# Аномальные тройные и четверные бозонные вершины в электрослабой теории

Проявления нейтральных трехбозонных вершин в процессе рождения  $ZZ \to \ell\ell\nu\nu$  в эксперименте ATLAS

Артур Семушин

нияу мифи

03.07.2025

Научный руководитель: к.ф.-м.н. Е.Ю. Солдатов

Артур Семушин

Аномальные вершины в  $ZZ 
ightarrow \ell \ell 
u 
u 
u$ 

03.07.2025 1/24

#### Введение в аномальные вершины, мотивация

- Косвенный поиск новой физики заключается в поиске частиц СМ, рожденных с аномальной кинематикой.
- Отклонения от СМ можно параметризовать модельнонезависимым образом через аномальные вершины взаимодействий известных частиц. Наиболее удобным формализмом является эффективная теория поля (ЭТП).

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{\mathsf{SM}} + \mathcal{L}^{(5)} + \mathcal{L}^{(6)} + \mathcal{L}^{(7)} + \mathcal{L}^{(8)} + \dots$$
  
 $\mathcal{L}^{(d)} = \sum_{i} rac{\mathcal{L}_{i}^{(d)}}{\Lambda^{d-4}} \mathcal{O}_{i}^{(d)}$ 

- ▶ O<sub>i</sub><sup>(d)</sup> оператор размерности d,
   ▶ C<sub>i</sub><sup>(d)</sup>/Λ<sup>d-4</sup> соответствующий коэффициент Вильсона.
  - ► Λ энергетический масштаб новой физики.
- Существует связь между коэффициентами Вильсона и параметрами моделей новой физики.



#### Цель и задачи диссертационного исследования

Цель: развитие методологии и постановка строгих ограничений на параметры аномальных бозонных вершин.

Задачи:

• Разработка переменных и методов, увеличивающих экспериментальную чувствительность, в т.ч. чувствительных к СР-нарушению,

- Интерпретация измерений процесса рождения  $ZZ 
  ightarrow \ell\ell 
  u 
  u$ ,
- Интерпретация измерений процесса рождения  $Z\gamma 
  ightarrow 
  u 
  u \gamma$ ,
- Проверка результатов на нарушение унитарности.

・ロッ ・雪 ・ ・ ヨ ・

# Нейтральные трехбозонные вершины и процесс рождения $ZZ(\ell\ell\nu\bar{\nu})$

- Рассматриваемый в работе процесс рождения пары Z-бозонов чувствителен к проявлениям нейтральных трехбозонных вершин.
- Изучаются 6 операторов ЭТП:

$$\blacktriangleright \mathcal{O}_{G+} = g^{-1} B_{\mu\nu} W^{a\mu\rho} (D_{\rho} D_{\lambda} W^{a\nu\lambda} + D^{\nu} D^{\lambda} W^{a}_{\lambda\rho})$$

• Разложение ЭТП:  
$$|\mathcal{A}|^2 = |\mathcal{A}_{SM}|^2 + (C/\Lambda^4) \cdot 2 \operatorname{Re} \mathcal{A}_{SM}^{\dagger} \mathcal{A}_{BSM} + (C/\Lambda^4)^2 \cdot |\mathcal{A}_{BSM}|^2.$$

• Альтернативным способом описания вышеупомянутых вершин является формализм вершинной функции:

$$\Delta \mathcal{L} = \frac{e}{m_Z^2} \left( -f_4^{\gamma} \partial_{\mu} A^{\mu\beta} Z_{\alpha} \partial^{\alpha} Z_{\beta} + f_5^{\gamma} \partial^{\sigma} A_{\sigma\mu} \tilde{Z}^{\mu\beta} Z_{\beta} - f_4^{Z} \partial_{\mu} Z^{\mu\beta} Z_{\alpha} \partial^{\alpha} Z_{\beta} + f_5^{Z} \partial^{\sigma} Z_{\sigma\mu} \tilde{Z}^{\mu\beta} Z_{\beta} \right).$$
  
Approx Cemvuuh Ahomazahise вершины в  $ZZ \to \ell\ell\nu\nu$  03.07.2025 4/2

# Эксперимент ATLAS



- В работе используется полный набор данных Run II:
  - ▶ pp-столкновения с  $\sqrt{s} = 13$  ТэВ,

► 
$$\int L dt = 140.1 \pm 1.2 \ \phi 6^{-1}.$$

イロト イポト イヨト イヨト

э

# Фоновые процессы, критерии отбора событий

- Сигнатура процесса рождения  $ZZ \to \ell\ell\nu\nu$  на БАК: 2 лептона и недостающая поперечная энергия  $E_{\rm T}^{\rm miss}$ .
- Процесс имеет ряд неустранимых фонов:
  - ►  $WZ \rightarrow \ell \nu \ell \ell$ ,
  - ▶  $Z \rightarrow \ell \ell + jets$ ,
  - ▶ Нерезонансные:  $WW \rightarrow \ell \nu \ell \nu$ ,  $t\bar{t}$ ,
- Прочие (дающие очень малый вклад).

- 2 лептона одного аромата и противоположных зарядов  $\rho_{\rm T}^{\ell_1} > 30$  ГэВ,  $\rho_{\rm T}^{\ell_2} > 20$  ГэВ  $80 < m_{\ell\ell} < 100$  ГэВ  $E_{\rm T}^{\rm miss} > 110$  ГэВ  $\Delta R(\ell_1, \ell_2) < 1.8$   $\Delta \Phi(\ell\ell, \vec{p}_{\rm T}^{\rm miss}) > 2.2$   $E_{\rm T}^{\rm miss}/H_{\rm T} > 0.65$   $N_{b\text{-jets}} = 0$
- Оценка фоновых процессов происходит напрямую из результатов Монте-Карло моделирования, т.к. известно, что оно имеет хорошее согласие с данными.

#### Статистическая модель и одномерные ограничения

• Чувствительная переменная:  $p_{\mathsf{T}}^{\ell\ell}$ .

. - 5

• Используется частотный статистический метод с асимптотическим распределением тестовой статистики, доверительная вероятность 95%.

ATLAS Internal → Data ↓ · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	Zz Z+jets Koje	þ. Ожид. пред.	Набл. пред.
$10^{4} \text{ pp} \rightarrow ZZ \rightarrow I \text{ lvv} \qquad \text{ www, top} \\ -C_{G_{a}}/\Lambda^{4}=0. \\ 10^{3} \text{ cm} C_{G_{a}}/\Lambda^{4}=0. \\ 10^{2} \text{ cm} C_{G_{a}}/\Lambda^{4}=0. \\ 0^{2} \text{ cm} C_{G_{a}}/\Lambda^{4}=0. \\ $	Other 2 TeV <sup>4</sup> Uncertainty $C_{G+}$ 4 TeV <sup>4</sup> $C_{G-}$ $C_{\tilde{B}W}$ $C_{BB}$	$/\Lambda^4$ [-0.36; 0.36] T $\Rightarrow$ B <sup>-4</sup> $/\Lambda^4$ [-1.1; 1.2] T $\Rightarrow$ B <sup>-4</sup> $/\Lambda^4$ [-1.3; 1.3] T $\Rightarrow$ B <sup>-4</sup> $/\Lambda^4$ [-1.6; 1.6] T $\Rightarrow$ B <sup>-4</sup>	$ \begin{bmatrix} -4 & [-0.29; & 0.30] & T \Rightarrow B^{-4} \\ [-0.95; & 0.95] & T \Rightarrow B^{-4} \\ [-1.1; & 1.1] & T \Rightarrow B^{-4} \\ [-1.3; & 1.3] & T \Rightarrow B^{-4} \\ \begin{bmatrix} -4 & 2 & 4 & 3 \\ 2 & 4 & 2 & 4 \end{bmatrix} = D^{-4} $
	$\begin{array}{c} C_{BW} \\ C_{WV} \\ \hline \end{array}$	$\frac{1}{\sqrt{\Lambda^4}}$ [-2.9; 2.9] $13B^{-4}$ $\frac{1}{\sqrt{\Lambda^4}}$ [-2.4; 2.4] $T3B^{-4}$	$[-2.4; 2.4] 1 \Im B^{-4}$ $[-2.0; 2.0] T \Im B^{-4}$
2 1.5 1.5 0.5	$f_{4}$ $f_{4}$ $f_{4}$ $f_{5}$	$[-7.7; 7.7] \times 10^{-4}$ $[-6.8; 6.8] \times 10^{-4}$ $[-7.8; 7.7] \times 10^{-4}$ $[-6.0; 6.0] \times 10^{-4}$	$[-6.4; 6.4] \times 10^{-4}$ $[-5.7; 5.7] \times 10^{-4}$ $[-6.4; 6.5] \times 10^{-4}$
0 <sup>E</sup> 200 400 600 800 -	<u>, 1200 1400</u> p <sup>ll</sup> <sub>T</sub> [GeV] Аномальные	$[-0.9, \ 0.9]  imes 10$ вершины в $ZZ  o \ell \ell  u  u$	[-3.6; 5.6]×10 

# Двумерные результаты



8/24

#### Линейная модель, мотивация для дополнительного исследования

• Амплитуда процесса с одним ненулевым параметром аномальных вершин:

$$|\mathcal{A}|^{2} = |\mathcal{A}_{\mathsf{SM}}|^{2} + \frac{C^{(8)}}{\Lambda^{4}} 2 \operatorname{Re} \mathcal{A}_{\mathsf{SM}}^{\dagger} \mathcal{A}_{\mathsf{BSM}}^{(8)} + \frac{(C^{(8)})^{2}}{\Lambda^{8}} |\mathcal{A}_{\mathsf{BSM}}^{(8)}|^{2}.$$

- Энергетическая шкала новой физики Л должна быть достаточно большой, поэтому квадратичный член должен быть подавлен.
- В разложении  $|\mathcal{A}|^2$  по ЭТП не используются (пропущены) некоторые слагаемые, которые могут изменить или полностью сократить квадратичный член:
  - ►  $\frac{C^{(10)}}{\Lambda^6} 2 \operatorname{Re} \mathcal{A}_{SM}^{\dagger} \mathcal{A}_{BSM}^{(10)}$  линейный член операторов размерности 10, имеющий порядок  $\Lambda^{-6}$ ; ►  $\frac{C^{(12)}}{\Lambda^8} 2 \operatorname{Re} \mathcal{A}_{SM}^{\dagger} \mathcal{A}_{BSM}^{(12)}$  — линейный член операторов размерности 12, имеющий порядок  $\Lambda^{-8}$ .
- Таким образом, необходимо экспериментально исследовать обе модели: квадратичную и линейную.
- Дополнительная мотивация: лишь линейные члены СР-нарушающих операторов содержат СР-нарушение.

# Одномерные ограничения в линейной модели, СР-нарушающие коэф.

• Разработана специальная СР-чувствительная переменная, разделяющая конструктивную и деструктивную интерференцию:  $\sin \varphi \cos \theta$ , где углы определены для отрицательно заряженного лептона в специальной системе координат.



Коэф.	Ожид. пред.	Набл. пред.
$C_{BB}/\Lambda^4 \ C_{BW}/\Lambda^4 \ C_{WW}/\Lambda^4 \ f_4^\gamma \ f_4^Z$	$      \begin{bmatrix} -130; \ 140 \end{bmatrix} T \ni B^{-4} \\       \begin{bmatrix} -580; \ 550 \end{bmatrix} T \ni B^{-4} \\       \begin{bmatrix} -230; \ 250 \end{bmatrix} T \ni B^{-4} \\       \begin{bmatrix} -1.0; \ 1.0 \end{bmatrix} \times 10^{-1} \\       \begin{bmatrix} -3.4; \ 3.4 \end{bmatrix} \times 10^{-2} $	$  \begin{bmatrix} -20; 240 \end{bmatrix} T \mathfrak{B}^{-4} \\  \begin{bmatrix} -330; 740 \end{bmatrix} T \mathfrak{B}^{-4} \\  \begin{bmatrix} -240; 410 \end{bmatrix} T \mathfrak{B}^{-4} \\  \begin{bmatrix} -0.3; 2.2 \end{bmatrix} \times 10^{-1} \\  \begin{bmatrix} -5.5; 1.4 \end{bmatrix} \times 10^{-2} $

Аномальные вершины в  $ZZ \rightarrow \ell \ell \nu \nu$ 

03.07.2025

# Разработка СР-чувствительных переменных

- Было проведено отдельное исследование для разработки СР-чувствительных переменных (Phys.Rev.D 111 (2025) 11, 115028).
- За основу взят процесс рождения  $Z(\ell\ell)\gamma$ , рассмотрены 5 СР-нарушающих операторов.
- Определены СР-чувствительные угловые переменные для всех операторов (sin  $2\varphi$  для  $\mathcal{O}_{\tilde{G}+}$  и sin  $\varphi \cos \theta$  для остальных).
- Показано, что для достижения наибольшей чувствительности угловую переменную нужно комбинировать с энергетической.
- Показано, что оптимальная наблюдаемая  $OO = 2 \operatorname{Re} \mathcal{M}_{SM}^{\dagger} \mathcal{M}_{BSM} / |\mathcal{M}_{SM}|^2$  комбинирует все остальные переменные наиболее эффективным образом.



Артур Семушин

Аномальные вершины в ZZ  $ightarrow \ell\ell 
u 
u 
u$ 

11/24

03 07 2025

Одномерные ограничения в линейной модели, СР-сохраняющие коэф.

• Чувствительная переменная:  $p_{\rm T}^{\ell\ell}$ .



Коэф.	Ожид. пред.	Набл. пред.
$C_{G+}/\Lambda^4 \ C_{G-}/\Lambda^4 \ C_{ ilde{B}W}/\Lambda^4 \ f_5^\gamma \ f_5^Z$	$\begin{array}{l} \left[-420;480\right]  \text{T} \ni \text{B}^{-4} \\ \left[-105;80\right]  \text{T} \ni \text{B}^{-4} \\ \left[-66;47\right]  \text{T} \ni \text{B}^{-4} \\ \left[-3.9;5.3\right] \times 10^{-2} \\ \left[-5.6;5.1\right] \times 10^{-2} \end{array}$	

### Итоги

• Установлены ограничения на нейтральные трехбозонные вершины с помощью процесса рождения  $ZZ(\ell\ell\nu\bar{\nu})$  в эксперименте ATLAS:

► В квадратичной (полной) модели — одномерные и двумерные на 6 коэффициентов Вильсона ЭТП и 4 параметра вершинной функции,

■ Параметры вершинной функции и коэффициент *C*<sub>*G*-</sub>/Λ<sup>4</sup> получили самые строгие в мире ограничения;

▶ В линейной модели — на 6 коэффициентов Вильсона ЭТП и 4 параметра вершинной функции.

Коэффициенты  $f_4^{\gamma}$  и  $f_4^Z$  получили наиболее строгие в мире ограничения, а остальные параметры были ограничены впервые.

• Разработаны чувствительные к СР-нарушению переменные (угловые и оптимальные) для процесса рождения  $Z(\ell\ell)\gamma$ ,

► Угловая переменная была модифицирована и применена при установке модельнонезависимых ограничений на СР-нарушение в исследовании  $ZZ(\ell\ell\nu\nu)$  (пределы в линейной модели).

・ロト ・ 同 ト ・ 三 ト ・ 三 ・ つへの

# **BACK-UP**

	н.
, .p., p. cc,	

э.

# Список публикаций по теме диссертации

1. A. Semushin, E. Soldatov. Technique for Setting Limits on the Coupling Constants of the Effective Theory from Electroweak  $Z\gamma$  Production at the Conditions of Run-2 of the ATLAS Experiment. Phys.Atom.Nucl. 84 (2021) 12, 1976-1981.

2. A. Semushin, E. Soldatov. Methodology of accounting for aQGC effect on background for improvement of the limits on EFT coupling constants in case of electroweak  $Z\gamma$  production at the conditions of Run2 at the ATLAS experiment. PoS PANIC2021 (2022) 127.

3. ATLAS Collaboration. Measurement of electroweak  $Z(\nu \bar{\nu})\gamma jj$  production and limits on anomalous quartic gauge couplings in pp collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector. JHEP 06 (2023) 082. arXiv: 2208.12741.

4. A. Semushin, E. Soldatov. Study of Corrections for Anomalous Coupling Limits Due to the Possible Background BSM Contributions. Symmetry 14 (2022) 10, 2082. arXiv: 2209.07906.
5. A. Semushin, E. Soldatov. Composite Effective Field Theory Signal from Anomalous Quartic Gauge Couplings for ZZ(→ ℓℓνν)jj and Zγ(→ ννγ)jj Productions. LHEP 2024 (2024) 519. arZiv: 2405.02641.
6. A. Semushin, E. Soldatov. Composite Effective Field Theory Signal in Case of Searching for Neutral Triple Gauge Couplings with ZZ → ℓℓνν Production. Phys.Atom.Nucl. 87 (2024) 4, 523-531. arXiv: 2405.02657.
7. A. Semushin, E. Soldatov, A. Kurova. *CP*-violating effects of the neutral triple gauge couplings in Z(ℓℓ)γ production at the LHC. Phys.Rev.D 111 (2025) 11, 115028. arXiv: 2503.20945.

(日) (日) (日) (日) (日) (日)

# Апробация результатов на конференциях

1. Development of a method for reweighting distributions to search for new physics using effective field theory. Moscow International School of Physics 2020, 2020-03-03 - 2020-03-09.

2. Методика получения пределов на константы связи эффективной теории из процесса электрослабого рождения Z-бозона с фотоном для данных второго сеанса работы эксперимента ATLAS. Молодежная конференция по теоретической и экспериментальной физике 2020. 2020-11-16 - 2020-11-19.

3. Methodology of accounting for aQGC effect on background for improvement of EFT coupling constants limits in case of electroweak  $Z\gamma$ production at the conditions of run2 of the ATLAS experiment. Particles and Nuclei International Conference 2021. 2021-09-05 - 2021-09-10.

4. Поправки к пределам на аномальные четверные бозонные вершины на основе процесса рождения Z-бозона с фотоном в условиях второго сеанса работы эксперимента ATLAS. Летняя научная школа по физике высоких энергий и ускорительной технике. 2022-07-25 – 2022-07-29

5. Corrections to the nTGC limits at EFT  $O(\Lambda^{-3})$  expansion due to the possible background contributions in  $Z(\nu\bar{\nu})\gamma$  production. International Conference on Particle Physics and Astrophysics 2022, 2022-11-29 – 2022-12-02.

6. Использование составного аномального сигнала для постановки пределов на коэффициенты Вильсона аномальных трехбозонных вершин на основе процесса рождения  $Z(
u
u)\gamma$ . Школа НЦФМ по физике элементарных частиц и космологии им. В.А. Рубакова. 2023-07-03 - 2023-07-08

7. Composite effective field theory signal in case of searching for neutral triple gauge couplings with  $ZZ \rightarrow \ell^+ \ell^- \nu \bar{\nu}$  production. XIXth Workshop on High Energy Spin Physics, 2023-09-04 - 2023-09-08.

8. Composite anomalous signal approach in searching for anomalous quartic gauge couplings using effective field theory. Beyond Standard Model: From Theory to Experiment 2023, 2023-11-06 - 2023-11-09.

9. Prospects of search for CP-violating effects of neutral triple gauge couplings at the LHC. International Conference on Particle Physics and Astrophysics 2024, 2024-10-22 - 2024-10-25.

### Используемый результат оценки фонов

#### ATLAS Internal

ATLAS Internal mu top mu Zjets 2





# Оценка ожидаемой флуктуации пределов

• Ожидаемо, наблюдаемые пределы могут не совпадать с ожидаемыми в связи с пуассоновской флуктуацией.

03.07.2025

18/24

Для оценки эффекта (в полной модели) было разыграно 10000 событий, в которых число событий в каждом бине варьировалось в соответствии с законом: N<sup>i</sup><sub>pseudo</sub> ~ P(N<sup>i</sup><sub>SM</sub>).
 Для каждоых псевдоданных были установлены ограничения на коэффициенты Вильсона. Выборочное среднеквадратичное отклонение является оценкой ожидаемой флуктуации (составляет примерно 22%).



# Доверительный фазовый объем на уровне частиц

• Для увеличения Монте-Карло статистики исследование в линейной модели проводится на уровне частиц с использованием развернутых данных.

2 лептона одного аромата и противоположных зарядов Лептоны скорректированы на испущенные фотоны в  $\Delta R(\ell, \gamma) < 0.1$   $|\eta_{\ell}| < 2.5 \ p_{T}^{\ell_1} > 30 \ \Gamma$ эВ,  $p_{T}^{\ell_2} > 20 \ \Gamma$ эВ  $76 < m_{\ell\ell} < 106 \ \Gamma$ эВ  $E_{T}^{miss} > 95 \ \Gamma$ эВ  $\Delta R(\ell_1, \ell_2) < 1.8$   $\Delta \Phi(\ell\ell, \vec{p}_{T}^{miss}) > 2.2$  $E_{T}^{miss}/H_{T} > 0.65$ 

# СР-чувствительные переменные для $ZZ ightarrow \ell \ell u u u$



- $z_0$  стандартная ось z (вдоль пучка).
- Ось z вдоль  $Z(\ell \ell)$  в системе покоя ZZ.
- Ось *х* лежит на плоскости реакции так, что ее проекция на *z*<sub>0</sub> и проекция *z* на *z*<sub>0</sub> одного знака.
- Ось у по правилу правой руки.

•  $\theta$  и  $\varphi$  — полярный и азимутальный углы направления движения отрицательно заряженного лептона в системе покоя  $Z(\ell \ell)$ .

- Итоговая переменная:  $\sin \varphi \cos \theta$ .
- Для определения системы покоя ZZ необходимо зафиксировать импульс системы Z(νν):
   p
   *p Z*(νν) = p
   *Z*(ℓℓ).
- ► Также была рассмотрена гипотеза  $p_z^{Z(\nu\nu)} = 0$ ,  $p_x^{Z(\nu\nu)} = p_x^{\text{miss}}$ ,  $p_y^{Z(\nu\nu)} = p_y^{\text{miss}}$ .

20 / 24

# Результаты на уровне частиц для СР-нарушающих взаимодействий

Coef.	Model	Expected	Observed
$C_{BB}/\Lambda^4$	lin+quad	[-5.5; 5.4] ТэВ <sup>-4</sup>	[-6.7; 6.8] ТэВ <sup>-4</sup>
	lin	[-130; 140] ТэВ <sup>-4</sup>	[-20; 240] ТэВ <sup>-4</sup>
$C_{BW}/\Lambda^4$	lin+quad	[-9.9; 9.9] ТэВ <sup>-4</sup>	[-12.3; 12.5] ТэВ <sup>-4</sup>
	lin	[-580; 550] ТэВ <sup>-4</sup>	[-330; 740] ТэВ <sup>-4</sup>
$C_{WW}/\Lambda^4$	lin+quad	[-8.3; 8.1] ТэВ <sup>-4</sup>	[-10.4; 10.2] ТэВ <sup>-4</sup>
	lin	[-230; 250] ТэВ <sup>-4</sup>	[-240; 410] ТэВ <sup>-4</sup>
$f_4^{\gamma}$	lin+quad	[-2.7; 2.6]×10 <sup>-3</sup>	[-3.3; 3.3]×10 <sup>-3</sup>
	lin	[-1.0; 1.0]×10 <sup>-1</sup>	[-0.3; 2.2]×10 <sup>-1</sup>
$f_4^Z$	lin+quad	[-2.4; 2.4]×10 <sup>-3</sup>	[-3.0; 2.9]×10 <sup>-3</sup>
	lin	[-3.4; 3.4]×10 <sup>-2</sup>	[-5.5; 1.4]×10 <sup>-2</sup>

# Результаты на уровне частиц для СР-сохраняющих взаимодействий

Coef.	Model	Expected	Observed
$C_{G+}/\Lambda^4$	lin+quad	[-0.32; 0.32] ТэВ <sup>-4</sup>	[-0.30; 0.32] ТэВ <sup>-4</sup>
	lin	[-420; 480] ТэВ <sup>-4</sup>	[-240; 1000] ТэВ <sup>-4</sup>
$C_{G-}/\Lambda^4$	lin+quad	[-1.3; 1.3] ТэВ <sup>-4</sup>	[-1.2; 1.3] ТэВ <sup>-4</sup>
	lin	[-105; 80] ТэВ <sup>-4</sup>	[-206; 58] ТэВ <sup>-4</sup>
$C_{ ilde{B}W}/\Lambda^4$	lin+quad	[-1.4; 1.4] ТэВ <sup>-4</sup>	[-1.3; 1.4] ТэВ <sup>-4</sup>
	lin	[-66; 47] ТэВ <sup>-4</sup>	[-61; 46] ТэВ <sup>-4</sup>
$f_5^{\gamma}$	lin+quad	[-8.6; 8.5]×10 <sup>-4</sup>	[-8.2; 8.1]×10 <sup>-4</sup>
	lin	[-3.9; 5.3]×10 <sup>-2</sup>	[-3.5; 5.7]×10 <sup>-2</sup>
$f_5^Z$	lin+quad	[-7.8; 7.7]×10 <sup>-4</sup>	[-7.4; 7.3]×10 <sup>-4</sup>
	lin	[-5.6; 5.1]×10 <sup>-2</sup>	[-10.3; 1.4]×10 <sup>-2</sup>

### Сравнение пределов в полной модели

Коэф.	Ожид. пред	ц. ATLA	AS $ZZ(\ell\ell u\nu)$ 36.1 $\varphi$ 6 $^{-1}$	CMS $ZZ(4\ell)$ 137 $\varphi 6^{-1}$
$egin{array}{c} f_4^\gamma \ f_4^Z \ f_5^\gamma \ f_5^Z \end{array}$	[-7.7; 7.7] > [-6.8; 6.8] > [-7.8; 7.7] > [-6.9; 6.9] >	$ \begin{array}{ccc} \times 10^{-4} & [-13] \\ \times 10^{-4} & [-11] \\ \times 10^{-4} & [-13] \\ \times 10^{-4} & [-11] \end{array} $	$(13] \times 10^{-4}$ $(11] \times 10^{-4}$ $(13] \times 10^{-4}$ $(11] \times 10^{-4}$	$\begin{array}{l} [-9.9; 9.5] \times 10^{-4} \\ [-8.8; 8.3] \times 10^{-4} \\ [-9.2; 9.8] \times 10^{-4} \\ [-8.0; 9.9] \times 10^{-4} \end{array}$
Коэф.		Ожид. пред.	ATLAS $Z(\ell\ell)\gamma$ 140 фб	-1
$C_{G+}/\Lambda^4$ $C_{G-}/\Lambda^4$ $C_{\tilde{B}W}/\Lambda^4$ $C_{BW}/\Lambda^4$ $C_{WW}/\Lambda^2$	<sup>4</sup> [ TəB <sup>-4</sup> ] <sup>4</sup> [ TəB <sup>-4</sup> ] <sup>4</sup> [ TəB <sup>-4</sup> ] [ TəB <sup>-4</sup> ] <sup>4</sup> [ TəB <sup>-4</sup> ] <sup>4</sup> [ TəB <sup>-4</sup> ]	[-0.36; 0.36] [-1.1; 1.2] [-1.3; 1.3] [-1.6; 1.6] [-2.9; 2.9] [-2.4; 2.4]	[-0.022; 0.020] [-1.41; 1.08] [-0.54; 0.53] [-0.37; 0.37] [-0.87; 0.95] [-1.90; 1.78]	

э.

# Сравнение пределов в линейной модели

Коэф.	Ожид. пред.	ATLAS $ZZ(4\ell)$ 140 $\phi 6^{-1}$
$egin{array}{c} f_4^\gamma \ f_4^Z \ f_4^Z \end{array}$	$\begin{matrix} [-1.0;1.0]\times 10^{-1} \\ [-3.4;3.4]\times 10^{-2} \end{matrix}$	$[-3.0; 3.0]  imes 10^{-1} \ [-16; 16]  imes 10^{-2}$

• Остальные коэффициенты ограничены в линейной модели впервые.

Артур С	емушин
---------	--------

イロト 不得下 イヨト イヨト

3