



Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова
НИЦ «Курчатовский институт»



Поиск возбужденных электронов и дибозонных резонансов в конечном состоянии с лептоном, нейтрино и струями на детекторе ATLAS на LHC

Черемушкина Евгения Вадимовна

Диссертация на соискание учёной степени

кандидата физико-математических наук

01.04.23 – Физика высоких энергий

Научный руководитель

к. ф.-м. н., ведущий научный сотрудник

Мягков Алексей Григорьевич

20 апреля 2020

Задачи диссертации

1. Выбор и обоснование полулептонного конечного состояния для поиска возбужденных электронов.
2. Моделирование сигнальных наборов данных для поиска возбужденных электронов в событиях с электроном, нейтрино и W -бозоном.
3. Оптимизация условий отбора объектов и первичного отбора событий для поиска возбужденных электронов в конечном состоянии с электроном, нейтрино и адронно распадающимся W -бозоном в pp столкновениях с $\sqrt{s} = 13$ ТэВ в детекторе ATLAS.
4. Оценка вклада фоновых процессов в поиске возбужденных электронов.
5. Выбор дискриминирующих переменных, а также построение сигнальных, контрольных и проверочных областей для поиска возбужденных электронов в pp взаимодействиях при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ.
6. Оценка систематических неопределенностей в поиске возбужденных электронов.
7. Проведение статистического анализа и получение пределов на параметры модели возбужденного электрона в поиске в полулептонном конечном состоянии.
8. Оптимизация условий отбора объектов и первичного отбора событий для поиска дибозонных резонансов в полулептонном конечном состоянии на данных, полученных на детекторе ATLAS в pp столкновениях при $\sqrt{s} = 8$ ТэВ.

Модель возбужденного электрона (EL)

[PhysRevD.42.815](#) Модель составленности: 1990, Baur, Spira and Zerwas

“Excited-quark and -lepton production at hadron colliders”

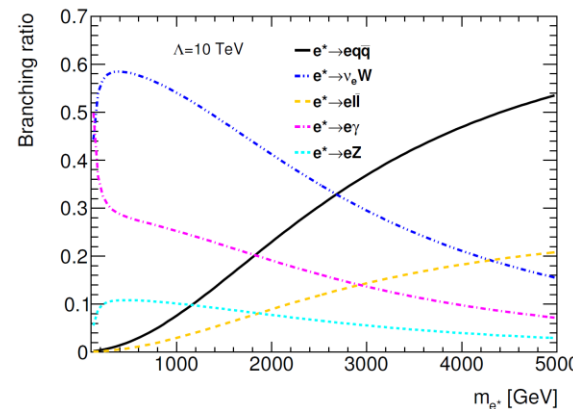
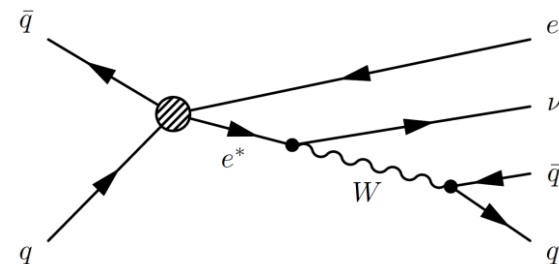
- Наблюдаемые фермионы – связанные состояния гипотетических преонов;
- Модели составленности решает проблему иерархии (3 поколения и разница m);
- 2 свободных параметра: $m_{e^*} \leq \Lambda$ – масштаб составленности;
- Рождение e^* :
 - Одиночное или парное через вершину контактного взаимодействия (CI);
 - Вклад калибровочного взаимодействия (GM) в сечение рождения ee^* пренебрежимо мал в доступной области (m_{e^*}, Λ).
- Распады e^* : $l^* \rightarrow l + V$ (GM) и $l^* \rightarrow l + ff$ (CI).

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{SM} + \mathcal{L}_{CI} + \mathcal{L}_{GI}$$

$$\mathcal{L}_{CI} = \frac{2\pi}{\Lambda^2} j^\mu j_\mu$$

$$j_\mu = \bar{l}_L \gamma_\mu l_L + \bar{l}_L^* \gamma_\mu l_L^* + \bar{l}_L^* \gamma_\mu l_L + H.c.$$

$$\Delta \mathcal{L}_{GM} = \frac{1}{2\Lambda} \bar{f}_R^* \sigma^{\mu\nu} \left[g \frac{\tau}{2} W_{\mu\nu} + g' \frac{Y}{2} B_{\mu\nu} \right] f_L + H.c.$$



Модели дибозонных резонансов (VV)

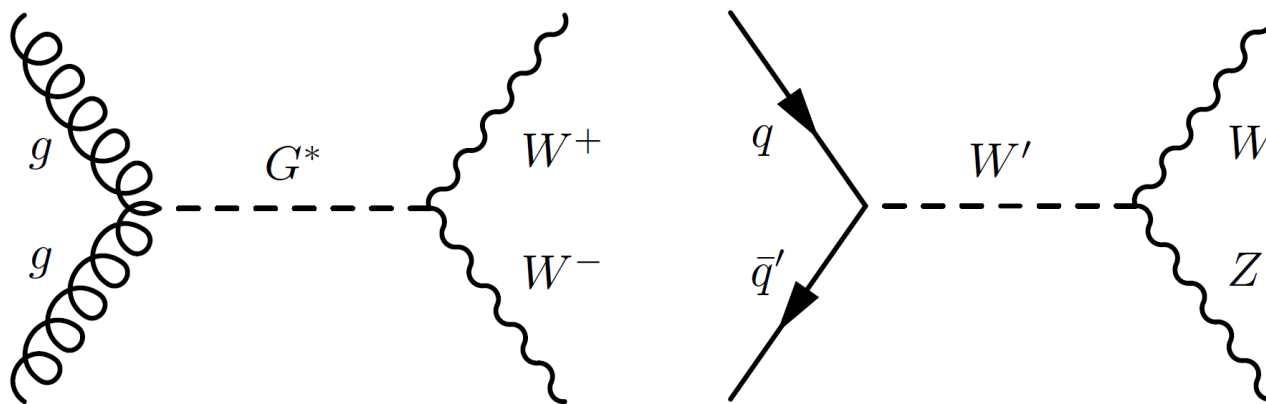
RS1 KK G^* – расширенная модель Рэндалл-Сандрума:

- Дополнительное 5-ое искривленное измерение;
- 2 браны: ТэВ (SM) и Планковская (гравитация);
- Модель RS1 G^* решает проблему иерархии (слабость гравитационного взаимодействия на ТэВ-бране);
- Параметр модели $k/\bar{M}_{Pl} = 1$, k – характеризует кривизну измерения;

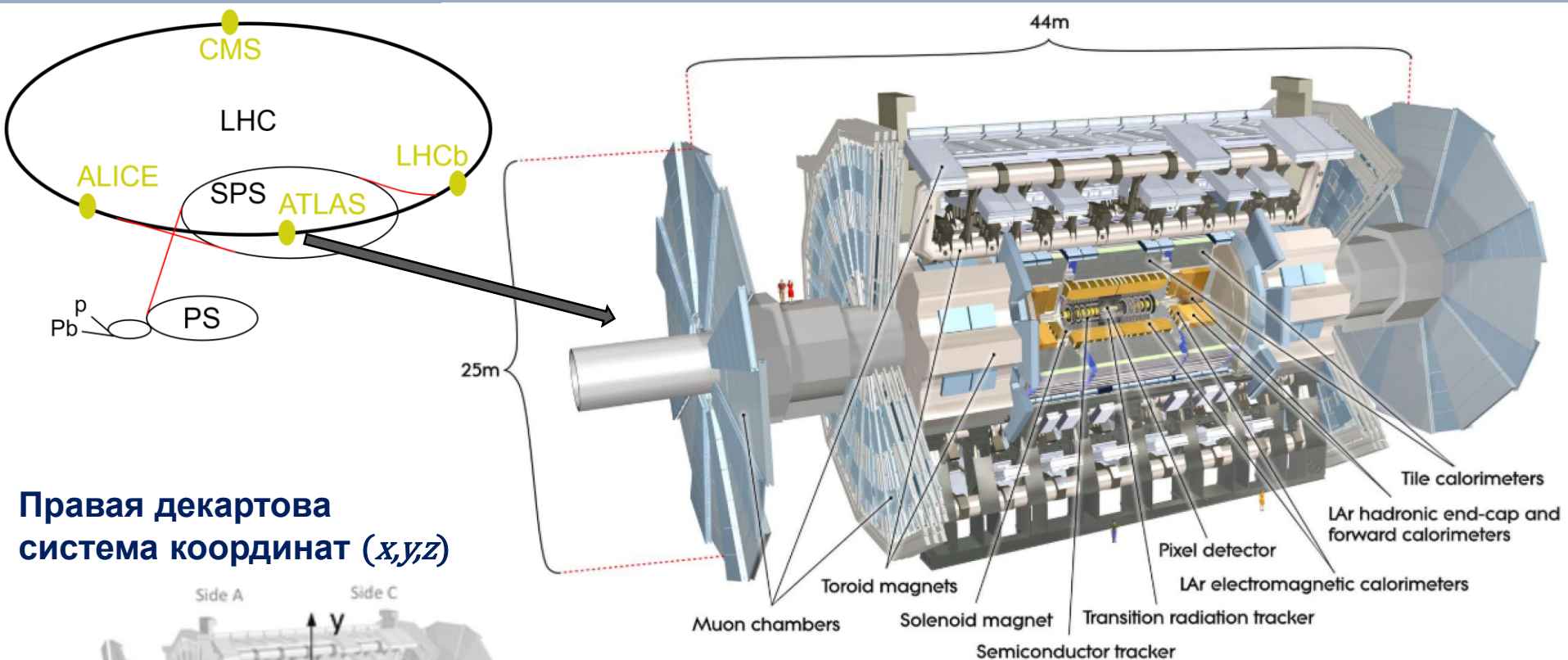
EGM W' - расширенная калибровочная модель;

- Тяжелый векторный триплет (возникает во многих расширениях SM);
- Константа связи $c = 1$.

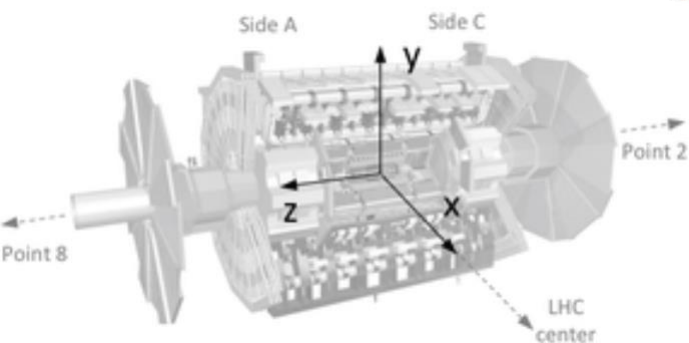
Распад: $G^* \rightarrow WW \rightarrow l\nu qq$ и $W' \rightarrow WZ \rightarrow l\nu qq$.



Детектор ATLAS на LHC



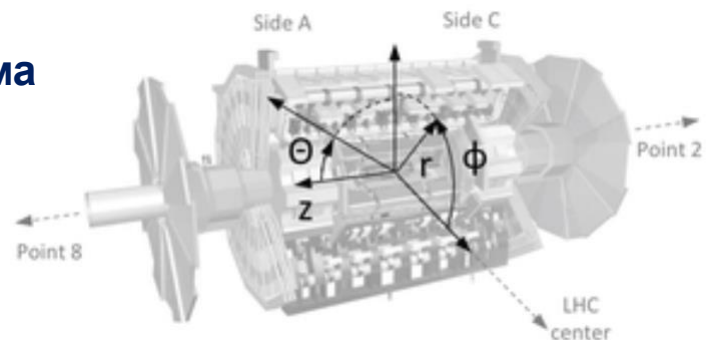
Правая декартова система координат (x, y, z)



Сферическая система координат (r, ϕ, θ)

$$\eta = -\ln \tan(\theta/2)$$

$$\Delta R = \sqrt{(\Delta\eta)^2 + (\Delta\phi)^2}$$



Данные и моделирование

	EL	VV
данные	2015+2016, 13 ТэВ, $L_{\text{int}} = 36.1 \text{ фб}^{-1}$	2012, 8 ТэВ, $L_{\text{int}} = 20.6 \text{ фб}^{-1}$
W/Z+jets $t\bar{t}$ Single- t VV (WW, WZ, ZZ)	Sherpa 2.2.1, NLO ME для 0-2j; LO ME 3-4j Powheg-Box v2, NLO; Pythia 8 (PS) Powheg-Box v1, Pythia 6 (PS) Sherpa 2.2.1, NLO ME для 0-1j; LO ME 2-3j	Sherpa 1.4.1, NLO ME для 0-2j; LO ME 3-4j MC@NLO Herwig +Jimmy (PS) MC@NLO Herwig +Jimmy (PS) Herwig +Jimmy, NLO ME для 0-1j; LO ME 2-3j
сигнал	Pythia 8.210, LO	G*-CalcHEP, LO; W'-Pythia 8 NNLO, PS
Pile-up	Pythia 8.186, LO ME	

Каждое смоделированное событие поправляется на полный вес w_i^{total} :

$$w_i^{\text{total}} = w_i^{\text{theory}} \times \prod_k \text{SF}_k \times w_i^{\text{pile-up}}$$

$$w_i^{\text{theory}} = \frac{(\sigma \times \mathcal{B}) \times k_{\text{factor}} \times \epsilon_{\text{filter}} \times \mathcal{L}}{N'_{\text{gen}}}$$

$$N'_{\text{gen}} = \sum_{m=1}^{N_{\text{gen}}} w_m$$

Моделирование сигнала для EL

- Моделировались отдельно наборы для e^* и μ^* (далее не использовался);
- Генератор: Pythia8 + LO ME;
- $pp \rightarrow ee^* \rightarrow evW$: FullSim;
- $\Lambda = 5000$ GeV;
- $m_{e^*} = \{100; 1000\}$ ГэВ – шаг 100 ГэВ, $m_{e^*} = \{1000; 4000\}$ ГэВ – шаг 250 GeV;
- Проверены кинематические распределения на уровне генератора.

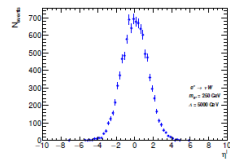


Рис. В.2. e (PV) η

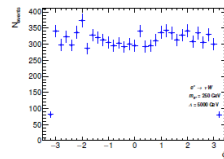


Рис. В.3. e (PV) ϕ

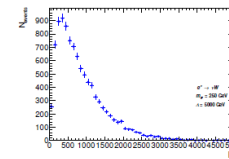


Рис. В.4. e (PV) E

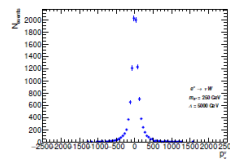


Рис. В.6. ν (d.) p_x

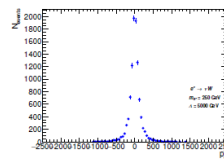


Рис. В.7. ν (d.) p_y

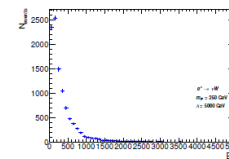
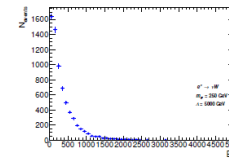
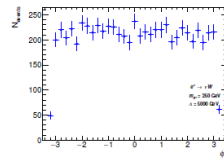
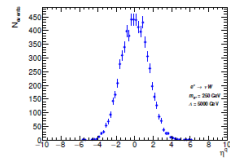


Рис. В.8. ν (d.) E



Отбор объектов

Тип отбора	Объекты	VV	EL
Начальный	Электроны	$ \eta < 2.47$, кроме $\{1.37; 1.52\}$ $p_T > 20$ ГэВ <i>medium id</i> $p_T^{\text{cone}0.2}/p_T < 0.15$ $ d_0 /\sigma_{d_0} < 6$ $ z_0 \sin \theta < 2$ мм	$p_T > 40$ ГэВ <i>loose id</i> — $ d_0 /\sigma_{d_0} < 5$ $ z_0 \sin \theta < 0.5$ мм
	Мюоны	$ \eta < 2.5$ $p_T > 20$ ГэВ Качество ID трека, $(q/p)_{\text{sig}} < 5$ $p_T^{\text{cone}0.2}/p_T < 0.15$ $ d_0 /\sigma_{d_0} < 3.5$ $ z_0 \sin \theta < 2$ мм	$p_T > 40$ ГэВ <i>medium id</i> loose для треков $ d_0 /\sigma_{d_0} < 3$ $ z_0 \sin \theta < 0.5$ мм
	Струи	<i>AntiKt4</i> $p_T > 30$ ГэВ, $ \eta < 2.8$ JVF	$p_T > 20$ ГэВ JVT
Конечный	Электроны	$p_T > 25$ ГэВ <i>tight id</i> $E_T^{\text{cone}0.2}/E_T < 0.14$ $ z_0 \sin \theta < 0.5$ мм	$p_T > 65$ ГэВ <i>loose</i> $ z_0 \sin \theta < 0.5$ мм
	Мюоны	$p_T > 25$ ГэВ $E_T^{\text{cone}0.2}/E_T < 0.14$ $ z_0 \sin \theta < 0.5$ мм	
	Струи	<i>CA12</i> $p_T > 400$ ГэВ $ \eta < 2$, $\sqrt{y_F} > 0.45$	<i>AntiKt10</i> $p_T > 200$ ГэВ $ \eta < 2$
	b-струи	начальные <i>AntiKt4</i> струи, $ \eta < 2.5$, $p_T > 20$ ГэВ MV1, 70%, JVF	MV2, 77%, JVT
	E_T^{miss}	откалиброванные объекты (e, μ, j) и TST компонента	

- Объекты:
 e, μ , струи, E_T^{miss} .
- Категории объектов:
начальные и конечные.
- Реконструкция:
 e – ID+EM;
 μ – ID+MS;
 Струи – EM.

Первичный (PRE) отбор событий

- Событие с полной информацией;
- 1 PV с ≥ 2 (3) треками для EL (VV);

	VV	EL
Удаление перекрытий (1)	между начальными e, μ и конечными $CA12$ и $AntiKt4$	$AntiKt4$ и b -струями
Чистка струй	Событие удаляется, если начальная $AntiKt4$ является $LooseBad$	
Удаление перекрытий (2)	—	между начальными e и конечными $AntiKt10$
Число струй	$N_{\text{final}}^{\text{jets}} \geq 2 \parallel N_{\text{final}}^J \geq 1$	$N_{\text{final}}^J \geq 1$
Число лептонов	$N_{\text{final}}^e + N_{\text{final}}^\mu = 1$	$N_{\text{final}}^e = 1$
Триггерное соответствие	$N_{\text{baseline}}^e + N_{\text{baseline}}^\mu = 0$ Событие удаляется, если конечный ℓ не совпадает с триггируемым ℓ	
Генераторное соответствие	—	Смоделированные данные: событие удаляется, если конечный e не является генераторным e
E_T^{miss}	$E_T^{\text{miss}} > 30 \text{ GeV}$	$E_T^{\text{miss}} > 100 \text{ GeV}$
m_J	—	$m_{\text{final}}^J > 50 \text{ GeV}$
$D_2^{\beta=1}$	—	событие удаляется, если конечная $AntiKt10$ не проходит верхний отбор с W -tag50

Фоновые процессы после PRE

EL:

- Основной фон: $t\bar{t}$, W +jets.
- Учтены все систематические и статистические неопределенности.
- События нормированы на ω_{tot} для 36.1 фб^{-1} .

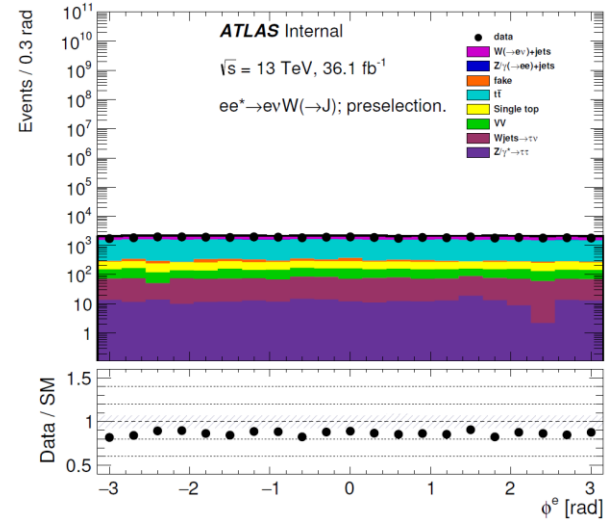
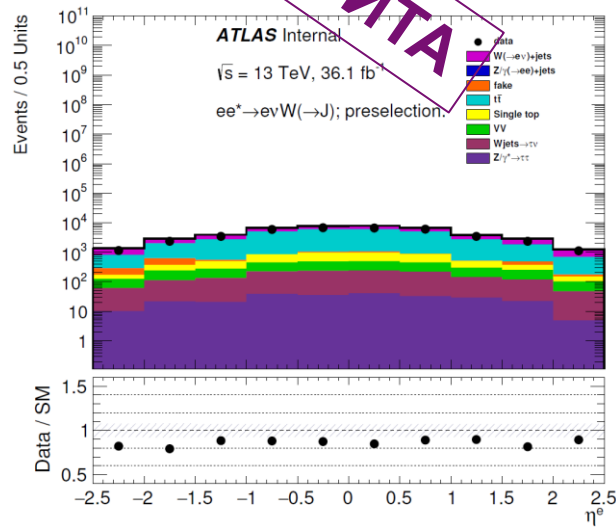
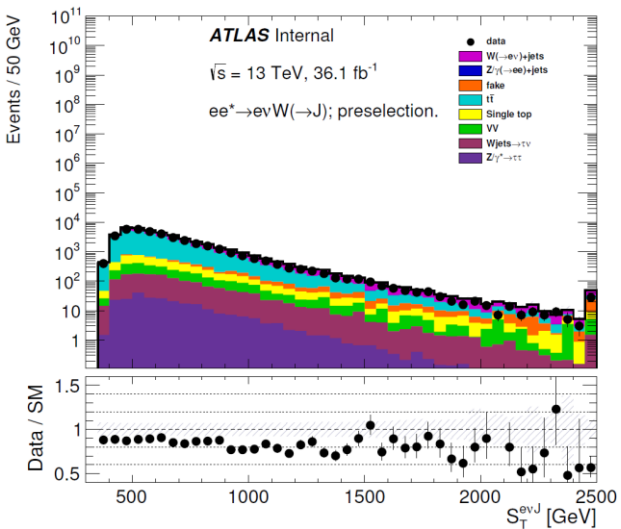
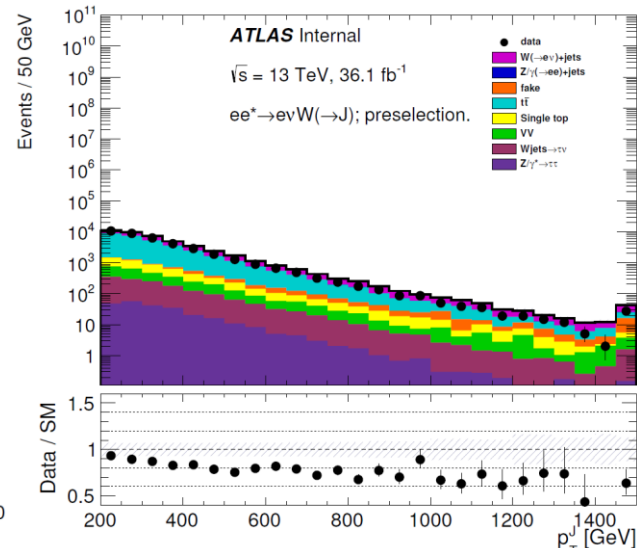
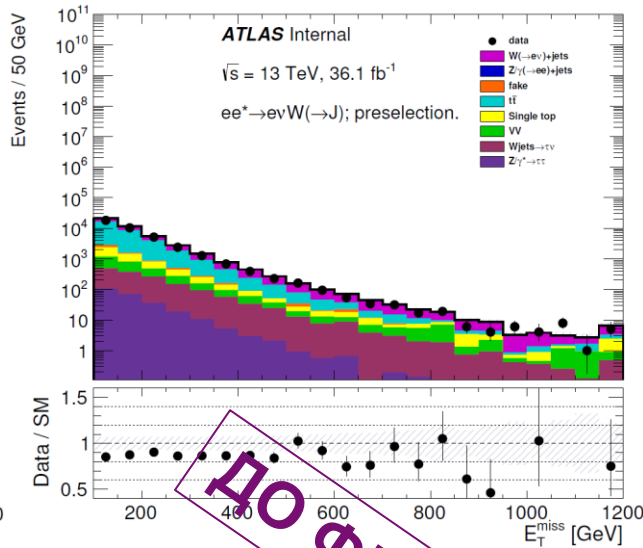
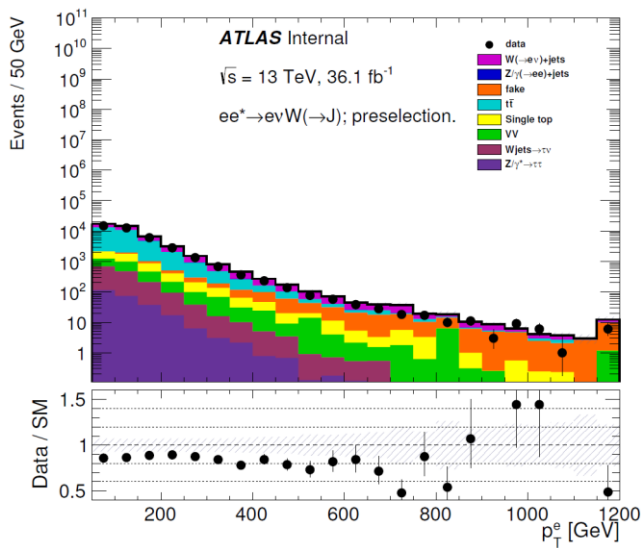
	N_{evt}	$N_{\text{evt}}/N_{\text{total}}$ [%]
$W(\rightarrow e\nu) + \text{jets}$	$(1218 \pm 96) \times 10$	27
$W(\rightarrow \tau\nu) + \text{jets}$	1291 ± 97	3
$Z/\gamma^*(\rightarrow ee) + \text{jets}$	$(7 \pm 2) \times 10$	<1
$Z/\gamma^*(\rightarrow \tau\tau) + \text{jets}$	$(26 \pm 3) \times 10$	<1
$t\bar{t}$	$(26 \pm 2) \times 10^3$	58
Single- t	$(26 \pm 2) \times 10^2$	6
VV	$(164 \pm 11) \times 10$	4
Fake электроны	$(8 \pm 2) \times 10^2$	2

VV:

- Основной фон: W +jets
- События нормированы на ω_{tot} для 20.3 фб^{-1} .

каналы распада	N_{evt}		N_{total} [%]	
	e	μ	e	μ
$W + \text{jets}$	76853600	68530500	91	91
$Z/\gamma^* + \text{jets}$	6701340	6251600	8	8
$t\bar{t}$	491097	434220	< 1	< 1
Single- t	141017	124199	< 1	< 1
VV	119200	104315	< 1	< 1

Композиция фона после первичного отбора в EL



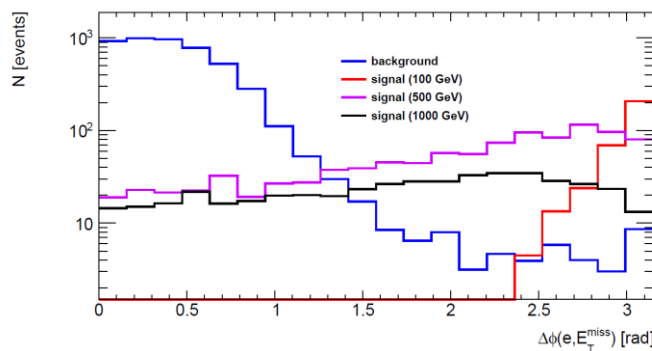
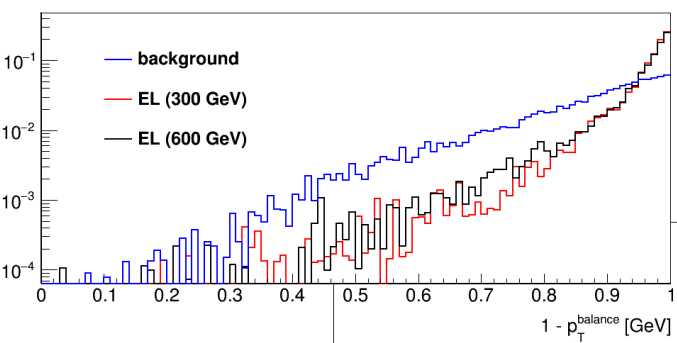
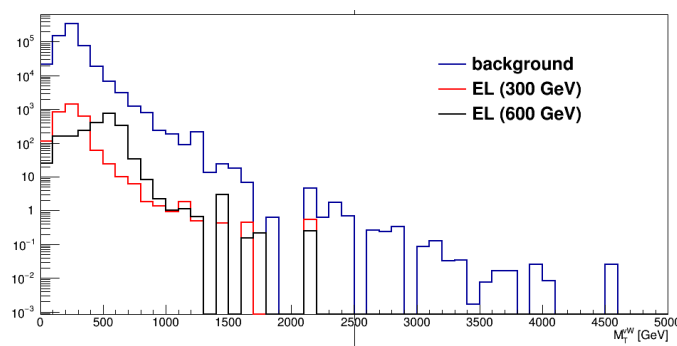
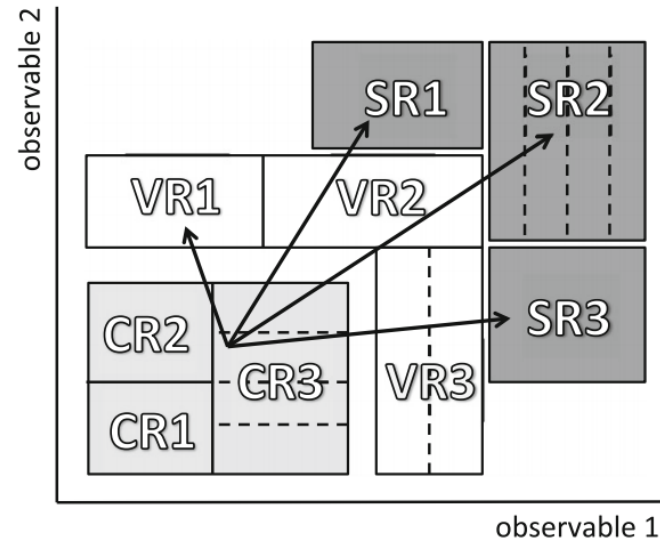
ДО ФИТА

- События нормированы $L_{\text{int}} = 36.1 \text{ fb}^{-1}$ с учетом полного веса событий.
- Учтены все систематические и статистические неопределенности.

Дискриминирующие переменные

EL:

- m_J – пик в массе W в сигнале;
- M_T^{vW} – якобиановский пик в сигнале;
- $|\Delta\phi(e, E_T^{\text{miss}})|$ – разная форма сигнала и фона;
- p_T^{balance} для e и e^* – после ограничений на M_T^{vW} & $|\Delta\phi(e, E_T^{\text{miss}})|$ не эффективен.



VV:

- $m_{jj(j)}$;
- $p_T^{jj(j)}$;
- p_T^{lv} ;
- $|\Delta\phi(j(j), E_T^{\text{miss}})|$.

Оптимизация сигнальных областей (SR) в EL

- Конечное состояние $e\nu J$ эффективно на малых массах e^* , поэтому оптимизация важна на $m_{e^*} < 1000$ ГэВ. (см. график бренчингов на слайде 3)
- Оптимизация выполнена с помощью максимизации модифицированного критерия значимости $Z = \sqrt{2 \times ((S + B) \times \ln(1 + S/B) - S)}$,

	m_{e^*} [ГэВ]	$\min m_T^{\nu W}$ [ГэВ]	$\max m_T^{\nu W}$ [ГэВ]	$\min \Delta\phi(e, \vec{E}_T^{\text{miss}}) $ [радиан]	эфф. в SRi-1 к PRE [%]	эфф. в SRi к PRE [%]	эфф. в SRi+1 к PRE [%]	эфф. полная [%]
SR1	100	0	200	2.7	н/п	61	0	3
SR2	200	100	н/п	2.4	46	59	61	4
SR3	300	100	н/п	2.1	49	56	40	5
SR4	400	200	н/п	1.8	45	40	34	5
SR5	500	300	н/п	1.5	39	38	31	5
SR6	600	400	н/п	1.2	38	38	28	6
SR7	700	500	н/п	1.2	40	34	28	6
SR8	800 900	600	н/п	0.9	38 38	36 38	27 32	7 8
SR9	1000	700	н/п	0.9	42	37	н/п	8
	1250				44	42	н/п	9
	1500				45	43	н/п	10
	1750				45	44	н/п	10
	2000				46	45	н/п	10
	2250				45	45	н/п	10
	2500				44	43	н/п	10
	2750				44	44	н/п	10
	3000				44	44	н/п	10
	3250				43	42	н/п	10
	3500				44	43	н/п	10
	3750				42	42	н/п	10
4000	42	42	н/п	9				

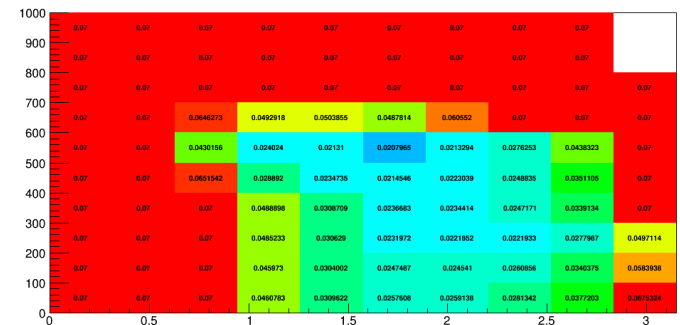
- Проверены 3 комбинации дискриминирующих переменных:

1. $\max p_T^{\text{balance}}, \max m_T^{\nu W}$ и $\min |\Delta\phi(e, \vec{E}_T^{\text{miss}})|$,

2. $\max p_T^{\text{balance}}, \min m_T^{\nu W}$ и $\min |\Delta\phi(e, \vec{E}_T^{\text{miss}})|$,

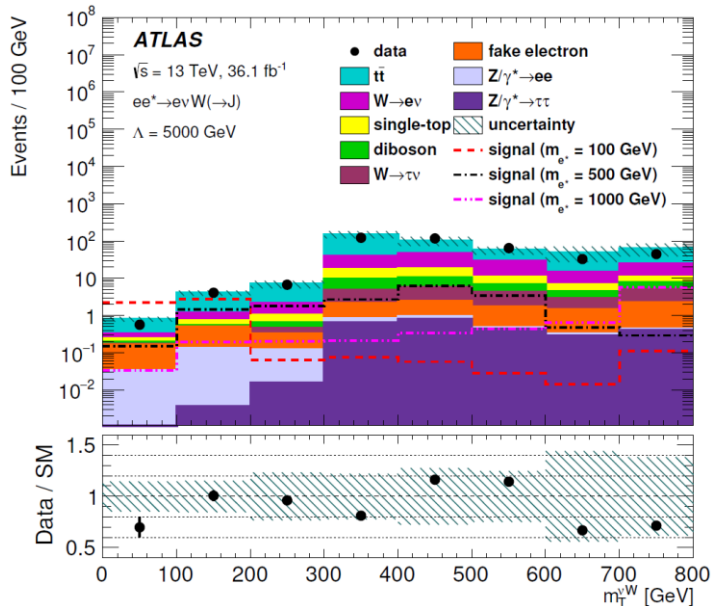
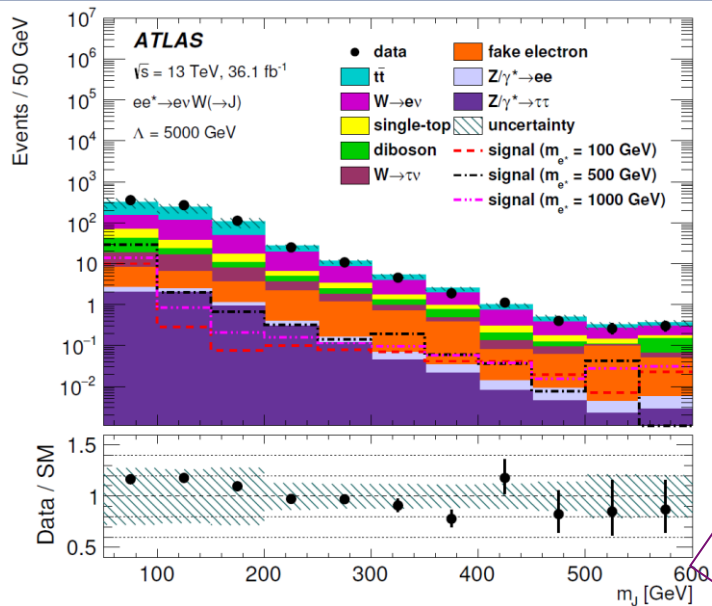
3. $\min |\Delta\phi(e, \vec{E}_T^{\text{miss}})|, \min m_T^{\nu W}$ и $\max m_T^{\nu W}$.

- Также оптимизация проверена минимизацией $\mu_{\text{sig}}^{\text{UL}}$.



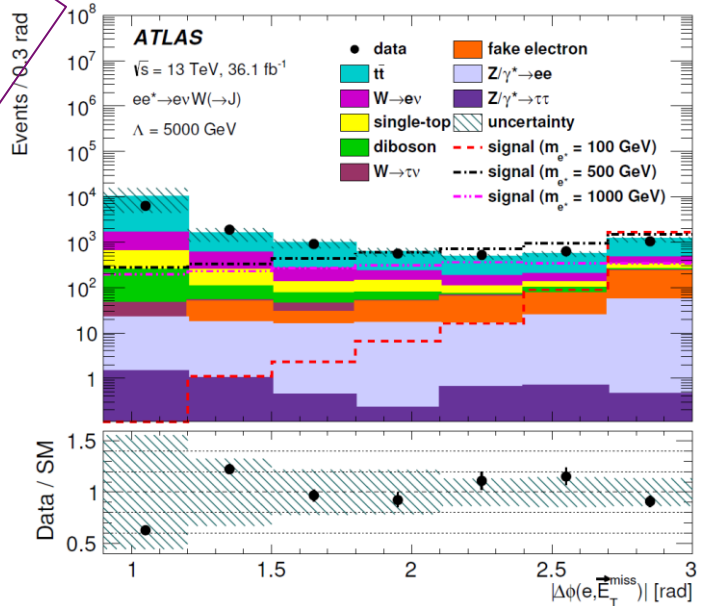
- Оба метода дали близкий результат.

Дискриминирующие переменные после отбора PRE



Каждый бин показывает суммарное предсказанное число событий и наблюдаемое в соответствующей SR (в соответствии с оптимизацией SR) после фита в соответствующих W и $t\bar{t}$ CR для данной SR.

**ПОСЛЕ
CR ФИТА**



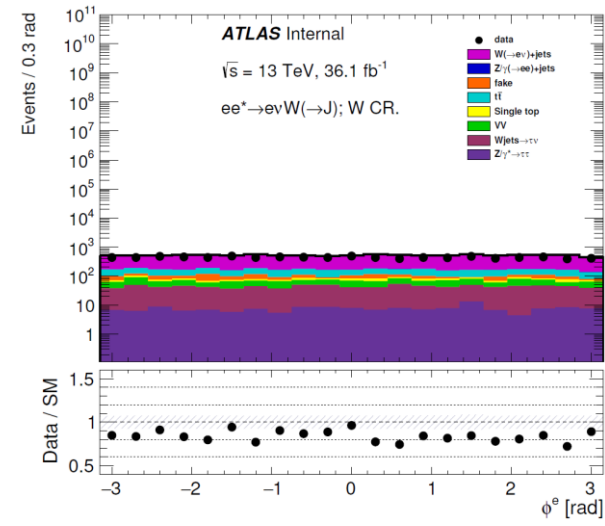
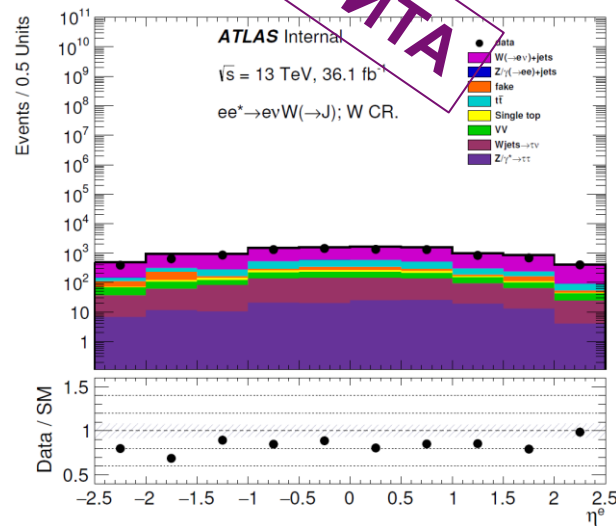
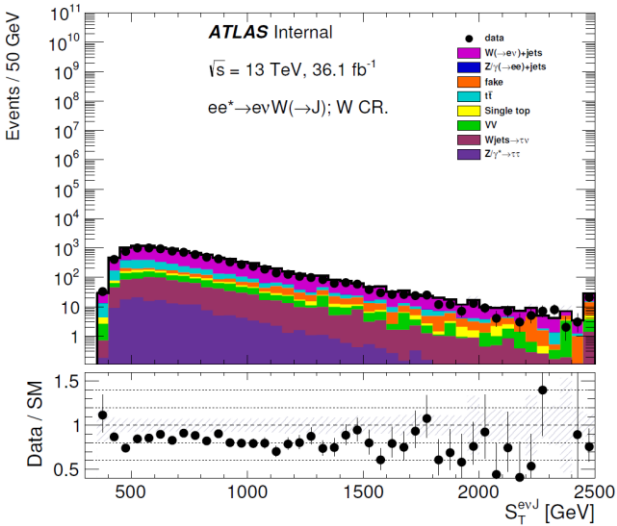
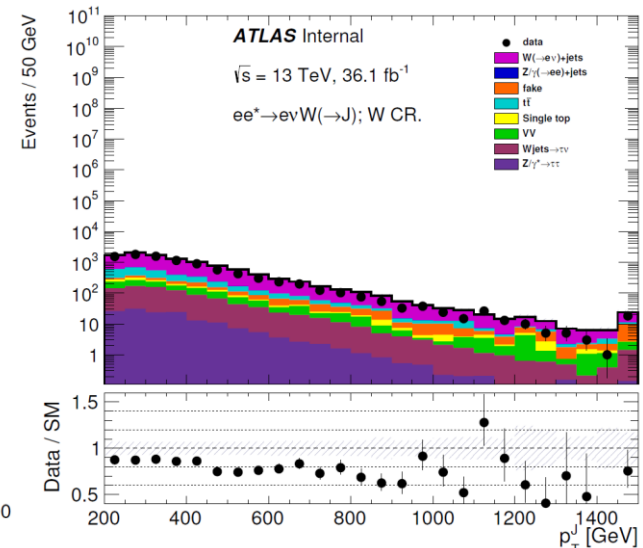
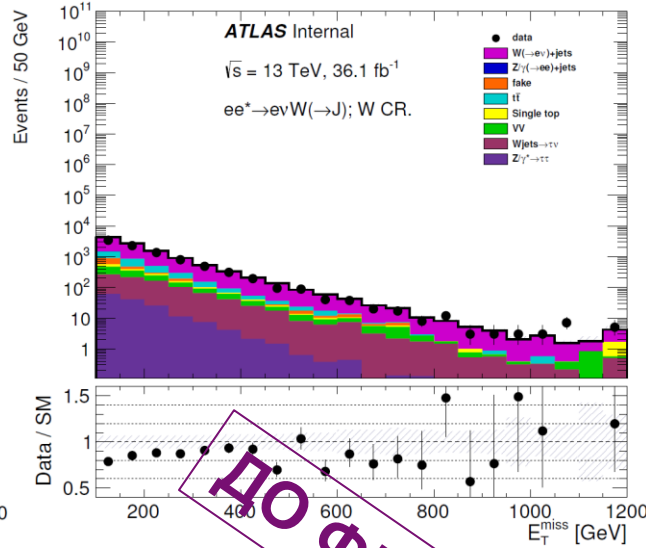
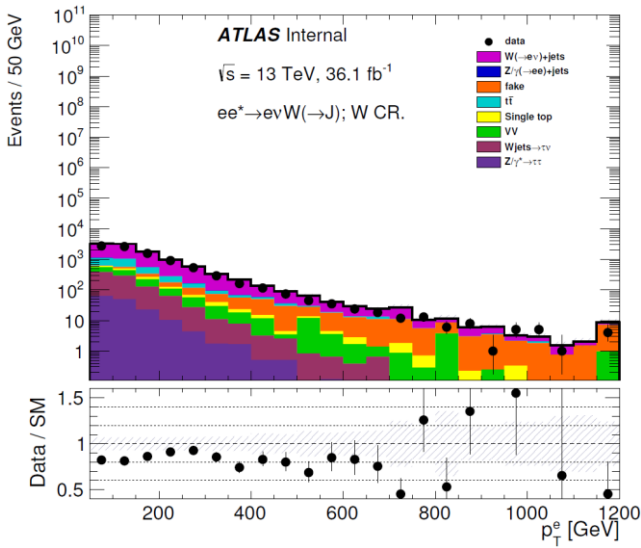
PRE, SR, CR, VR в EL

CR и VR синхронизированы с SR для надежности оценки фона, 9 SR → 9 CR & 9 VR.

Область	$D_2^{\beta=1}$	m_J интервал	$N^{b\text{-jets}}$	$m_T^{\nu W}$	$\Delta\phi(e, \vec{E}_T^{\text{miss}})$
PRE	W -tag50 проходит	н/п	н/п	н/п	н/п
SR	W -tag50 проходит	W -tag50 проходит	0	проходит	проходит
W CRs	W -tag50 проходит	W -tag80 не проходит	0	проходит	н/п
$t\bar{t}$ CRs	W -tag50 проходит	W -tag50 проходит	≥ 2	проходит	проходит
m_J VRs	W -tag50 проходит	W -tag50 не проходит W -tag80 проходит	н/п	проходит	проходит
b -jet VRs	W -tag50 проходит	W -tag50 проходит	1	проходит	проходит

Для иллюстрации построены интегральные W и $t\bar{t}$ CR и m_J и b -jet VR без применения отборов на дискриминирующие переменные.

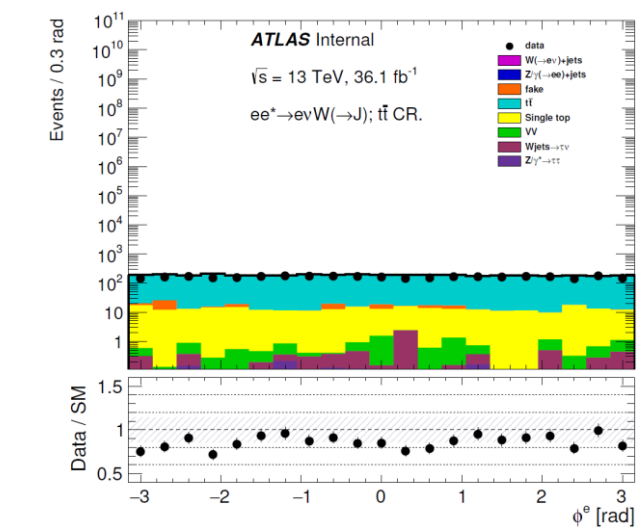
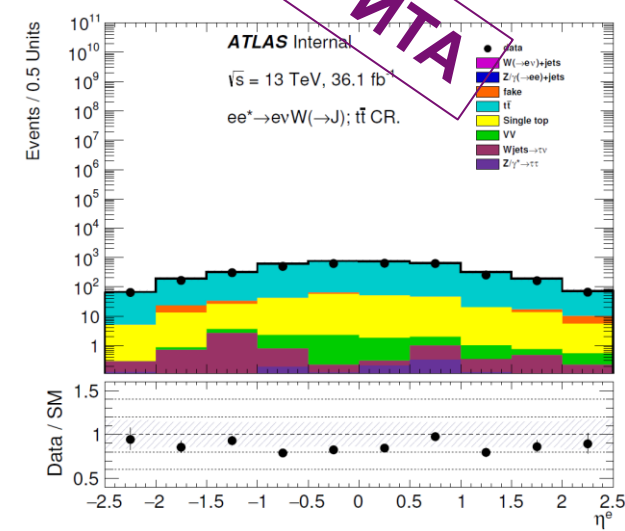
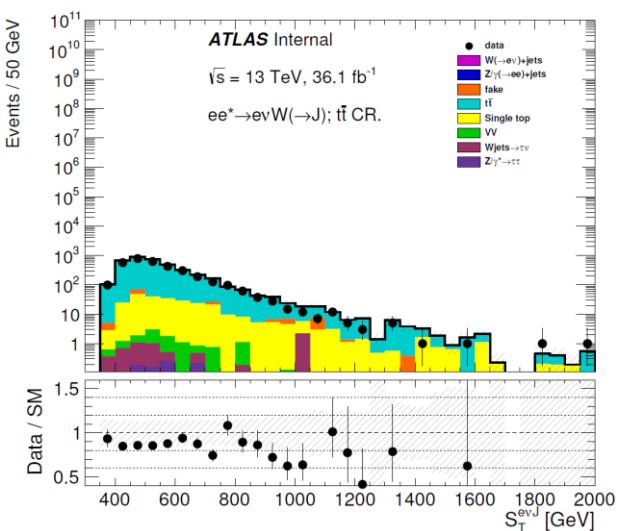
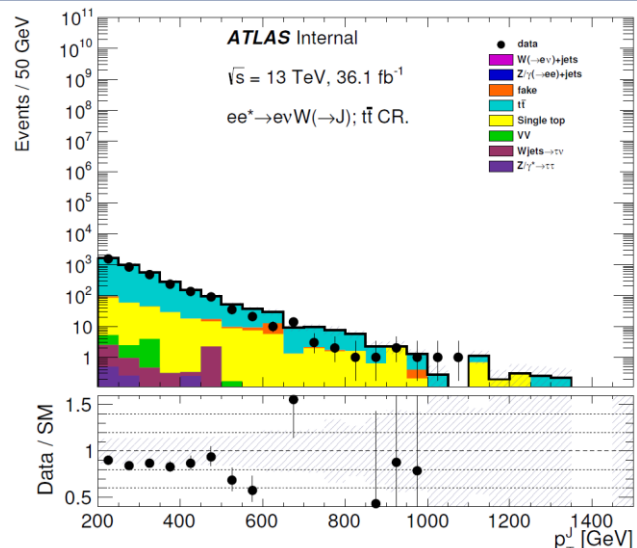
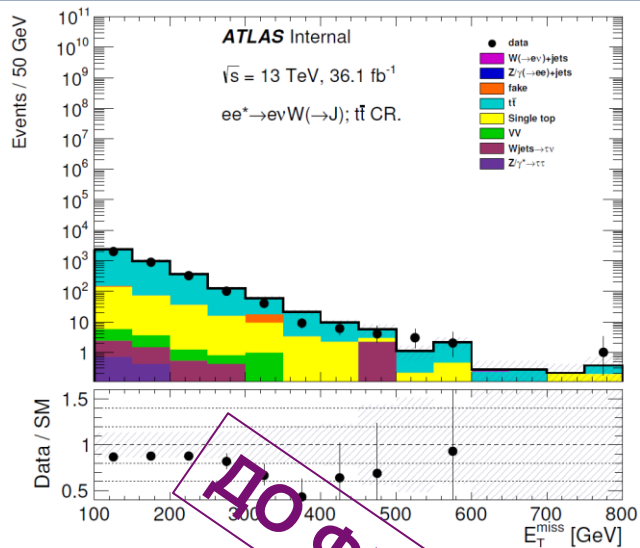
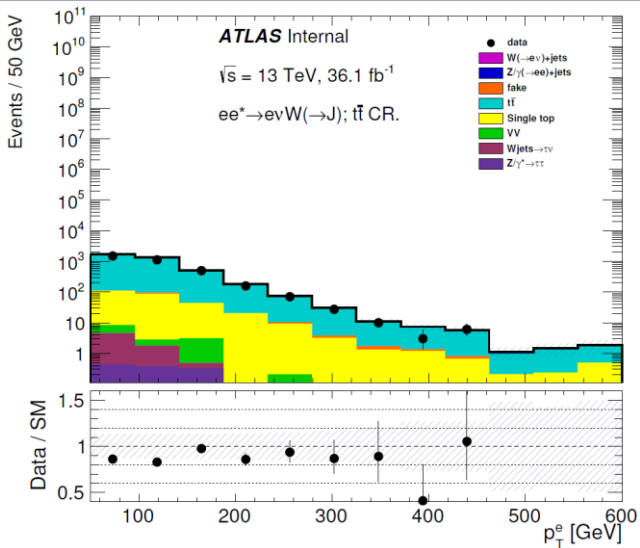
Интегральная W CR в EL



ДО ФИТА

- События нормированы $L_{\text{int}} = 36.1 \text{ fb}^{-1}$ с учетом полного веса событий.
- Учтены все систематические и статистические неопределенности.

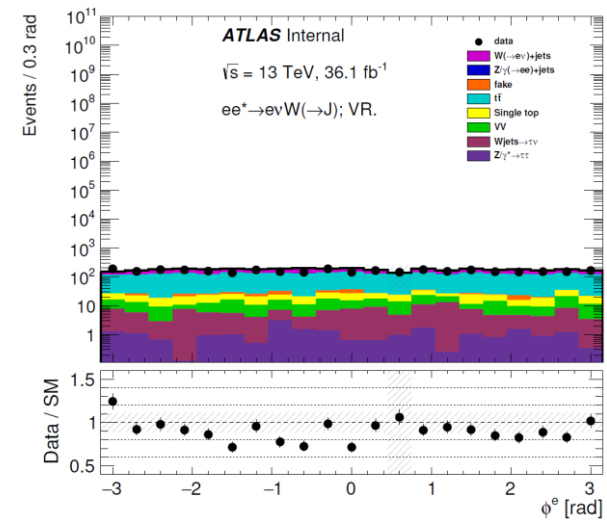
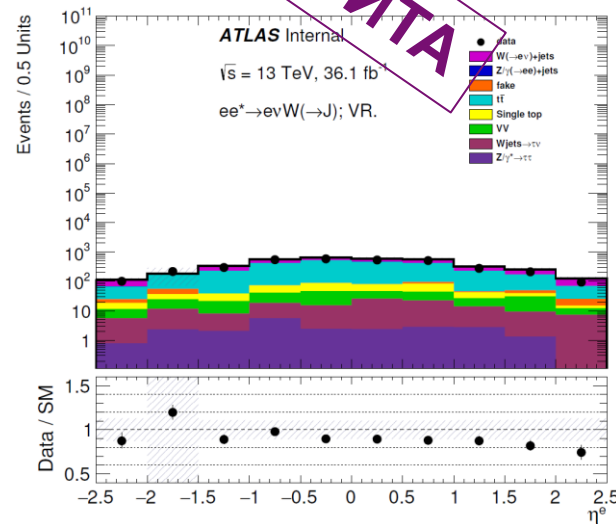
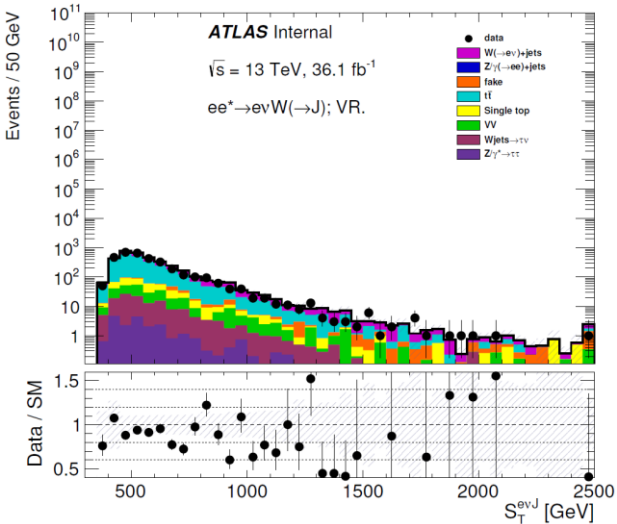
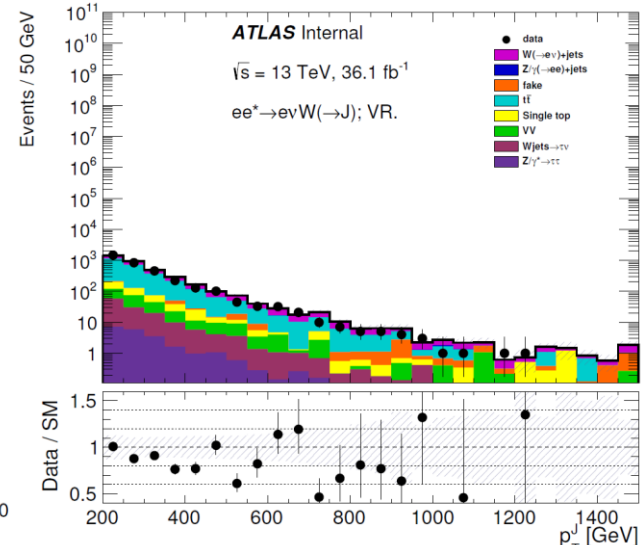
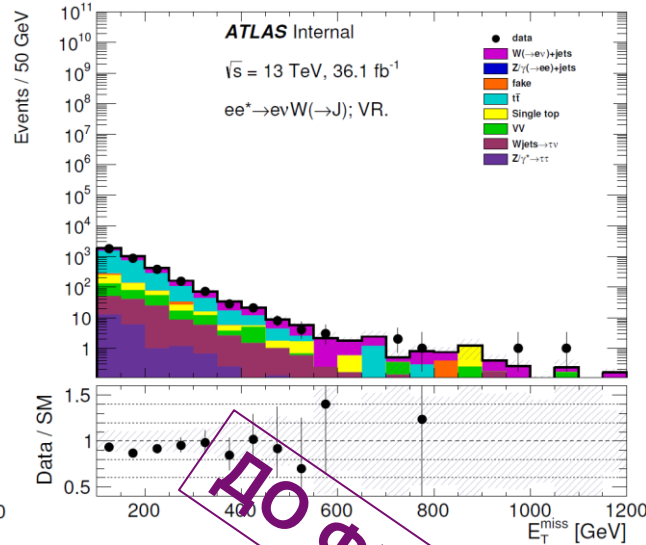
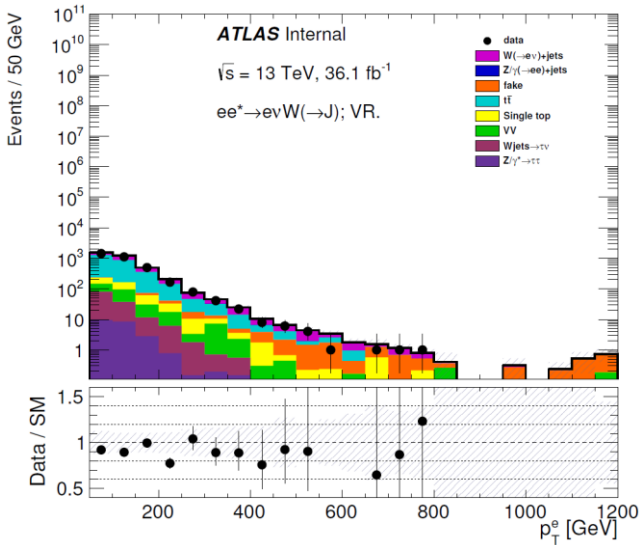
Интегральная $t\bar{t}$ CR в EL



ДО ФИТА

- События нормированы $L_{\text{int}} = 36.1 \text{ fb}^{-1}$ с учетом полного веса событий.
- Учтены все систематические и статистические неопределенности.

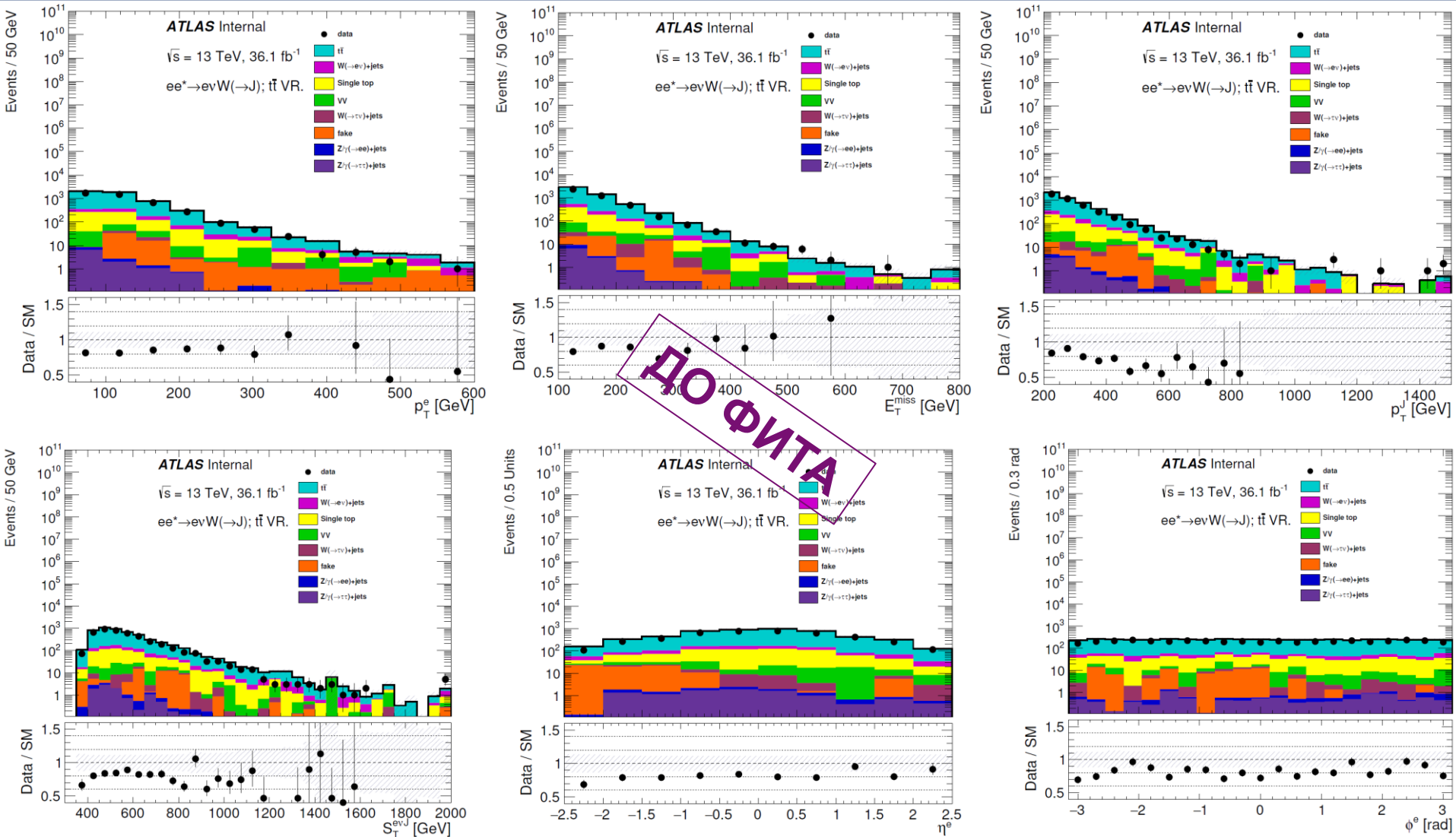
Интегральная m_J VR в EL



ДО ФИТА

- События нормированы $L_{int} = 36.1 \text{ фб}^{-1}$ с учетом полного веса событий.
- Учтены все систематические и статистические неопределенности.

Интегральная b -jet VR в EL



- События нормированы $L_{\text{int}} = 36.1 \text{ фб}^{-1}$ с учетом полного веса событий.
- Учтены все систематические и статистические неопределенности.

Сигнальные области (SR) в VV

Low- p_T resolved region (LRR)	High- p_T resolved region (HRR)	Merged region (MR)
≥ 2 AntiKt4 jets ($p_T > 30$ GeV) $p_{T,jj} > 100$ GeV $p_{T,l\nu} > 100$ GeV b -jet Veto (MV1, 70%) $\Delta\phi(j_1, E_T^{\text{miss}}) > 1$ $65 < m_{jj} < 105$ GeV	≥ 2 AntiKt4 jets ($p_T > 80$ GeV) $p_{T,jj} > 300$ GeV $p_{T,l\nu} > 300$ GeV b -jet Veto (MV1, 70%) $\Delta\phi(j_1, E_T^{\text{miss}}) > 1$ $65 < m_{jj} < 105$ GeV	≥ 1 CA12 Jet $p_{T,J} > 400$ GeV $p_{T,l\nu} > 400$ GeV b -jet Veto (MV1, 70%) $\Delta\phi(J, E_T^{\text{miss}}) > 1$ $65 < m_J < 105$ GeV

- SR используется для $m_{G^*W'}$, если вносит не менее 10% от суммарной эффективности сигнала.

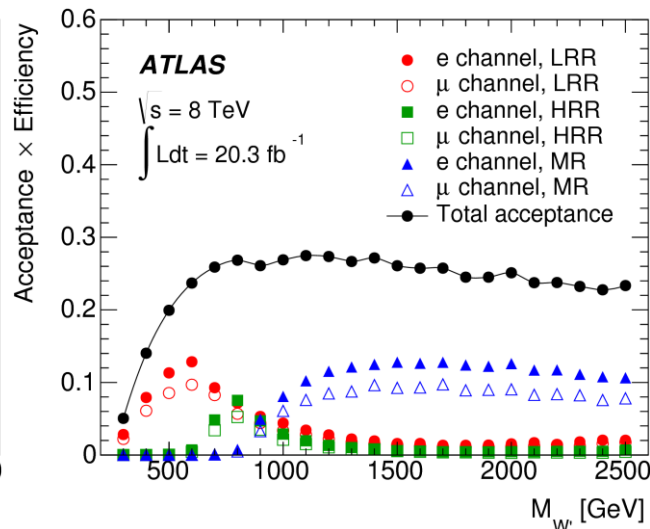
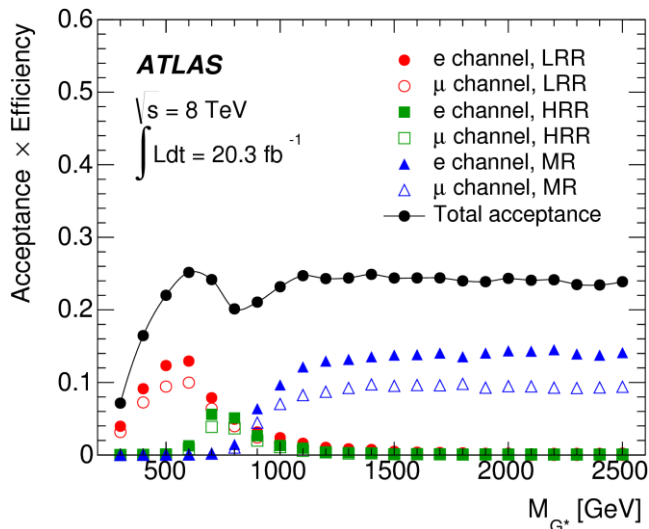
m [ГэВ]	G^*	W'
300	LRR	LRR
400	LRR	LRR
500	LRR	LRR
600	LRR & HRR	LRR & HRR
700	LRR & HRR	LRR & HRR
800	LRR & HRR & MR	LRR & HRR & MR
900	HRR & MR	HRR & MR
1000	MR	HRR & MR
1100	MR	HRR & MR
1200	MR	MR
1300	MR	MR
1400	MR	MR
1500	MR	MR
1600	MR	MR
1700	MR	MR
1800	MR	MR
1900	MR	MR
2000	MR	MR
2100	MR	MR
2200	MR	MR
2300	MR	MR
2400	MR	MR
2500	MR	MR

Prioritization for SR

Low- p_T resolved region

High- p_T resolved region

Merged region



Систематические неопределенности

Экспериментальные источники:

- Измерение светимости;
- Электроны и мюоны:
 - Эффективность реконструкции, триггера, идентификации, изоляции;
 - энергетическая шкала (калибровка);
 - энергетическое разрешение;
- E_T^{miss} , Струи:
 - энергетическая шкала (калибровка);
 - энергетическое разрешение;
- Коллимированные струи: p_T , m_J , D_2 ;
- b -струи: доли b , c , легких q и g
- Статистическая ограниченность смоделированных данных в CR и SR

Теоретические источники:

- Моделирование фоновых и сигнальных данных;
- PDF вариации;
- μ_R , μ_F вариации;
- Альтернативные генераторы.

Статистический анализ в EL

$$\begin{aligned}
 & L(N, \theta^0, m | \mu, \beta, \theta, \gamma) = \\
 & \underbrace{P \left(N_{SR} \left| \underbrace{\left[\mu \times S_{SR} \times \prod_i^{Systematics} v_{SR, sig}^i(\theta_i) + \sum_l^{Backgrounds} \beta_l \times B_{SR, l} \times \prod_i^{Systematics} v_{SR, l}^i(\theta_i) \right]}_{\xi_{SR}} \right. \right)}_{\text{Poissonian term for SR}} \times \gamma_{SR} \\
 & \times \prod_q^{CR} P \left(N_{CR_q} \left| \underbrace{\left[\sum_l^{Backgrounds} \beta_l \times B_{CR_q, l} \times \prod_i^{Systematics} v_{CR_q, l}^i(\theta_i) \right]}_{\xi_{CR_q}} \right. \right) \times \gamma_{CR_q} \\
 & \underbrace{\times \prod_n^{Systematics} G(\theta_n^0 | \theta_n, 1)}_{\text{Gaussian constraint term}} \times \underbrace{\prod_p^{Regions} P(m_p | \gamma_p \times \tau_p)}_{\text{Poissonian constraint term}} .
 \end{aligned}$$

- Простой счетный эксперимент (1 бин), описываемый функцией L
- Проверка сигнальной (H1) гипотезы проведена в асимптотическом приближении
- Систематические неопределенности включены как мешающие параметры в Гаусс член
- Статистические неопределенности включены как мешающие параметры в Пуассоновский член
- Нормировочные параметры (β) фита для основных фоновых процессов включены в L

Нормировочные параметры: β

	β_W	$\beta_{t\bar{t}}$
CR1	H/П	$0.8^{+0.2}_{-0.2}$
CR2	$0.79^{+0.08}_{-0.08}$	$0.8^{+0.2}_{-0.2}$
CR3	$0.79^{+0.08}_{-0.08}$	$0.8^{+0.2}_{-0.2}$
CR4	$0.77^{+0.10}_{-0.10}$	$1.0^{+0.4}_{-0.3}$
CR5	$0.72^{+0.10}_{-0.10}$	$1.2^{+0.5}_{-0.4}$
CR6	$0.83^{+0.10}_{-0.10}$	$0.7^{+0.4}_{-0.4}$
CR7	$0.91^{+0.11}_{-0.18}$	$0.13^{+1.17}_{-0.13}$
CR8	$0.65^{+0.15}_{-0.22}$	$1.7^{+1.6}_{-0.9}$
CR9	$0.66^{+0.14}_{-0.20}$	$1.6^{+1.6}_{-0.9}$

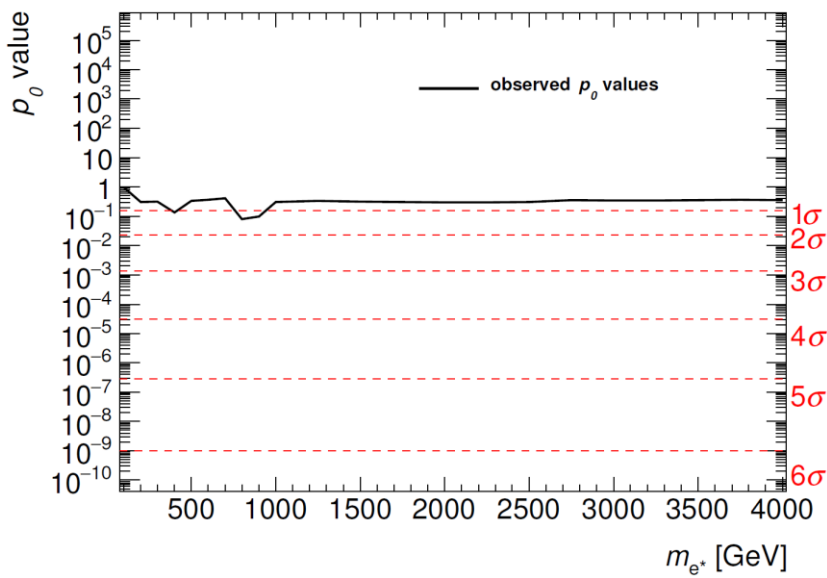
- Фит bkg-only в CR
- W CR1 не строится, так как $W(\rightarrow e\nu)+jets$ в SR1 не является доминирующим, устанавливается $\beta=1$.
- Начиная с $\sim t\bar{t}$ CR7 большие систематические неопределенности, так как число событий $t\bar{t}$ очень мало в соответствующих SR (см. следующий слайд).

Числа событий в SR в EL

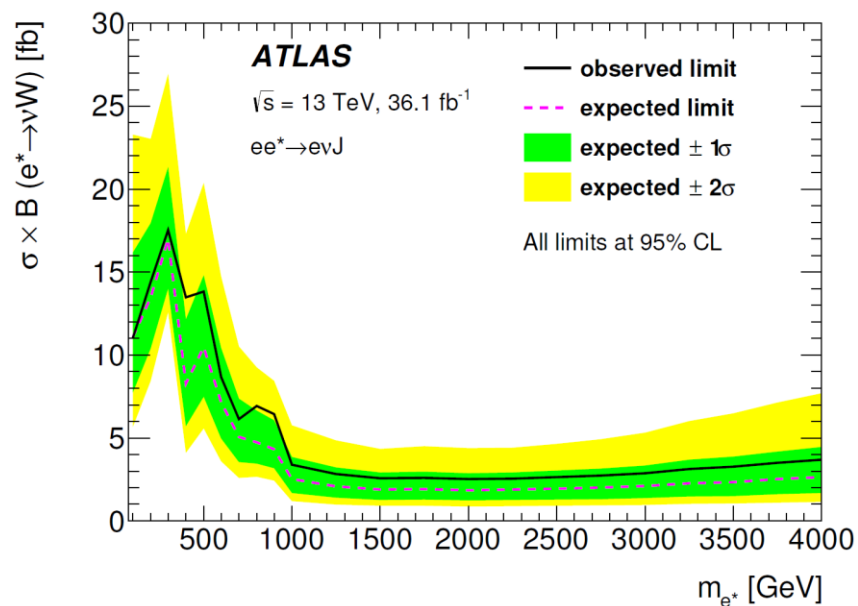
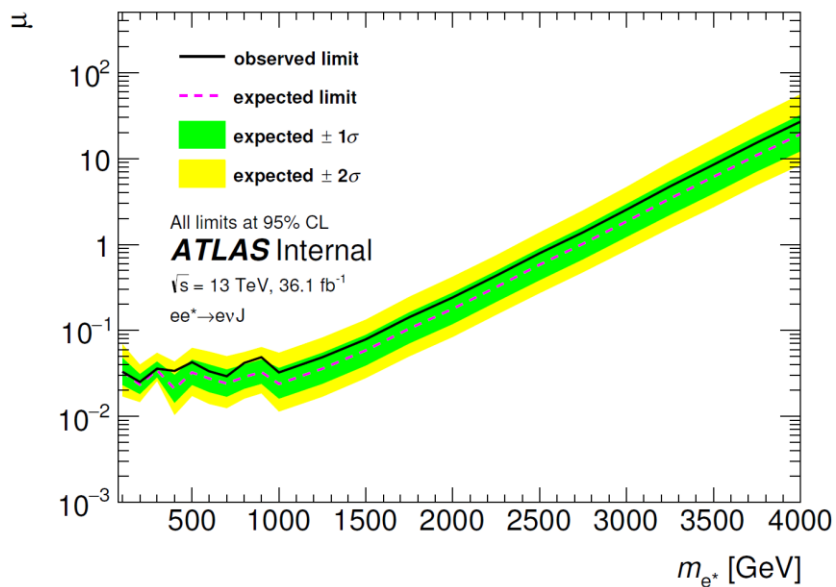
После фита фоновых процессов (H0-гипотеза) в CR&SR областях

Yields	SR1	SR2	SR3	SR4	SR5	SR6	SR7	SR8	SR9
Observed	13	25	39	35	43	34	15	16	8
Background	13 ± 5	17 ± 5	26 ± 8	25 ± 5	34 ± 8	30 ± 6	12 ± 4	8 ± 2	6 ± 2
$W \rightarrow e\nu$	2 ± 2	7 ± 3	11 ± 4	13 ± 3	14 ± 5	17 ± 4	7 ± 3	3.2 ± 1.3	2.2 ± 1.1
$Z/\gamma^* \rightarrow ee$	1.3 ± 1.2	1.6 ± 1.1	2.1 ± 1.3	1.7 ± 1.0	1.4 ± 0.9	0.6 ± 0.3	0.14 ± 0.10	0.10 ± 0.05	0.04 ± 0.03
$t\bar{t}$	2.9 ± 1.2	5 ± 2	7 ± 3	4 ± 3	11 ± 5	3 ± 2	0.1 ± 0.3	1 ± 2	0.4 ± 0.7
Single-top	0.7 ± 0.3	1.9 ± 0.5	2.6 ± 0.6	3.0 ± 1.4	3.0 ± 1.4	4 ± 2	1.9 ± 0.7	1.9 ± 0.6	1.7 ± 0.7
Fake electron	6 ± 2	1.9 ± 0.3	3.2 ± 1.0	0.6 ± 0.3	0.25 ± 0.07	0.7 ± 0.3	0.06 ± 0.11	–	–
Diboson	0.0 ± 1.1	0.2 ± 1.1	1 ± 2	2.9 ± 0.9	3.4 ± 0.7	3 ± 2	2 ± 3	1.1 ± 1.1	1.1 ± 1.1
$W \rightarrow \tau\nu$	–	–	0.0 ± 0.5	0.1 ± 0.2	0.34 ± 0.10	0.2 ± 0.6	0.21 ± 0.09	0.21 ± 0.08	0.20 ± 0.09
$Z/\gamma^* \rightarrow \tau\tau$	0.04 ± 0.02	0.04 ± 0.02	0.06 ± 0.03	0.03 ± 0.02	0.08 ± 0.06	0.06 ± 0.05	0.05 ± 0.06	0.1 ± 0.2	–

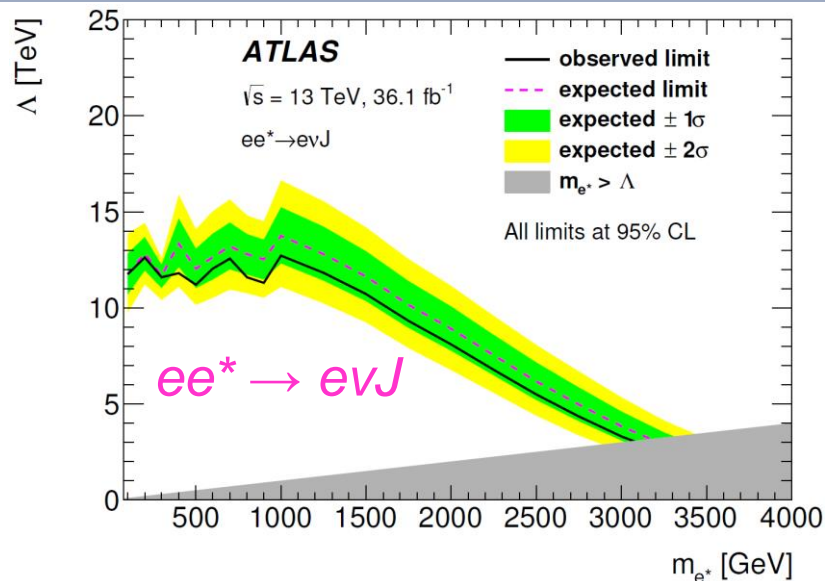
Результаты поиска возбужденных электронов (EL)



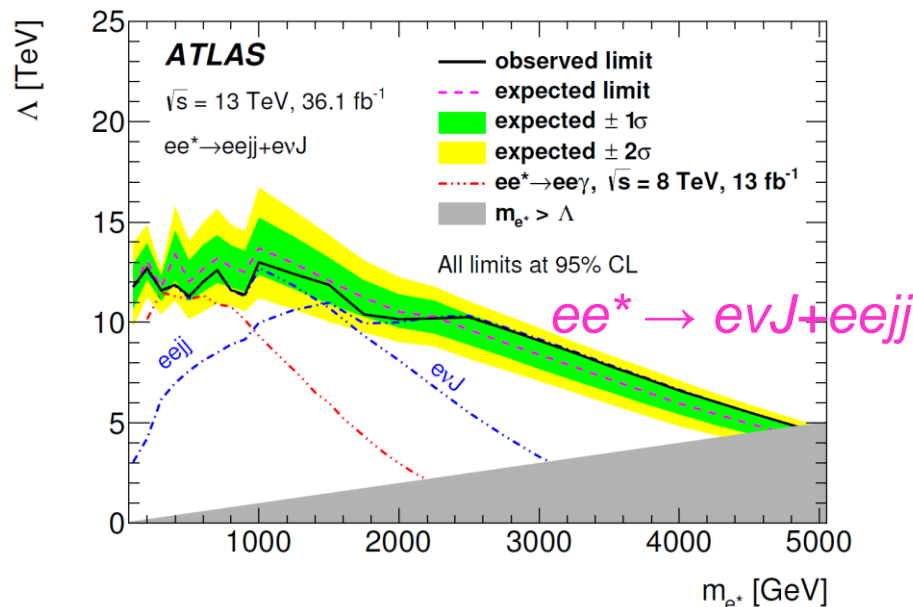
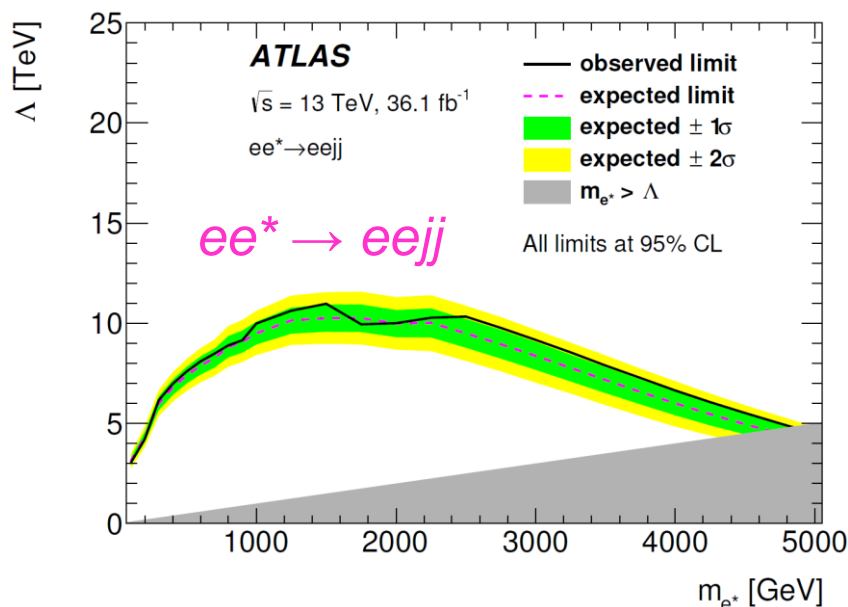
- Не обнаружены события рождения EL.
- Наблюдаемые отклонения от предсказаний SM лежат в пределах 1σ для всех массовых гипотез.
- Получены верхние пределы (UL) на μ и $\sigma \times B$ как функции m_{e^*} ($\sigma = \mu \times \sigma^{\text{теор}}$) с 95% уровнем значимости.
- Флуктуации, наблюдаемые в точках ниже 1 ТэВ, возникают из-за независимой оптимизации условий отбора в SRs для каждой массовой точки.



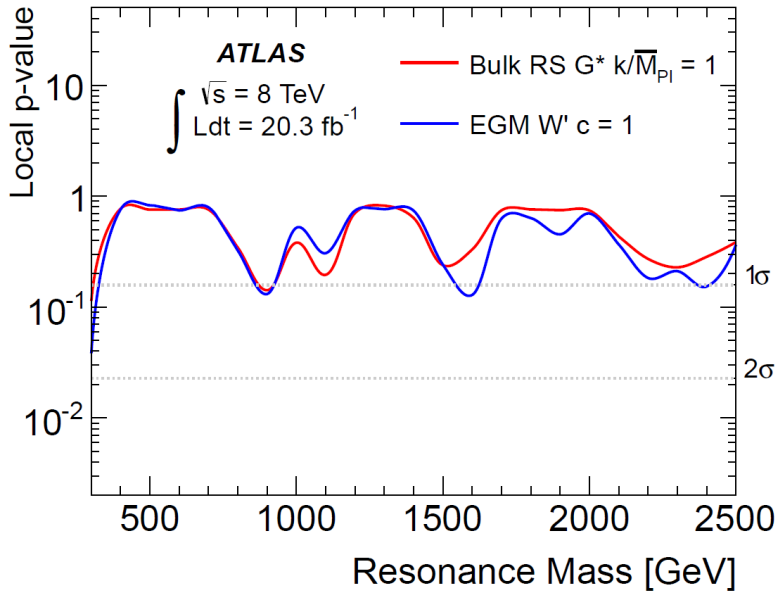
Результаты поиска возбужденных электронов (EL)



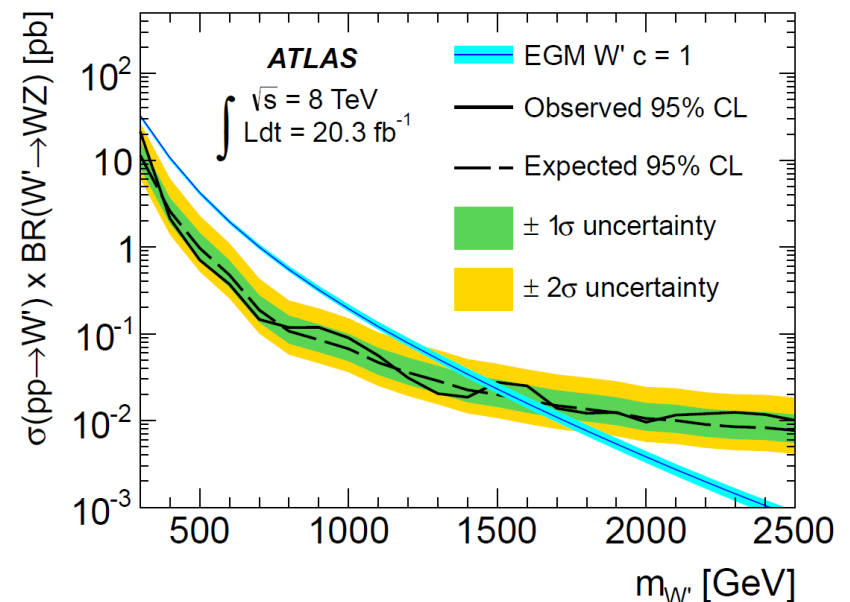
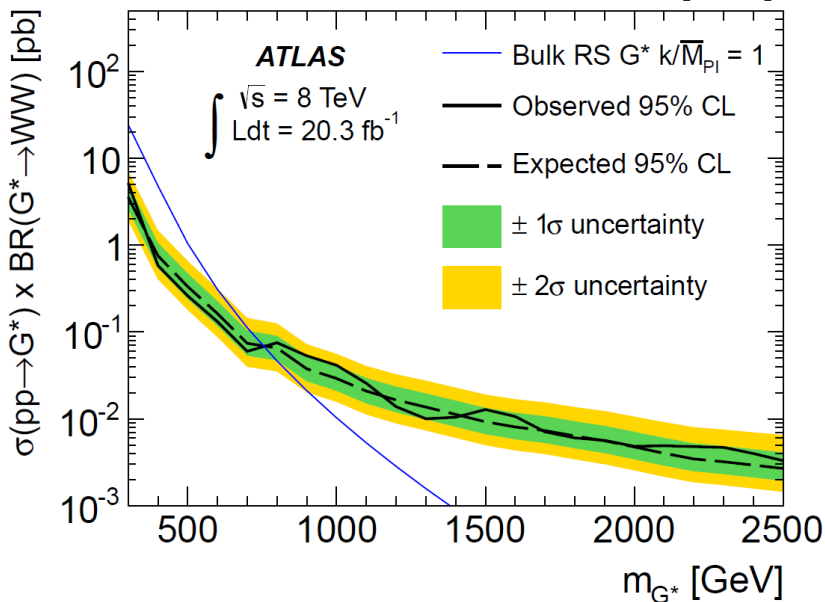
- Нижний предел (LL) на Λ как функция m_{e^*} определен как $\Lambda^{LL} = \Lambda^{nom}/\sqrt[4]{\mu^{tot}}$.
- Получен нижний предел на Λ как функция m_{e^*} с 95% уровнем значимости для evJ .
- Показан Λ^{LL} как функция m_{e^*} с 95% уровнем значимости для $eejj$. Пределы для $m_{e^*} > 4 \text{ ТэВ}$ получены в результате экстраполяции.
- Построена единая функция LH для $evJ+eejj$ в каждой точке m_{e^*} для получения комбинированного нижнего предела на Λ как функции m_{e^*} с 95% уровнем значимости.
- $\Lambda^{LL} = 11 \text{ ТэВ}$ для $m_{e^*} \leq 1.5 \text{ ТэВ}$, $\Lambda^{LL} = 7 \text{ ТэВ}$ для $m_{e^*} \leq 4 \text{ ТэВ}$, для $m_{e^*} = \Lambda$ запрещены $m_{e^*} < 4.8 \text{ ТэВ}$.



Результаты поиска дибозонных резонансов (VV)



- Скомбинированы все SR (LRR, HRR, MR) и конечные состояния (e и μ).
- Не обнаружены события рождения VV.
- Наблюдаемые отклонения от предсказаний SM в пределах 1σ для всех массовых гипотез.
- Поставлены верхние пределы на $\sigma \times \mathcal{B}$ как функции m_{G^*} и $m_{W'}$ с 95% уровнем значимости.
- Исключены $m_{G^*} < 760 \text{ ГэВ}$ и $m_{W'} < 1490 \text{ ГэВ}$ с 95% CL.
- Плечо, наблюдаемое вокруг 800 ГэВ, возникает из-за перехода от HRR к MR.
- Пределы превосходят, полученные в анализе с $evqq$ на 7 ТэВ, равные 710 ГэВ и 950 ГэВ для G^* и W' .



Заключение

1. Выбрано и обосновано полулептонное конечное состояние с электроном, нейтрино и струями для поиска возбужденных электронов на данных, полученных на детекторе ATLAS на LHC в pp столкновениях с $\sqrt{s} = 13$ ТэВ.
2. Смоделированы и проверены на достоверность сигнальные наборы данных для поиска возбужденных электронов в событиях с электроном, нейтрино и W -бозоном.
3. Оптимизированы условия отбора объектов и *первичный* отбор событий для поиска возбужденных электронов в полулептонном конечном состоянии в pp столкновениях с $\sqrt{s} = 13$ ТэВ в детекторе ATLAS.
4. Оценен вклад фоновых процессов для поиска возбужденных электронов в pp столкновениях в детекторе ATLAS при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ.
5. Выбраны дискриминирующие переменные и построены сигнальные, контрольные и проверочные области для поиска возбужденных электронов на данных в pp взаимодействиях при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ.
6. Получена оценка систематических неопределенностей в поиске возбужденных электронов на данных, полученных на детекторе ATLAS на LHC в pp столкновениях с при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ.
7. Проведен статистический анализ для проверки модели рождения возбужденных электронов с конечным состоянием с электроном, нейтрино и струями на данных, полученных в pp столкновениях с $\sqrt{s} = 13$ ТэВ в детекторе ATLAS на LHC с полной интегральной светимостью $L_{\text{int}} = 36.1$ фб $^{-1}$. Отклонения реальных данных от предсказаний Стандартной модели обнаружены не были, отклонения лежат в пределах 1σ для всех сигнальных моделей m_{e^*} . Поставлены верхние ограничения на параметры сигнальной модели: силу сигнала, μ , и сечение рождения умноженное на вероятность распада, $\sigma \times \beta$, как функции m_{e^*} , из которых получено нижнее ограничение на параметр составленности Λ как функции m_{e^*} . Скомбинированы результаты поисков возбужденных электронов в конечных состояниях evJ и $eejj$. Это позволило установить нижнее ограничение с 95% уровнем значимости на Λ , равный 11 ТэВ для $m_{e^*} \leq 1.5$ ТэВ, и 7 ТэВ для $m_{e^*} = 4$ ТэВ, а в специальном случае $m_{e^*} = \Lambda$, запретить массы меньше 4.8 ТэВ. Комбинация двух каналов позволила усилить ограничения по сравнению с результатами, полученными в LHC Run I на детекторах ATLAS и CMS.
8. Оптимизированы условия отбора объектов и *первичный* отбор событий для поиска дибозонных резонансов в конечном состоянии с лептоном (электроном или мюоном), нейтрино и струями на данных, полученных на детекторе ATLAS в pp столкновениях при $\sqrt{s} = 8$ ТэВ.

Выступления

Лично автором:

1. The 3rd Annual Large Hadron Collider Physics Conference, St. Petersburg, Russia, 31 August – 5 September 2015 (LHCP2015)” в виде постерного доклада <https://cds.cern.ch/record/2049868>;
2. “Международная сессия-конференция Секции ядерной физики ОФН РАН, 12 – 15 апреля 2016, ОИЯИ Дубна, Россия (РАН2016)” в виде доклада на параллельной сессии <https://cds.cern.ch/record/2304070>;

Соавтором коллаборации:

3. “European Physical Society Conference on High Energy Physics 2019, Ghent, Belgium, 10 – 17 July 2019 (EPS-HEP2019)” в виде доклада на параллельной сессии <https://cds.cern.ch/record/2684390>.

Резерв

SR, CR, VR B VV

BG	W/Z + jets	Single top, $t\bar{t}$	Multijet	Diboson
Shape	From MC	From MC	Data driven (enriched multijet ds)	From MC
Normalization	Data driven (CR)	From MC	Data driven (CR)	From MC
Control, Validation regions	CR: $40 < m_{jj} < 65$ GeV $105 < m_{jj} < 200$ GeV	VR: ≥ 1 b -jet ≥ 4 jets (RR)	VR: $E_T^{\text{miss}} < 30$ GeV (e channel) $50 < E_T^{\text{miss}} < 80$ GeV (μ channel)	

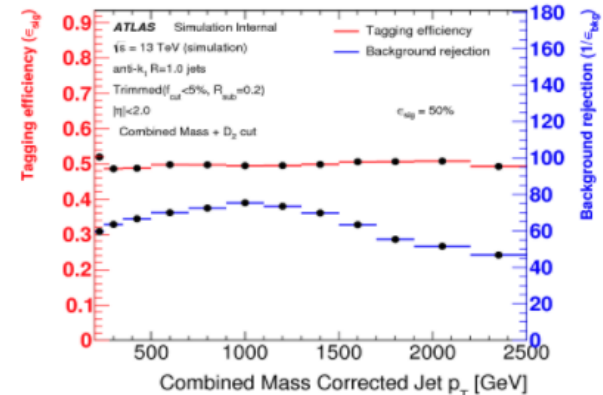
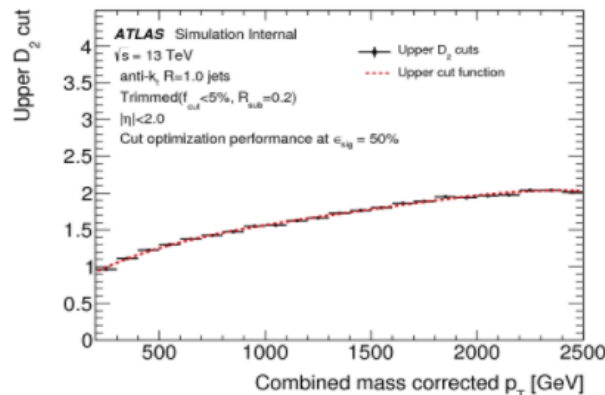
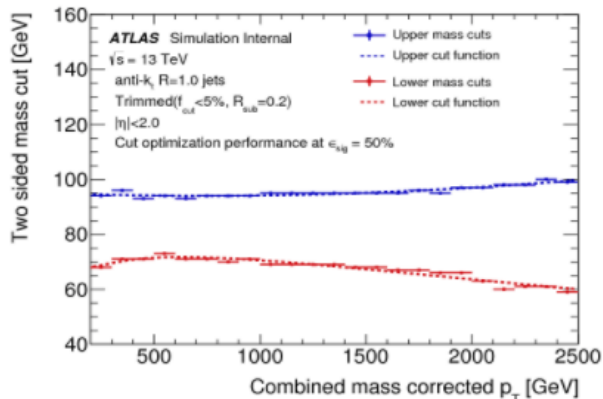
W-tagger

- Smooth W/Z Tagger: [SmoothWZTagger](#)

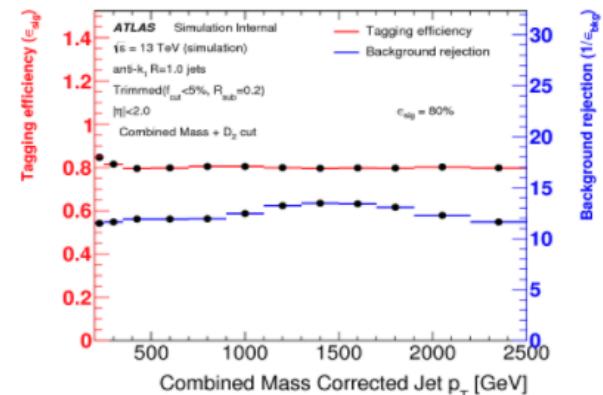
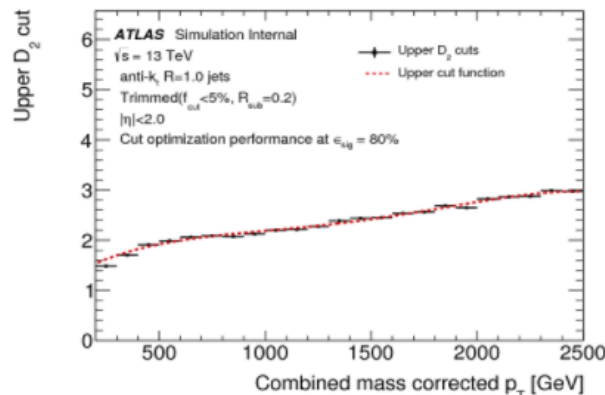
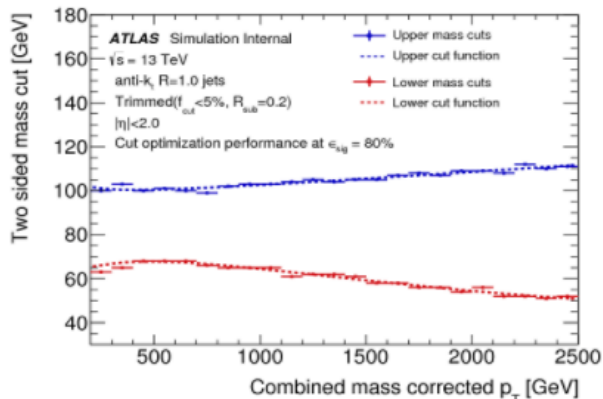
Working point: 50 (tagging efficiency 50%, bkg rejection ~40-80%)

Working point: 80 (tagging efficiency 80%, bkg rejection ~10-15%)

W Tagging Performance - Combined mass + D2 - 50% working point



W Tagging Performance - Combined mass + D2 - 80% working point



Переменные

$$m_T^{\nu W} = \sqrt{(m_W)^2 + 2 \times \left(\sqrt{(m_W)^2 + (p_T^W)^2} \times E_T^{\text{miss}} - p_x^W \times E_x^{\text{miss}} - p_y^W \times E_y^{\text{miss}} \right)}$$

$$p_T^{\text{balance}} = \frac{p_T^e - p_T^{e^*}}{p_T^e + p_T^{e^*}}$$

$$D_2^{\beta=1} = E_{CF3} \times \left(\frac{E_{CF1}}{E_{CF2}} \right)^3$$

$$E_{CF1} = \sum_i p_{T,i};$$

$$E_{CF2} = \sum_{ij} p_{T,i} p_{T,j} \Delta R_{ij};$$

$$E_{CF3} = \sum_{ijk} p_{T,i} p_{T,j} p_{T,k} \Delta R_{ij} \Delta R_{jk} \Delta R_{ki}.$$