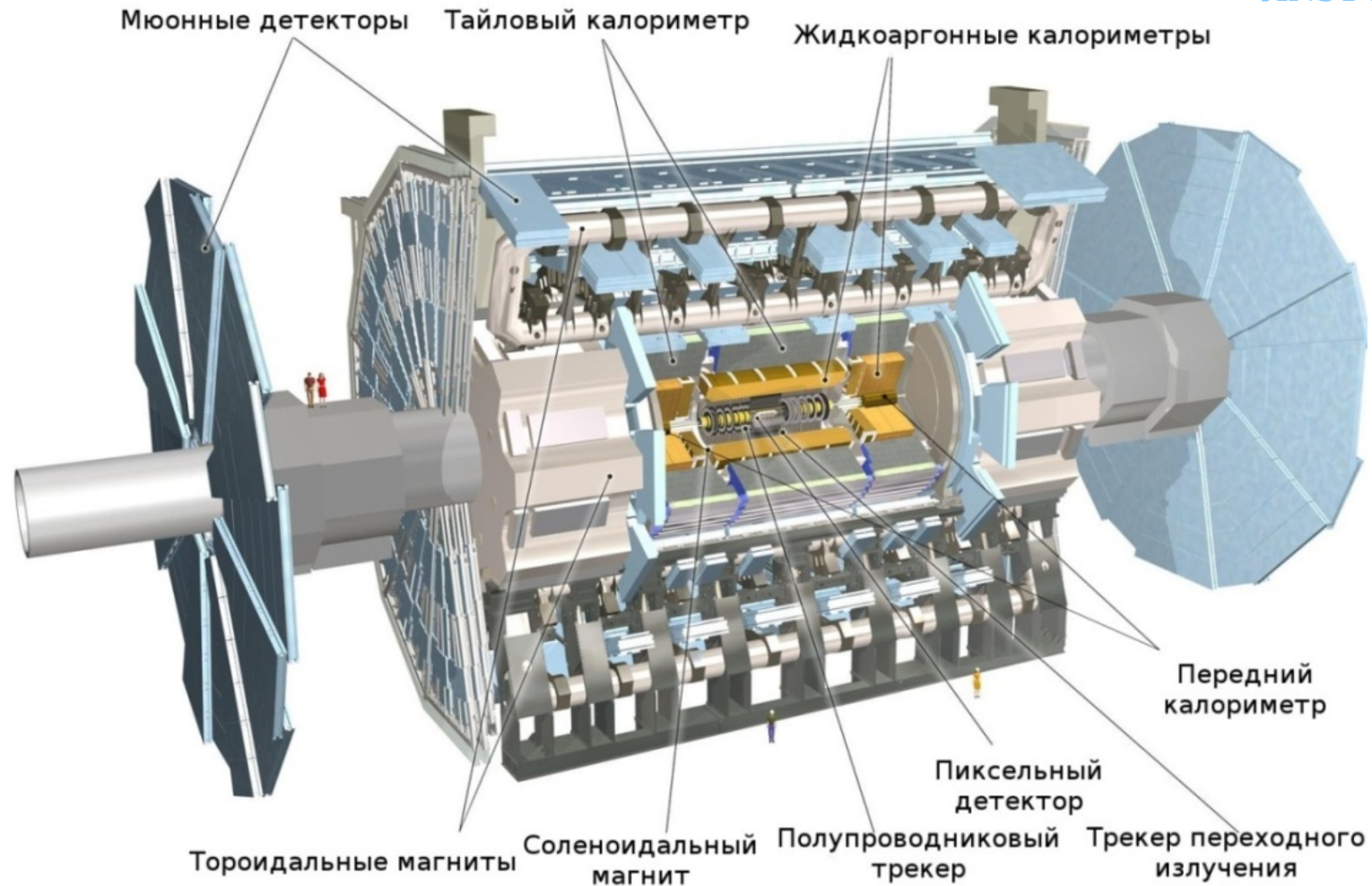
- LHC работал с протон-протонными столкновениями при энергиях:
 - $\sqrt{s} = 7$ ТэВ в 2010-2011 гг.
 - $\sqrt{s} = 8$ ТэВ в 2012 г.
 - $\sqrt{s} = 13$ ТэВ в 2015-2018 гг.
 - $\sqrt{s} = 13.6$ ТэВ в 2022-н.в
- 50 нс между столкновениями, 1380 банчей для 7-8 ТэВ;
25 нс между столкновениями и 2556 банчей для 13 и 13.6 ТэВ
- Эксперименты:
ATLAS, CMS, LHCb, ALICE – многоцелевые;
TOTEM, LHCf, MoEDAL
- Набранные данные (ATLAS и CMS):
 - 2011: 5 фб⁻¹, 2012: 20 фб⁻¹,
 - 2015-2016: 44 фб⁻¹,
 - 2017: 50 фб⁻¹, 2018: 60 фб⁻¹
 - 2022: 36 фб⁻¹, 2023: 30 фб⁻¹
- Достигнута светимость 2.26×10^{34} см⁻²с⁻¹, что вдвое выше проектной. Энергия 14 ТэВ пока не достигнута.

$$1 \text{ фб} = 10^{-15} \text{ б} = 10^{-43} \text{ м}^2$$



2. Эксперимент АТЛАС

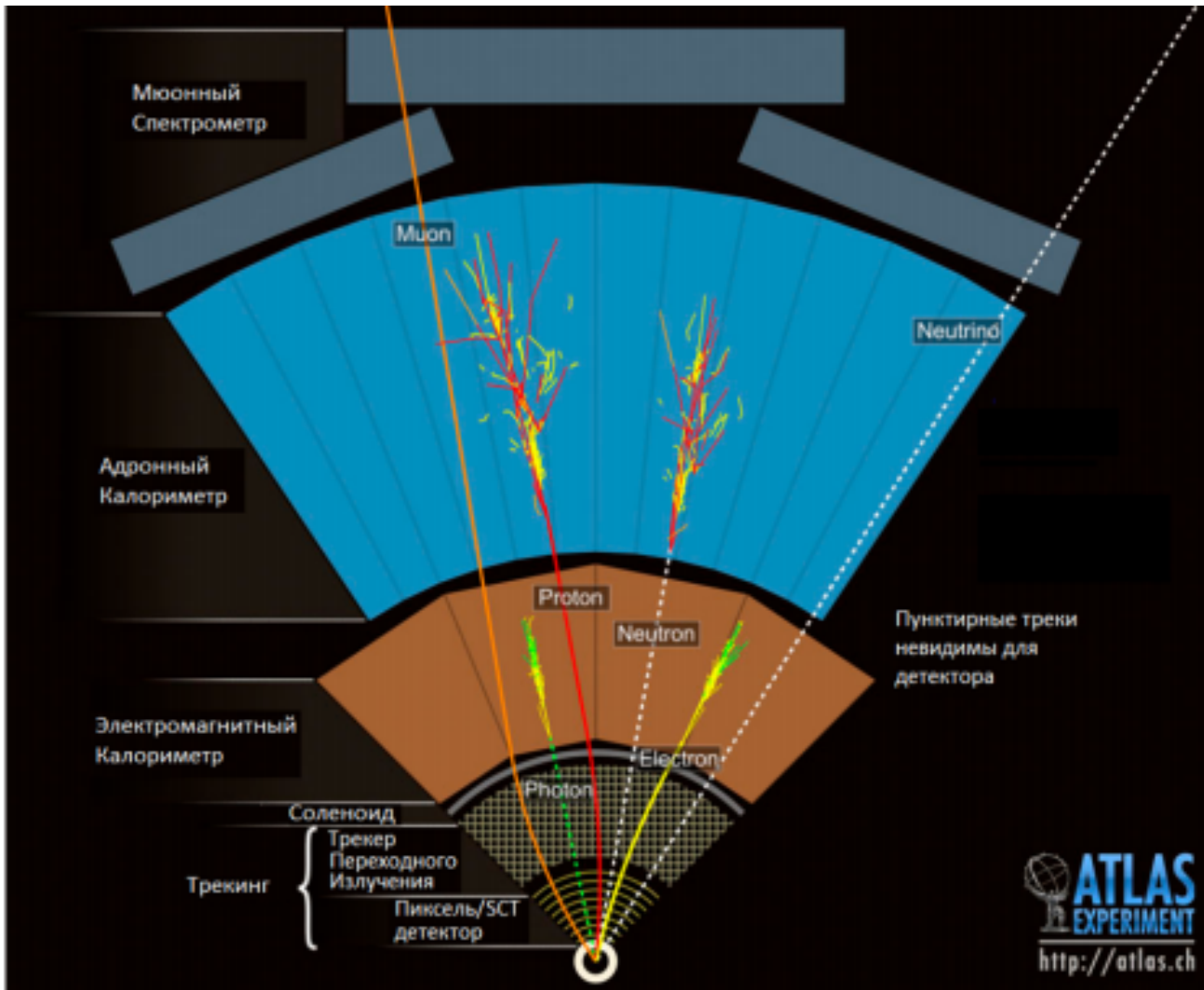
JINST 3 (2008) S08003



Цели эксперимента:

- изучение СМ в новом диапазоне энергий, включая открытый бозон Хиггса
- прецизионные измерения ключевых параметров СМ
- поиск новой физики за пределами СМ

3. Восстановление “объектов” в АТЛАС



Электроны – согласованная информация из ID (треки и вершины) и ЭМ калориметра (энергетические кластеры)

Мюоны - согласованная информация из ID и MS (треки)

Струи – ансамбль информации из ID и калориметрии для заряженных адронов и только калориметрии для нейтральных частиц

E_T^{miss} (**недостающий поперечный импульс**) – согласованная информация из ID и калориметра

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

ID – внутренний детектор
MS – мюонный спектрометр

Псевдобыстрота: $\eta = -\ln(\text{tg}(\theta/2))$ где θ – полярный угол

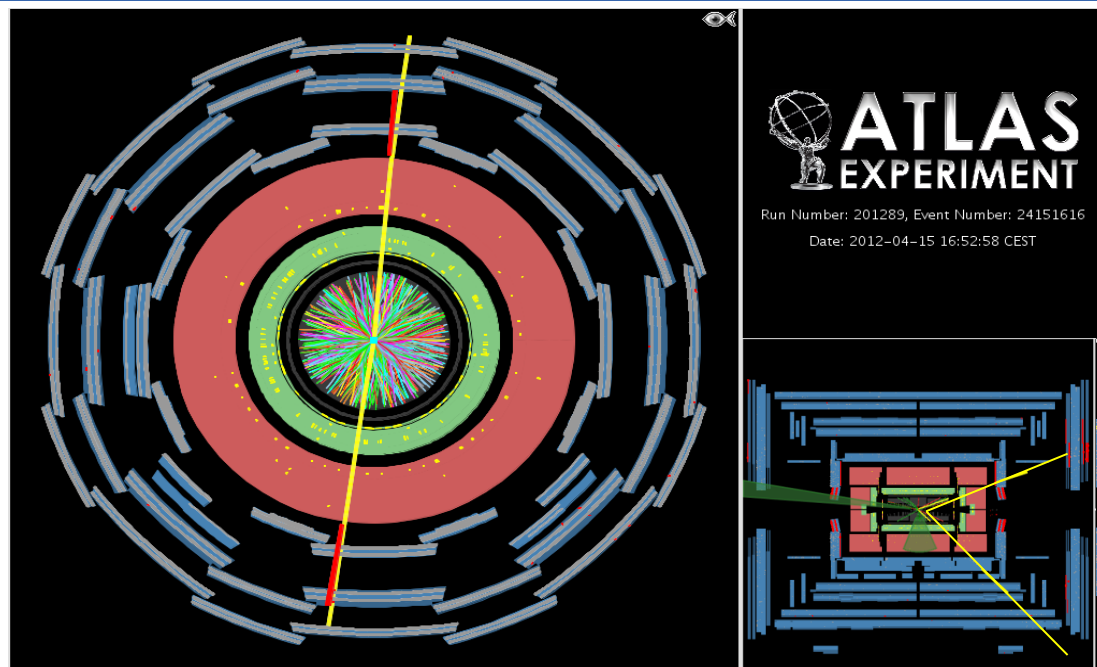
$|\eta| \rightarrow 0$: объекты с ненулевым импульсом в поперечной пл-ти

$|\eta| \rightarrow \infty$: объекты, летящие вдоль пучка

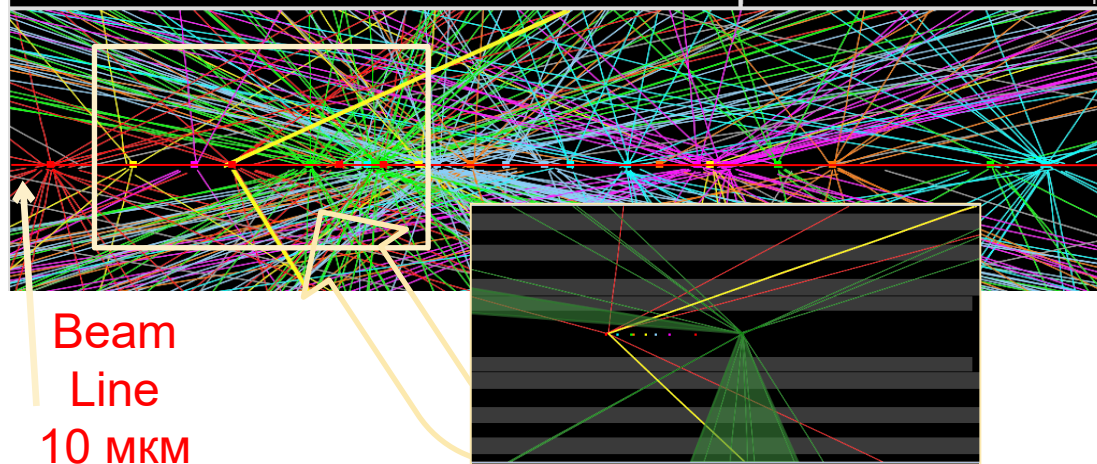
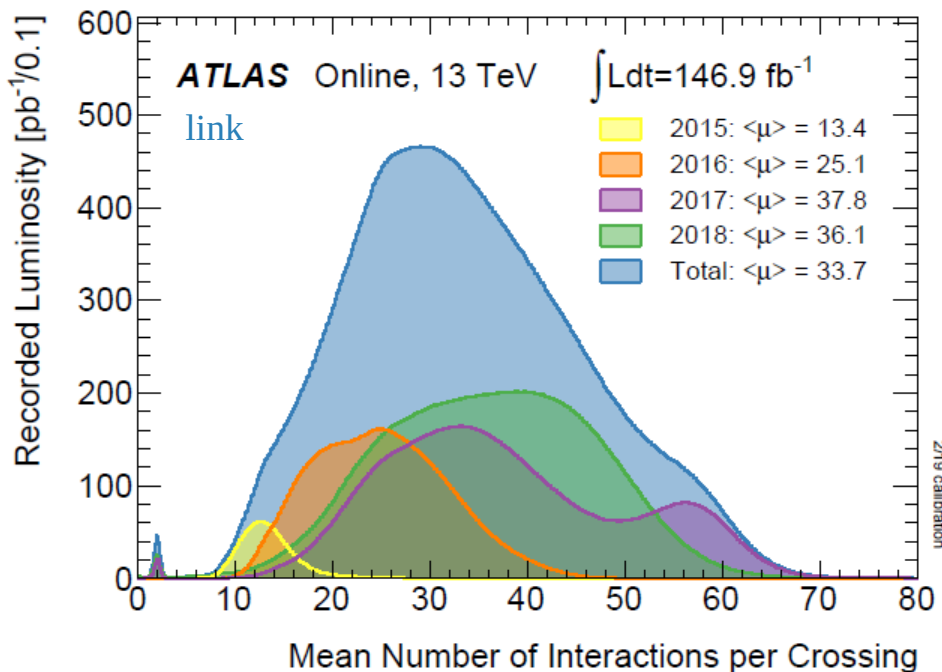
3. Эффект наложения событий

Отображение ATLAS события ($Z \rightarrow \mu\mu$) с 25 дополнительными вершинами (для 2015-2016 гг).

При столкновении сгустков в одном пересечении пучков каждые 25 нс происходит сразу несколько взаимодействий протонов (μ), в результате чего на жесткое регистрируемое событие накладываются еще несколько мягких событий.



ATLAS EXPERIMENT
Run Number: 201289, Event Number: 24151616
Date: 2012-04-15 16:52:58 CEST



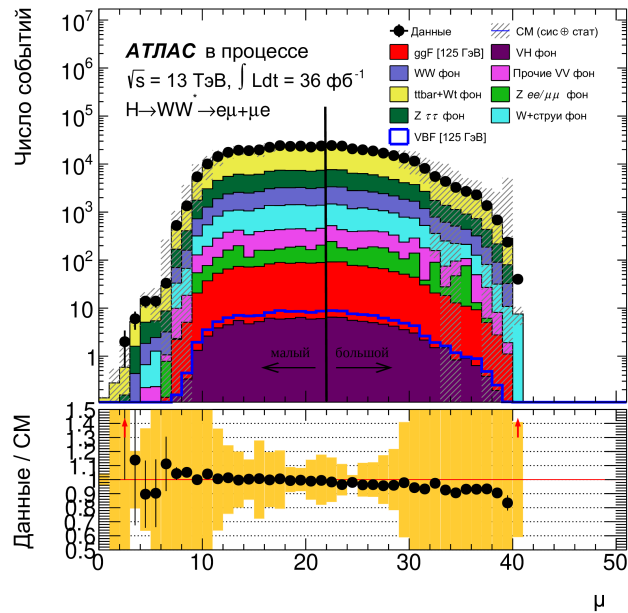
На верхнем рисунке показаны продольный и поперечный виды детектора, а на нижнем рисунке - детали события во внутреннем детекторе (ID).

3. Наложение событий в данных 2015-2016 гг.

Phys.Atom.Nucl. - 2019. - 82, 1696.

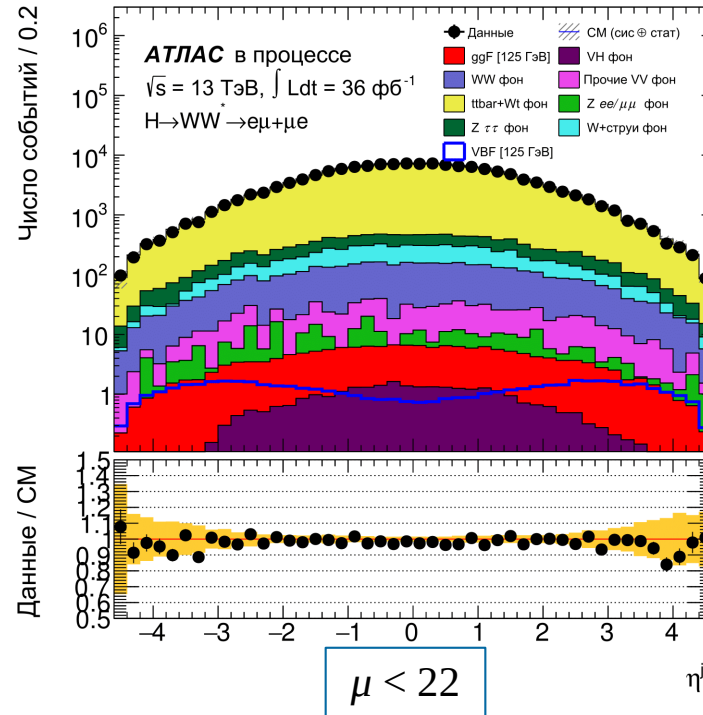
$H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$

Распределение по числу наложений.

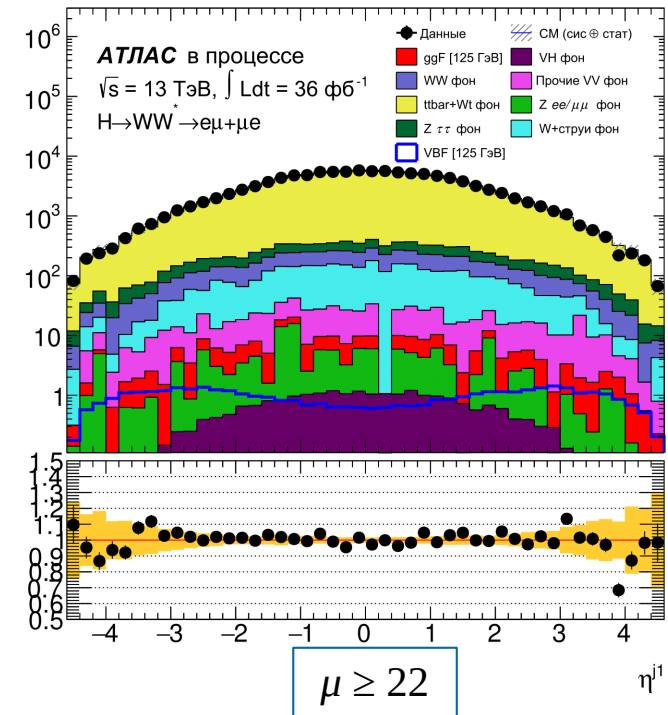


Данные согласуются с предсказаниями СМ в пределах погрешности.

Распределения псевдобыстроты второй адронной струи при малых и больших μ

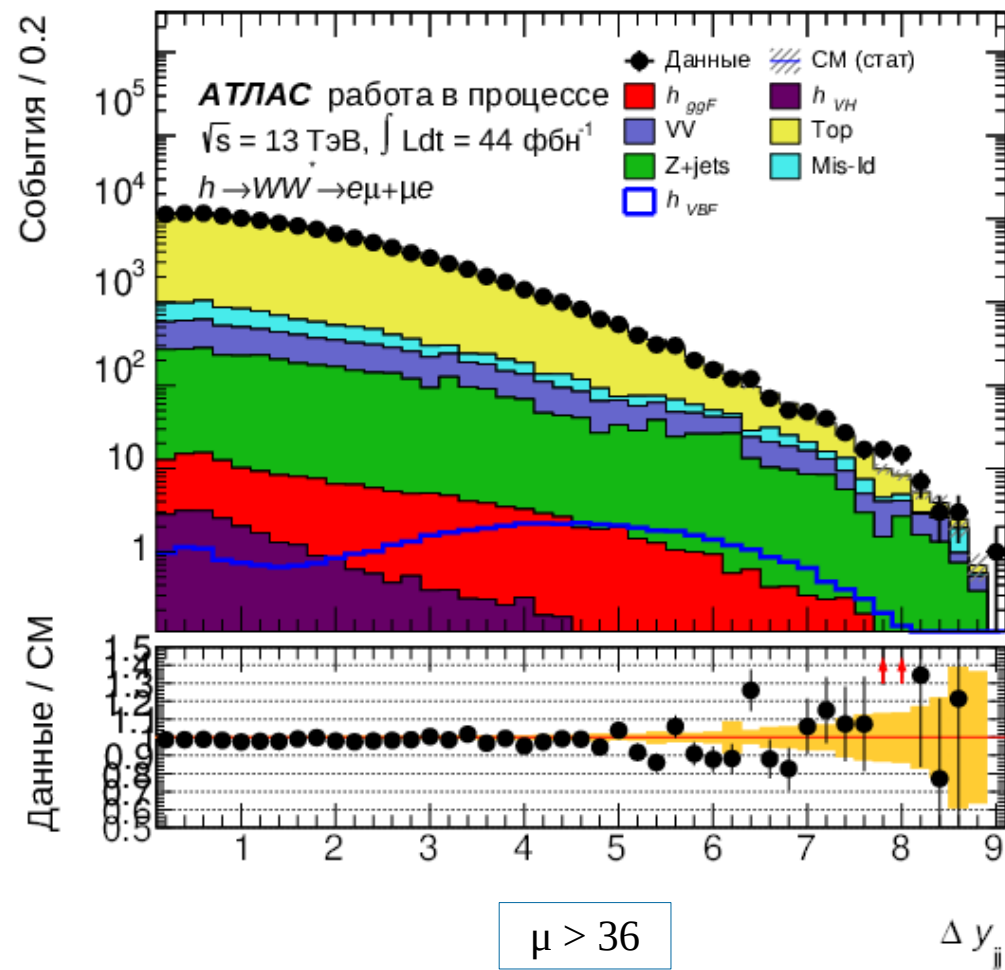
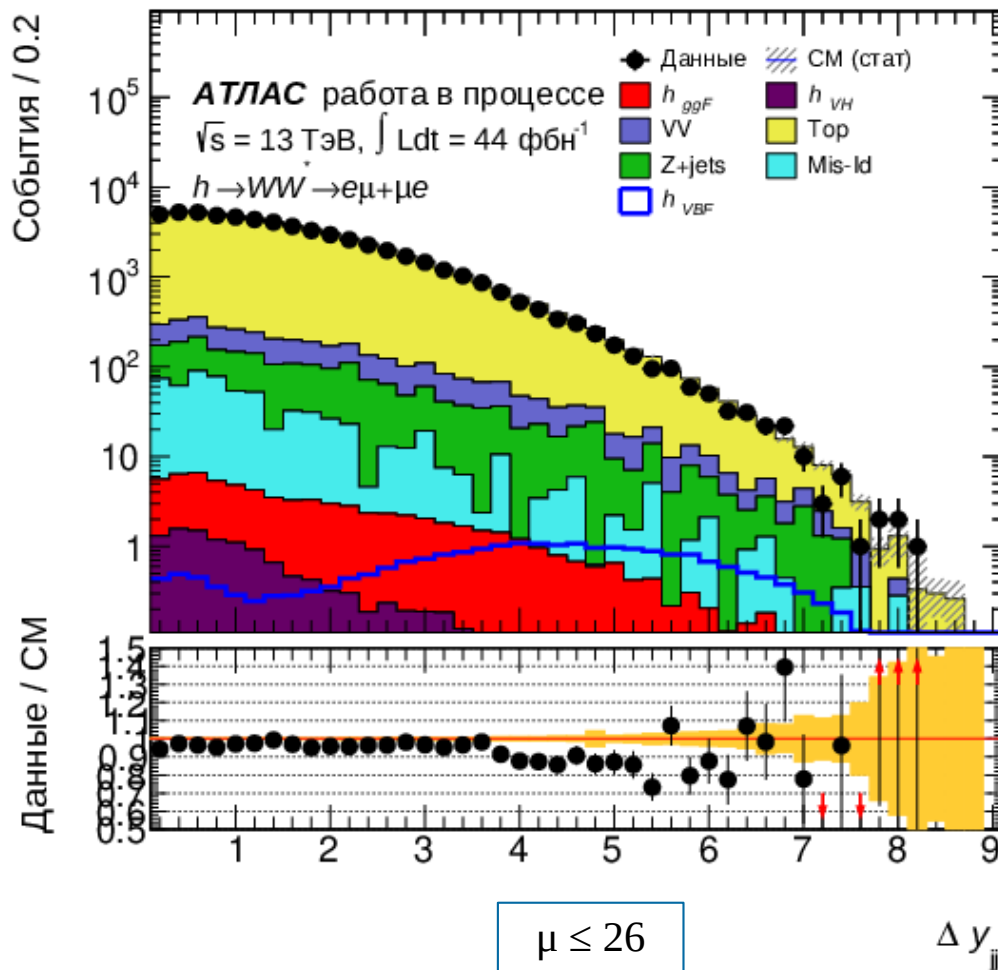


Влияние эффекта наложения событий на кинематические распределения описывается МС-моделированием.



3. Наложение событий в данных 2017 г

Распределение по разнице быстрот двух адронных струй в зависимости от μ



Влияние эффекта наложения событий на кинематические распределения описывается МС-моделированием. Данные согласуются с предсказаниями СМ в пределах погрешности.

4. Анализ данных (2015-2016 гг)

Канал: $H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$

Перечень отборов на основе анализа при 7 - 8 ТэВ [[arXiv:1606.02266](https://arxiv.org/abs/1606.02266)]

VBF SR	
lepton p_T	$p_{T,\ell 0(\ell 1)} > 22(15)\text{GeV}$
$m_{\ell\ell}$	$> 10\text{ GeV}$
charge	opposite
n_{jets}	≥ 2
b-veto	$n_{\text{bjets}} = 0$
p_T^{tot}	$< 15\text{ GeV}$
$Z/\gamma^* \rightarrow \tau\tau$ veto	$m_{\tau\tau} < m_Z - 25\text{ GeV}$
ΔY_{jj}	> 3.6
m_{jj}	$> 600\text{ GeV}$
CJV, OLV	применение
$m_{\ell\ell}$	$< 50\text{ GeV}$
$\Delta\phi_{\ell\ell}$	< 1.8
m_T	$< 1.2 * m_H$

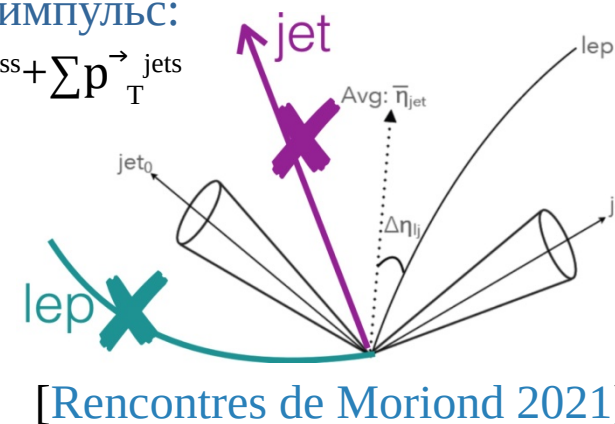
Контрольные области (CR) ортогональны сигнальной области (SR). Основные фоны измеряются в контрольных областях для нормировки соответствующих процессов в сигнальной области.

Полный поперечный импульс:

$$\vec{p}_T^{\text{tot}} = \vec{p}_T^{\ell 1} + \vec{p}_T^{\ell 2} + \vec{E}_T^{\text{miss}} + \sum \vec{p}_T^{\text{jets}}$$

CJV = запрет на центральную адр. струю

OLV – запрет на внешний лептон



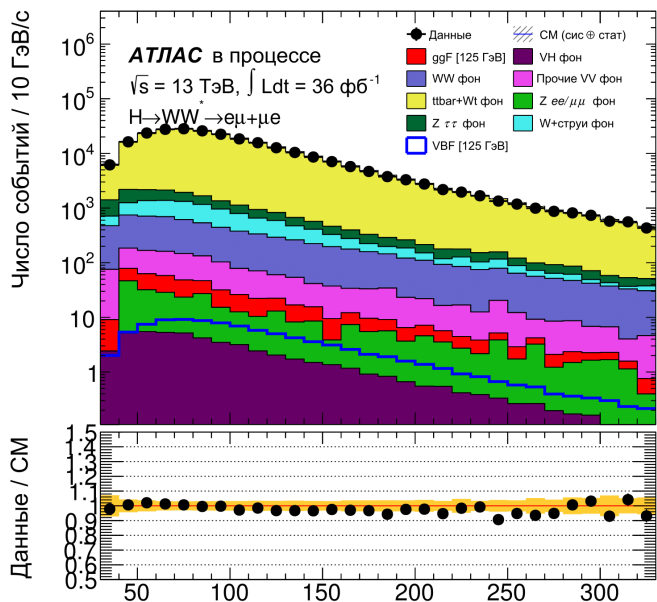
Z $\tau\tau$ CR
$|m_{\tau\tau} - m_Z| \leq 25\text{ GeV}$
$m_{\ell\ell} < 80\text{ GeV}$
CJV, OLV

TopCR
$n_{\text{bjets}} = 1$
CJV, OLV
$m_{\tau\tau} < m_Z - 25\text{ GeV}$

4. Анализ с кинематическими отборами (2015-2016 гг.)

Phys.Atom.Nucl. - 2019. - 82, 1696.

Распределение поперечного импульса первой струи в сигнальной (SR) и контрольных (CR) областях

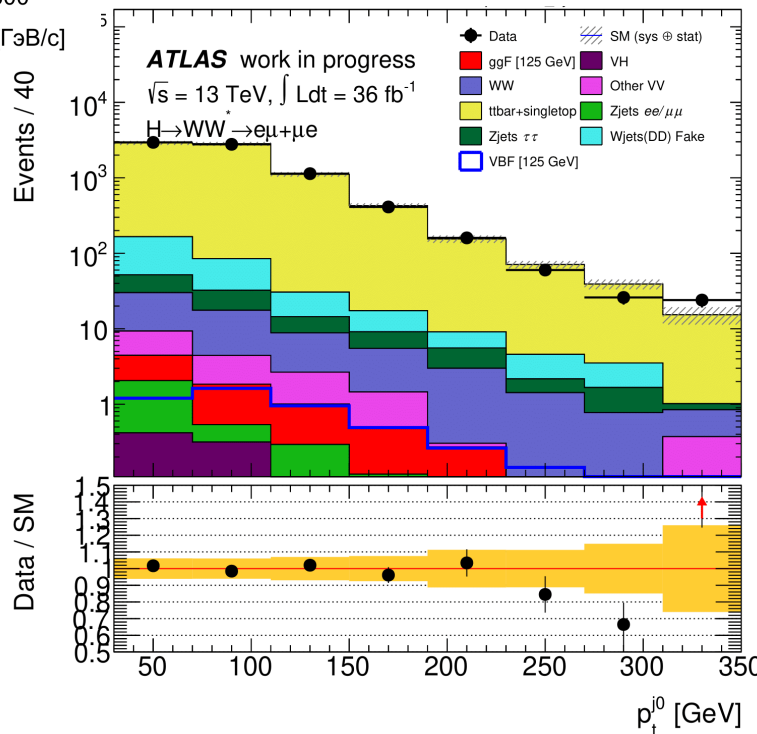


SR: после отбора более 2 jets

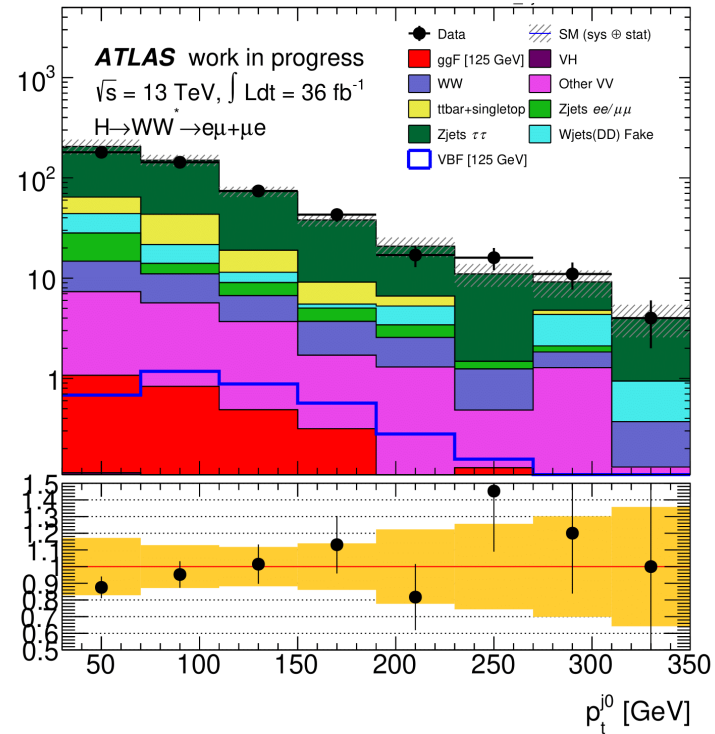
p_T^{j0} [ГэВ/c]

Данные согласуются с предсказаниями СМ в пределах погрешности.

CR для t-кварка



CR для Zττ



4. Анализ данных (2015-2018 гг., eμ/eμ)

Канал: $H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$

	Top quark CR	Z+jets CR	SR	
			DNN	Кинемат. отборы
Отборы	Два изолированных лептона с разными ароматами ($\ell=e,\mu$) и противоположными зарядами $p_T^{\text{lead}} > 22 \text{ GeV}$, $p_T^{\text{sublead}} > 15 \text{ GeV}$ $m_{\ell\ell} > 10 \text{ GeV}$, $N_{\text{jet}(p_T>30 \text{ GeV}; |\eta|<4.5)} \geq 2$			
	$N_{b\text{-jet}(p_T>20 \text{ GeV})} = 1$	$N_{b\text{-jet}(p_T>20 \text{ GeV})} = 0$		
	- $m_{\tau\tau} < m_Z - 25\text{GeV}$ - - -	- $|m_{\tau\tau} - m_Z| \leq 25\text{GeV}$ - - $m_{\ell\ell} < 70 \text{ GeV}$	- $m_{\tau\tau} < m_Z - 25\text{GeV}$ $m_{jj} > 120 \text{ GeV}$ - -	$p_T^{\text{tot}} < 15 \text{ GeV}$ $m_{\tau\tau} < m_Z - 25\text{GeV}$ $m_{jj} > 600 \text{ GeV}$ $\Delta y_{jj} > 3.6$ $m_{\ell\ell} < 50 \text{ GeV}$
	CJV OLV			
DNN с 15 входными переменными: $\Delta\phi_{\ell\ell}$, $m_{\ell\ell}$, m_T , Δy_{jj} , m_{jj} , p_T^{tot} , $\sum_e C_e$, $m_{\ell_1 j_1}$, $m_{\ell_1 j_2}$, $m_{\ell_2 j_1}$, $m_{\ell_2 j_2}$, p_T^{jet1} , p_T^{jet2} , p_T^{jet3} and E_T^{miss} significance			$\Delta\phi_{jj} < 1.8$ $m_T < 1.2 * m_H$	

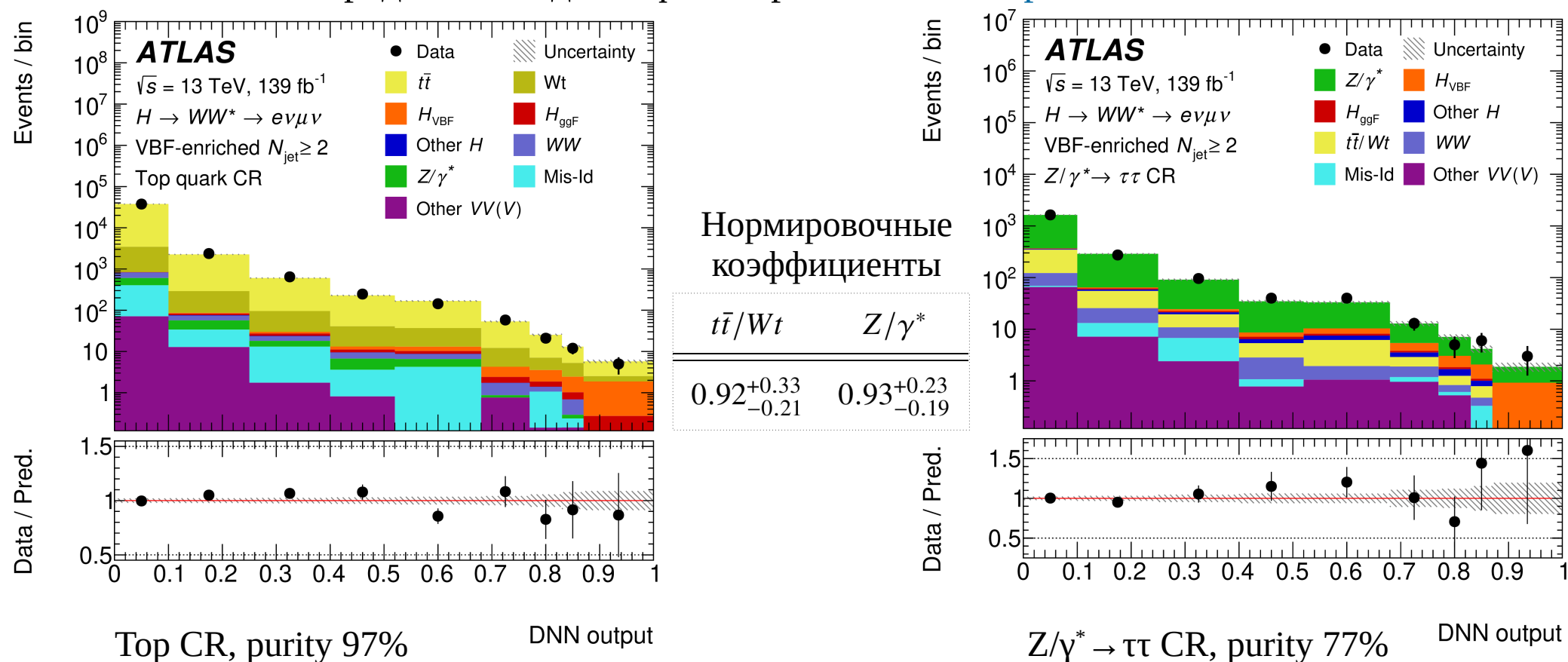
CJV — запрет на центральную струю
 OLV — запрет на внешний лептон
 DNN — глубокая нейронная сеть
 SR/CR — сигнальная/контрольная область

E_T^{miss} **significance** – разделяет события с реальным E_T^{miss} от событий, где ненулевая E_T^{miss} является результатом эффекта разрешения детектора.

5. Многомерный анализ с DNN (2015-2018 г., еμ/еμ)

ATLAS Collab., Phys. Rev. D. – 2023 – 108, 032005

Распределения идентификатора DNN в контрольных областях



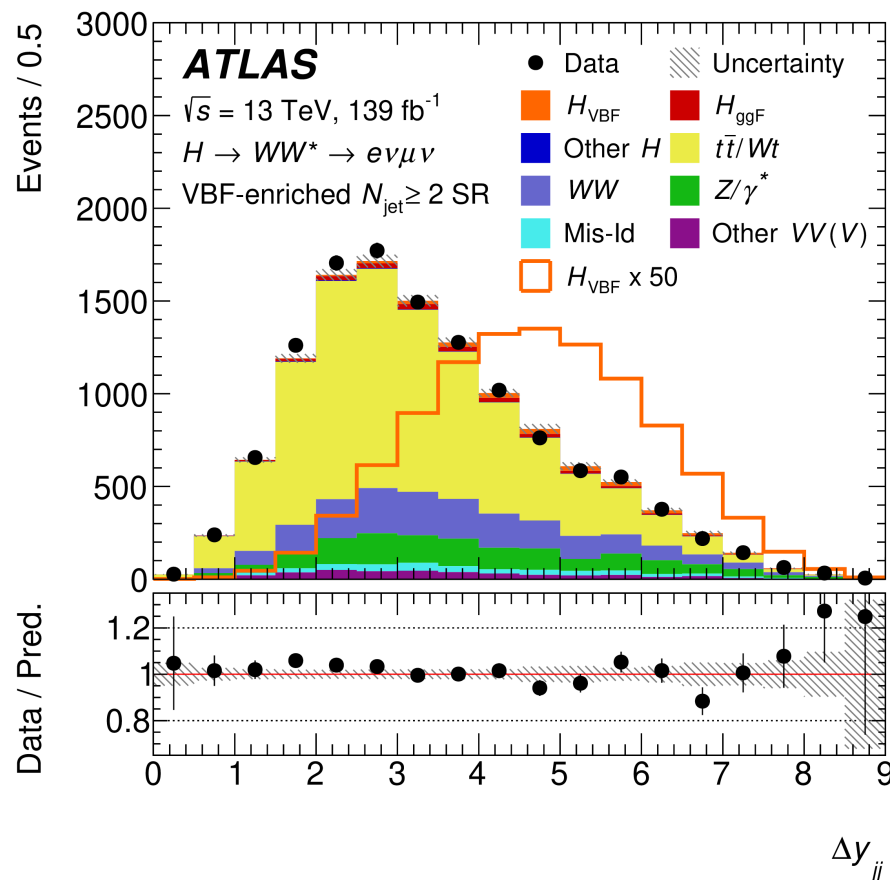
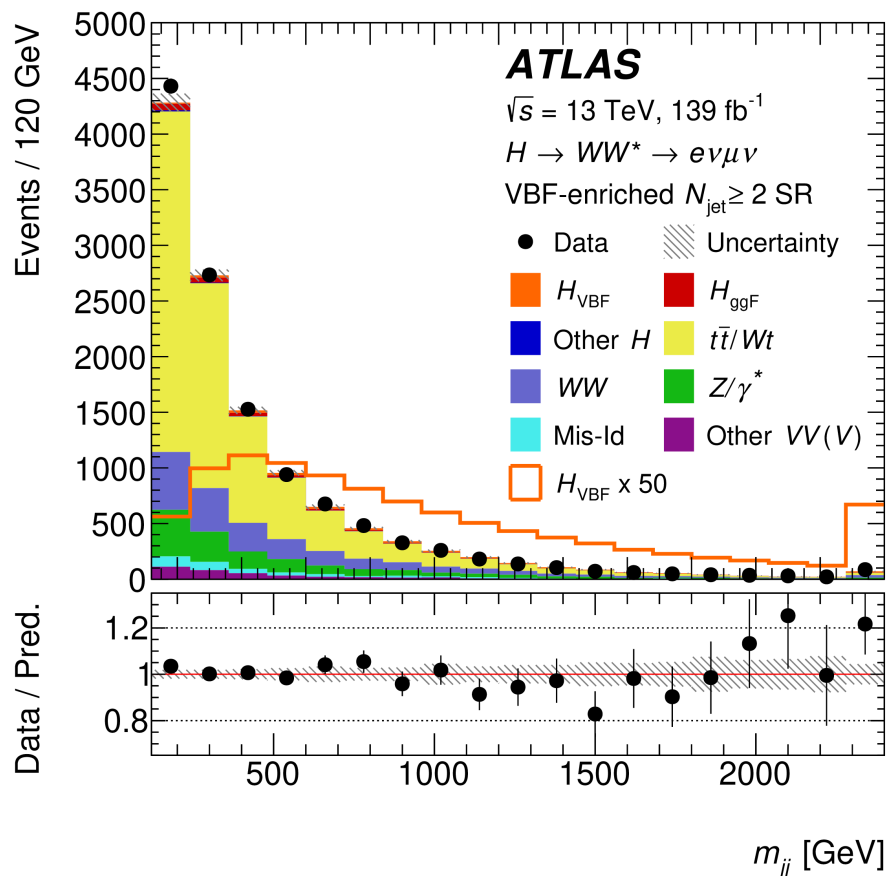
Данные согласуются с предсказаниями СМ в пределах погрешности.

Основные фоновые процессы: $t\bar{t}/Wt$, Z/γ^* , WW . Первые два используют контрольные области для нормировки соответствующих процессов в сигнальной области. Вклад WW оценивается на основе смоделированных событий, нормированных на теоретическое сечение этого процесса.

5. Многомерный анализ с DNN (2015-2018 г., еμ/еμ)

ATLAS Collab., Phys. Rev. D. – 2023 – 108, 032005

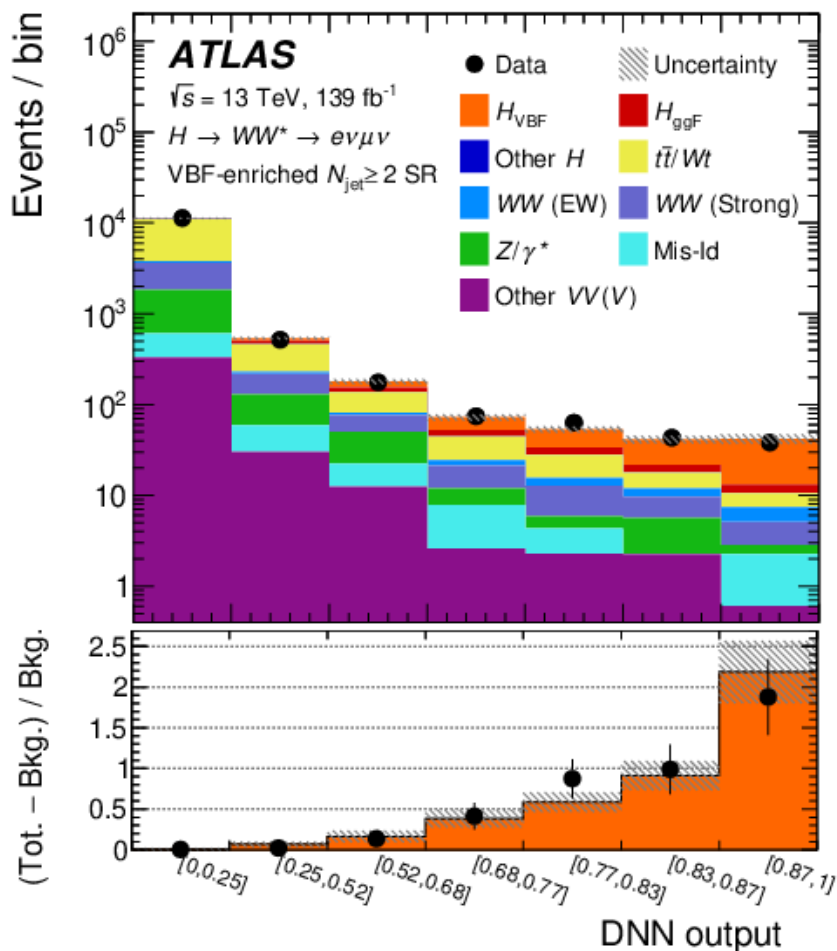
Распределения в **сигнальной области**: по инвариантной массе и разности быстрот двух адронных струй. Красная линия показывает ожидаемый сигнал с коэффициентом 50.



Переменные m_{jj} и ΔY_{jj} обеспечивают наилучшее разделение сигнала и фона.
 Данные согласуются с МС-моделированием в пределах погрешности.

5. Многомерный анализ с DNN (2015-2018 г., $e\mu/e\mu$)

ATLAS Collab., Phys. Rev. D. – 2023 – 108, 032005



Распределение идентификатора DNN в сигнальной области

Наблюдаемая (ожидаемая) значимость сигнала vbf - 5.8 (6.2) σ с учетом статистических и систематических ошибок.

Processes	Total	DNN bin [0.87, 1]
H_{ggF}	180 ± 40	2.65 ± 0.9
H_{VBF}	209 ± 40	28.8 ± 5.5
H_{other}	29 ± 15	0.04 ± 0.02
$t\bar{t}/Wt$	7600 ± 370	2.6 ± 0.8
Z/γ^*	1300 ± 300	0.6 ± 0.1
WW	2100 ± 340	4.6 ± 1.2
Other VV	380 ± 80	0.6 ± 0.1
Mis-Id	330 ± 40	1.7 ± 0.2
Total	12200 ± 180	42.0 ± 5.1
Observed	12189	38

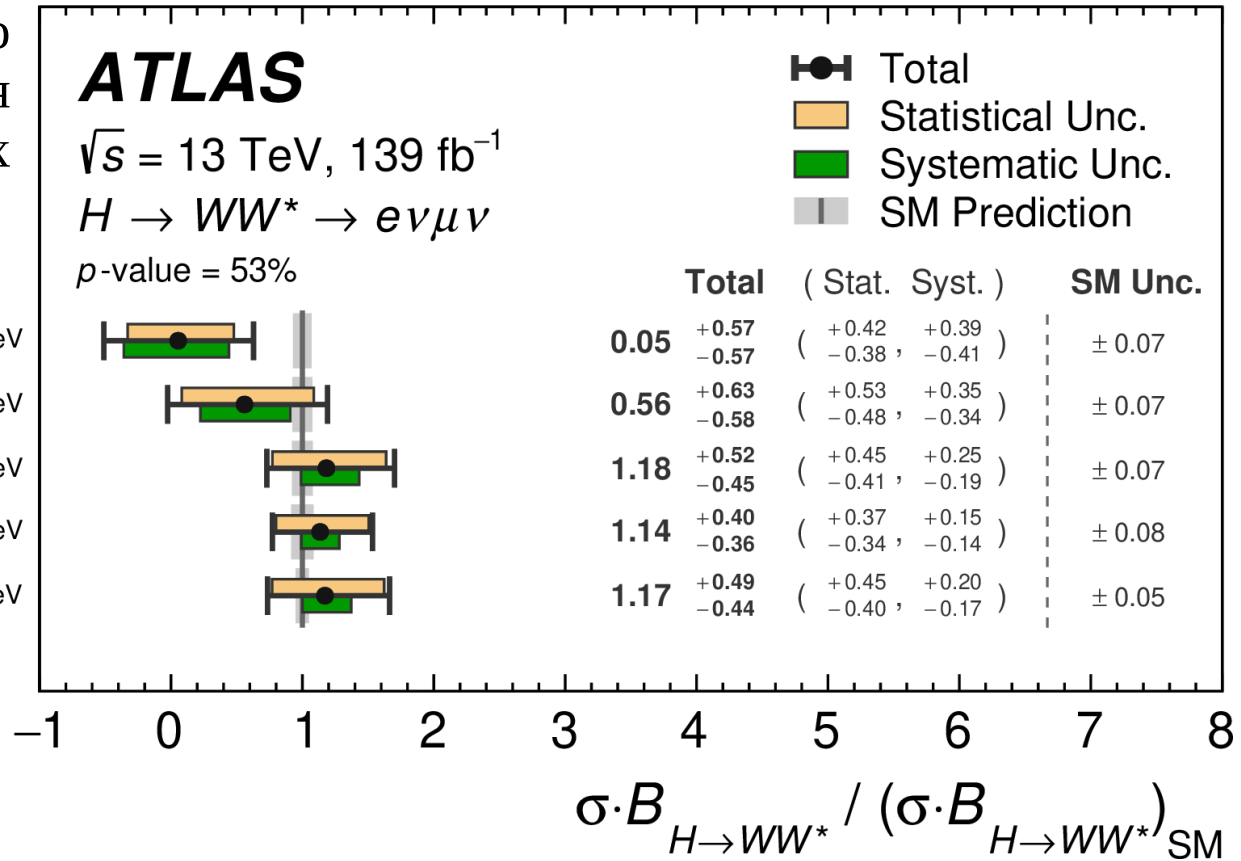
MC и данные в VBF SR и в последнем интервале [0.87, 1] идентификатора DNN, где содержание сигнальных событий наибольшее

5. Результаты анализа с DNN (2015-2018 г., eμ/eμ)

ATLAS Collab., Phys. Rev. D. – 2023 – 108, 032005

Пять областей фазового пространства для измерения упрощенных шаблонных сечений (STXS)

- EW qqH-2j, $350 \leq m_{jj} < 700$ GeV, $p_{\perp}^H < 200$ GeV
- EW qqH-2j, $700 \leq m_{jj} < 1000$ GeV, $p_{\perp}^H < 200$ GeV
- EW qqH-2j, $1000 \leq m_{jj} < 1500$ GeV, $p_{\perp}^H < 200$ GeV
- EW qqH-2j, $m_{jj} \geq 1500$ GeV, $p_{\perp}^H < 200$ GeV
- EW qqH-2j, $m_{jj} \geq 350$ GeV, $p_{\perp}^H \geq 200$ GeV



Полное сечение рождения H в механизме слияние векторных бозонов, умноженное на относительную вероятность распада $H \rightarrow WW^*$, согласуется с предсказаниями СМ 0.81 ± 0.02 пб:

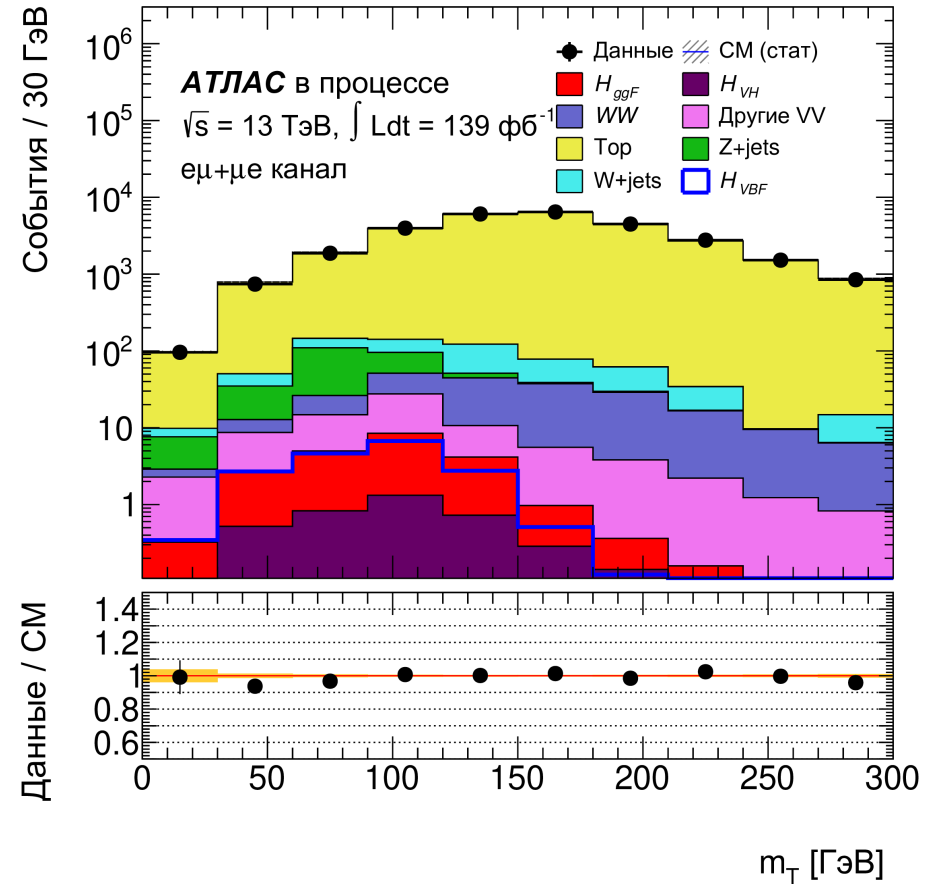
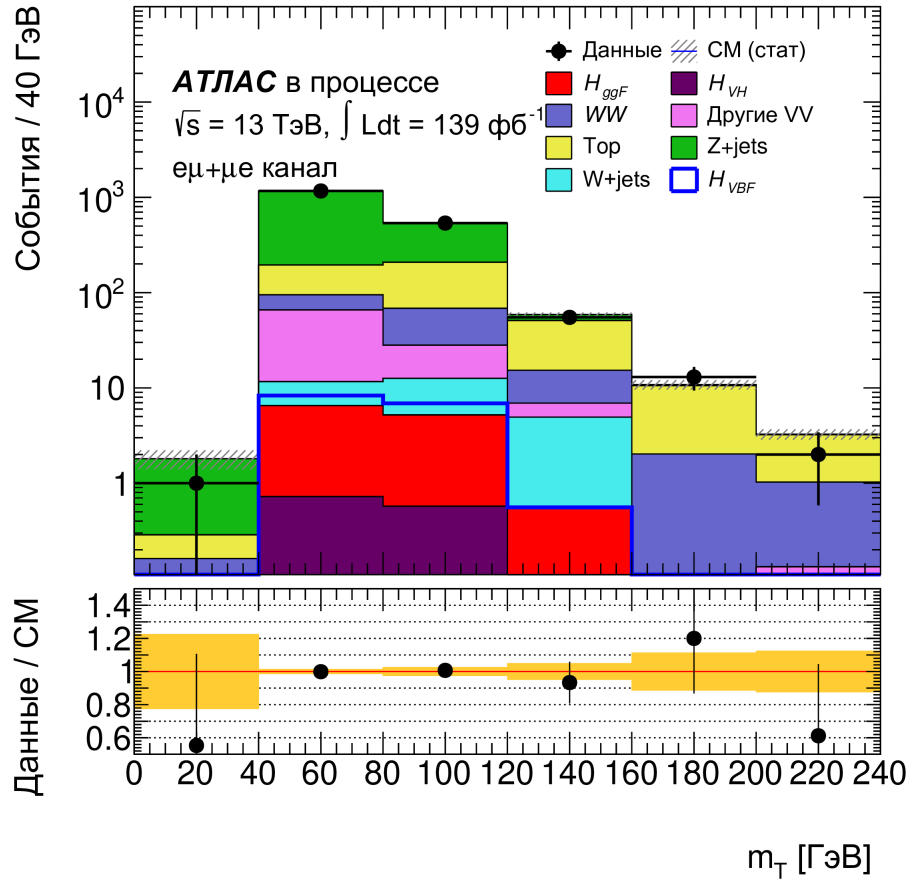
$$\sigma_{VBF} \cdot B_{H \rightarrow WW} = 0.75^{+0.19}_{-0.16} = 0.75^{+0.11}_{-0.11} (\text{стат})^{+0.07}_{-0.06} (\text{экс. сист})^{+0.12}_{-0.08} (\text{теор. сигн})^{+0.07}_{-0.06} (\text{теор. фон}) \text{ пб}$$

Общая систематическая ошибка составляет 17%, причем экспериментальная - 6.7 % (max. от E_T^{miss} реконструкции), а теоретическая - 16% (max. от vbf процесса). Статистическая ошибка составляет 15%.

5. Анализ на основе отборов (2015-2018 г., $e\mu/e\mu$)

Phys. At. Nucl. - 2021. – 84, 2055

Распределения по поперечной массе в **контрольных областях**



Данные согласуются с СМ-моделированием в пределах погрешности.

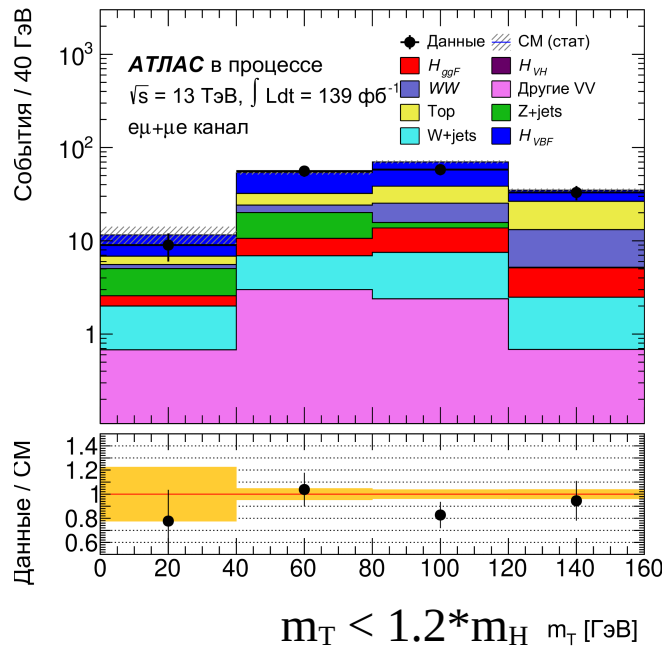
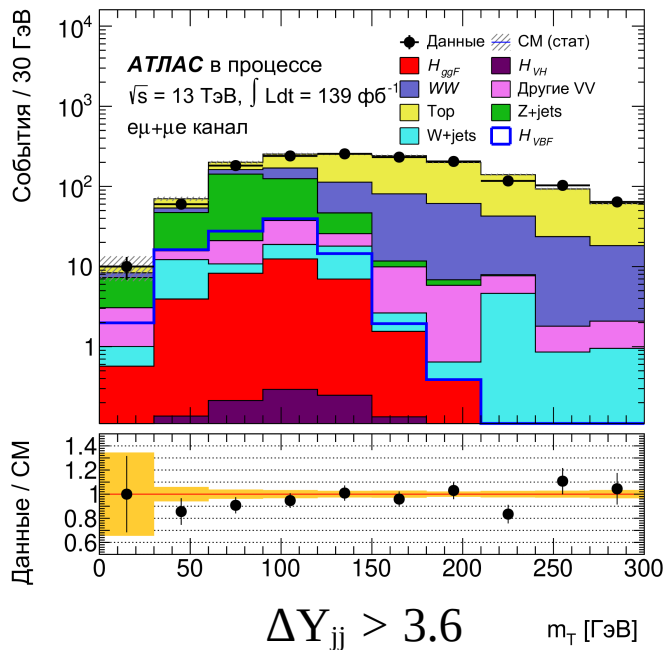
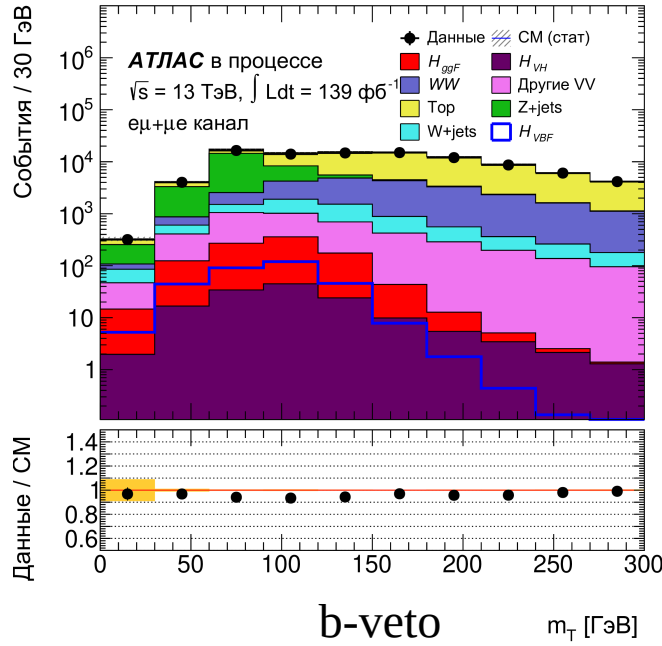
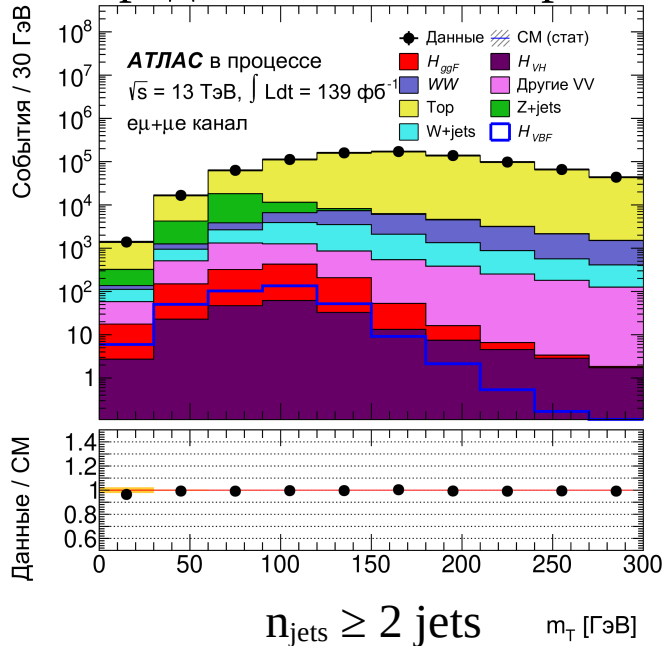
Нормировочные коэффициенты для $Zt\bar{t}$ и $Wt/\bar{t}t$ процессов: 1.00 ± 0.04 и 0.99 ± 0.01

Чистота контрольных областей для $Zt\bar{t}$ и $Wt/\bar{t}t$ процессов: 74% и 98%

5. Анализ на основе отборов (2015-2018 г., ер/ер)

Phys. At. Nucl. - 2021. – 84, 2055

Распределения по поперечной массе в **сигнальной области**



Отб.	$n_{\text{jets}} \geq 2$ jets	$m_T < 1.2 * m_H$
H_{VBF}	358 ± 1	66.5 ± 0.3
bkg	968.8K	105 ± 4
data	967K	156

Наблюдаемая (ожидаемая)
 значимость сигнала
4.6 (5.9) σ без систематики.

Данные согласуются с МС-
 моделированием в пределах
 погрешности.

В основном многомерном
 анализе с DNN наблюдаемая
 (ожидаемая) значимость **5.8
 (6.2) σ**

6. Анализ данных (2015-2018 гг., ee/μμ)

Канал:

$$H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu e\nu/\mu\nu\mu\nu$$

VBF Signal Region	
lepton p_T	$p_T^{\ell 0(\ell 1)} > 22(15)\text{GeV}$
$m_{\ell\ell}$	$> 12 \text{ GeV}$
charge	opposite
n_{jets}	≥ 2
b-veto	$n_{\text{bjets}} = 0$
Z veto	$|M_{\ell\ell} - M_Z| > 15 \text{ ГэВ}$
p_T^{tot}	$< 15 \text{ GeV}$
Z/γ* → ττ veto	$m_{\tau\tau} < m_Z - 25 \text{ GeV}$
DY _{jj}	> 3.6
m_{jj}	$> 600 \text{ GeV}$
CJV, OLV	applied
Track E_T^{miss}	$> 50 \text{ GeV}$
E_T^{miss}	$> 50 \text{ GeV}$
$m_{\ell\ell}$	$< 50 \text{ GeV}$
m_T	$< 1.2 * m_H$

TopCR
$|M_{\ell\ell} - M_Z| > 15 \text{ ГэВ}$
$n_{\text{bjets}} = 1$
CJV, OLV
$m_{\tau\tau} < m_Z - 25 \text{ GeV}$
E_T^{miss} significance > 6

ZℓℓCR
$20 \leq E_T^{\text{miss}} < 50 \text{ GeV}$
$p_T^{\text{tot}} < 15 \text{ GeV}$
$M_{\tau\tau} < m_Z - 25 \text{ GeV}$
CJV, OLV

E_T^{miss} - отрицательная векторная сумма выбранных жестких объектов и “мягкой” составляющей:

$$E_T^{\text{miss}} = - \left(\sum_{\text{objects}} p_T + \sum_{\text{soft}} p_T \right)$$

Objects: вклад от жестких (с высоким p_T) μ , e , γ , τ , jets
Soft: вклад от всех calo-кластеров и треков, не связанных с жесткими objects

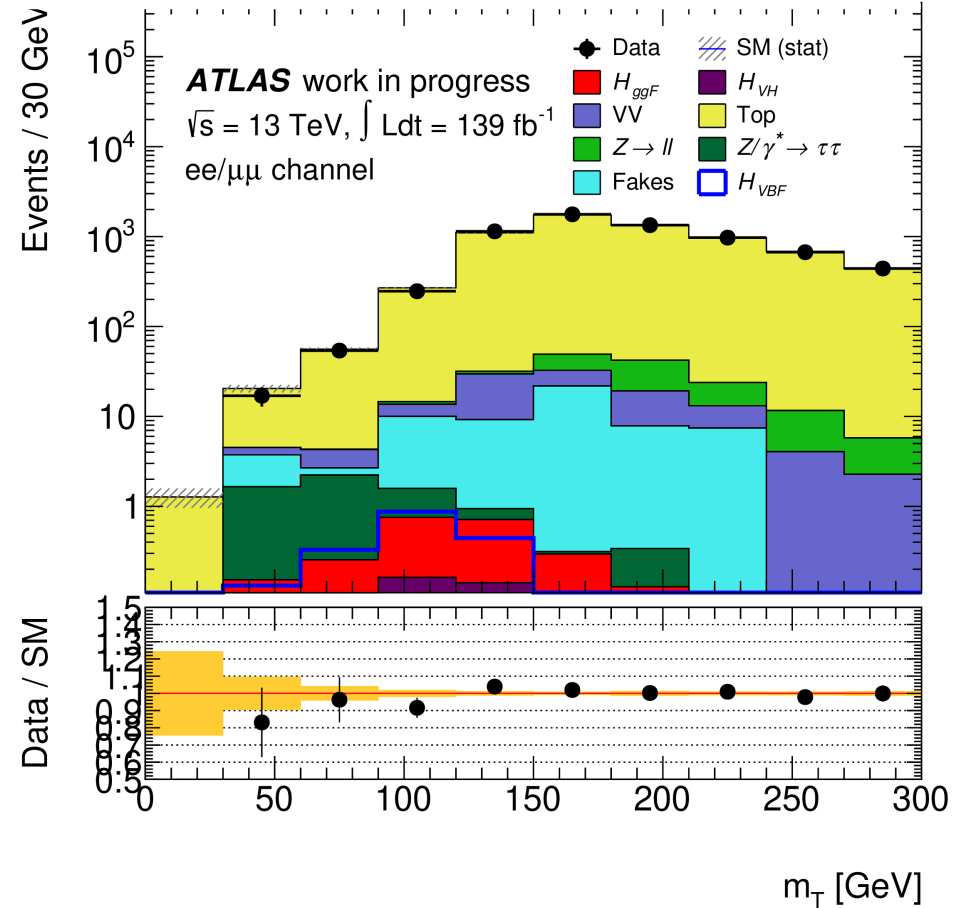
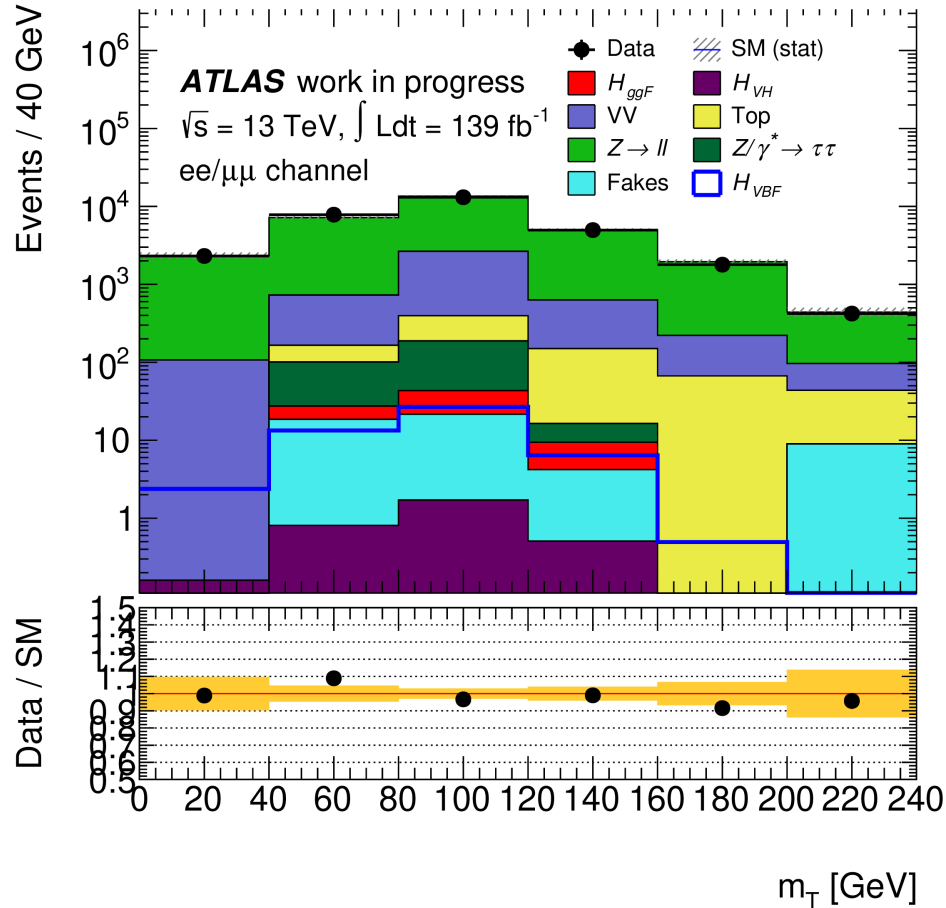
Track E_T^{miss} – E_T^{miss} со

вкладом только от треков, другое название p_T^{miss}

6. Анализ на основе отборов (2015-2018 гг., $ee/\mu\mu$)

Phys. At. Nucl. - 2021. – 84, 2055

Распределения по поперечной массе в контрольных областях



Данные согласуются с МС-моделированием в пределах погрешности.

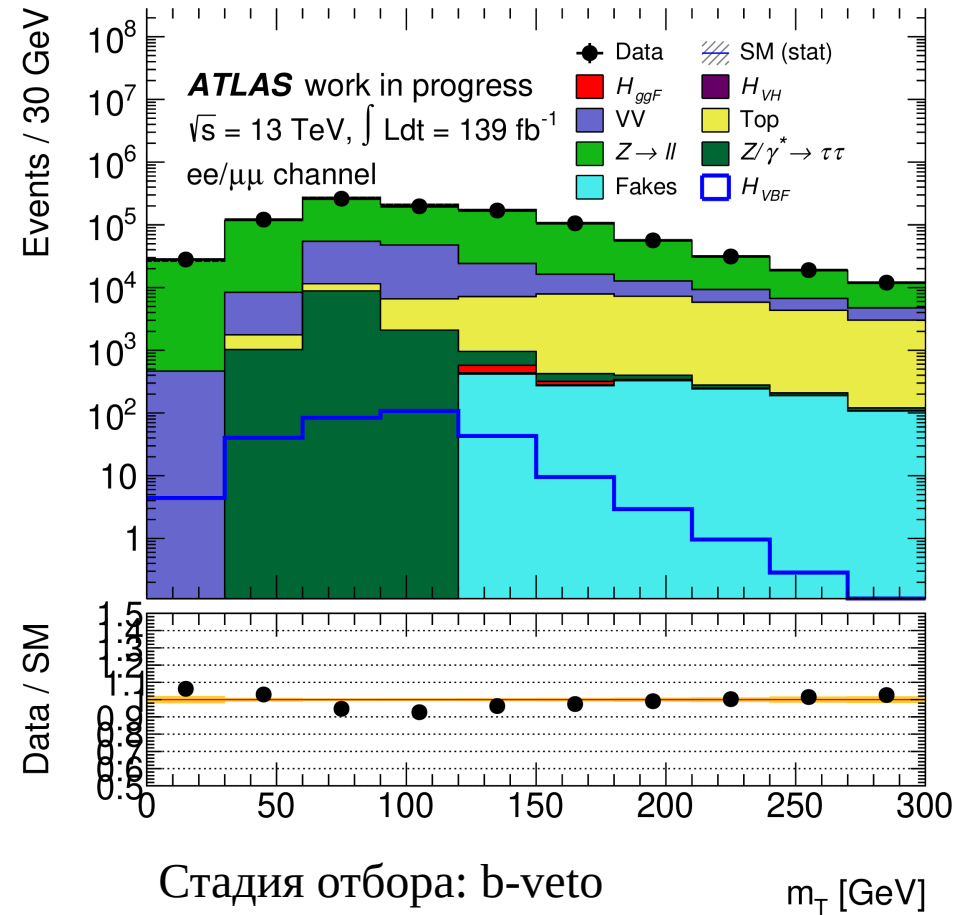
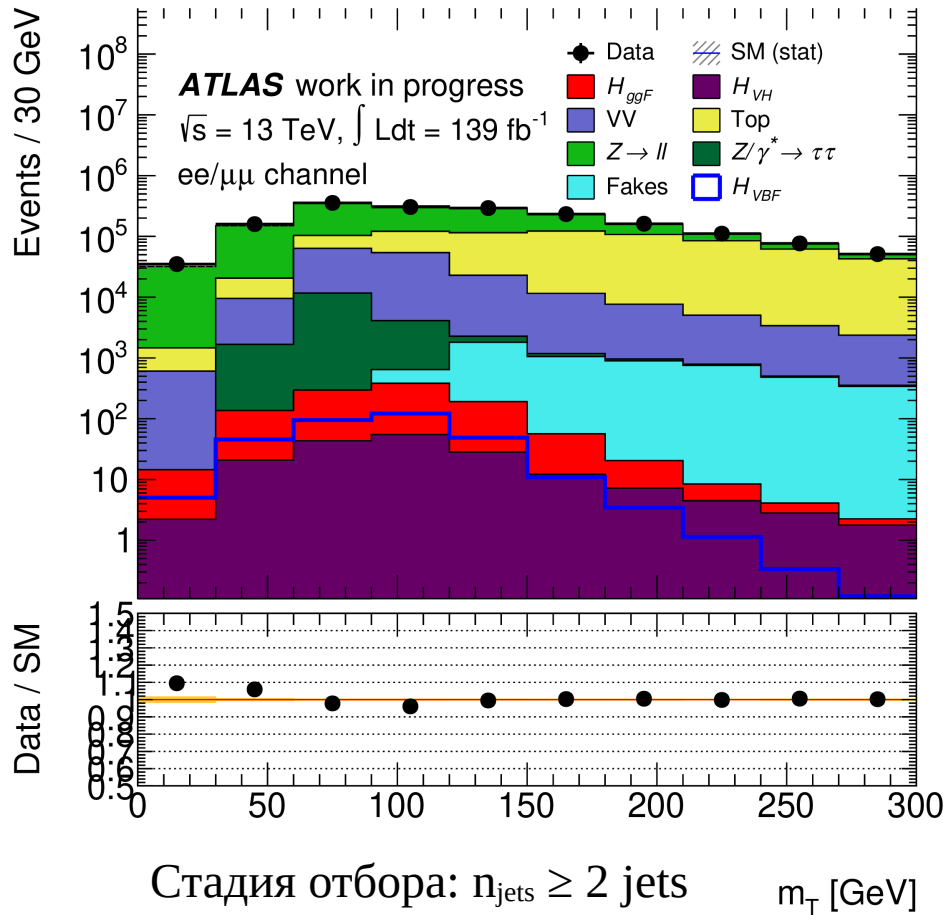
Нормировочные коэффициенты для $Z\ell\ell$ и $Wt/t\bar{t}$ процессов: 0.88 ± 0.02 и 0.99 ± 0.01

Чистота контрольных областей для $Z\ell\ell$ и $Wt/t\bar{t}$ процессов: 87% и 96%

6. Анализ на основе отборов (2015-2018 гг., $ee/\mu\mu$)

Phys. At. Nucl. - 2021. – 84, 2055

Распределения по поперечной массе в **сигнальной области**



Данные согласуются с МС-моделированием в пределах погрешности.

Основные фоны (Zll и Top) нормируются из соответствующих контрольных областей.

Основная проблема — неподдаваемый Zll (74% от общего фона) фон.

6. Анализ на основе отборов (2015-2018 гг., ee/μμ)

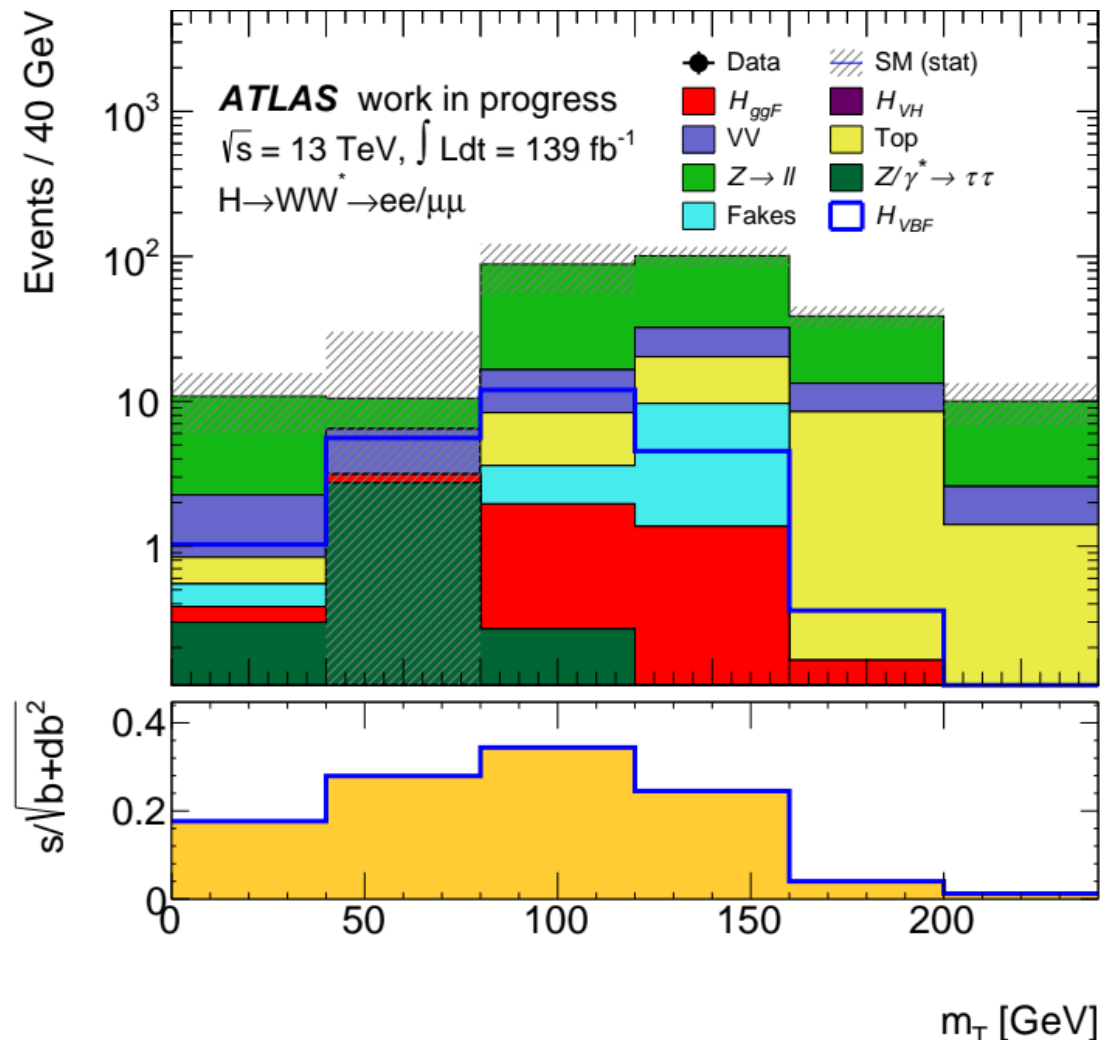
Phys. At. Nucl. - 2021. – 84, 2055

Суммарное количество событий (в тыс.) на конечном этапе отбора.

Отбор	VBF	ggF+VH	VV	Топ	W+jets	Zℓℓ	Полный фон
$m_T < 1.2 m_H$	0.023	0.004	0.025(4)	0.013(1)	0.007(6)	0.145(41)	0.195(42)

Zℓℓ фон даже в конце отборов превышает сумму остальных фонов в 3 раза, а его погрешность составляет около 30% от его величины и дает преобладающий вклад в погрешность суммарного фона.

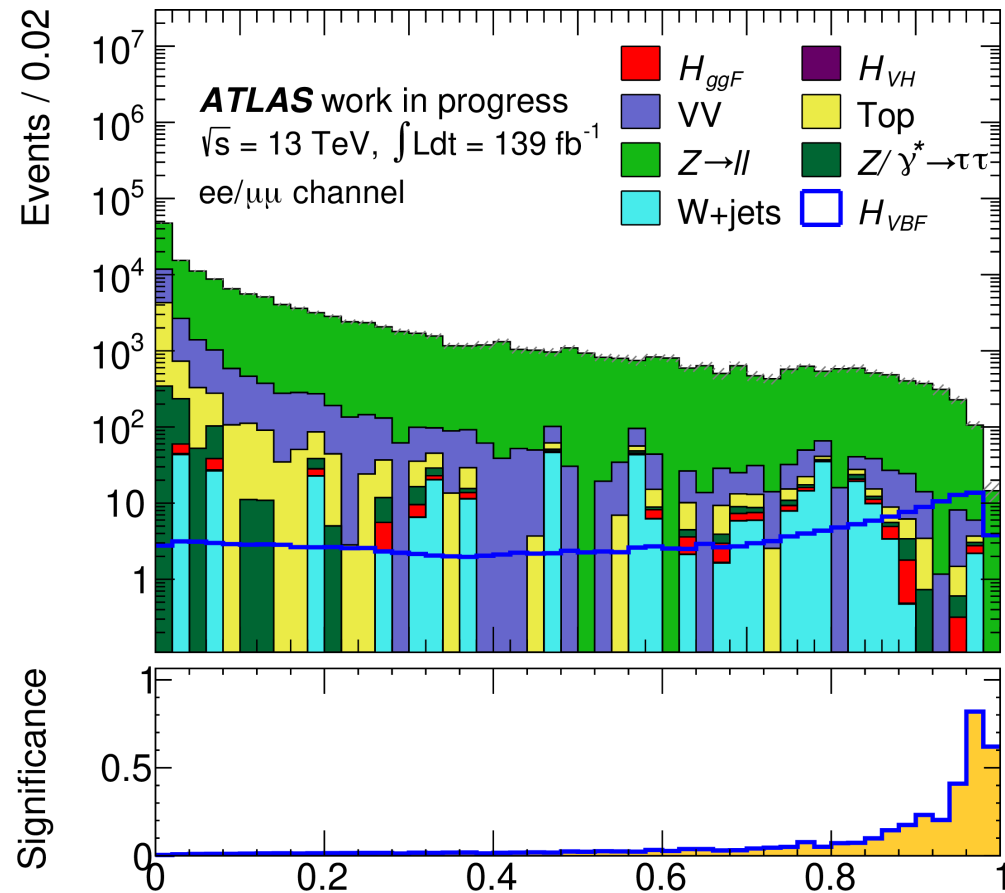
Распределение поперечной массы m_T на последнем этапе отбора событий. На нижнем графике показана расчетная значимость в каждом интервале. Ожидаемая интегральная значимость составляет 0.5 σ.



6. Применение DNN (2015-2018 гг., ee/μμ)

Phys. At. Nucl. - 2022. – 85, 1587

VBF Signal Region	
lepton p_T	$p_{T,\ell_0(\ell_1)} > 22(15)\text{GeV}$
$m_{\ell\ell}$	>12 GeV
charge	opposite
Z veto	$|M_{\ell\ell} - M_Z| > 15 \text{ ГэВ}$
n_{jets}	≥ 2
b-veto	$n_{\text{bjets}} = 0$
Z/γ* → tt veto	$m_{\tau\tau} < m_Z - 25 \text{ GeV}$
M_{jj}	$> 120 \text{ GeV}$
CJV, OLV	применены
Применение DNN	



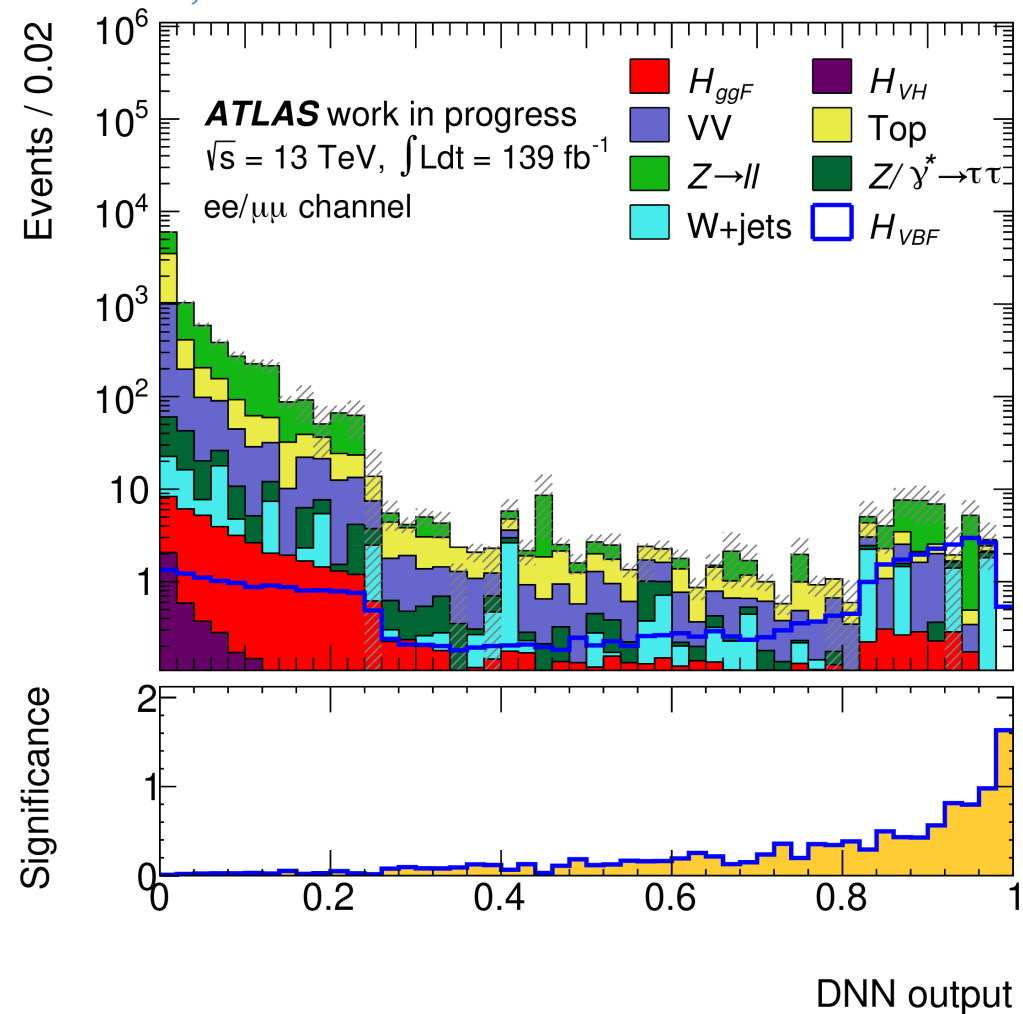
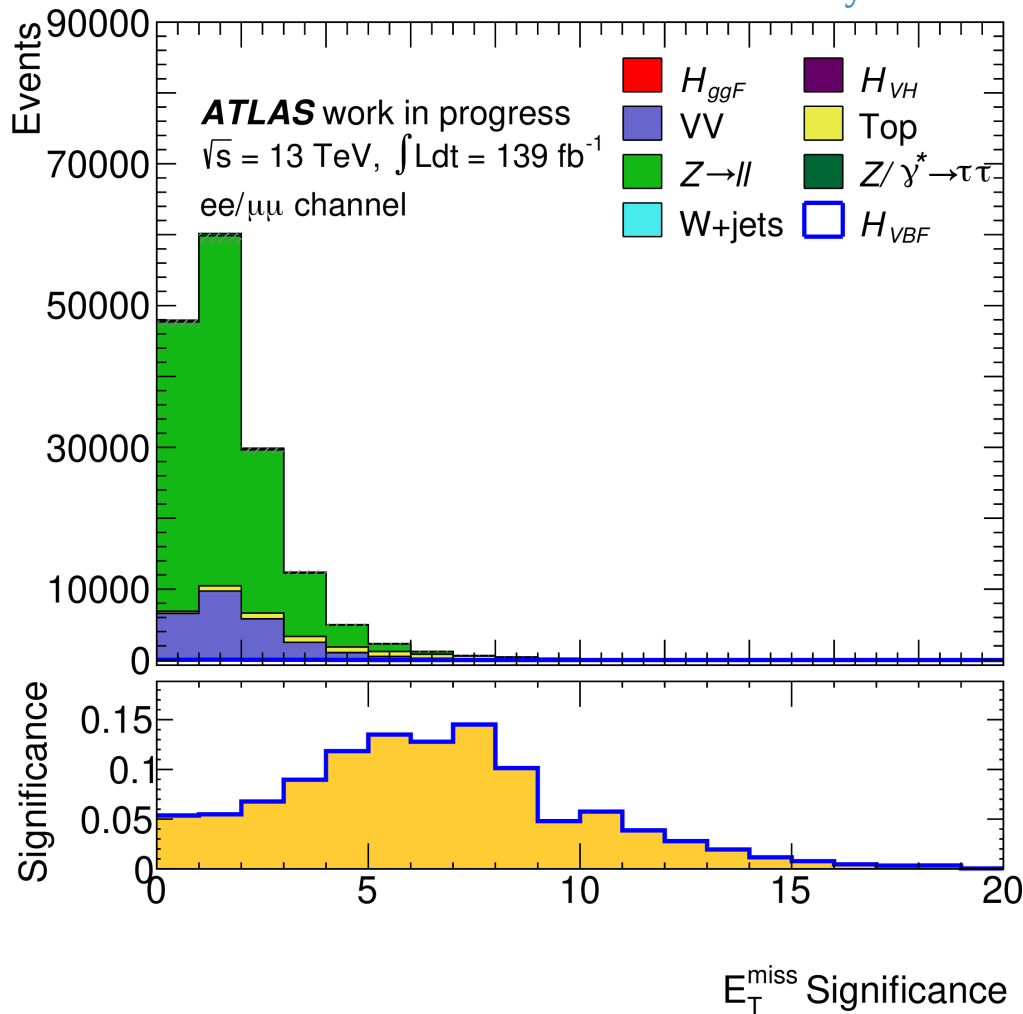
DNN output

Применение DNN, натренированной на ee/μe событиях (не учитывается Zℓℓ фон при тренировке DNN). Распределение классификатора DNN: доля сигнала растет с увеличением величины классификатора.

Ожидаемая значимость составляет **0.9σ**

6. Применение DNN (2015-2018 гг., ee/ $\mu\mu$)

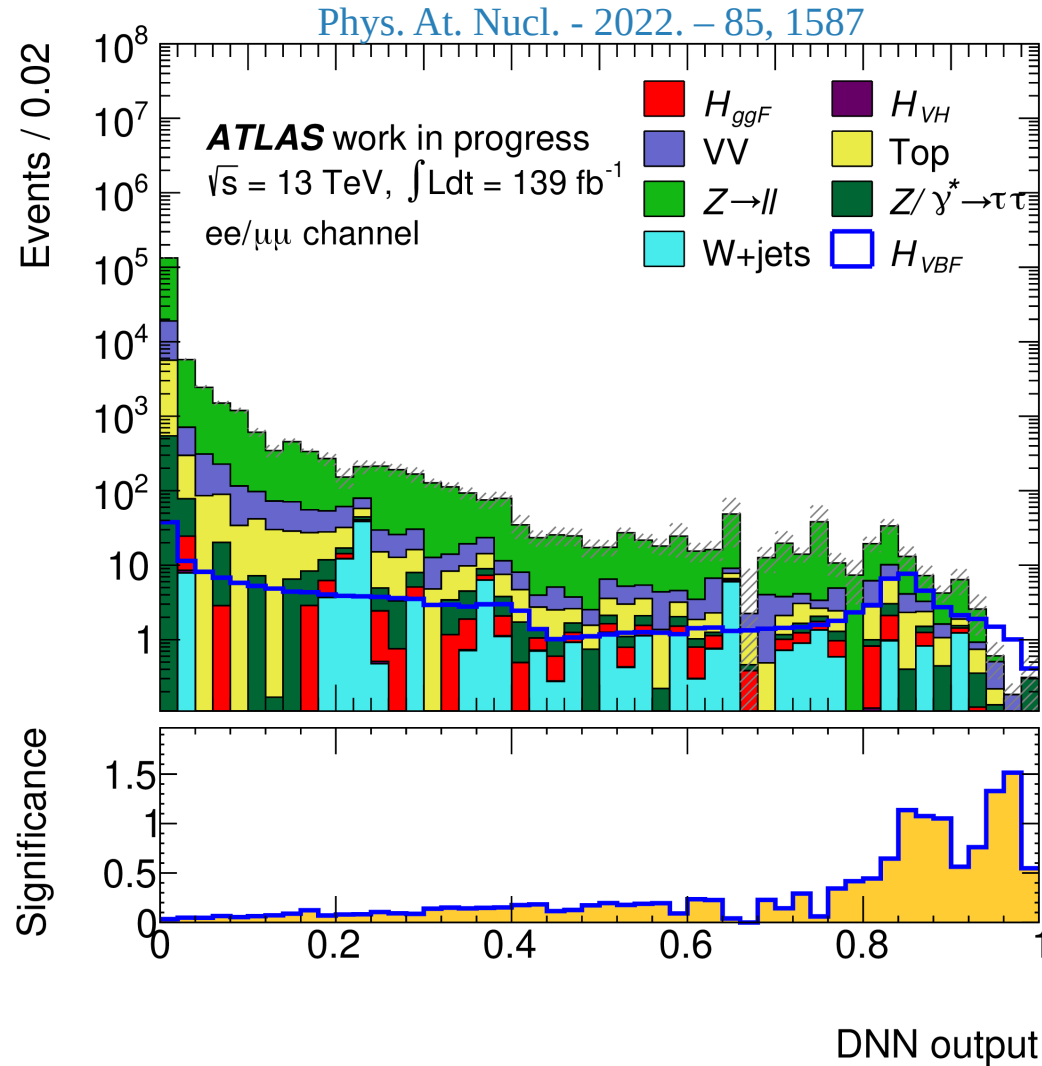
Phys. At. Nucl. - 2022. - 85, 1587



Дополнительное подавление $Z\ell\ell$ фона перед применением DNN с помощью отбора по переменной E_T^{miss} significance: $S(E_T^{\text{miss}}) > 4$ (6) в зависимости от классификатора DNN

Показано распределение по классификатору DNN после дополнительного подавления $Z\ell\ell$ фона. Ожидаемая значимость составляет 2σ

6. Применение DNN (2015-2018 гг., ee/μμ)



Распределение классификатора DNN. Нейросеть натренирована на образцах событий с ee/μμ в конечном состоянии без дополнительного отбора по E_T^{miss} Significance.

Значимость сигнала достигла значения 3σ . Полученный результат перспективен для объединения двух мод распада: eμ/μe и ee/μμ.

Результаты работы

Приводятся основные результаты диссертационной работы, которые сводятся к следующему:

1. Показано, что влияние эффекта наложения событий в одном пересечении пучков на распределения адронных струй описывается МС-моделированием и не сказывается на качестве восстановления и идентификации объектов эксперимента. Это исследование было проведено для данных 2015 – 2016 гг. и 2017 – 2018 гг. с электроном и мюоном в конечном состоянии.
2. Проведен анализ конечного состояния с электроном и мюоном на полной статистике при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ, измерено число событий и на каждом этапе их отбора построены кинематические распределения по различным переменным, и проведено их сравнение с результатами МС-моделирования, оценены измеренная и ожидаемая значимости сигнала.
3. Измерено полное сечение рождения бозона Хиггса в механизме VBF в канале его распада на два W-бозона, которое оказалось равным $0.93_{-0.20}^{+0.23}$ в единицах СМ, при впервые достигнутой статистической значимости сигнала 5.8σ благодаря использованию глубоких нейронных сетей DNN в анализе. Также были измерены упрощенные шаблонные сечения в пяти разных областях фазового пространства.

Результаты работы

4. Проведен анализ конечного состояния с двумя электронами или двумя мюонами в данных 2015 – 2018 гг., рассмотрены новые критерии отбора событий для выделения сигнальных и контрольных областей основных фоновых процессов, также измерено число этих событий, построены кинематические распределения по различным переменным и проведено их сравнение с результатами МС-моделирования, а также оценена ожидаемая статистическая значимость сигнала.
5. Осуществлена тренировка глубокой нейронной сети DNN на событиях с двумя электронами или двумя мюонами и показано, что ее применение в анализе позволило в шесть раз увеличить значимость сигнала по сравнению с кинематическими отборами.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Разработана и детально проверена методика моделирования кинематики адронных струй и распределений по поперечной массе для задачи исследования бозона Хиггса в канале распада $H \rightarrow WW^*$ в механизме рождения VBF на основе анализа полной статистики событий с двумя лептонами и двумя струями в конечном состоянии при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ в эксперименте ATLAS без использования нейросетей.
2. Измерены полное сечение бозона Хиггса $H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$ в механизме рождения VBF с точностью 25%, а также упрощенные шаблонные сечения в нескольких областях фазового пространства по результатам анализа полной статистики событий при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ в эксперименте ATLAS с использованием нейросетей.
3. Доказана эффективность нейросетей для поиска каналов распада бозона Хиггса $H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu e\nu$ и $H \rightarrow WW^* \rightarrow \mu\nu\mu\nu$ при тех же условиях на основе анализа с предложенными и оптимизированными автором критериями отбора событий.

Личный вклад автора

1. Участие в разработке и отладке программного обеспечения АТЛАС, в частности, разработка алгоритма мониторинга калибровочных данных с жидкоаргонового калориметра. По итогам этой работы диссертант стал полноправным соавтором всех публикаций сотрудничества начиная с февраля 2022 г.;
2. Исследование кинематики адронных струй и распределений по поперечной массе в области сигнала от бозона Хиггса и в контрольных кинематических областях фонов с учетом эффекта наложения событий;
3. Анализ событий для конечного состояния с электроном и мюоном на полной статистике данных АТЛАС при 13 ТэВ на основе кинематических критериев отбора, который послужил проверкой основного анализа группы с применением глубоких нейронных сетей;
4. Выработка кинематических критериев отбора событий сигнала для конечного состояния с двумя мюонами или двумя электронами с выделением контрольной кинематической области для доминирующего здесь фона от процессов Дрелла-Яна; модернизация и успешное применение алгоритмов на основе нейронных сетей для существенного увеличения чувствительности к сигналу от бозона Хиггса.

1. *Рамакоти Е.Н., Гаврилюк А.А., Цукерман И.И.*, Анализ двухлептонных событий для изучения свойств стандартного бозона Хиггса в канале $H \rightarrow WW^* \rightarrow \ell\nu\ell\nu$ в эксперименте АТЛАС на БАК при 13 ТэВ [Текст] // Ядерная Физика и Инжиниринг. – 2018. – 9, 488.
2. *E.N. Ramakoti, A.A. Gavrilyuk, I.I. Tsukerman*, An Investigation of Signal Kinematical Region to Study Standard Model Higgs Boson Properties in the $H \rightarrow WW^* \rightarrow \ell\nu\ell\nu$ Decay Channel in the ATLAS Experiment at the Large Hadron Collider at 13 TeV [Text] // Phys. At. Nucl. – 2019. – 82, 1696.
3. *E.N. Ramakoti, A.A. Gavrilyuk, I.I. Tsukerman*, Study of events with an electron, muon, and two hadron jets in the final state with an integrated luminosity of a 139 fb⁻¹ in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector at the LHC [Text] // Phys. At. Nucl. – 2021. – 84, 1776.
4. *E.N. Ramakoti, A.A. Gavrilyuk, I.I. Tsukerman*, A study of the standard model Higgs boson in the $H \rightarrow WW^* \rightarrow \ell\nu\ell\nu$ decay channel in the ATLAS experiment at the LHC [Text] // Phys. At. Nucl. – 2021. – 84, 2055.
5. *E.N. Ramakoti, A.A. Gavrilyuk, I.I. Tsukerman*, 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] // Phys. At. Nucl. – 2022. – 85, 1587.
6. *G.Aad... E. Ramakoti [et al.] (ATLAS Collaboration)*, Measurement 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. – 108, 032005, arXiv: 2207.00338.

Апробация

1. Молодежные конференции по теоретической и экспериментальной физике (МКТЭФ), (г. Москва, Россия, 2017) с докладом: “Анализ двухлептонных событий для изучения свойств СБХ в канале $H \rightarrow WW^* \rightarrow \ell\nu\ell\nu$ в эксперименте АТЛАС на БАК при 13 ТэВ”
2. 53-я Зимняя Школа Петербургского Института Ядерной Физики НИЦ «Курчатовский Институт» (г. Санкт-Петербург, Россия, 2018) с постером: “ $H \rightarrow WW^* \rightarrow \ell\nu\ell\nu$ searches in the ATLAS 13 TeV data”
3. Молодежные конференции по теоретической и экспериментальной физике (МКТЭФ), (г. Москва, Россия, 2018) с докладом: “Изучение стандартного бозона Хиггса в канале $HWW\ell\nu\ell\nu$ в эксперименте АТЛАС на БАК при 13 ТэВ”
4. IV International Conference on Particle Physics and Astrophysics (ICPPA) (г. Москва, Россия, 2018) с постером: “ $H \rightarrow WW^* \rightarrow \ell\nu\ell\nu$ searches in the ATLAS 13 TeV data”
5. Молодежные конференции по теоретической и экспериментальной физике (МКТЭФ), (г. Москва, Россия, 2019) с докладом: “Анализ двухлептонных событий для задачи изучения стандартного бозона Хиггса в эксперименте АТЛАС на БАК при энергии 13 ТэВ на полной статистике событий”
6. Молодежные конференции по теоретической и экспериментальной физике (МКТЭФ), (г. Москва, Россия, 2020) с докладом: “Обнаружение сигнала от бозона Хиггса в механизме рождения vbf в канале распада $h \rightarrow WW^* \rightarrow \ell\nu\ell\nu$ на полной статистике при 13 ТэВ в АТЛАС на LHC”

Апробация

7. V International Conference on Particle Physics and Astrophysics (ICPPA) (г. Москва, Россия, 2020) с постером: “Observation of the VBF production in the $H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$ decay channel with the ATLAS detector”
8. Молодежные конференции по теоретической и экспериментальной физике (МКТЭФ), (г. Москва, Россия, 2021) с докладом: “Изучение рождения бозона Хиггса в механизме слияния векторных бозонов в канале $H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu e\nu/\mu\nu\mu\nu$ при 13 ТэВ в эксперименте АТЛАС”
9. International Conference on Particle Physics and Astrophysics (ICPPA) (г. Москва, Россия, 2022) с докладом: “Measurements of Higgs boson production through vector boson fusion in the $H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$ final state at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector”
10. Семинар ККТЭФ «Экспериментальная физика высоких энергий, физика ускорителей заряженных частиц и физико-химические исследования материалов» (г. Москва, Россия, 2023 г.) с докладом: “Изучение бозона Хиггса Стандартной модели в механизме рождения VBF в распаде $H \rightarrow WW^* \rightarrow \ell\nu\ell\nu$ в эксперименте ATLAS”

Спасибо за
внимание!

Содержимое

39. Нучная новизна и практическая значимость
40. Выступления (2)
41. Сечения при 13 ТэВ для $m_H=125.0$ ГэВ
42. Исследуемые моды распада для VBF
43. BR каналов распада H
44. Полное сечение процессов на LHC
45. Детектор CMS
46. Разрешение для подсистем ATLAS
47. Разрешение E и p_T в CMS
48. Реконструкция: электроны
49. Реконструкция: мюоны
50. Реконструкция: E_T^{miss} и E_T^{miss} Significance
51. Реконструкция: адронные струи
52. Реконструкция: адронные струи EMТоро
53. Реконструкция: адронные струи PFlow
54. Jet energy scale (JES)
55. Jet energy resolution (JER)
56. Светимость в Run2 (2015-2018)
57. Светимость в Run3 (2022-2023)
58. Восстановление $M(Z \rightarrow \ell\ell)$
59. Восстановление $M(J/\Psi \rightarrow \ell\ell)$
60. n_{jets} в событиях с Z-бозоном
61. p_T^{j0} в событиях с Z-бозоном
62. Фоновые процессы с малым вкладом
63. Наложение событий: эффективность отборов
64. Доля сторонних струй в $e\mu/\mu e$ -событиях
65. $H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$ (36 fb^{-1}): Run 1/Run 2
66. Многомерный анализ $H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$ с BDT (36 fb^{-1})
67. BDT
68. STXS сечения для VBF
69. STXS VBF: correlation and composition
70. Основные вклады в полную погрешность
71. Экспериментальная систематика
72. Теоретическая систематика
73. Теоретическая справка для процессов
74. Расчет сечения в анализе
75. DNN переменные
76. Алгоритм DNN: описание
77. Алгоритм DNN: определение понятий (1)
78. Алгоритм DNN: определение понятий (2)
79. Алгоритм DNN: примеры распределений
80. Анализ $H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$ с кин. отборами (139 fb^{-1}): оптимизация
81. Анализ $H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$ с кин. отборами (139 fb^{-1}): причины оптимизации
82. Выбор E_T^{miss} переменных для оптимизации
83. Оценка $Z\ell\ell$ фона в $H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu e\nu/\mu\nu\mu\nu$ (139 fb^{-1})
84. Анализ $H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$ с кин. отборами (139 fb^{-1}): итоговое количество событий
85. Результаты ATLAS и CMS

Научная новизна и практическая значимость

Научная новизна. Диссертационная работа выполнена в рамках участия НИЦ «Курчатовский институт» в международном эксперименте ATLAS в составе рабочей группы HWW, а тема входит в программу эксперимента по изучению бозона Хиггса SM и поиску новых частиц. Все результаты, представленные в диссертационной работе, являются новыми. Впервые обнаружен сигнал от рождения бозона Хиггса в механизме VBF со значимостью, существенно большей, чем 5σ . Изучение свойств бозона Хиггса в механизме рождения через слияние векторных бозонов в канале $H \rightarrow WW^* \rightarrow \ell\nu\ell\nu$ при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ проводилось лишь в эксперименте CMS на БАК. Конечное состояние с двумя мюонами и двумя электронами при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ не рассматривалось в эксперименте ATLAS.

Практическая значимость. Полученные и представленные в диссертации результаты заложили основу для новых исследований по улучшению точности измеренных характеристик в данном канале распада в последующих экспозициях на БАК. В частности, алгоритмы выделения малого сигнала при большом фоне на основе нейронных сетей, использованные в работе, могут применяться и в других областях науки и техники.

Выступления (2)

- Конференция Physics&Computing Russian Institutes meeting (г. Москва, Россия, 2017): “Кинематика адронных струй в событиях со стандартным бозоном Хиггса и в фонах при 8 ТэВ”
- Конференция Physics&Computing Russian Institutes meeting (г. Москва, Россия, 2018): “Simple cut-based VBF DF $H \rightarrow WW^* \rightarrow \ell\nu\ell\nu$ analysis of 2015-2016 data”
- Конференция Physics&Computing Russian Institutes meeting (г. Москва, Россия, 2019): “Cut-based VBF DF $H \rightarrow WW^* \rightarrow \ell\nu\ell\nu$ analysis based on release 21 with PFlow jet collection”
- Конференция Physics&Computing Russian Institutes meeting (г. Москва, Россия, 2021): “Исследование стандартного бозона Хиггса в канале $H \rightarrow WW^* \rightarrow \ell\nu\ell\nu$ в эксперименте ATLAS на LHC”
- Конференция Physics&Computing Russian Institutes meeting (г. Москва, Россия, 2022): “Изучение канала распада $H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu e\nu/\mu\nu\mu\nu$ при 13 ТэВ в эксперименте ATLAS”
- Workshop с докладом на тему: “VBF topology: typical characteristics” (Церн, Швейцария, 2018)
- Workshop с докладом на тему: “VBF production of Higgs boson in the $H \rightarrow WW^* \rightarrow \ell\nu\ell\nu$ decay channel at 13 ТэВ with the ATLAS detector” (Церн, Швейцария, 2021)
- Workshop с докладом на тему: “SF ggF+2jets and VBF DNN analysis results” (Церн, Швейцария, 2022)

1. Сечения при 13 ТэВ для $m_H=125.0$ ГэВ

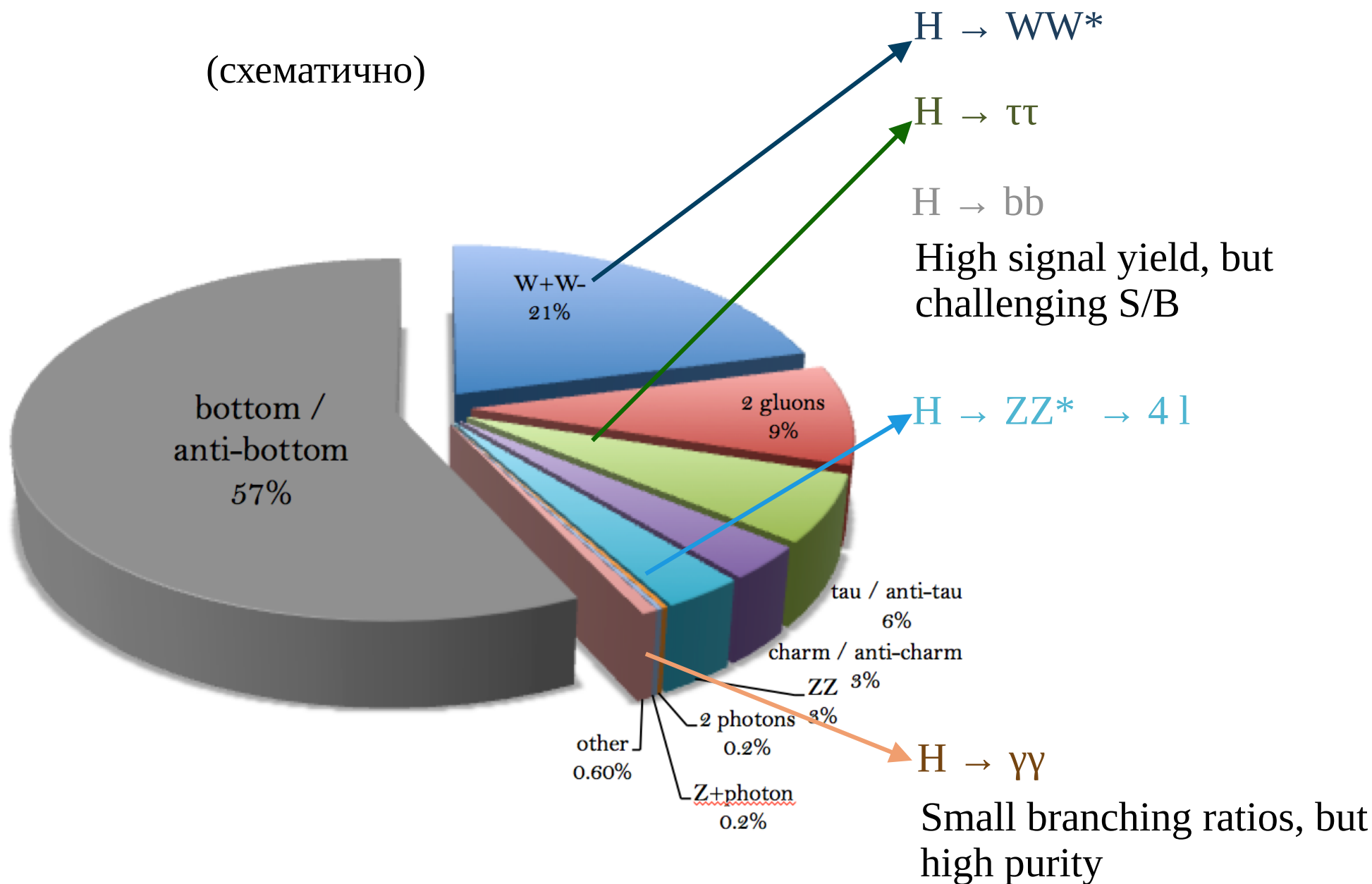
All ggF and VBF numbers are based upon complex-pole-scheme (CPS), while WH/ZH and ttH numbers are with zero-width-approximation (ZWA).

CERNYellowReport

	Cross Section (pb)	+QCD Scale %	-QCD Scale %	+(PDF+ α_s) %	-(PDF+ α_s) %	Accuracy
ggF	43.92	+7.4	-7.9	+7.1	+7.1	NNLO+NNLL QCD and NLO EW
vbf	3.748	+0.7	-0.7	+3.2	+3.2	NNLO QCD and NLO EW
WH	1.380	+0.7	+0.7	+0.7	+0.7	NNLO QCD and NLO EW
pp \rightarrow ZH	0.8696	+3.8	-3.8	+2.2	-2.2	NNLO QCD and NLO EW
gg \rightarrow ZH	0.1057	+25.7	-20.5	+5.1	-5.1	NLO QCD with $O(\alpha_s^3)$
ttH	0.5085	+5.7	-9.3	+8.8	-8.8	NLO QCD

1. Исследуемые моды распада для VBF в АТЛАС

(схематично)



Относительная вероятность каналов распада H в указанные конечные состояния для $m_H = 125.1$ ГэВ

4ℓ				ℓνℓν				
$H \rightarrow \ell^+\ell^-\ell^+\ell^-$ $\ell=e,\mu,\tau$	$H \rightarrow \ell^+\ell^-\ell^+\ell^-$ $\ell=e,\mu$	$H \rightarrow e^+e^-e^+e^-$	$H \rightarrow e^+e^-\mu^+\mu^-$	$H \rightarrow \ell^+\ell^-\nu_\ell\nu_\ell$ $\ell=e, \mu \text{ or } \tau,$ $\nu=\text{any}$	$H \rightarrow \ell^+\ell^-\nu_e\nu_e$ $\ell=e \text{ or } \mu,$ $\nu=\text{any}$	$H \rightarrow e^+\nu_e e^-\nu_e$	$H \rightarrow e^+\nu_e \mu^-\nu_\mu$	ΔBR (%)
2.79E-04	1.26E-04	3.30E-05	5.99E-05	2.36E-02	1.06E-02	2.54E-03	2.54E-03	4.24
		2ℓ2q		ℓν2q	2ν2q	4q	4 fermions	
$H \rightarrow \nu\nu\nu\nu$ $\nu=\text{any} (*)$	$\Delta\text{BR} (%)$	$H \rightarrow \ell^+\ell^-qq$ $\ell=e,\mu \text{ or } \tau,$ $q=udcsb$	$H \rightarrow \ell^+\ell^-qq$ $\ell=e \text{ or } \mu,$ $q=udcsb$	$H \rightarrow \ell^+\nu_\ell qq$ $\ell=e \text{ or } \mu,$ $q=udcsb (**)$	$H \rightarrow \nu_e\nu_e qq$ $\nu=\text{any},$ $q=udcsb$	$H \rightarrow qqqq$ $q=udcsb$	$H \rightarrow ffff$ $\nu=\text{any of}$ fermion	ΔBR (%)
1.13E-03	-	3.74E-03	2.49E-03	1.10E-01	1.10E-01	1.10E-01	2.42E-01	4.24

* неопределенности получены изсоответствующего состояния в $H \rightarrow ZZ^*$

** зарядово-сопряженное состояние не включено

Таблица 1 – распад W^+ бозона (W^- аналогично)

Таблица 2 – распад Z бозона

Mode	Табл.1	Fraction (Γ_i/Γ)
Γ_1 $\ell^+\nu$	[a]	$(10.80 \pm 0.09) \%$
Γ_2 $e^+\nu$		$(10.75 \pm 0.13) \%$
Γ_3 $\mu^+\nu$		$(10.57 \pm 0.15) \%$
Γ_4 $\tau^+\nu$		$(11.25 \pm 0.20) \%$
Γ_5 hadrons		$(67.60 \pm 0.27) \%$

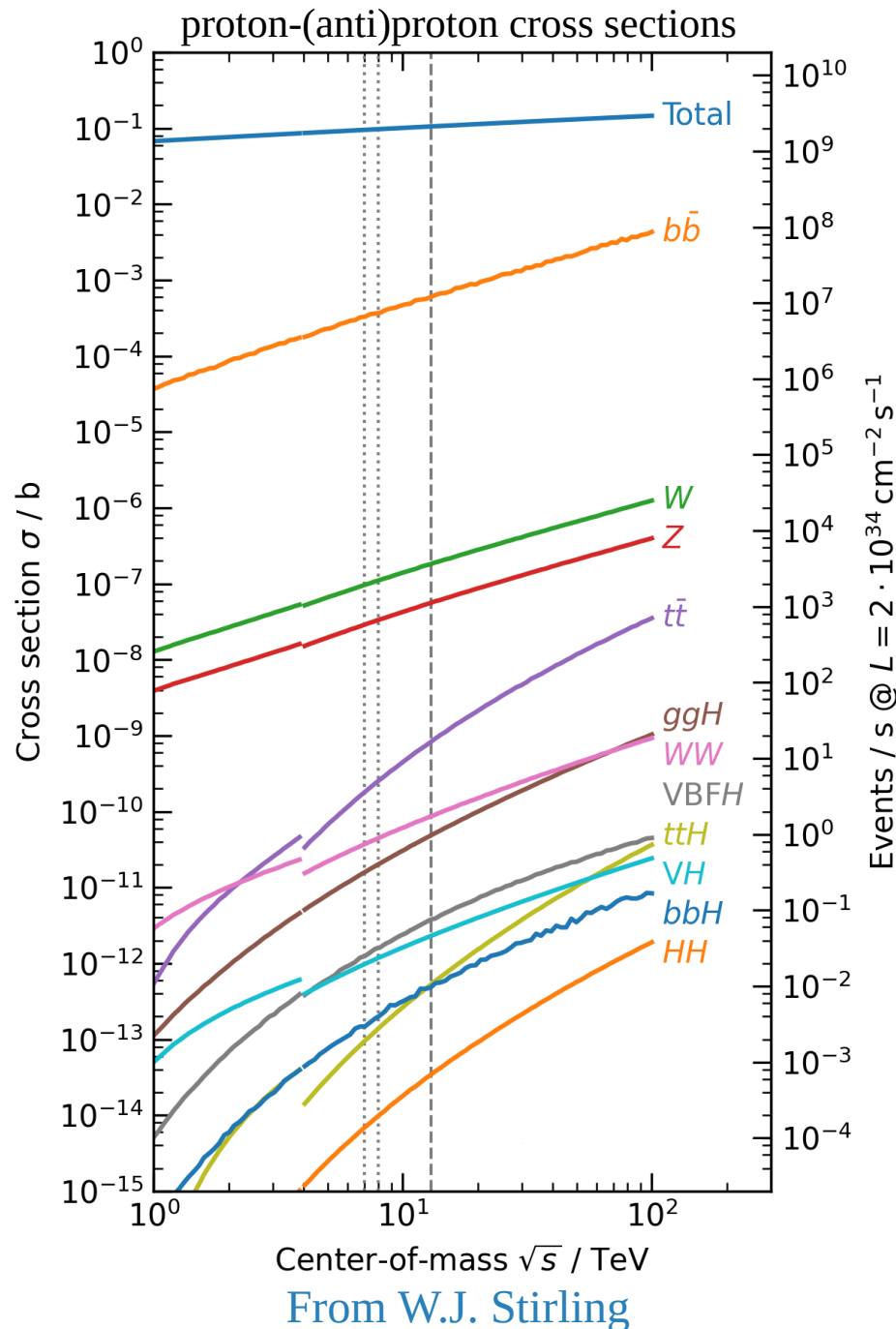
[a] ℓ indicates each type of lepton (e, μ, and τ), not sum over them.

Mode	Табл.2	Fraction (Γ_i/Γ)
Γ_1 e^+e^-		$(3.3632 \pm 0.0042) \%$
Γ_2 $\mu^+\mu^-$		$(3.3662 \pm 0.0066) \%$
Γ_3 $\tau^+\tau^-$		$(3.3696 \pm 0.0083) \%$
Γ_4 $\ell^+\ell^-$	[b]	$(3.3658 \pm 0.0023) \%$
Γ_5 $\ell^+\ell^-\ell^+\ell^-$	[c]	$(3.5 \pm 0.4) \times 10^{-6}$
Γ_6 invisible		$(20.000 \pm 0.055) \%$
Γ_7 hadrons		$(69.911 \pm 0.056) \%$
Γ_8 $(u\bar{u} + c\bar{c})/2$		$(11.6 \pm 0.6) \%$
Γ_9 $(d\bar{d} + s\bar{s} + b\bar{b})/3$		$(15.6 \pm 0.4) \%$
Γ_{10} $c\bar{c}$		$(12.03 \pm 0.21) \%$
Γ_{11} $b\bar{b}$		$(15.12 \pm 0.05) \%$

[b] ℓ indicates each type of lepton (e, μ, and τ), not sum over them.

[c] Here ℓ indicates e or μ.

1. Полное сечение процессов на LHC



Dotted line – $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV

Dashed lines – $\sqrt{s} = 13$ TeV

$1 \text{ b} = 10^{-24} \text{ cm}^2$

At LHC $\sqrt{s} = 13$ TeV:

Total inelastic pp cross section: $\sigma = \text{O}(100\text{mb})$

$b\bar{b}$ production cross section: $\sigma = \text{O}(100\mu\text{b})$

Z boson production cross section: $\sigma = \text{O}(10\text{nb})$

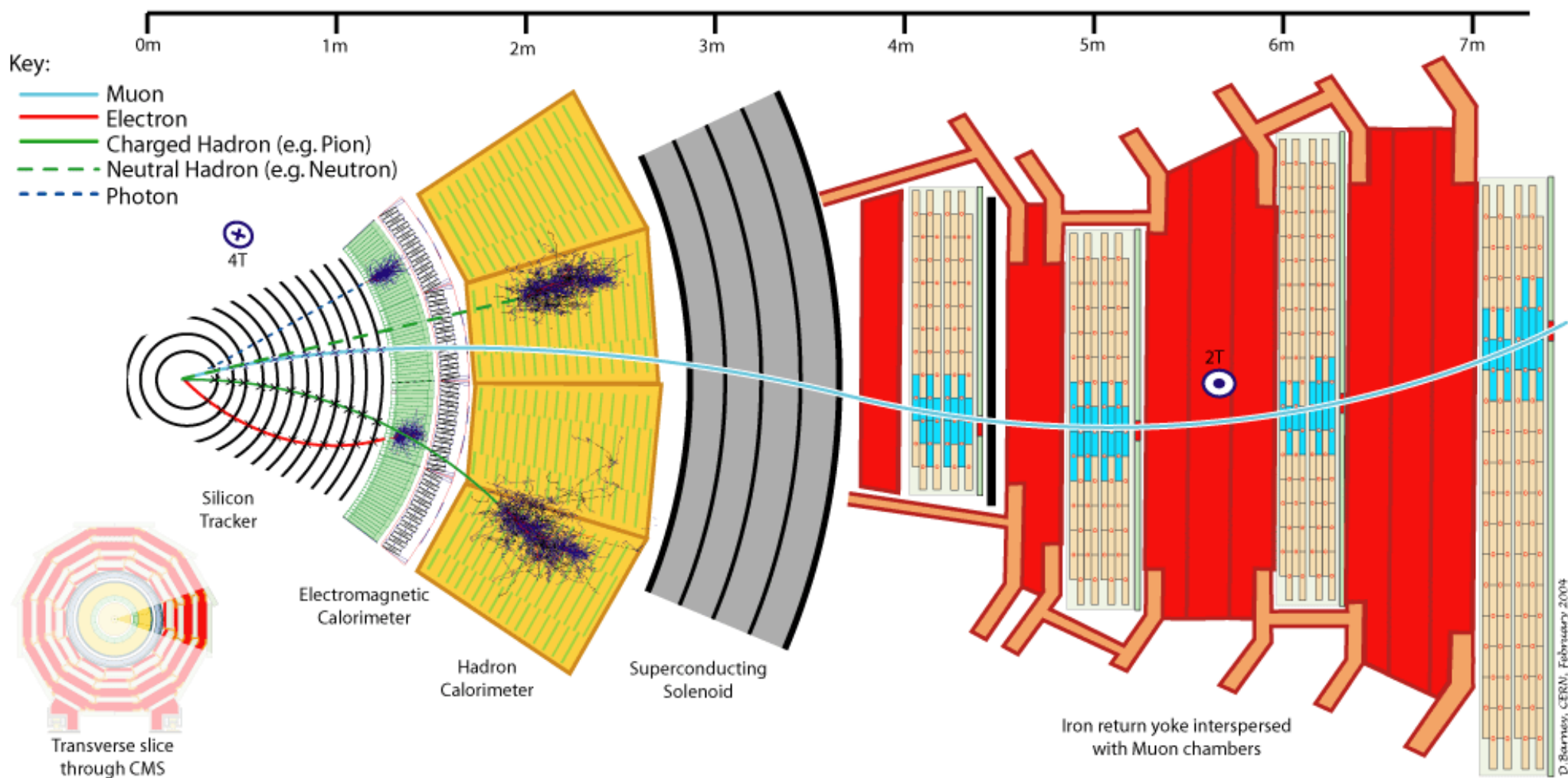
$t\bar{t}$ production cross section: $\sigma = \text{O}(1\text{nb})$

WW production cross section: $\sigma = \text{O}(100\text{pb})$

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

SM Higgs production cross section is expected to be **9÷10 orders** of magnitude smaller than total inelastic!

2. Детектор CMS



3. Разрешение для подсистем ATLAS

Подсистемы ATLAS	Область перекрытия	Разрешение, ГэВ
Внутренний детектор (ID)	$|\eta| < 2.5$	$\frac{\sigma(p_T)}{p_T} = 0.05\% \times p_T \oplus 1\%$
Калориметр		
ЭМ (центральная ($|\eta| < 1.48$) + торцевые части ($1.375 < |\eta| < 3.2$))	$|\eta| < 3.2$	$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{10\%}{\sqrt{E}} \oplus 0.7\%$
Адронный (центральная $|\eta| < 1.48$) + торцевые части ($1.375 < |\eta| < 3.2$))	$|\eta| < 3.2$	$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{50\%}{\sqrt{E}} \oplus 3\%$
Адронный (передняя часть)	$3.1 < |\eta| < 4.9$	$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{100\%}{\sqrt{E}} \oplus 10\%$
Мюонная система (MS)	$|\eta| < 2.7$	$\frac{\sigma(p_T)}{p_T} = \left\{ \begin{array}{l} 2\% @ 50 GeV \\ 10\% @ 1 TeV \end{array} \right\}$

3. Разрешение E и p_T в CMS

Подсистемы CMS	Область перекрытия	Разрешение, ГэВ	
Внутренний детектор (ID)	$|\eta| < 2.5$	$\frac{\sigma(p_T)}{p_T} = 0.015\% \times p_T \oplus 0.5\%$	[1]
Калориметрия			
ЭМ (центральная ($|\eta| < 1.4$) + торцевые части ($1.4 < |\eta| < 3.0$))	$|\eta| < 3.0$	$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{2.8\%}{\sqrt{E}} \oplus \frac{0.12 GeV}{E} \oplus 0.3\%$	[2]
Адронный (центральная $|\eta| < 1.4$) + торцевые части ($1.3 < |\eta| < 3.0$))	$|\eta| < 3.2$	$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{100\%}{\sqrt{E}} \oplus 5\%$	[3]
Адронный (передняя часть)	$3.0 < |\eta| < 5.2$	$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{280\%}{\sqrt{E}} \oplus 11\%$	[4]
Мюонная система (MS)	$|\eta| < 2.5$	$\frac{\sigma(p_T)}{p_T} = 1.2\% \text{ for } < 100 GeV$ $\frac{\sigma(p_T)}{p_T} = 4.5\% \cdot \sqrt{p_T / TeV} \text{ for } > 100 GeV$	[5]

$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{84.7\%}{\sqrt{E}} \oplus 7.6\% \quad [4]$$

1 - CMS Physics : Technical Design Report Volume 2: Physics Performance

4 - Development of the CMS detector for the CERN LHC Run 3

2 - The CMS hadron calorimeter project : Technical Design Report

5 - The muon project

3 - Design, performance, and calibration of CMS hadron-barrel calorimeter wedges

3. Реконструкция: электроны

1. Лептоны

Много фоновых событий, помимо первичных изолированных кандидатов электронов и мюонов, поэтому вводят дополнительные критерии **идентификации** и **изоляции**.

1.1. Электроны

- реконструкция по энергетическим кластерам из ЭМ калориметра ($E_T^{\text{miss}} > 2.5$ ГэВ) + связанным с кластером трекам во внутреннем детекторе
 - эффективность реконструкции для электронов с $E_T^{\text{miss}} > 15$ ГэВ более 97%
- критерии **идентификации**: “loose”, “medium” и “tight”
 - эффективность отбора сигнальных электронов и фоновых объектов с $E_T^{\text{miss}} = 60$ ГэВ составляет 96% и 0.3% («loose»), 94% и 0.15% («medium»), 90% и 0.1% («tight»)
 - HWW анализ: “tight” для $15 < p_T < 25$ ГэВ и “medium” для $p_T > 25$ ГэВ
- критерии **изоляции**: калориметрическая $E_T^{\text{cone}20}$, выделившаяся в конусе с радиусом $\Delta R=0.2$ вокруг кластера электронного кандидата, и трековая $p_T^{\text{conevar}20}$ в конусе с переменным радиусом $\Delta R = \min(0.2; 10 \text{ ГэВ}/E_T^e)$
- критерии проверки, что электрон из первичной вершины, для треков ассоциированных с электронами:
 $|d_0/\sigma_{d_0}| < 5 \quad |z_0 \sin(\theta)| < 0.5 \text{ mm}$
где d_0 – прицельный параметр (мин. расстояние от трека до оси пучка), σ_{d_0} – погрешность d_0 с учетом ширины профиля пучка. z_0 - расстояние вдоль оси пучка между точкой измерения d_0 и первичной вершиной

3. Реконструкция: мюоны

1.2. Мюоны

- Треки мюонов реконструируются независимо во внутреннем детекторе и в мюонном спектрометре — сопоставление информации из ID и MS, типы мюонов:
 - комбинированный (Combined, CB) мюон восстанавливается по совместимым друг с другом трекам из ID и MS; эффективно для быстрых мюонов с $p_T > 4$ ГэВ в области $|\eta| < 2.5$
 - сегментно-меченый (Segment-Tagged, ST) мюон имеет полный трек в ID и отдельные сегменты трека в MS (нет полного трекового восстановления в MS); характерно для мюонов с низкими p_T
 - калориметро-меченый (Calorimeter-Tagged, CT) мюон реконструируется путем сопоставления трека из ID с выделившейся энергией от слабоионизирующей частицы в калориметре; свойственно для мюонов в области $|\eta| < 0.1$ (не охватывается MS)
 - автономно-реконструированный (Stand-Alone, SA) мюон восстанавливается только по треку из MS; характерно для области $|\eta| > 2.5$, которые не охватываются внутренним детектором.
- критерии идентификации: “loose”, “medium” и “tight”
 - эффективность быстрых мюонов с $p_T > 100$ ГэВ и фоновых объектов составляет 98.1% и 0.76% («loose»), 96.1% и 0.17% («medium»), 91.8% и 0.17% («tight»)
- - HWW анализ: “tight” для $15 < p_T < 25$ ГэВ и “tight” для $p_T > 25$ ГэВ, $|\eta| < 2.5$
- критерии изоляции: калориметрическая $E_T^{\text{cone}20}$, выделившаяся в конусе с радиусом $\Delta R=0.2$ вокруг кластера электронного кандидата, и трековая $p_T^{\text{cone}30}$ в конусе с переменным радиусом $\Delta R = \min(0.3; 10 \text{ ГэВ}/p_T^\mu)$
- критерии проверки, что электрон из первичной вершины, для треков ассоциированных с электронами: $|d_0/\sigma_{d_0}| < 3$ $|z_0 \sin(\theta)| < 0.5 \text{ mm}$
где d_0 – прицельный параметр (мин. расстояние от трека до оси пучка), σ_{d_0} – погрешность d_0 с учетом ширины профиля пучка. z_0 - расстояние вдоль оси пучка между точкой измерения d_0 и первичной вершиной

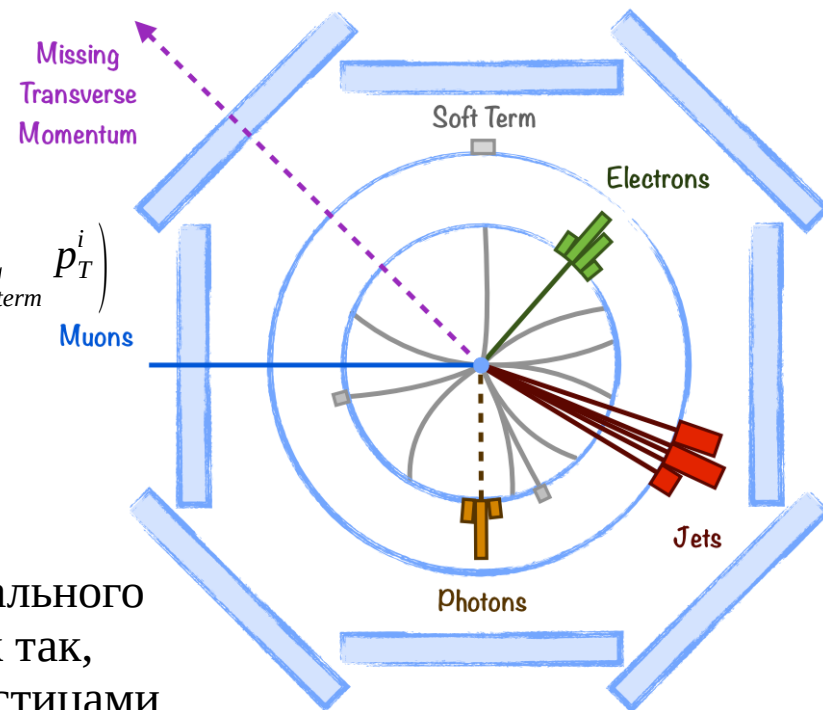
3. Реконструкция: E_T^{miss} и E_T^{miss} Significance

2.1. E_T^{miss}

Величина E_T^{miss} рассчитывается как отрицательная векторная сумма выбранных и калиброванных «жестких» объектов и «мягкой» оставляющей:

$$E_x^{miss} = - \left(\sum_{i \in \text{muons}} p_T^i + \sum_{i \in \text{electrons}} p_T^i + \sum_{i \in \text{photons}} p_T^i + \sum_{i \in \text{hadronic}} p_T^i + \sum_{i \in \text{jets}} p_T^i + \sum_{i \in \text{softterm}} p_T^i \right)$$

$$E_T^{miss} = \sqrt{(E_x^{miss})^2 + (E_y^{miss})^2} \quad \phi^{miss} = \tan^{-1} \frac{E_y^{miss}}{E_x^{miss}}$$



2.2. E_T^{miss} Significance

E_T^{miss} Significance (S) оценивается на основе методов максимального правдоподобия с использованием смоделированных выборок так, чтобы отделить события с реальными не обнаруженными частицами с высоким p_T от событий, где ненулевая E_T^{miss} является результатом эффектов импульсного разрешения детектора.

S: проверка гипотезы о том, что общий поперечный импульс, переносимый невидимыми частицами p_T^{inv} , равен 0, в противовес гипотезе о том, что p_T^{inv} отличен от 0.

Также S можно вычислить в L-V базисе:

$$S^2 = 2 \ln \left(\frac{\max_{p_T^{inv} \neq 0} L(E_T^{miss} \vee p_T^{inv})}{\max_{p_T^{inv} = 0} L(E_T^{miss} \vee p_T^{inv})} \right) = \frac{|E_T^{miss}|^2}{\sigma_L^2 (1 - \rho_{LT}^2)}$$

ρ_{LT}^2 - коэффициент корреляции продольных (L) и поперечных (T) измерений.

σ_L^2 - суммарное отклонение в продольном (L) направлении относительно вектора E_T^{miss}

3. Реконструкция: адронные струи

3. Адронные струи

Адронные струи — это объекты, представляющие собой узконаправленные адронные ливни, которые возникают при адронизации кварков или глюонов.

3.1. Алгоритм реконструкции anti- k_t

- две меры расстояния: d_{ij} - расстояние между объектами (частицами, треками или кластерами энерговывделений), а d_{iB} - расстояние между определенным объектом и осью пучка:

$$d_{ij} = d_{ji} = \min\left(\frac{1}{p_{T,i}^2}, \frac{1}{p_{T,j}^2}\right) \times \frac{\Delta R_{ij}^2}{R^2} \quad d_{iB} = \frac{1}{p_{T,i}^2}$$

- Перебирая все объекты, находят \min значения для d_{ij} и d_{iB} :
 - $\min d_{ij} < \min d_{iB}$: объединение объектов i и j в один объект, суммируя их 4-импульсы
 - $\min d_{iB} < \min d_{ij}$: объект i - искомая струя, объект i удаляется из рассматриваемого множества
- Перерасчет всех расстояний нового множества объектов → итерация повторяется до тех пор, пока не останется ни одного объекта
- Из определения d_{ij} : в первую очередь объединяются объекты с высоким поперечным импульсом, в результате получаются струи почти идеальной конической формы с радиусом R .

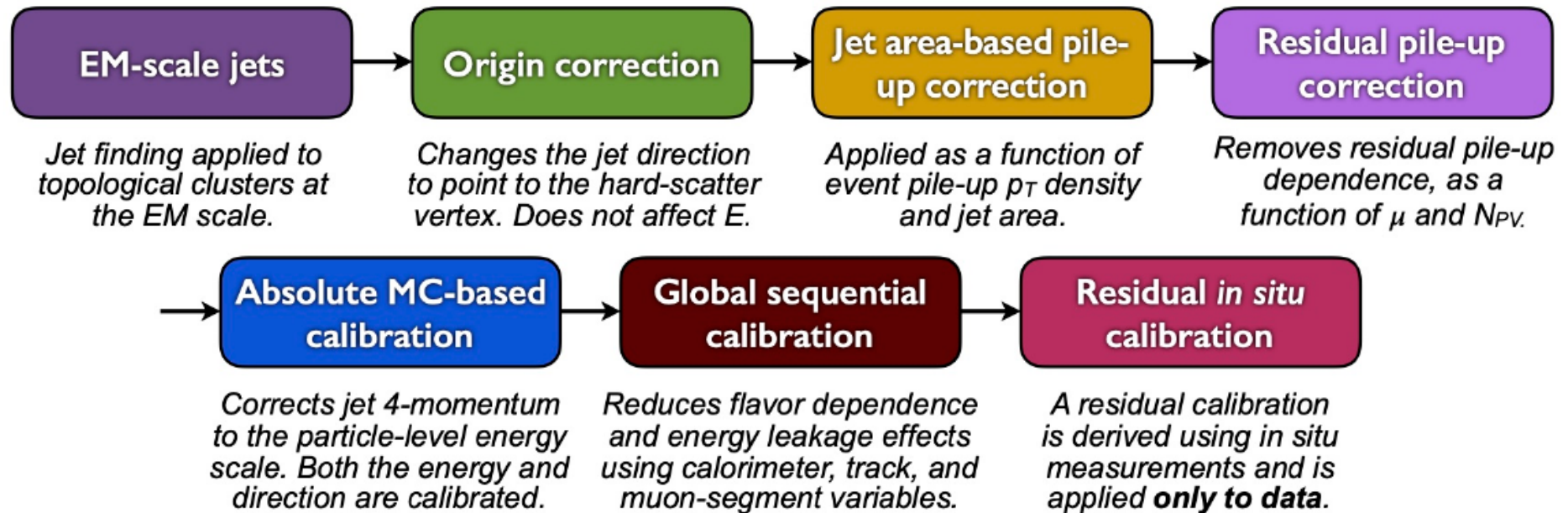
3.2. Трековые струи (из Run1)

- Используются треки ID с $p_T > 0.5$ ГэВ, ассоциированные с первичной вершиной
- Характеристики струи: радиус $R=0.2$, $p_T > 20$ ГэВ, $|\eta| < 2.5$

3. Реконструкция: адронные струи EMТоро

3.3. EMТоро

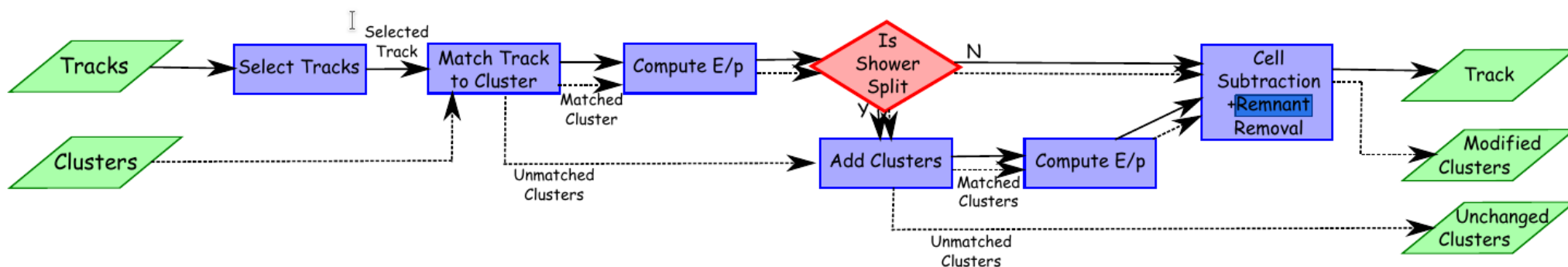
- Калориметрические струи, anti-kT с $R=0.4$
- Алгоритм на основе топологических кластеров из энерговыделений в ячейках калориметра в поперечном и продольном направлении
- Некалиброванные струи: $|\eta| < 4.5$ ГэВ и $p_T > 7$ ГэВ (струя считается восстановленной)
- Перед реконструкцией применяется калибровка топо-кластера на EM шкалу (EM scale jet на схеме), а после - калибровка адронной струи на энергетическое разрешение струи (JES)
- Схема калибровки струи (все этапы, кроме origin correction, корректируют 4-импульс струи) - коррекция на угол вылета, удаление энергии наложенных событий, калибровка по хорошо восстановленным Z или γ .



3. Реконструкция: адронные струи PFlow

3.4. PFlow

- Топокластеры из EMТоро совместно с ID Track формируют основной вклад в алгоритм
- Удаляет пересечения между импульсным (ID) и энергетическими (калориметр) измерениями
- Для заряженных частиц измерения в калориметре вычитаются из наблюдаемых топокластеров и заменяются на импульсы треков, которые соответствуют этим кластерам.
- Треки должны удовлетворять требованиям: $|\eta| < 2.5$ ГэВ и $0.5 < p_T < 40$ ГэВ
- Некалиброванные струи: $|\eta| < 4.5$ ГэВ и $p_T > 7$ ГэВ (восстановленные струи), калибровка как и в EMТоро струях

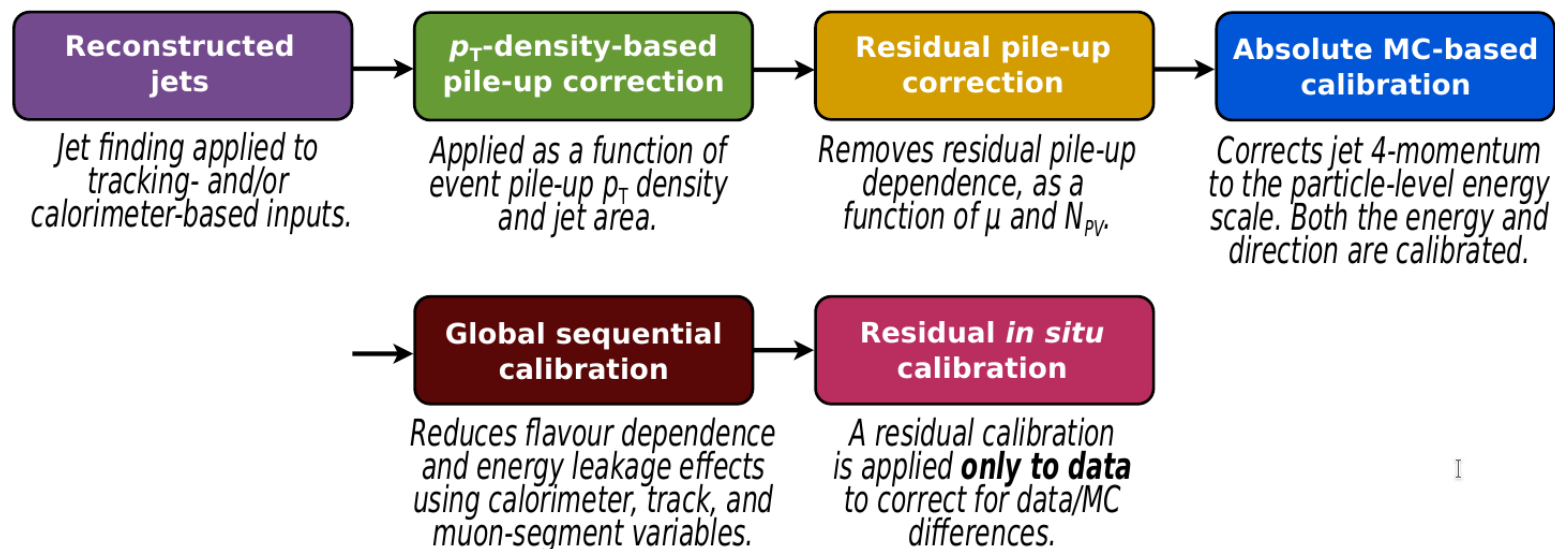


- Благодаря использованию информации о треках увеличивается чувствительность и улучшается точность.

3. Jet energy scale (JES)

Калибровка шкалы энергии струи восстанавливает энергию струи до уровня струй, восстановленных на уровне частиц.

Реконструированные струи (1) предварительно проходят изначальную калибровку для улучшения разрешения η струи. Это делается путем пересчета четырехимпульса струи так, чтобы он указывал на основную вершину, а не на центр детектора.



- (2) (3) **Pile-up corrections**: удаляют избыточную энергию за счет дополнительных протон-протонных взаимодействий внутри того же (in-time) или близлежащих (out-of-time) пересечений сгустков; два компонента - поправки, основанной на площади струи и плотности поперечного импульса события (2) и остаточной поправки (3), полученной в результате моделирования MC и параметризованной как функция двух параметров: среднего числа взаимодействий на пересечение сгустка (μ) и числа восстановленных первичных вершин в событии (NPV).
- (4) **The absolute JES calibration**: корректирует струю так, чтобы она согласовывалась по энергии и направлению с истинными струями из событий dijet MC
- (5) **Global sequential calibration**: полученная на основе событий dijet MC; улучшает разрешение p_T струи и связанные с ней неопределенности за счет устранения зависимости восстановленного отклика струи от переменных, построенных с использованием информации из трекера, калориметра и мюонных систем детектора
- (6) **Residual in situ calibration**: для корректировки оставшихся различий между данными и моделированием MC; он получен с использованием хорошо измеренных эталонных объектов, включая фотоны, Z-бозоны и хорошо калиброванные струи с низким p_T , причем последние используются для калибровки струй с высоким p_T
- Этапы 2-6 применялись для data и MC, этап 7 — только для data

3. Jet energy resolution (JER)

Точное знание энергетического разрешения струи (JER) важно для детальных измерений процессов рождения струи SM, измерений и изучения свойств частиц SM, распадающихся на струи (например, W/Z-бозонов, топ-кварков), а также для поиска физика за пределами SM с участием струй. JER также влияет на недостающий поперечный импульс (E_T^{miss}), который играет незаменимую роль во многих поисках новой физики и измерениях, связанных с частицами, распадающимися на нейтрино, и, таким образом, зависит от хорошо восстановленного недостающего импульса.

Зависимость относительного JER от поперечного импульса струи может быть параметризована с использованием функциональной формы, ожидаемой для разрешения на основе калориметра, с тремя независимыми вкладками, а именно шумовым (N), стохастическим (S) и постоянным (C) членами.

$$\frac{\sigma(p_T)}{p_T} = \frac{N}{p_T} \oplus \frac{S}{\sqrt{p_T}} \oplus C$$

Шумовой член: обусловлен вкладом электронного шума в сигнал, измеряемый входной электроникой детектора, а также шумом из-за наложений; значительный в области низких p_T , ниже ~ 30 ГэВ

Стохастический член: определяет статистические флуктуации количества выделяемой энергии; до нескольких сотен

Постоянный член: соответствует флуктуациям, которые составляют постоянную долю, например, флуктуации энерговыделения в пассивном материале, начальной точке адронных ливней и неравномерности отклика по калориметру; доминирует в области высоких значений p_T , примерно выше 400 ГэВ.

Для измерения JER необходимо точно измерить импульс струи, что означает, что струи должны либо отталкиваться от эталонного объекта, импульс которого можно точно измерить, либо уравниваться друг относительно друга в четко определенной дистрибутивной системе.

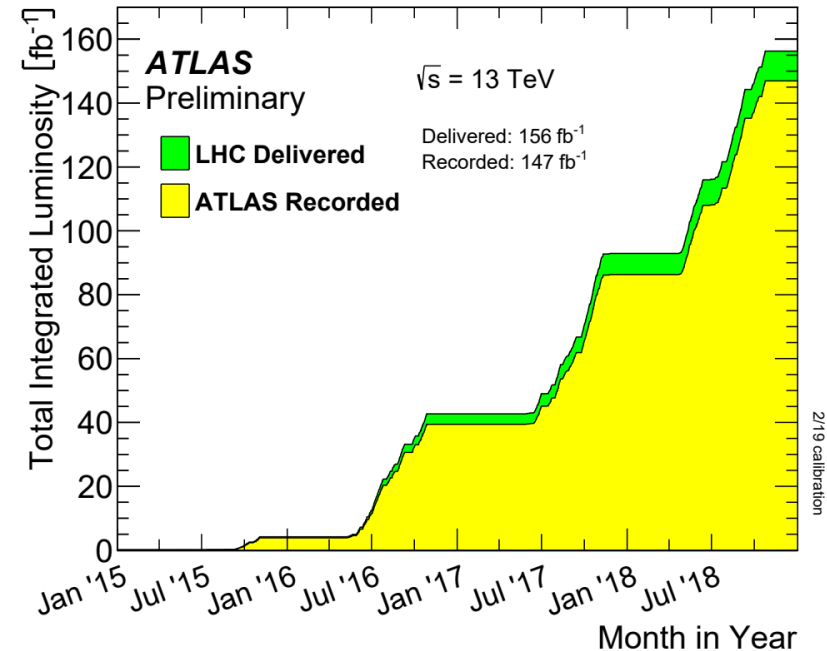
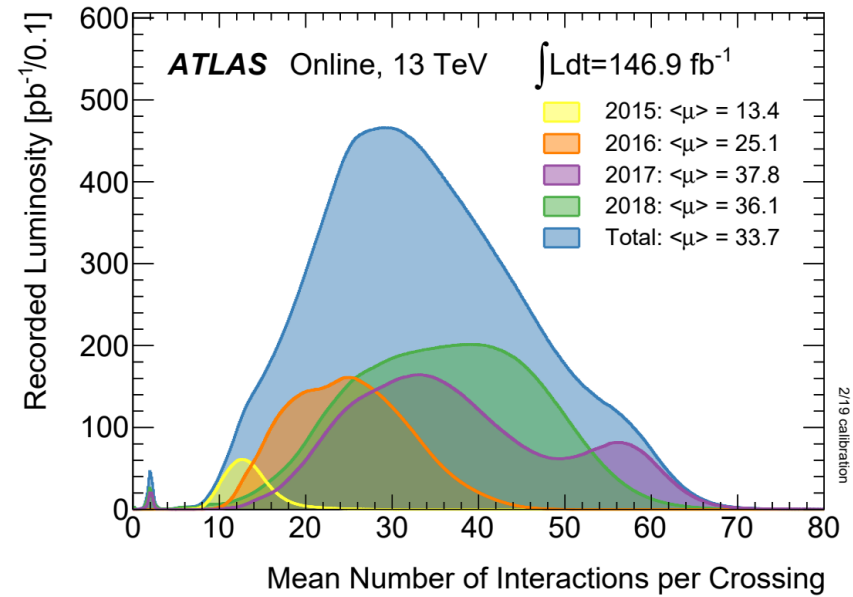
3. Светимость в Run2 (2015-2018)

Среднее число взаимодействий на пересечение, которое соответствует среднему значению распределения Пуассона числа взаимодействий на пересечение, рассчитанному для каждой пары сталкивающихся сгустков:

$$\mu = \mathcal{L}_{bunch} \times \sigma_{inel} / f_r$$

\mathcal{L}_{bunch} — мгновенная светимость сгустка, σ_{inel} — неупругое сечение (~ 80 мб для столкновений с энергией 13 ТэВ), а f_r — частота цикла ЛНС.

Суммарная интегральная светимость.
Совокупная светимость в зависимости от времени, переданная (зеленый) и зарегистрированная ATLAS (желтый) во время стабильных пучков для pp-столкновений с энергией центра масс 13 ТэВ



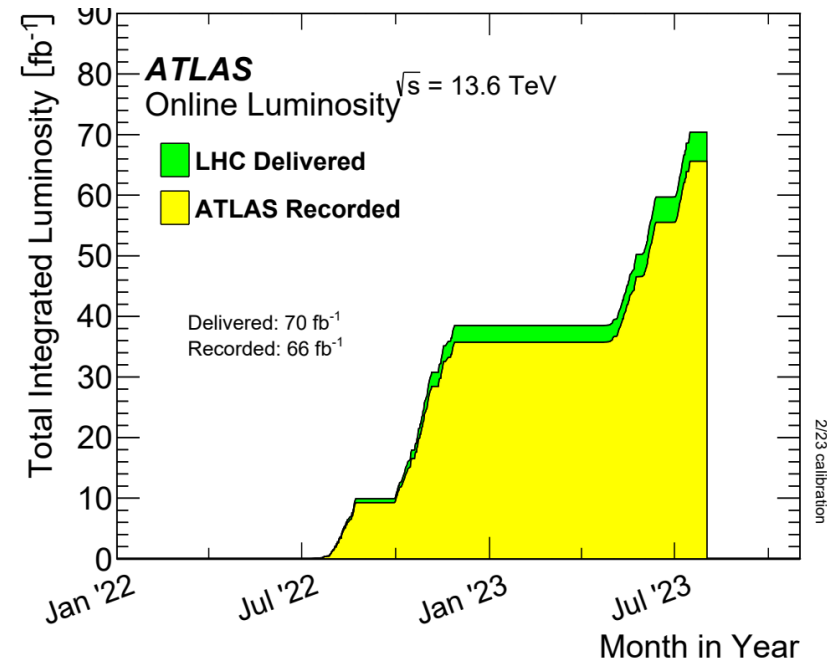
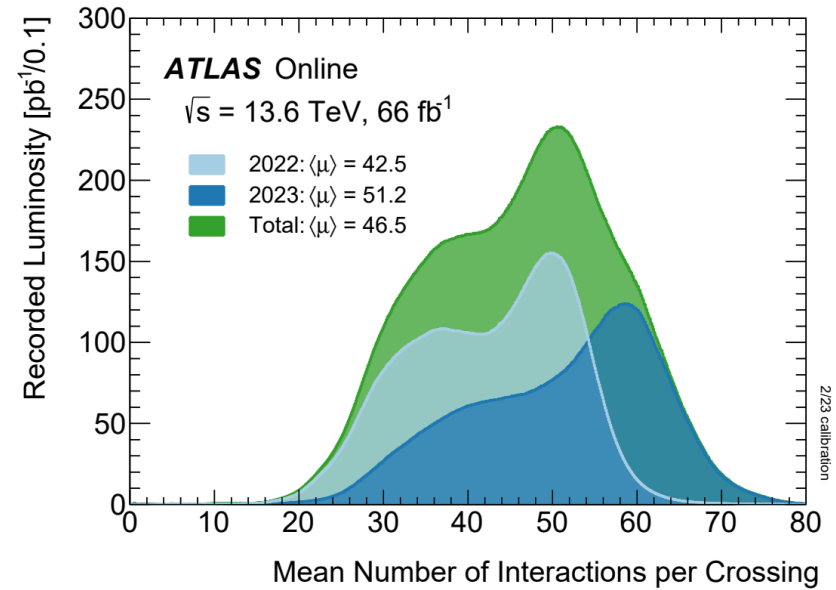
3. Светимость в Run3 (2022-2023)

Среднее число взаимодействий на пересечение, которое соответствует среднему значению распределения Пуассона числа взаимодействий на пересечение, рассчитанному для каждой пары сталкивающихся сгустков:

$$\mu = \mathcal{L}_{\text{bunch}} \times \sigma_{\text{inel}} / f_r$$

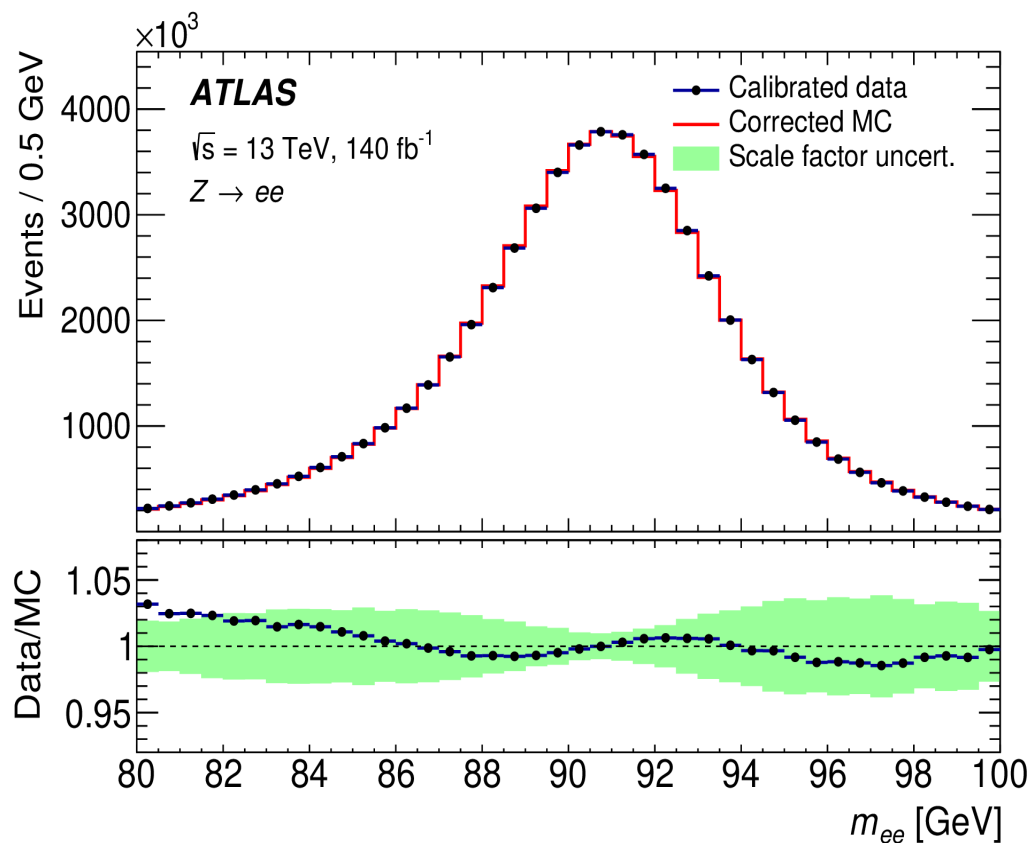
$\mathcal{L}_{\text{bunch}}$ — мгновенная светимость сгустка, σ_{inel} — неупругое сечение (~ 80 мб для столкновений с энергией 13.6 ТэВ), а f_r — частота цикла LHC.

Суммарная интегральная светимость.
Совокупная светимость в зависимости от времени, переданная (зеленый) и зарегистрированная ATLAS (желтый) во время стабильных пучков для pp-столкновений с энергией центра масс 13.6 ТэВ



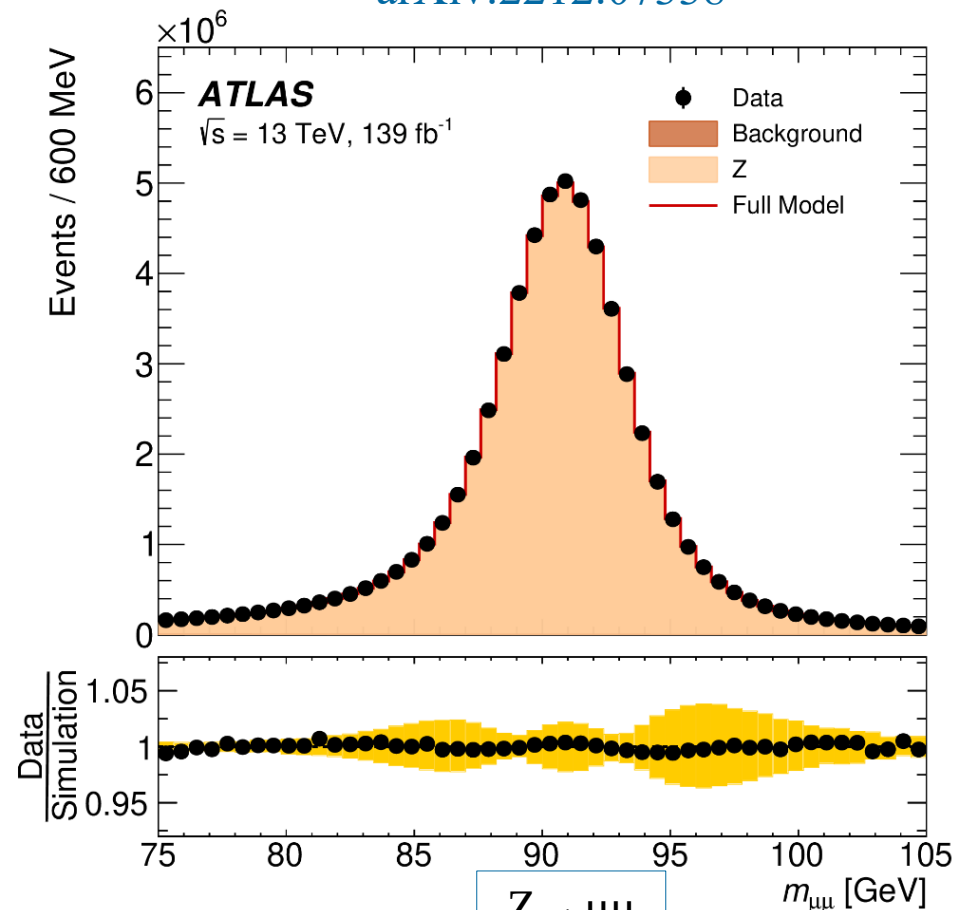
3. Восстановление инвариантной массы $Z \rightarrow \ell\ell$

arXiv:2308.13362



$Z \rightarrow ee$

arXiv:2212.07338

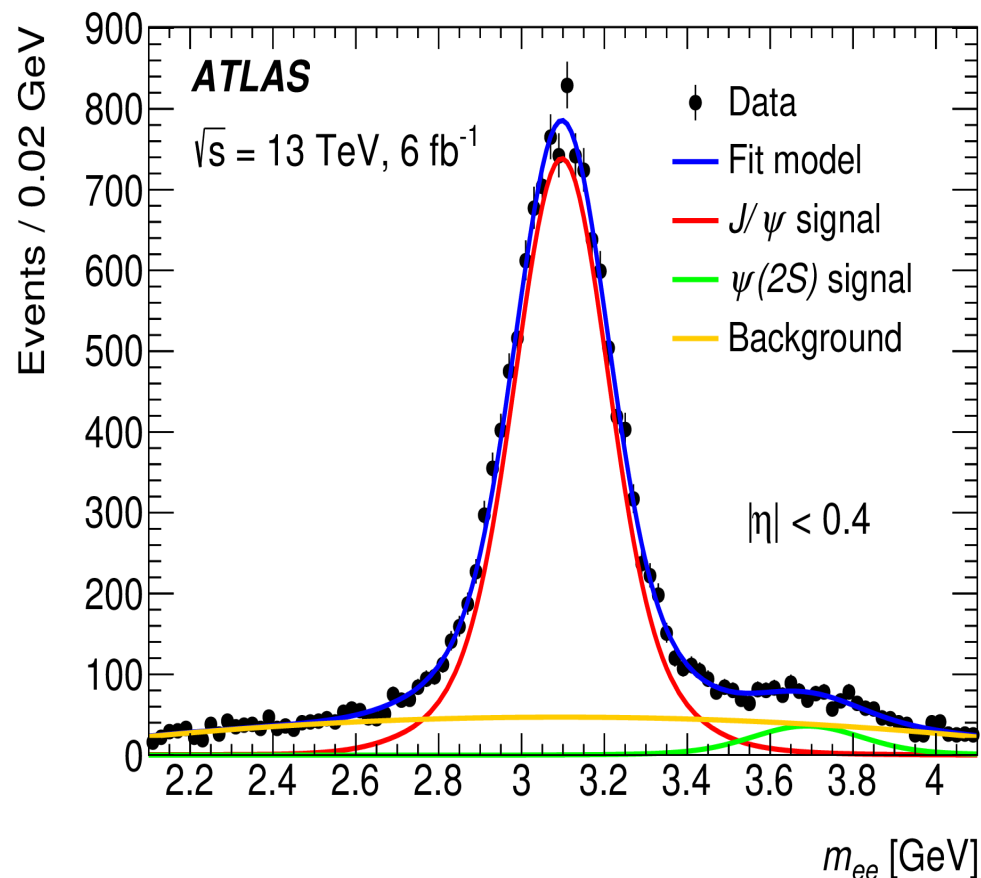


$Z \rightarrow \mu\mu$

Отличное восстановление массы Z-бозона в АТЛАС на полной статистике экспериментальных данных 2015 – 2018 гг.

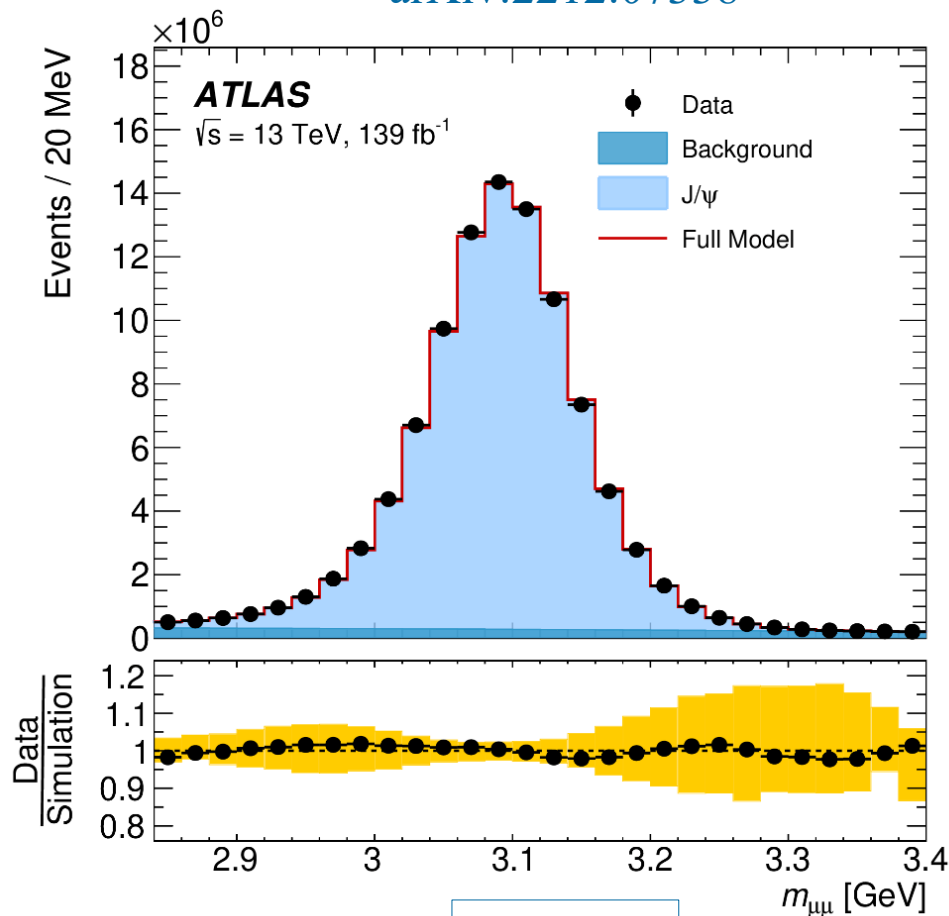
3. Восстановление инвариантной массы $J/\psi \rightarrow \ell\ell$

arXiv:2308.13362



$J/\psi \rightarrow ee$

arXiv:2212.07338



$J/\psi \rightarrow \mu\mu$

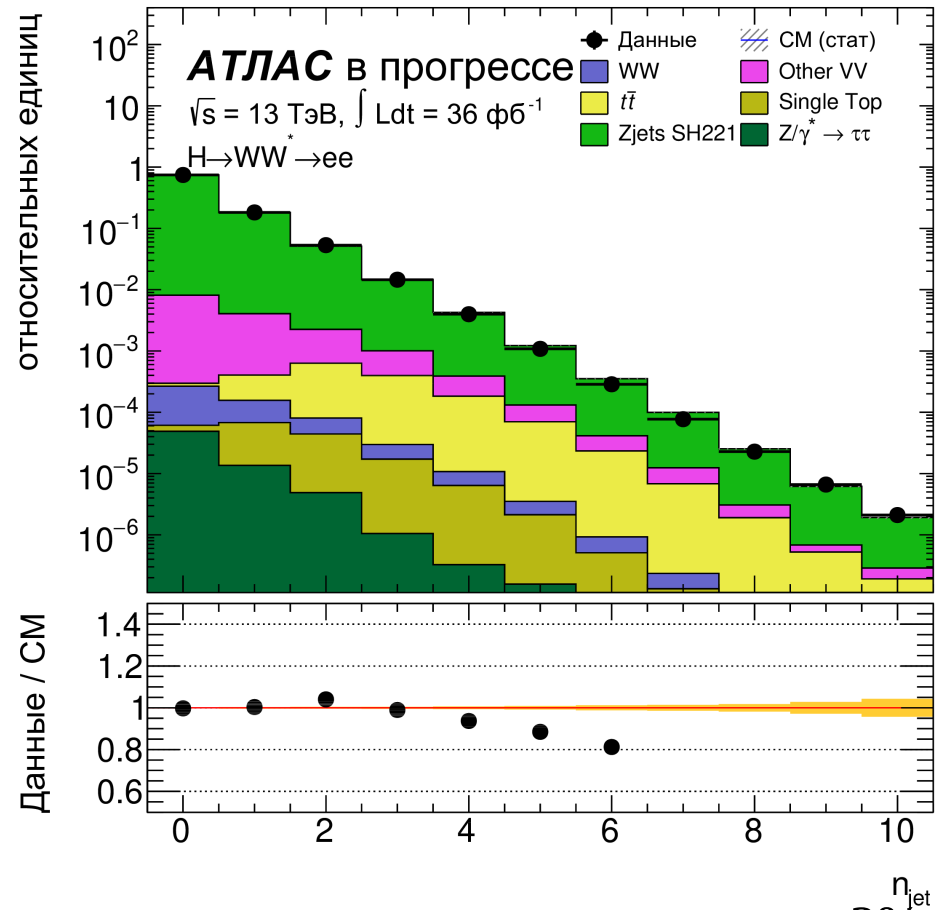
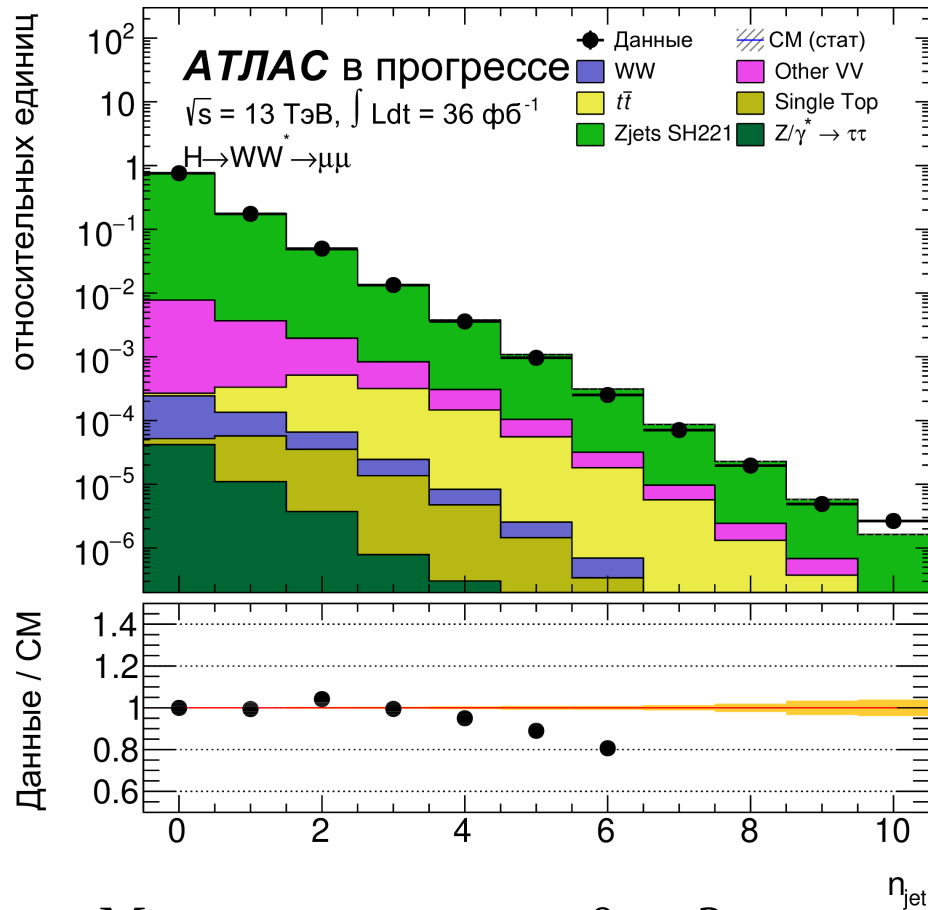
Отличное восстановление массы J/ψ в АТЛАС на полной статистике экспериментальных данных 2015 – 2018 гг.

3. Адронные струи в событиях с Z-бозоном

Ядерная Физика и Инжиниринг. – 2018. – 9, 488

$H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu e\nu/\mu\nu\mu\nu$

Множественность адронных струй в событиях $Z \rightarrow \mu\mu$ и $Z \rightarrow ee$



Множественность от 0 до 3 воспроизводится моделированием с точностью 3%

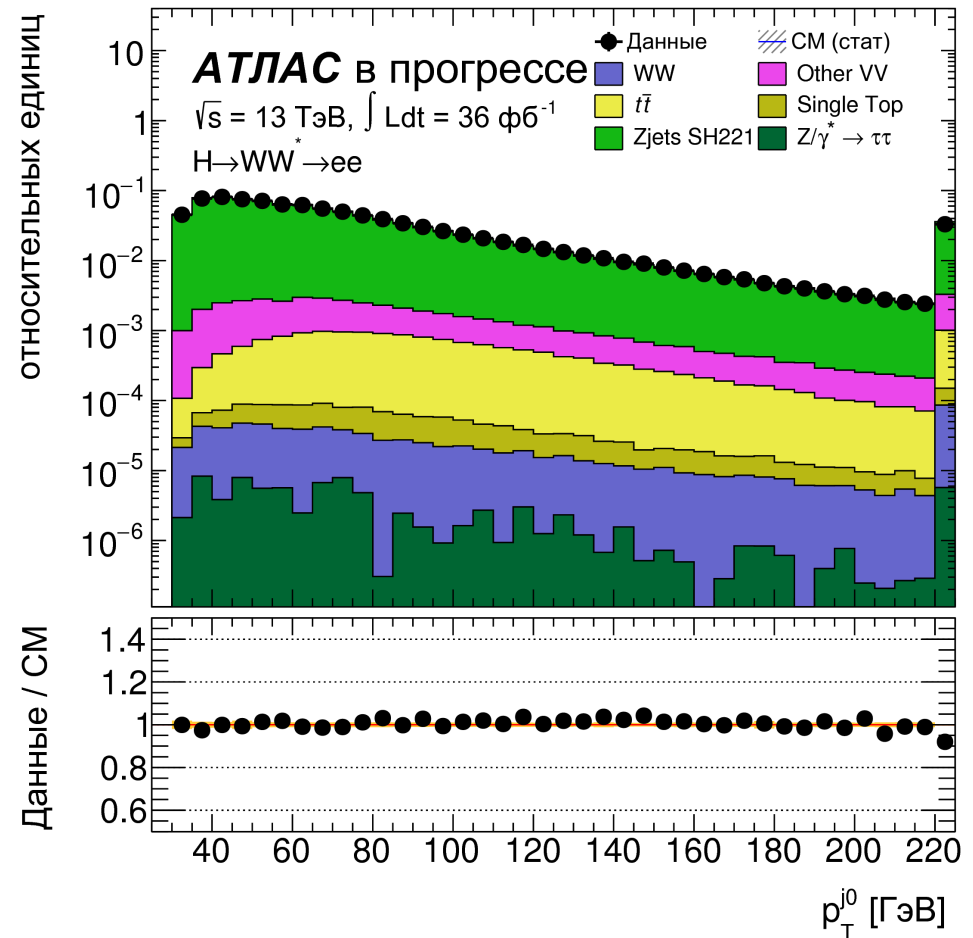
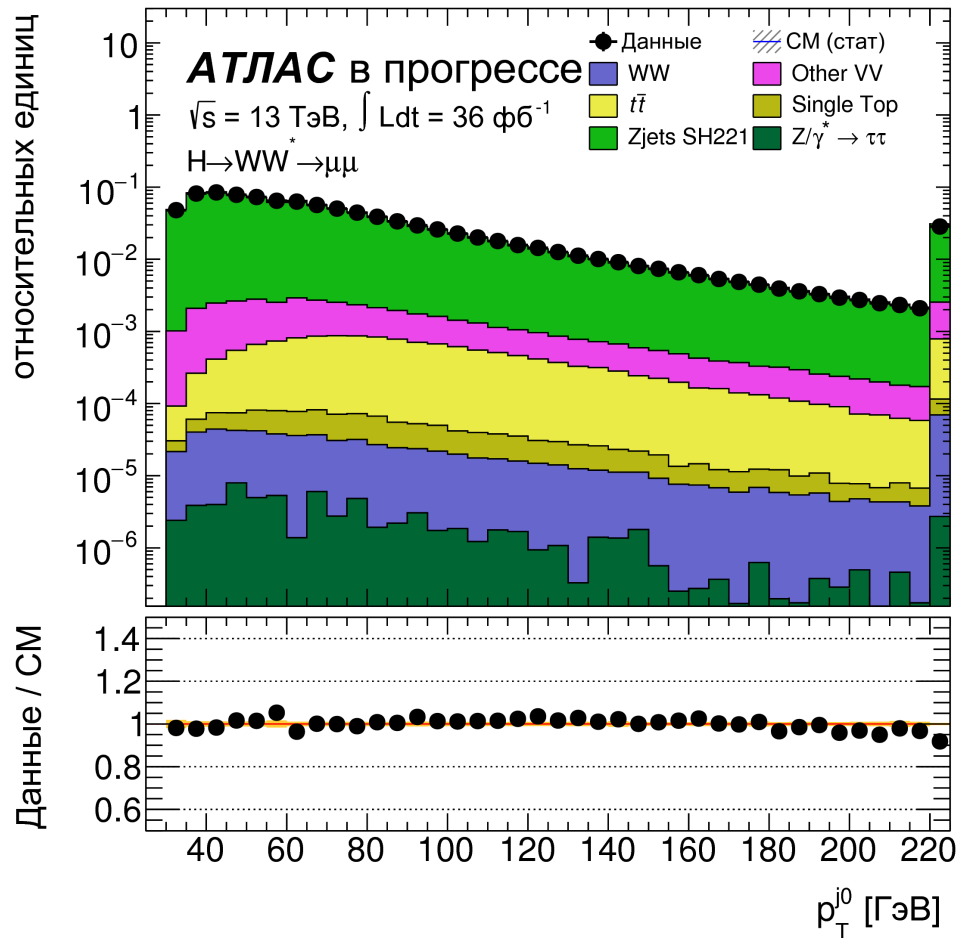
Предварительный отбор событий:

- наличие двух жестких изолированных лептонов разного знака заряда: $p_T^{\ell 0} > 22$ ГэВ, $p_T^{\ell 1} > 15$ ГэВ
- дилептонная масса в области Z бозона: $m_{\ell\ell} = m_Z \pm 10$ ГэВ (~40млн)
- определение адронных струй: $p_T > 30$ ГэВ в области $|\eta| < 4.5$ (более 2 струй ~ 2млн событий)

3. Адронные струи в событиях с Z-бозоном

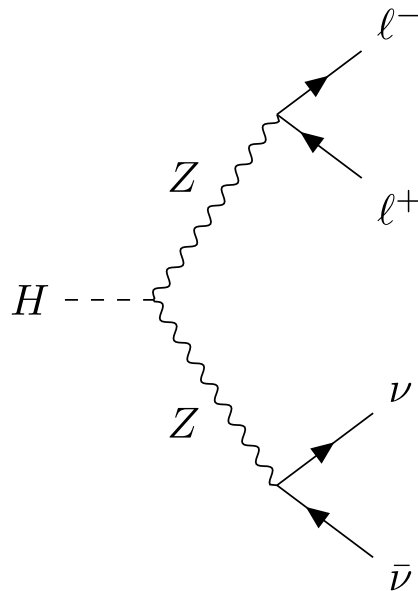
Ядерная Физика и Инжиниринг. – 2018. – 9, 488

Распределение по поперечному импульсу первой струи в событиях $Z \rightarrow \mu\mu$ и $Z \rightarrow ee$

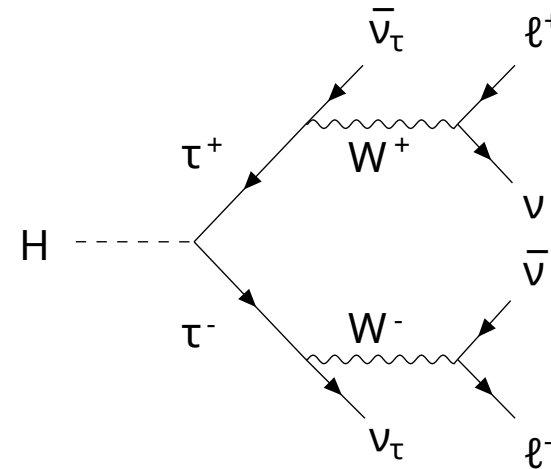


Влияние эффекта наложения событий на кинематические распределения описывается МС-моделированием. Данные согласуются с предсказаниями СМ в пределах погрешности.

3. Фоновые процессы с малым вкладом



[6] $H \rightarrow ZZ \rightarrow \ell\ell\nu\bar{\nu}$
SF: доля менее 0.1% от общ.фона



[7] $H \rightarrow \tau\tau \rightarrow \ell\ell\nu\bar{\nu}$
SF/DF: доля менее 0.03% от общ.фона

$H \rightarrow ZZ \rightarrow \ell\ell\nu\bar{\nu}$ [6] или $H \rightarrow \tau\tau \rightarrow \ell\ell\nu\bar{\nu}$ [7]

3. Наложение событий: эффективность отборов

$$H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$$

Phys.Atom.Nucl. - 2019. - 82, 1696.

Данные 2015-2016 гг.

Phys.Atom.Nucl. - 2021 - 84, 1776

Данные 2015-2018 гг.

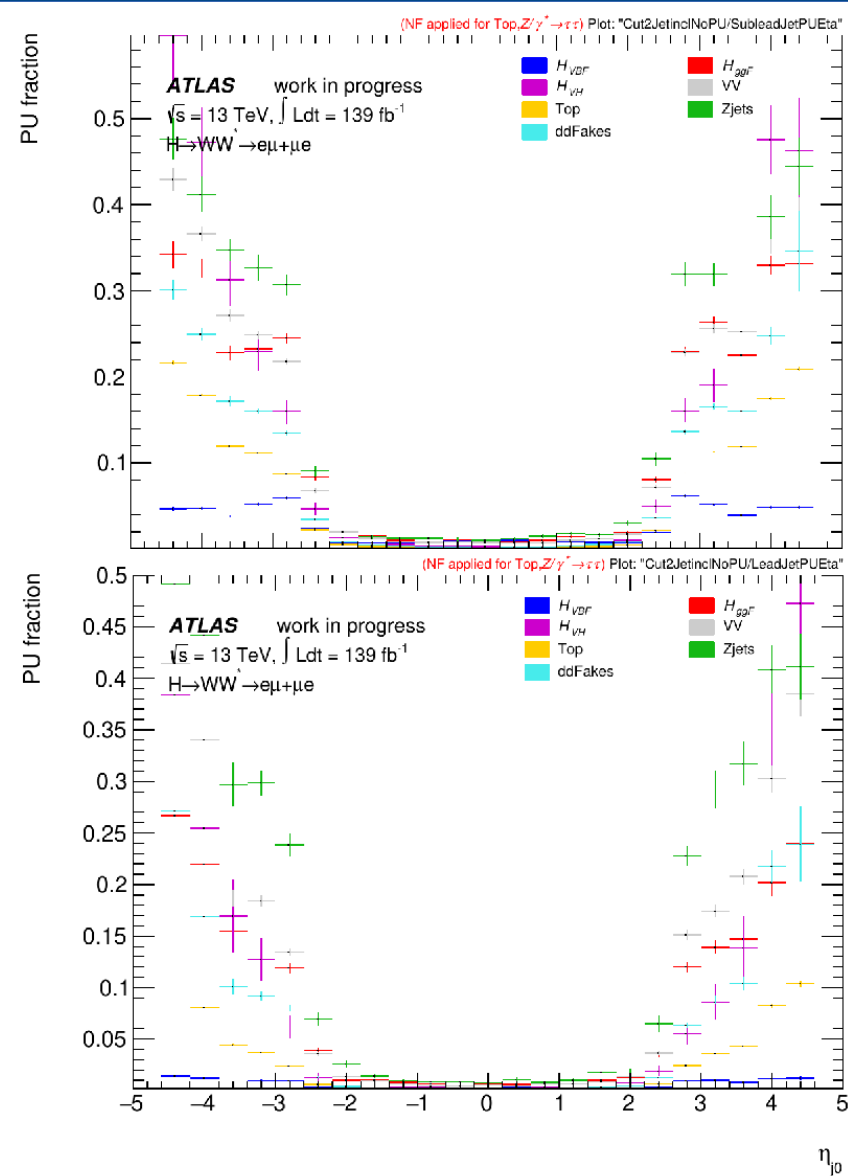
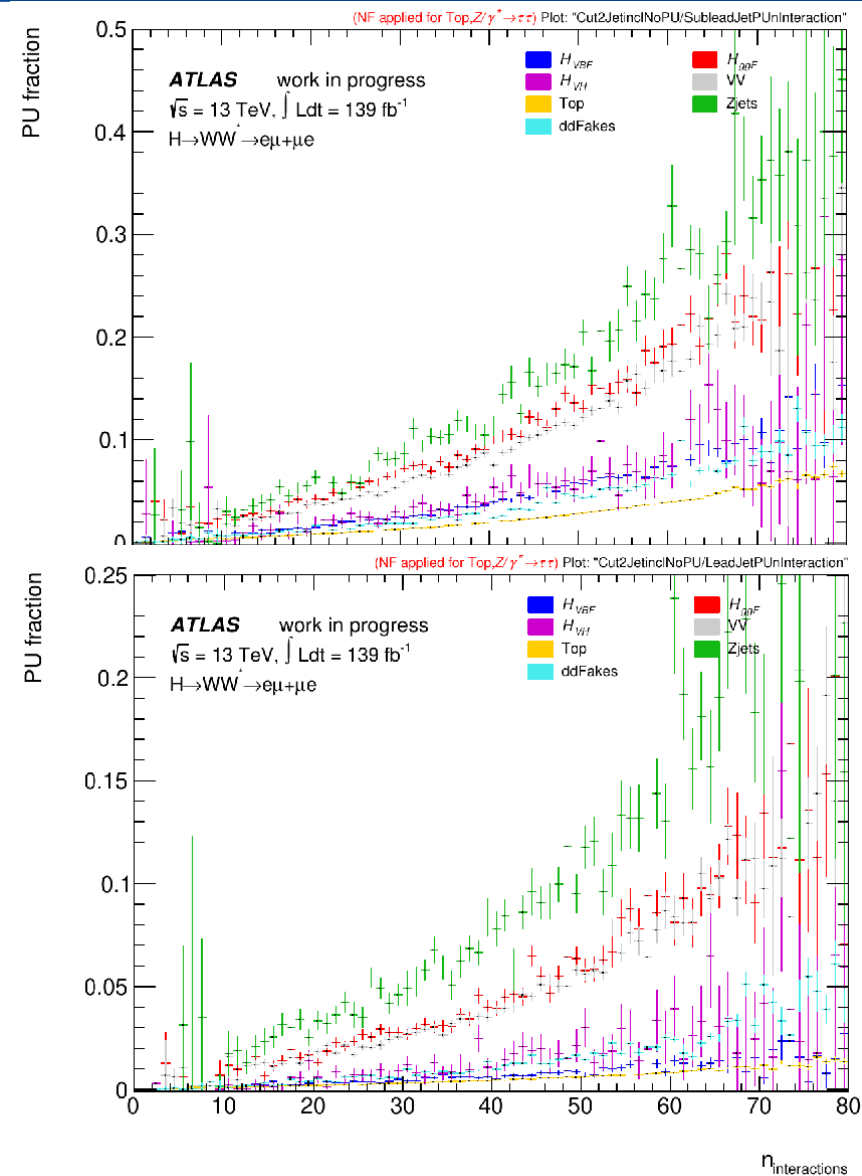
Отборы	$\mu < 22$	$\mu \geq 22$	$(\mu < 22)/(\mu \geq 22)$
$N_{jets} \geq 2$	.000363	.000367	0.99
Запрет b -струи	.00306	.00304	1.01
$p_T^{tot} < 15$ ГэВ	.00410(3)	.00404(4)	1.02(13)
Запрет $Z\tau\tau$	.00656(6)	.00642(8)	1.02(2)
$\Delta Y_{jj} > 3.6$, $M_{jj} > 600$ ГэВ	.070(2)	.061(3)	1.15(6)
CJV (20 ГэВ)	.128(5)	.105(6)	1.22(9)
OLV	.156(7)	.121(9)	1.3(1)
$\Delta\phi_{\ell\ell} < 1.8$	.28(2)	.24(2)	1.2
$M_{\ell\ell} < 50$ ГэВ	.54(6)	.40(5)	1.3
$m_T < 1.2 \cdot m_H$	.65(8)	.50(8)	1.3

Отборы	$\mu \leq 26$		$26 < \mu \leq 36$		$\mu > 36$	
	Z	S/B	Z	S/B	Z	S/B
$N_{jets} \geq 2$	.21	.0004	.20	.0004	.20	.0004
Запрет b -струи	.51	.0029	.48	.0028	.47	.0026
$p_T^{tot} < 15$	.55	.0044	.50	.0042	.46	.0039
Запрет $Z\tau\tau$	.65	.0068	.58	.0065	.54	.0060
$\Delta Y_{jj} > 3.6$, $M_{jj} > 600$	1.53	.071	1.35	.064	1.13	.050
CJV (20 ГэВ)	1.93	.14	1.67	.12	1.37	.10
OLV	2.09	.16	1.80	.15	1.46	.12
$\Delta\phi_{\ell\ell} < 1.8$	2.71	.30	2.30	.28	1.97	.23
$M_{\ell\ell} < 50$	3.21	.55	2.87	.53	2.37	.43
$m_T < 1.2m_H$	3.39	.66	3.08	.68	2.52	.53

Оценка отношение сигнала к фону (S/B) на разных стадиях отбора событий для двух областей: $\mu < 22$ и $\mu \geq 22$. В скобках указана стат. ошибка.

Ожидаемая значимость (Z) и отношение сигнала к фону (S/B) на разных стадиях отбора событий для трех областей: $\mu \leq 26$, $26 < \mu \leq 36$ и $36 < \mu \leq 80$

3. Доля сторонних струй в $e\mu/\mu e$ -событиях



Доля сторонних струй увеличивается с ростом числа наложений (μ) для всех рассматриваемых фоновых и сигнальных процессов.

Доля сторонних струй пренебрежимо мала в центральной области ($|\eta| < 2.5$, трекер), затем резкий рост для всех фонов. vbf процесс из-за наличия жестких двух струй слабо подвержен эффекту.

4. Проверочный анализ $H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$ (36 фб⁻¹)

Phys.Atom.Nucl. - 2019. - 82, 1696.

Эффективность отборов в Run 2 в сравнении с Run 1. В таблице указано отношение Run 1/Run 2

	vbf+vh	ggF	WW	Top	Ztt	Wjets	Total B	Data
b-veto	.72 / .82	.74 / .83	.73 / .83	.064 / .056	.74 / .80	.37 / .25	.129 / .101	.127 / .097
p_T^{tot}	.85 / .68	.73 / .58	.79 / .58	.65 / .50	.84 / .60	.69 / .46	.729 / .534	.740 / .536
Ztt veto	.84 / .85	.87 / .87	.62 / .58	.64 / .62	.31 / .31	.31 / .58	.530 / .536	.541 / .536
M_{jj}, DY_{jj} .....	.27 / .39	.06 / .08	.036 / .051	.027 / .048	.018 / .057	.024 / .07	.026 / .052	.034 / .052
m_T	.91 / .98	.86 / .97	.53 / .66	.45 / .69	.53 / 1.	.4 / 1.	.53 / .78	.74 / .82

Эффективность отбора это отношение числа событий на данном отборе к числу событий предыдущего отбора.

С ростом энергии \sqrt{s} с 7-8 ТэВ до 13 ТэВ сечения фоновых и сигнальных процессов увеличиваются непропорционально. Также есть влияния от роста светимости на алгоритмы восстановления, изоляции и идентификации объектов. В итоге, эффективность отборов ухудшается по сравнению с Run1.

4. Многомерный анализ $H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$ с BDT (36 fb^{-1})

CERN-EP-2018-212

Category	$N_{\text{jet}} \geq 2, \text{ VBF}$	Process	$N_{\text{jet}} \geq 2 \text{ VBF}$	
			Inclusive	BDT
Preselection	Two isolated, different-flavor leptons ($\ell = e, \mu$) with opposite charge $p_T^{\text{lead}} > 22 \text{ GeV}, p_T^{\text{sublead}} > 15 \text{ GeV}$ $m_{\ell\ell} > 10 \text{ GeV}$	ggF VBF	45 ± 8 28 ± 16	6.4 ± 2.3 15.9 ± 4.1
Background rejection	$N_{b\text{-jet}, (p_T > 20 \text{ GeV})} = 0$ $m_{\tau\tau} < m_Z - 25 \text{ GeV}$	WW VV $t\bar{t}/Wt$	370 ± 60 70 ± 12 1270 ± 80	10.2 ± 3.2 2.6 ± 1.6 13.4 ± 3.7
$H \rightarrow WW^* \rightarrow \ell\nu\ell\nu$ topology	Central Jet Veto Outside Lepton Veto	Mis-Id Z/γ^*	96 ± 30 280 ± 40	6.7 ± 2.7 4.2 ± 2.1
Discriminant Variable BDT input variables	BDT $m_{jj}, \Delta y_{jj}, m_{\ell\ell}, m_{T^*}, \sum_{\ell} C_{\ell}, \sum_{\ell,j} m_{\ell j}, p_T^{\text{tot}}$	Total Observed	2143 ± 48 2164	59.7 ± 7.8 60

Сила сигнала в единицах СМ, μ , определена как отношение измеренного сигнала к предсказанному в СМ. Для VBF значения таковы:

$$\mu_{\text{VBF}} = 0.62 \pm 0.36$$

Соответствующие экспериментальные сечения таковы:

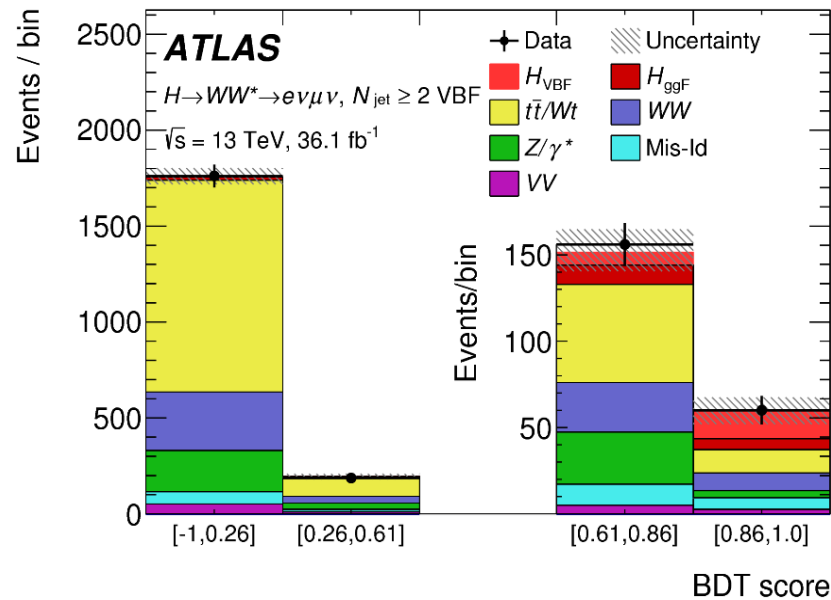
$$\sigma_{\text{VBF}} = 0.5 \pm 0.3 \text{ пб}$$

Они хорошо согласуются с расчетными

$$\sigma_{\text{VBF}} = 0.81 \pm 0.02 \text{ пб}$$

4. BDT

CERN-EP-2018-212



В интервале с наибольшей величиной BDT score ожидаемое соотношение сигнала к фону составляет около 0.6. В первых двух интервалах, где VBF сигнал мал, отношение data/МС хорошо согласуется. Избыток в этом отношении наблюдается в последних двух интервалах из-за наличия VBF сигнальных событий в них.

Кинематические переменные двух струй и лептонов (m_{jj} , Δy_{jj} , $m_{\ell\ell}$, m_T , $\sum_{\ell} C_{\ell}$, $\sum_{\ell,j} m_{\ell j}$, p_T^{tot}) - входные параметра для BDT анализа, BDT score – выходной параметр, который используется как разделяющая переменная в анализе с 4-мя интервалами.

Process	[-1.0, 0.26]	[0.26, 0.61]	[0.61, 0.86]	[0.86, 1.0]
H_{ggF}	17.3 ± 3.8	10.2 ± 2.9	11.2 ± 3.0	6.4 ± 2.3
H_{VBF}	1.7 ± 1.4	2.8 ± 1.7	7.5 ± 2.8	15.9 ± 4.1
WW	306 ± 18	34.4 ± 5.9	28.7 ± 5.4	10.2 ± 3.2
VV	51.4 ± 7.2	10.6 ± 3.3	5.0 ± 2.3	2.6 ± 1.6
$t\bar{t}/Wt$	1102 ± 33	92.7 ± 9.6	56.7 ± 7.4	13.4 ± 3.7
Mis-Id	64.1 ± 8.5	13.2 ± 3.9	12.2 ± 3.7	6.7 ± 2.7
Z/γ^*	214 ± 15	33.0 ± 5.9	30.1 ± 5.6	4.2 ± 2.1
Total	1760 ± 42	195 ± 14	152 ± 12	59.7 ± 7.8
Data	1761	187	156	60

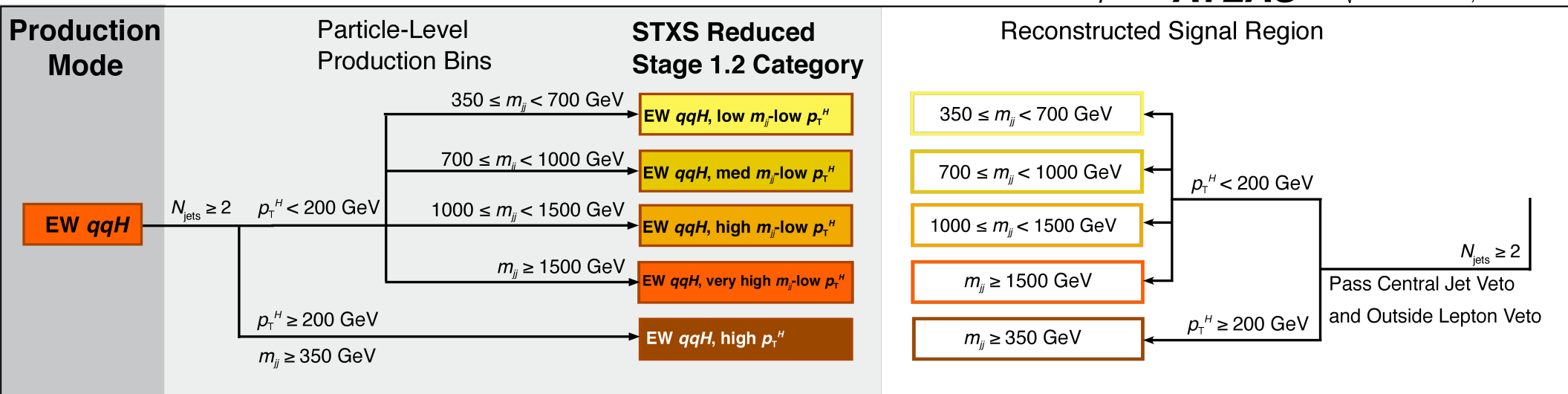
5. STXS сечения для VBF

Phys. Rev. D. – 2023 – 108, 032005

$H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$

ATLAS

$\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}, 139 \text{ fb}^{-1}$



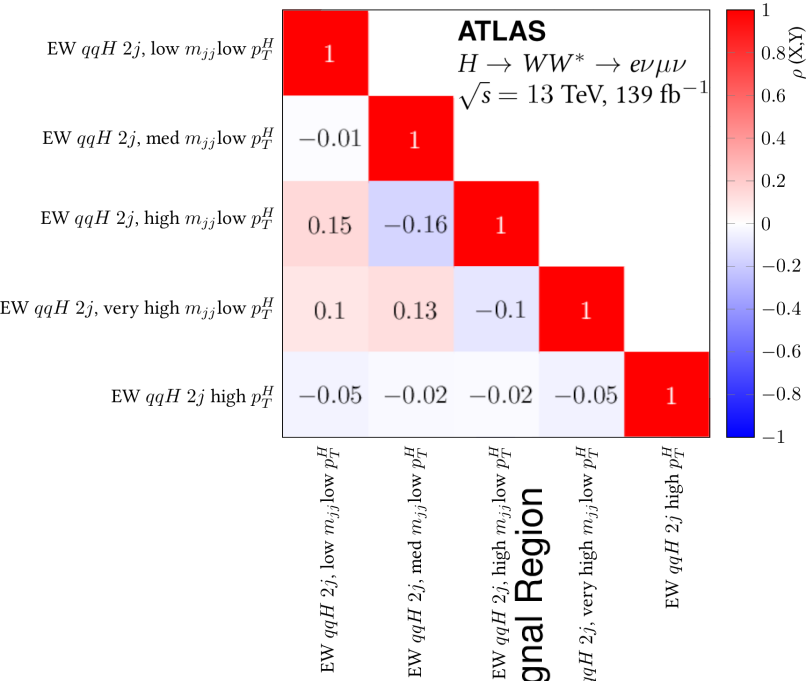
Отобранные события классифицируются в соответствии с требованиями, предъявляемыми к поперечному импульсу кандидата в бозон Хиггса m_{T}^H и к дополнительным адронным струям m_{jj} .

Каждый SR и соответствующий CR дополнительно дробятся, что обеспечивает независимые измерения сечений в разных фазовых пространствах.

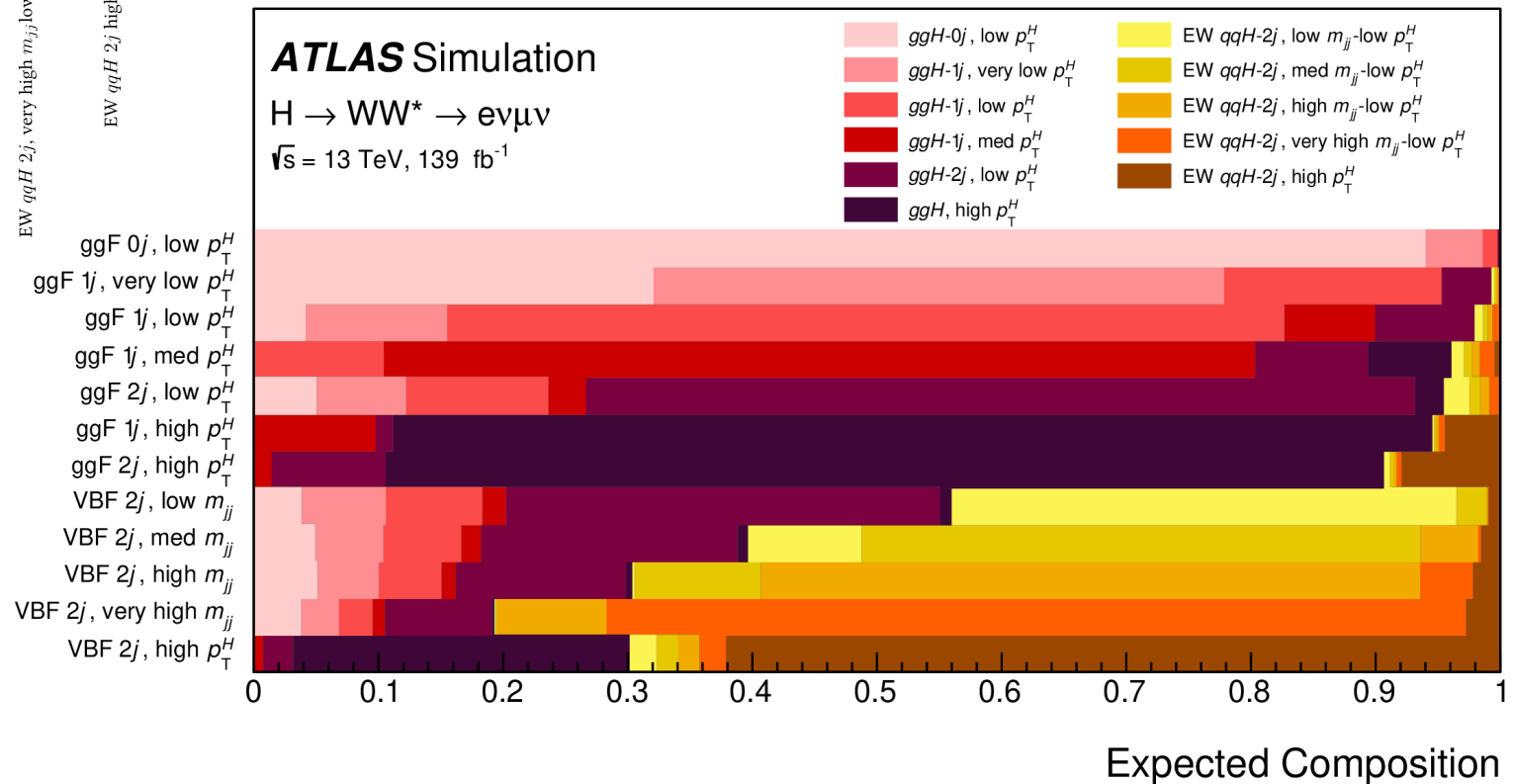
STXS - simplified template cross sections (sub-divide events in different phase space regions defined at particle level)

5. STXS VBF: correlation and composition

Phys. Rev. D. – 2023 – 108, 032005



Reconstructed Signal Region



5. Основные вклады в полную погрешность

ATLAS Collab., Phys. Rev. D. – 2023 – 108, 032005

Source	$\frac{\Delta\sigma_{\text{VBF}} \cdot \mathcal{B}_{H \rightarrow WW^*}}{\sigma_{\text{VBF}} \cdot \mathcal{B}_{H \rightarrow WW^*}}$ [%]	Source	$\frac{\Delta\sigma_{\text{VBF}} \cdot \mathcal{B}_{H \rightarrow WW^*}}{\sigma_{\text{VBF}} \cdot \mathcal{B}_{H \rightarrow WW^*}}$ [%]
Data statistical uncertainties	15	Theoretical uncertainties	16
Total systematic uncertainties	18	ggF	4.6
MC statistical uncertainties	4.9	VBF	12
Experimental uncertainties	6.7	WW	5.5
Flavor tagging	1.0	Top	6.4
Jet energy scale	3.7	Zττ	1.0
Jet energy resolution	2.1	Other VV	1.5
$E_{\text{T}}^{\text{miss}}$	4.9	Other Higgs	0.4
Muons	0.8	Background normalizations	4.9
Electrons	0.4	WW	0.6
Fake factors	0.8	Top	3.4
Pileup	1.3	Zττ	3.4
Luminosity	2.2	Total	23

Отдельные вклады в систематические ошибки сгруппированы вместе. Сумма квадратов отдельных вкладов может не совпадать с суммарной из-за наличия корреляций.

5. Экспериментальная систематика

ATLAS Collab., Phys. Rev. D. – 2023 – 108, 032005

- Неопределенности, связанные с реконструкцией объектов → data-driven на выборках процессов с высокой статистикой, таких как $Z \rightarrow \ell\ell$.
- Неопределенности, связанные с выбранными лептонами (electron and muon) → эффективности реконструкции и идентификации, масштабы и разрешения по энергии (или импульсу), а также эффективность изоляции.
- Неопределенности струй → масштабы энергии и разрешения струи, производительности мечения для определения вершин струи (jet-vertex tagger) и идентификации b-струи.
- Неопределенности, связанные с выбором триггера и “мягкой” составляющей при реконструкции E_T^{miss} .
- Неопределенность при моделировании наложений (pileup) → варьирования перевзвешенного профиля данных в пределах его неопределенностей.
- Неопределенность суммарной интегральной светимости за 2015–2018 гг., полученной с помощью детектора LUCID-2, составляет 1.7%. Интегральная неопределенность светимости применяется только к сигналу бозона Хиггса и к фоновым процессам, которые нормированы на теоретические предсказания.

Наибольший вклад вносят неопределенности, связанные с E_T^{miss} реконструкцией

5. Теоретическая систематика

ATLAS Collab., Phys. Rev. D. – 2023 – 108, 032005

- Для всех процессов: неопределенности, связанные с масштабом перенормирования и факторизации, underlying-event моделированием (UEPS) и PDF
- VBF, ggF, top и Z/ γ^* : неопределенности, связанные с партонным ливнем и согласованием матричных элементов \rightarrow сравнение предсказаний номинального и альтернативного генераторов
- qqWW, ZZ, WZ and $V\gamma^*$: неопределенности, связанные с масштабом согласования и непертурбативными эффектами
- Sherpa образцы: неопределенности, связанные со шкалой пересуммирования
- ggWW, $V\gamma$: неопределенность -50%/+100%
- EW WW: дополнительная неопределенность нормализации 15% (из-за поправок NLO EW)
- Non-WW и VVV: дополнительная неопределенность нормализации 12%
- Фоны из CR: неопределенности для коэффициентов экстраполяции CR-SR

Наибольший вклад вносят неопределенности, связанные со сравнением различных генераторов событий для согласования матричных элементов и для партонного ливня, а также теоретические неопределенности фона WW и Top

5. Теоретическая справка для процессов

MC генераторы, PDFs и программы для сопутствующих событий и партонных ливней UEPS. Также указано, в каком порядке по теории возмущений велись расчеты для каждого процесса.

Process	Matrix element (alternative)	PDF set	UEPS model (alternative model)	Prediction order for total cross section
ggF H	POWHEG Box v2 <input type="checkbox"/> NNLOPS <input type="checkbox"/> (MG5_AMC@NLO) <input type="checkbox"/>	PDF4LHC15NNLO <input type="checkbox"/>	PYTHIA 8 <input type="checkbox"/> (HERWIG 7) <input type="checkbox"/>	N ³ LO QCD + NLO EW <input type="checkbox"/>
VBF H	POWHEG Box v2 <input type="checkbox"/> (MG5_AMC@NLO)	PDF4LHC15NLO	PYTHIA 8 (HERWIG 7)	NNLO QCD + NLO EW <input type="checkbox"/>
VH excl. $gg \rightarrow ZH$	POWHEG Box v2	PDF4LHC15NLO	PYTHIA 8	NNLO QCD + NLO EW <input type="checkbox"/>
$t\bar{t}H$	POWHEG Box v2	NNPDF3.0NLO	PYTHIA 8	NLO <input type="checkbox"/>
$gg \rightarrow ZH$	POWHEG Box v2	PDF4LHC15NLO	PYTHIA 8	NNLO QCD + NLO EW <input type="checkbox"/>
$qq \rightarrow WW$	SHERPA 2.2.2 <input type="checkbox"/> (Q_{cut})	NNPDF3.0NNLO <input type="checkbox"/>	SHERPA 2.2.2 <input type="checkbox"/> (SHERPA 2.2.2; μ_q) <input type="checkbox"/>	NLO <input type="checkbox"/>
$qq \rightarrow WWqq$	MG5_AMC@NLO <input type="checkbox"/>	NNPDF3.0NLO	PYTHIA 8 (HERWIG 7)	LO
$gg \rightarrow WW/ZZ$	SHERPA 2.2.2	NNPDF3.0NNLO	SHERPA 2.2.2	NLO <input type="checkbox"/>
$WZ/V\gamma^*/ZZ$	SHERPA 2.2.2	NNPDF3.0NNLO	SHERPA 2.2.2	NLO <input type="checkbox"/>
$V\gamma$	SHERPA 2.2.8 <input type="checkbox"/>	NNPDF3.0NNLO	SHERPA 2.2.8	NLO <input type="checkbox"/>
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 <input type="checkbox"/>
Wt	POWHEG Box v2 (MG5_AMC@NLO)	NNPDF3.0NLO	PYTHIA 8 (HERWIG 7)	NNLO <input type="checkbox"/>
Z/γ^*	SHERPA 2.2.1 (MG5_AMC@NLO)	NNPDF3.0NNLO	SHERPA 2.2.1	NNLO <input type="checkbox"/>

UEPS - underlying event and parton shower
PDF - Parton Distribution Function

5. Расчет сечения в анализе

V. Cavaliere, Moriond QCD2018

Bin $i \rightarrow$ number of bin in discriminant distribution:

- for cut based analysis: m_T distribution
- for BDT/DNN analysis: BDT/DNN output

For STXS method there are the 2D $m_{jj}-m_T^H$ plot \rightarrow bin i, j

$$\sigma_i = \frac{N_{reco,i}}{C_i * A_i * L * B}$$

bin i

Number of measured signal events

Branching fraction

Integrated luminosity

Acceptance

Correction for detector efficiency

Why fiducial cross-sections?

- Correction for detector effects
 - easy interpretation for theorists
 - preserve measurements for posterity
- No acceptance correction
 - less model dependence

Fiducial cross section = cross section in fiducial volume (cuts applied to generated events)

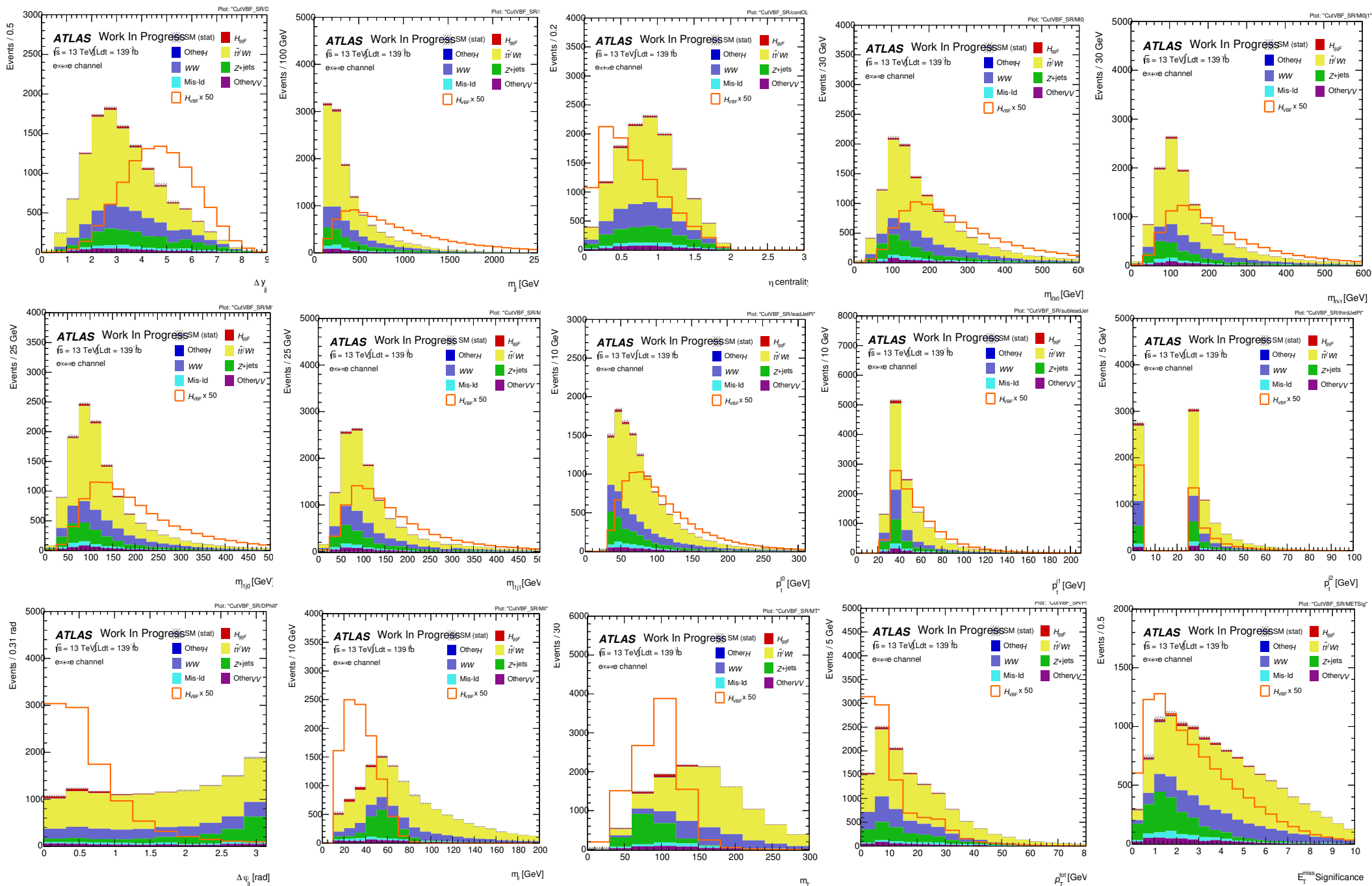
$$\sigma_{fid,i} * B = \frac{N_{reco,i}}{C_i * L}$$

Fiducial volumes depend on event selection/decay channel

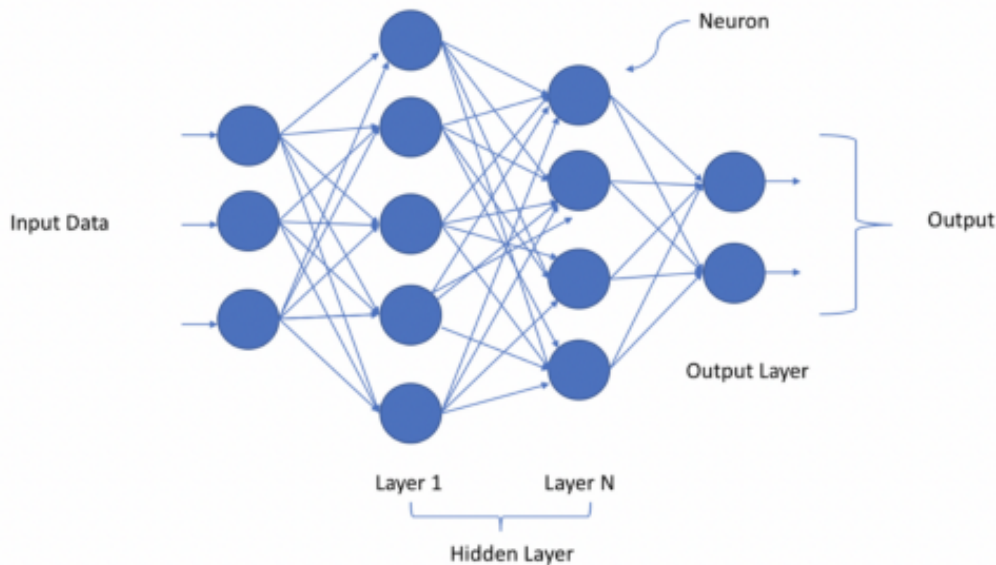
The signal strength:

$$\mu = \frac{\sigma_{prod+decay}^{measured}}{(\sigma_{prod} \times BR)_{SM}}$$

5. DNN переменные



5. Алгоритм DNN: описание



Упрощённая версия **глубокой нейросети** → это иерархическая (слоистая) структура из нейронов, связанных с другими нейронами.

В процессе анализа нейросети можно обнаружить несколько логических структурных элементов (**нейрон**, **слой**, **вес**, **вход**, **выход**, **функция активации** и **оптимизатор**), которые помогают ей постепенно заменять веса (изначально со случайными значениями) на более подходящие для точного прогноза выхода.

Функция активации → имитирует передачу сигнала последующим, связанным с предыдущими, нейронам.

Вес → определяет влияние входных данных на выход для следующего нейрона и последующий финальный выход (изначально случаен, но обновляется в процессе обучения сети).

Оптимизатор → процесс обучения сети. Из входных данных (input data) на выходе получается прогноз (output), который может быть верным или неверным. В зависимости от выхода система будет обучаться, меняя значения весов для нейронных связей ← **механизм обратной связи**. Чтобы правильно дать сети обратную связь и определить следующий шаг для внесения изменений, используется математический алгоритм “**обратного распространения ошибок**”. Процесс повторяется шаг за шагом несколько раз с нарастающим объёмом данных.

Рис.1. Нейросеть с N скрытых слоев ([link](#)):

Neuron — Нейрон

Input Data - Входные данные

Output — Выход

Output Layer - Выходной слой

Layer — Слой

Hidden Layer - Скрытый слой

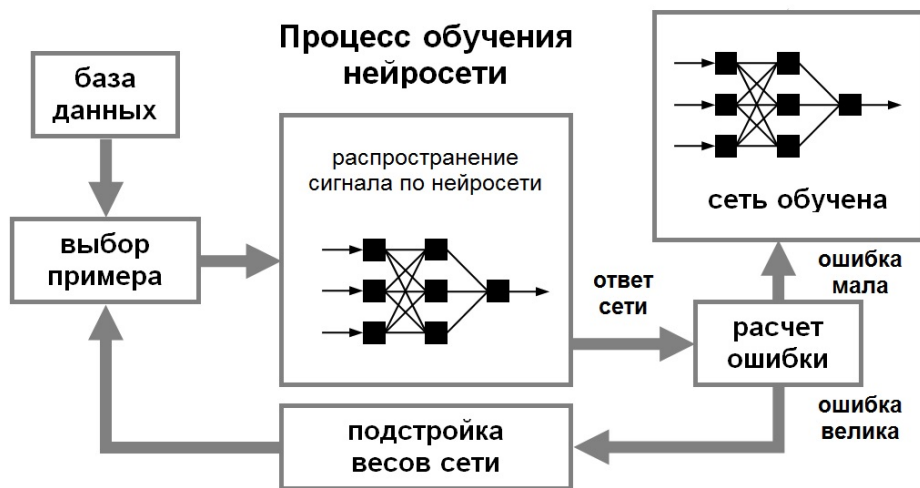


Рис.2. Схема процесса обучения нейросети ([link](#))

5. Алгоритм DNN: определение понятий (1)

Используемый **фреймворк**: keras на платформе tensorflow

Модель: HerNet - мета-модель конкретной нейронной сети вокруг базовой keras Sequential модели.

В модели вручную устанавливаются cross validation, normalization входных переменных, the input weights, а также параметры keras Sequential модели. Нет свободных параметров.

Количество образцов на обновление градиента: Batchsize = 512

Число **эпох**, в течение которых происходят итерации тренировки: Epochs = 25-50

Скорость обучения, с которой функция потерь будет изменяться: Learning_rate = 0.001 - 1.0

Типы и количество **слоев**: Layers = 256, 0.2, 128, 64, 0.2, 32, 24, 0.2, 16, 8

Value ≥ 1 — обычный слой с указанным числом нейронов в нем

$0 \leq \text{Value} < 1$ — слой отсева с указанной частотой (случайным образом устанавливает значение 0 для входных данных с указанной частотой → помогает предотвратить переобучение; ненулевые входные данные масштабируются на $1 / (1 - \text{частота})$)

Функция активации: ReLU - the rectified linear unit: $f(x) = \max(0, x)$

Возвращает 0, если она получает отрицательный вход, а если она получает положительное значение на вход, функция вернет то же положительное значение.

Позволяет модели учитывать нелинейности и специфические эффекты взаимодействия

Оптимизатор: AdaGrad - the adaptive gradient algorithm.

Модификация стохастического алгоритма градиентного спуска с отдельной для каждого параметра скоростью обучения (минимизирует степень обновления часто встречающихся признаков и увеличивает её для редко встречающихся).

Функция потерь: log_cosh - функция, которая вычисляет логарифм гиперболического косинуса ошибки предсказания модели: $\text{logcosh} = \log((\exp(x) + \exp(-x))/2)$, where x is the error $y_{\text{pred}} - y_{\text{true}}$.

Также является величиной, которую модель нейросети должна стремиться минимизировать во время обучения.

Функция обратного вызова: ReduceLROnPlateau

уменьшает скорость обучения, когда отслеживаемое значение (monitor) перестало улучшаться (изменяться):

```
callbacks = "keras.callbacks.ReduceLROnPlateau(monitor='val_loss', factor=0.2, patience=10)"
```

5. Алгоритм DNN: определение понятий (2)

Метрика: `metric` - это функция, которая используется для оценки производительности модели. Схожа с функцией потерь, но результат не используется в тренировке модели.

`metrics = "precision"` - вычисляет точность прогнозов относительно фактических результатов.

`metrics = "accuracy"` - вычисляет, как часто предсказания совпадают с фактическим результатом.

Один из параметров `Neper` модели: `crossValidator`

```
crossValidator = "BinaryCV(mod_var='eventNumber')"
```

определяет обучающий набор и тестовый набор с использованием двоичного разбиения;

нет независимой проверки (`validation`)

fold 0:	|	Training	|	Test & Val	|
---------	--	----------	--	------------	--

fold 1:	|	Test & Val	|	Training	|
---------	--	------------	--	----------	--

```
crossValidator = "MixedCV(k=3, mod_var='eventNumber')"
```

выполняет `k`-кратную перекрестную валидацию, где проверяются наборы проверки и тестирования

fold 0:	|	Training	|	Test	|	Val	|
---------	--	----------	--	------	--	-----	--

fold 1:	|	Test	|	Val	|	Training	|
---------	--	------	--	-----	--	----------	--

fold 2:	|	Val	|	Training	|	Test	|
---------	--	-----	--	----------	--	------	--

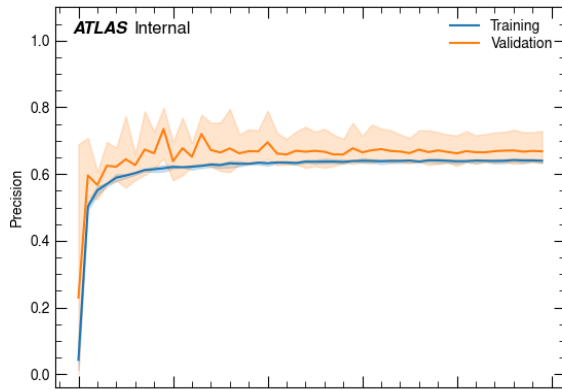
типы данных обучения:

Train - модель будет обучаться на этих данных → не применяется в анализе.

Test - в качестве данных для тестирования → не применяется в анализе.

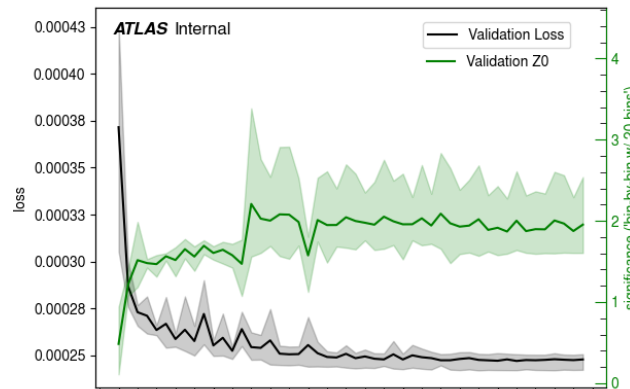
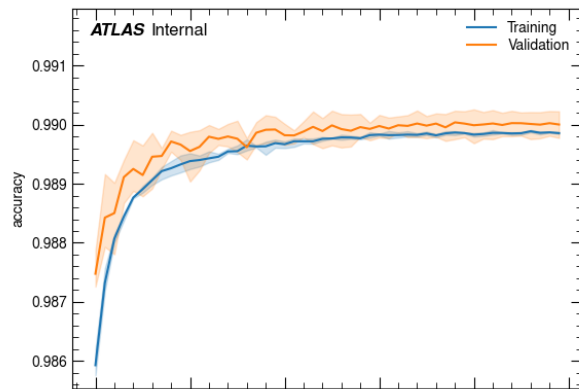
Validation - в качестве данных независимой проверки → применяется в анализе.

5. Алгоритм DNN: примеры распределений



False (true) negatives/positives – неверно (верно) классифицированы
AUC - площадь под кривой ROC-AUC. Эта метрика равна вероятности того, что классификатор поставит случайную положительную выборку выше, чем случайную отрицательную выборку.

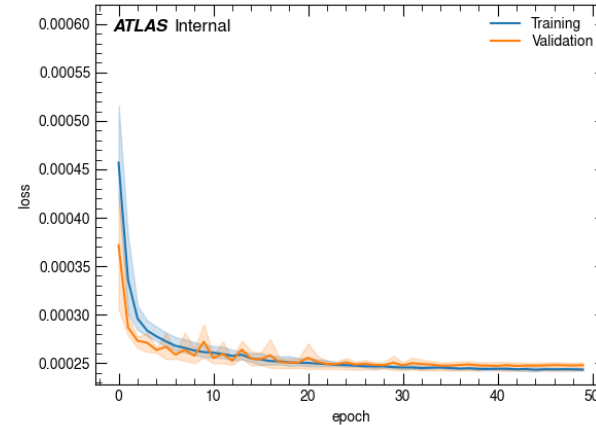
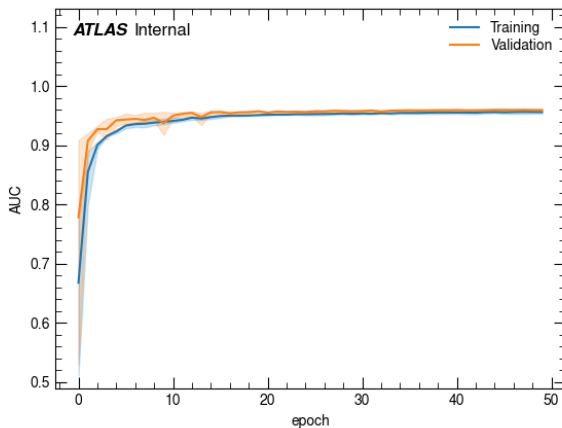
Loss - функция потерь (или функция стоимости) определяет разницу между фактическими данными и результатами, предсказанными моделью.



$$\text{Accuracy} = \frac{\text{true samples}}{\text{total samples}}$$

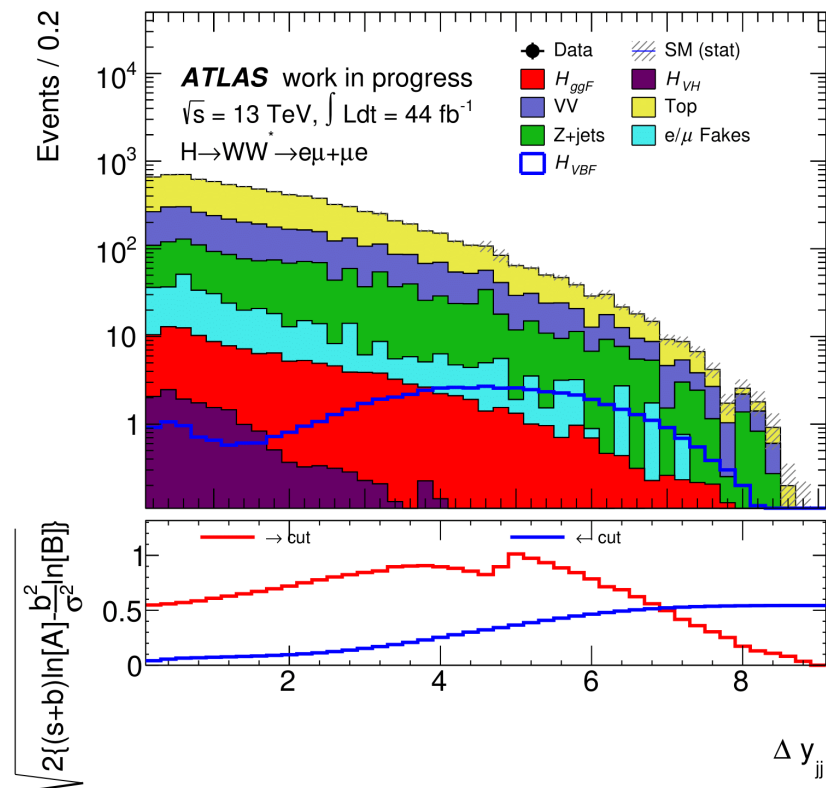
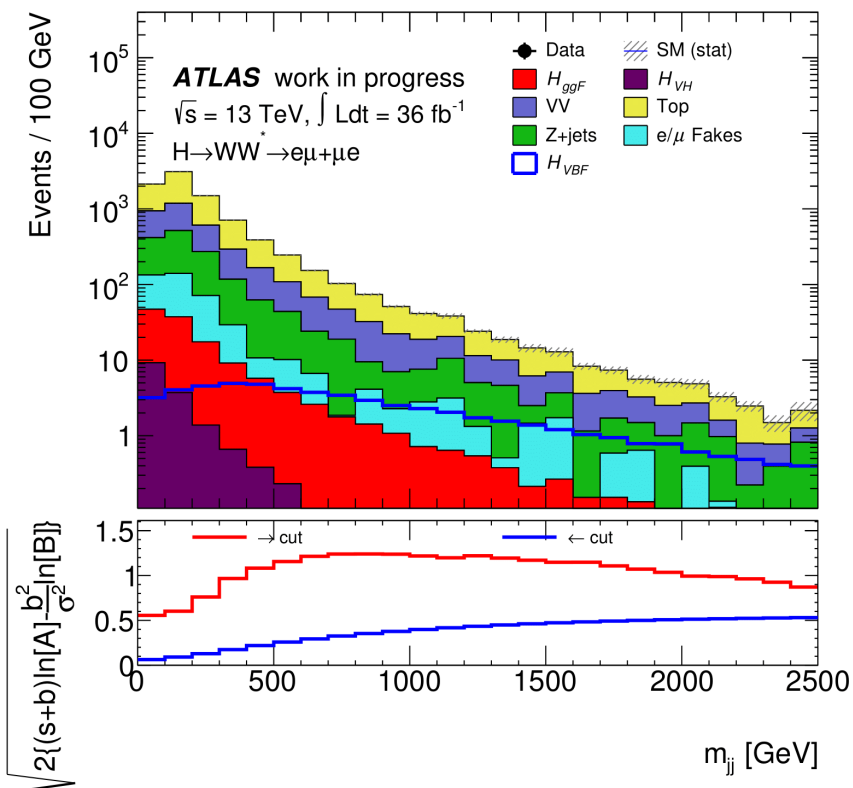
$$\text{Precision} = \frac{\text{true positives}}{\text{true positives} + \text{false positives}}$$

$$\text{Recall} = \frac{\text{true positives}}{\text{true positives} + \text{false negatives}}$$



5. Анализ $H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$ с кинемат. отборами (139 фб⁻¹)

Оптимизация критериев отбора



Оптимизация критериев отбора на примере распределения M_{jj} (36 fb⁻¹) и ΔY_{jj} (44 fb⁻¹) на этапе Z $\tau\tau$ -veto отбора, т.е. непосредственно перед основными VBF отборами по M_{jj} и ΔY_{jj} . В качестве метрики взята функция значимости Z. Голубая линия соответствует ограничению сверху, а красная – снизу на величину указанной переменной.

$$Z = \begin{cases} +\sqrt{2 \left(n \ln \left(\frac{n(b+\sigma^2)}{b^2+n\sigma^2} \right) + \frac{b^2}{\sigma^2} \ln \left(1 + \frac{\sigma^2(n-b)}{b(b+\sigma^2)} \right) \right)}, & n \geq b \\ -\sqrt{2 \left(n \ln \left(\frac{n(b+\sigma^2)}{b^2+n\sigma^2} \right) + \frac{b^2}{\sigma^2} \ln \left(1 + \frac{\sigma^2(n-b)}{b(b+\sigma^2)} \right) \right)}, & n < b \end{cases}$$

с учетом статистической ошибки по Пуассону

Оптимизация → определения и поиска областей, полных сигнальных событий, а также чистых контрольных областей с хорошей статистикой данных

5. Анализ $H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$ с кинемат. отборами (139 фб⁻¹)

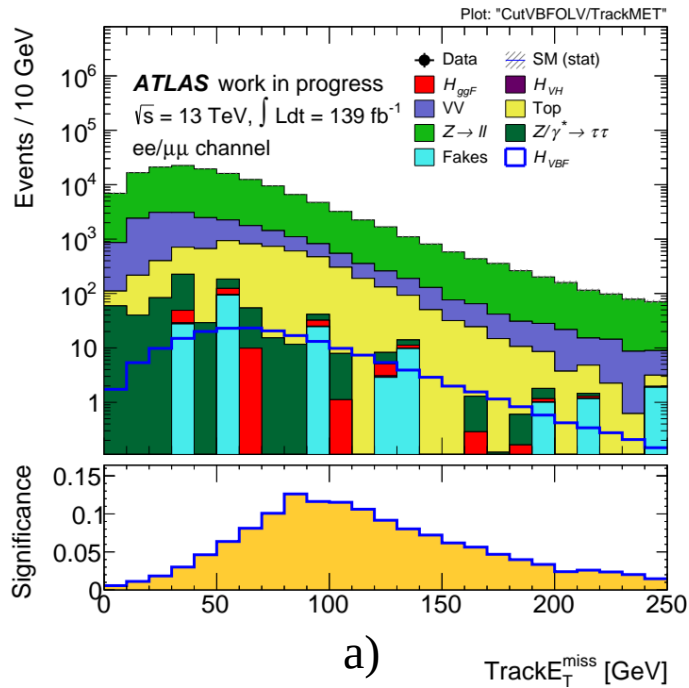
Причины оптимизации отборов:

- Фон от DY — основной и имеет небольшой E_T^{miss} , поэтому ужесточают ограничения по E_T^{miss} и вводят дополнительные ограничения по p_T^{miss}
- Увеличение светимости по сравнению с экспозициями при 7-8 ТэВ — рост относительного вклада DY за счет наложения событий (ложные струи)
- Переход к энергии 13 ТэВ - изменение отношения S/B из-за разного увеличения сечений с ростом \sqrt{s}
- Улучшенные алгоритмы восстановления «объектов»

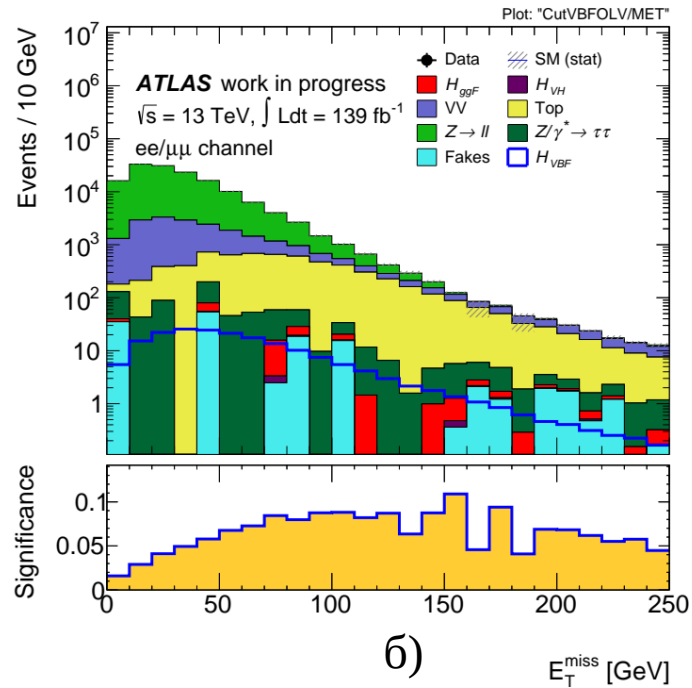
Переменная	По аналогии с Run 1	
	До оптимизации	После оптимизации
	Критерии	
Поперечный импульс лептонов	$p_T^{\ell 0} > 22$ ГэВ, $p_T^{\ell 1} > 15$ ГэВ	
Инвариантная масса лептонов	$M_{\ell\ell} > 12$ ГэВ	
Запрет на Z$	|M_{\ell\ell} - M_Z| > 15$ ГэВ	
Недостающий поперечный импульс	-	$p_T^{miss} > 50$ ГэВ
Недостающая поперечная энергия	$E_T^{miss} > 55$ ГэВ	$E_T^{miss} > 50$ ГэВ
Число адронных струй	$N_{jets} = 2$	
Запрет на b -струю	$N_{bjets} = 0$	
Общий поперечный импульс	$p_T^{tot} < 15$ ГэВ	
Запрет на $Z \rightarrow \tau\tau$	$m_{\tau\tau} < m_Z - 25$ ГэВ	
Основные критерии для VBF	$m_{jj} > 600$ ГэВ, $\Delta Y_{jj} > 3.6$	
Запрет на центральную струю	CJV (20 ГэВ)	
Запрет на внешний лептон	OLV	
Инвариантная масса лептонов	$M_{\ell\ell} < 50$ ГэВ	
Разность азимут. углов лептонов	$\Delta\phi_{\ell\ell} < 1.8$	-
Поперечная масса	$m_T < 1.2 \times m_H$	

Оценка ожидаемой значимости сигнала до оптимизации и после оптимизации отборов: **0.45 σ** и **0.51 σ** [в Run1 это значение было **0.88 σ**]

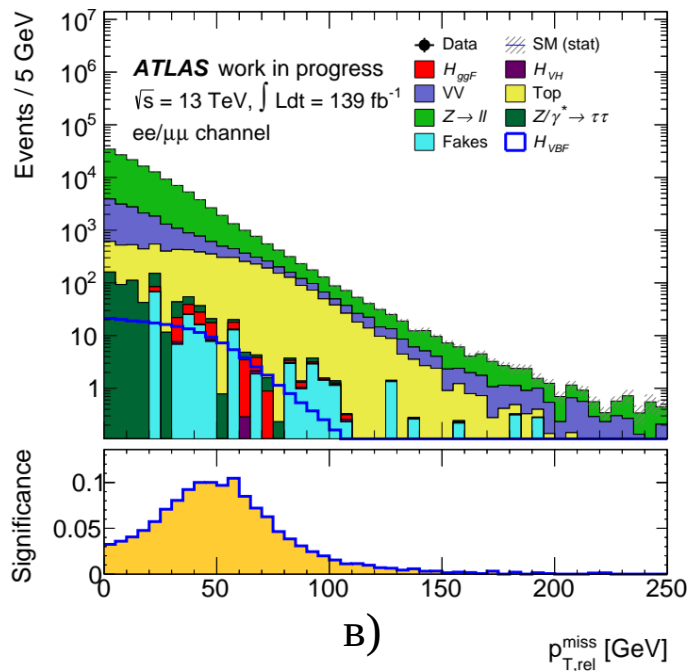
5. Выбор E_T^{miss} переменных для оптимизации



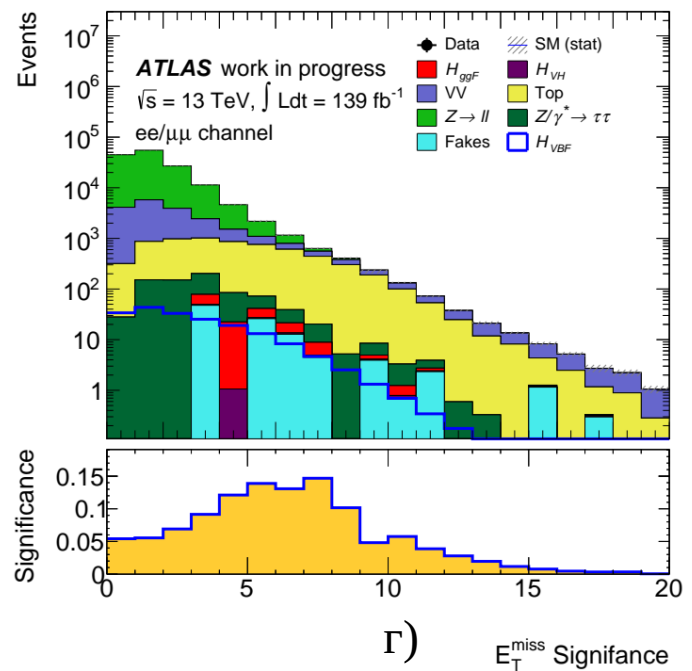
а)



б)



в)



г)

а) недостающий поперечный импульс $TrackE_T^{\text{miss}}$ (или p_T^{miss});

б) недостающая поперечная энергия E_T^{miss} ;

в) относительный недостающий поперечный импульс $p_{T,Rel}^{\text{miss}}$;

г) значимость недостающей поперечной энергии E_T^{miss} Significance

Хорошо видна отличительная форма распределения DY от других процессов на б) и г), но наибольшую значимость при малых потерях статистики можно получить только на г)

5. Оценка $Z\ell\ell$ фона в $H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu e\nu / \mu\nu \mu\nu$ (139 фб^{-1})

События в контрольных областях для Top, $Z\tau\tau$ и $Z\ell\ell$ фоновых процессов

	VBF	Other H	VV	Top	$Z \rightarrow \ell\ell$	$Z \rightarrow \tau\tau$	Total Bkg	Data	Purity %	Data/MC
TopCR	2.59	3.31	71.53	7571.61	96.56	7.63	7805.18	7806	97	$1,00 \pm 0,01$
$Z\tau\tau$ CR	1.23	0.58	6.92	5.18	0.24	70.35	82.47	82	85	$0,98 \pm 0,13$
$Z\ell\ell$ CR	0.07	0.03	74.57	27.76	1545.07	0.54	1650.93	1438	94	$0,87 \pm 0,06$

ABCD метод оценивает $Z\ell\ell$ фон в MET - $m_{\ell\ell}$ фазовом пространстве; использует высокую статистику контрольной области бозона Z.

A: Signal region - $m_{\ell\ell} < 50 \text{ GeV}$, $E_T^{\text{miss}} > 55 \text{ GeV}$ наиб. vbf

B: Signal region - $|m_{\ell\ell} - m_Z| < 15 \text{ GeV}$, $E_T^{\text{miss}} > 55 \text{ GeV}$

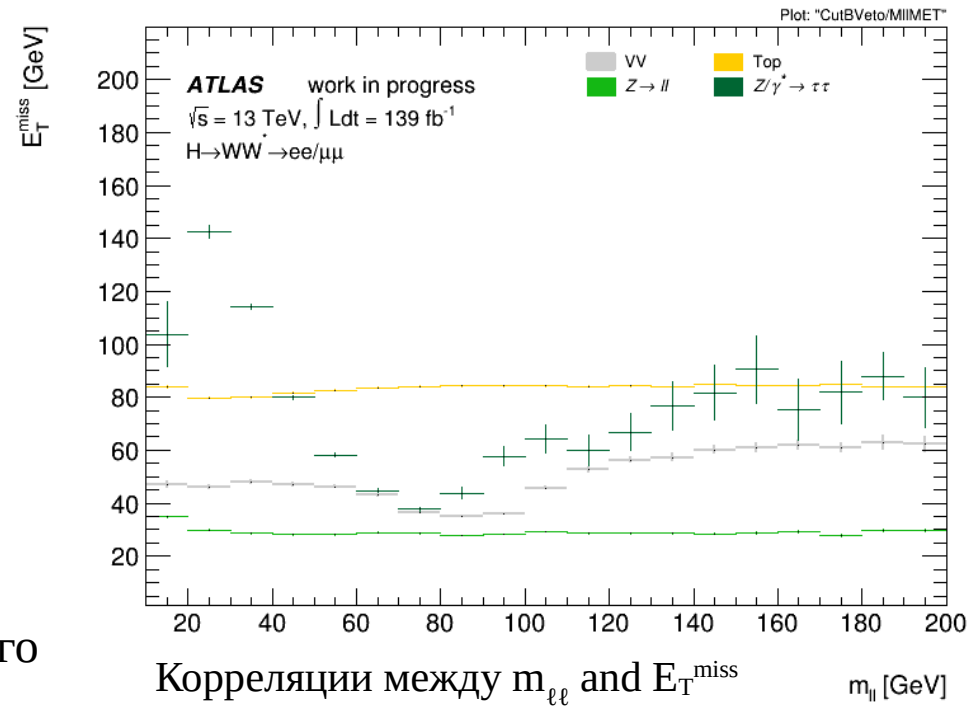
C: Signal region - $m_{\ell\ell} < 50 \text{ GeV}$, $20 \text{ GeV} < E_T^{\text{miss}} < 55 \text{ GeV}$

D: Signal region - $|m_{\ell\ell} - m_Z| < 15 \text{ GeV}$, $20 \text{ GeV} < E_T^{\text{miss}} < 55 \text{ GeV}$.

$$NF = \frac{A_{\text{data}}}{A_{\text{MC}}} = \frac{B_{\text{data}} \frac{C_{\text{data}}}{D_{\text{data}}}}{B_{\text{MC}} \frac{C_{\text{MC}}}{D_{\text{MC}}}} = f_{\text{corr}} \frac{B_{\text{data}} \frac{C_{\text{data}}}{D_{\text{data}}}}{A_{\text{MC}}} \quad f_{\text{corr}} = \frac{A_{\text{MC}}/B_{\text{MC}}}{C_{\text{MC}}/D_{\text{MC}}}$$

где делается предположение, что экстраполяция из области B в A (т.е. из области Z-пика в область низкого $m_{\ell\ell}$) ведет себя аналогично экстраполяции из D в C

Коэффициент f_{corr} , в идеальном случае равный единице по построению; отражает корреляции между E_T^{miss} и $m_{\ell\ell}$, которые не описываются должным образом MC-моделированием.



	Top	$Z \rightarrow \ell\ell$	$Z \rightarrow \tau\tau$
NFs из CRs	0.94 ± 0.01	0.88 ± 0.07	0.94 ± 0.13
NFs с ABCD	0.95 ± 0.01	0.75 ± 0.11	0.92 ± 0.13

5. Анализ $H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$ с кинемат. отборами (139 фб⁻¹)

Phys. At. Nucl. - 2021. – 84, 2055

Суммарное количество событий (в тыс.) на конечном этапе отбора.

Отбор	VBF	ggF+VH	VV	Топ	W+jets	DY	Полный фон	Data
Сигнальная область								
Пред.	0.55	5.3	1496	892	29,5	10263	12686	12361
2 струи	0.33	1.1	163	695	4,4	1017	1881	1912
b-запр.	0.29	0.9	135	48.1	-	855	1037	1038
VBF	0.092	0.030	1.8	0.69	-	16.6	18.9	-
m_T	0.023	0.004	0.025(4)	0.013(1)	0.007(6)	0.145(41)	0.195(42)	-
Контрольные области								
DY CR	0.050	0.041	3.5	0.55	0.040	27.1	31.2	30.959
Топ CR	0.002	0.003	0.068	7.2	0.045	0.087	7.5	7.444

DY фон даже в конце отборов превышает сумму остальных фонов в 3 раза, а его погрешность составляет около 30% от его величины и дает преобладающий вклад в погрешность суммарного фона.

Распределение поперечной массы m_T на последнем этапе отбора событий. На нижнем графике показана значимость по бинам. Суммарная ожидаемая интегральная значимость составляет 0.5σ .

Результаты ATLAS и CMS

- CMS 25 fb⁻¹ (7+8 TeV), [link](#)
JHEP01 (2014) 096 $\mu_{VBF} = 0.62^{+0.58}_{-0.47}$
- ATLAS 25 fb⁻¹ (7+8 TeV), [link](#)
Phys. Rev. D 92, 012006 (2015) $\mu_{VBF} = 1.27^{+0.53}_{-0.45}$
- ATLAS 36 fb⁻¹, [link](#)
Phys. Lett. B 789 (2019) 508 $\mu_{VBF} = 0.62^{+0.36}_{-0.35}$
- CMS 138 fb⁻¹, [link](#)
JHEP03(2021)003 $\mu_{VBF} = 0.71^{+0.28}_{-0.25}$
- ATLAS 139 fb⁻¹, [link](#)
arXiv:2207.00338v1 (2022) $\mu_{VBF} = 0.93^{+0.23}_{-0.20}$

Signal strength is measured with ~25% precision in ATLAS