

# Аномальные тройные и четверные вершины в электрослабой модели

Артур Семушин

НИЯУ МИФИ

13.06.2023

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

# Мотивация: эффективная теория поля

Поиск аномальных вершин — модельнонезависимый, косвенный поиск новой физики.

Эффективная теория поля параметризует лагранжиан операторами высших размерностей, описывающими аномальные вершины с уже известными частицами.

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{\text{SM}} + \mathcal{L}_5 + \mathcal{L}_6 + \mathcal{L}_7 + \mathcal{L}_8 + \dots, \quad \mathcal{L}_d = \sum_i \frac{C_i^{(d)}}{\Lambda^{d-4}} \mathcal{O}_i^{(d)}$$

Для постановки наиболее строгих ограничений на коэффициенты Вильсона и, следовательно, для более строго ограничения моделей новой физики, необходимо увеличивать чувствительность не только за счет увеличения светимости.

Амплитуда в случае параметризации одним оператором:

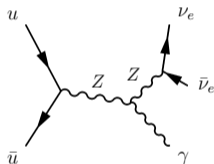
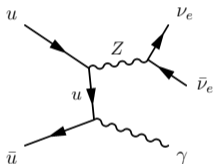
$$|\mathcal{A}|^2 = |\mathcal{A}_{\text{SM}}|^2 + \frac{C}{\Lambda^4} 2\text{Re} \mathcal{A}_{\text{SM}}^\dagger \mathcal{A}_{\text{BSM}} + \frac{C^2}{\Lambda^8} |\mathcal{A}_{\text{BSM}}|^2$$

Данные слагаемые по-отдельности позволяет генерировать MadGraph5.

# Мотивация: инклюзивное рождение $Z$ -бозона с фотоном

Рассматриваемый процесс: инклюзивное рождение  $Z(\nu\bar{\nu})\gamma$  в  $pp$ -столкновениях в эксперименте ATLAS (второй сеанс работы, 2015-2018,  $140 \text{ fb}^{-1}$ ).

Обладает высокой чувствительностью к нейтральным трехбозонным вершинам, запрещенным в СМ.



Эти вершины параметризуются с помощью специального базиса операторов размерности 8:

$$\mathcal{O}_{\tilde{B}W} = i\Phi^\dagger \tilde{B}_{\mu\nu} \hat{W}^{\mu\rho} \{D_\rho, D^\nu\} \Phi + \text{h.c.}, \quad \mathcal{O}_{BW} = i\Phi^\dagger B_{\mu\nu} \hat{W}^{\mu\rho} \{D_\rho, D^\nu\} \Phi + \text{h.c.},$$

$$\mathcal{O}_{BB} = i\Phi^\dagger B_{\mu\nu} B^{\mu\rho} \{D_\rho, D^\nu\} \Phi + \text{h.c.}, \quad \mathcal{O}_{WW} = i\Phi^\dagger \hat{W}_{\mu\nu} \hat{W}^{\mu\rho} \{D_\rho, D^\nu\} \Phi + \text{h.c.},$$

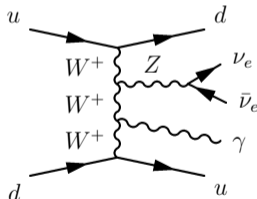
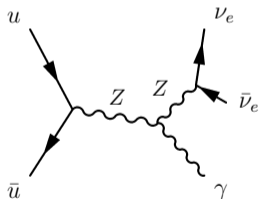
$$\mathcal{O}_{G\pm} = \frac{2}{g} \tilde{B}_{\mu\nu} \text{Tr} \left[ \hat{W}^{\mu\rho} \left( D_\rho D_\lambda \hat{W}^{\nu\lambda} \pm D^\nu D^\lambda \hat{W}^{\lambda\rho} \right) \right].$$

# Способы увеличения чувствительности

В таблице знаком  $\circ$  отмечены вершины, подверженные влиянию оператора. Почти все операторы влияют на тройные вершины с заряженными бозонами.

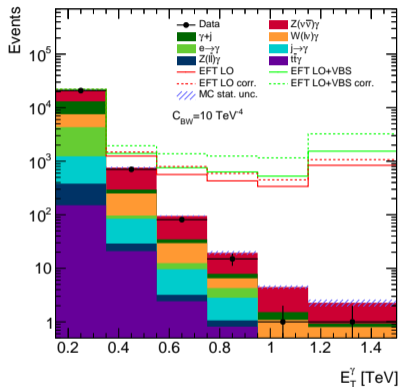
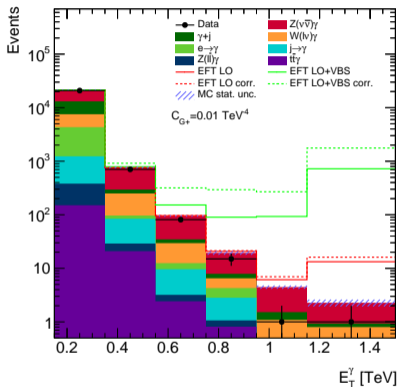
Оператор	ZZZ	ZZ $\gamma$	Z $\gamma\gamma$	$\gamma\gamma\gamma$	WWZ	WW $\gamma$
$\mathcal{O}_{\tilde{B}W}, \mathcal{O}_{BW}$	$\circ$	$\circ$	$\circ$		$\circ$	$\circ$
$\mathcal{O}_{BB}$	$\circ$	$\circ$	$\circ$			
$\mathcal{O}_{WW}$	$\circ$	$\circ$	$\circ$		$\circ$	
$\mathcal{O}_{G+}, \mathcal{O}_{G-}$	$\circ$	$\circ$	$\circ$	$\circ$	$\circ$	$\circ$

- Учет электрослабых диаграмм с двумя струями в дополнение к диаграммам ведущего порядка.



- Рассмотрение составного аномального сигнала: учет аномальных вкладов и от сигнального процесса, и от фоновых (непренебрежимый вклад возникает только от фона  $W(\ell\nu)\gamma$ ).

# Способы увеличения чувствительности: иллюстрация



Красная сплошная линия — без использования новых методов.

Зеленая пунктирная линия — с использованием новых методов.

Чувствительность увеличивается, а значит и пределы на коэффициенты становятся точнее.

# Результаты

Коэф.	Без новых методов	С новыми методами	Уточнение
$C_{G+}/\Lambda^4$	$[-6.24; 6.27] \times 10^{-3}$	$[-4.95; 4.95] \times 10^{-4}$	92.1%
$C_{G-}/\Lambda^4$	$[-0.338; 0.352]$	$[-3.61; 3.61] \times 10^{-3}$	99.0%
$C_{\tilde{B}W}/\Lambda^4$	$[-0.372; 0.378]$	$[-0.185; 0.185]$	49.3%
$C_{BW}/\Lambda^4$	$[-0.698; 0.674]$	$[-0.355; 0.350]$	48.6%
$C_{BB}/\Lambda^4$	$[-0.279; 0.275]$	$[-0.234; 0.231]$	16.1%
$C_{WW}/\Lambda^4$	$[-1.40; 1.37]$	$[-0.443; 0.441]$	68.1%

Ожидаемые

Коэф.	Поставленные в данной работе	Точнейшие опубликованные
$C_{G+}/\Lambda^4$	$[-3.67; 3.67] \times 10^{-4}$	No data
$C_{G-}/\Lambda^4$	$[-2.60; 2.60] \times 10^{-3}$	No data
$C_{\tilde{B}W}/\Lambda^4$	$[-0.127; 0.125]$	$[-1.1, 1.1]$
$C_{BW}/\Lambda^4$	$[-0.242; 0.240]$	$[-0.65; 0.64]$
$C_{BB}/\Lambda^4$	$[-0.158; 0.156]$	$[-0.24; 0.24]$
$C_{WW}/\Lambda^4$	$[-0.323; 0.316]$	$[-2.3; 2.3]$

Наблюдаемые

# Создание новой модели в FeynRules

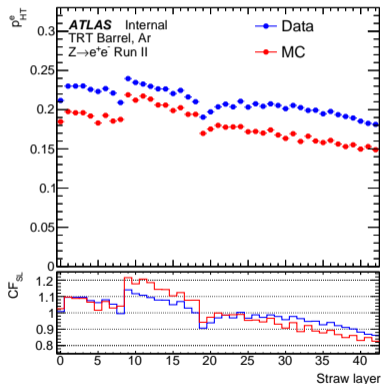
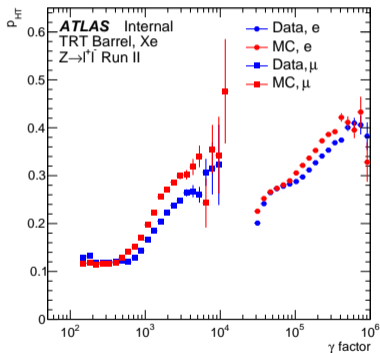
Для моделирования процессов в MadGraph5 используется UFO модель, полученная с помощью пакета FeynRules. У имеющихся в настоящее время есть ряд недостатков:

- Ни одна не содержит все шесть операторов.
- Во всех удалены четверные аномальные вершины и возможность расчета диаграмм с двумя аномальными вершинами. Для нового метода необходимо рассчитывать электрослабые диаграммы с двумя струями. В квадратичные члены таких диаграмм дают вклад четверные аномальные вершины и интерференция между диаграммами с двумя аномальными вершинами и диаграммами SM.
- В некоторых моделях не занулены массы первых двух поколений фермионов.

С помощью FeynRules была создана модель, устраняющая все эти проблемы. Она находится на стадии проверки, в дальнейшем с ее помощью планируется заказать наборы ATLAS с полной симуляцией детектора.

# Квалификационная задача ATLAS

Название: исследование идентификации частиц в TRT с помощью метода правдоподобия.  
Цель: калибровка и усовершенствование метода.



Повторена методология калибровки. Есть ряд эффектов, которые нужно объяснить, прежде чем двигаться дальше.



# Заключение

Получены следующие результаты:

- Разработаны и проверены два метода уточнения пределов на коэффициенты Вильсона, не применяемые ранее.
- Поставлены предварительные ожидаемые и наблюдаемые пределы на 6 коэффициентов Вильсона. Они являются более точными, чем установленные и опубликованные ранее.
- Создана новая модель в FeynRules.
- Повторена методология настройки параметров метода правдоподобия идентификации частиц в TRT.

Планы:

- Заказать официальные наборы ATLAS.
- Рассмотреть новые чувствительные переменные, в частности, оптимальные наблюдаемые.
- Рассмотреть возможности унитаризации пределов, постановки пределов без квадратичного члена.
- И многое другое...

# BACK-UP

# Используемые статистический метод и тестовая статистика

Тестовая статистика:  $t_\mu = -2 \ln \lambda(\mu)$ .

$$\lambda(\mu) = \frac{L(\mu, \hat{\theta}(f))}{L(\hat{\mu}, \hat{\theta})} \text{ — отношение правдоподобия.}$$

Метод  $CL_{s+b}$ : доверительный интервал — регион в пространстве параметров интереса  $\mu$ , в котором

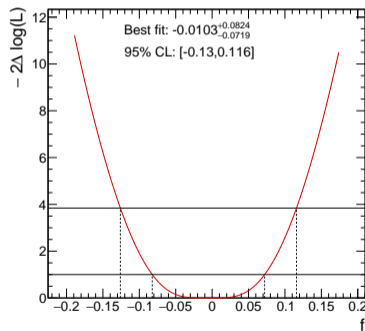
$$p_\mu = \int_{t_\mu^{\text{obs}}}^{\infty} f(t_\mu | \mu) dt_\mu > \alpha = 0.05.$$

В пределе большой выборки распределение тестовой статистики  $f(t_\mu | \mu)$  сходится к распределению  $\chi^2_{\text{dim}(\mu)}$ .

Нахождение пределов (95% CL) сводится к условию  $t_\mu = 3.84$ .

Параметр интереса:  $f_{T0}/\Lambda^4$ .

Регион:  $E_T^\gamma > 900$  ГэВ.



# Функция правдоподобия

$$L(\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\theta}) = \prod_i \frac{(N_{\text{pred}}^i(\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\theta}))^{N_{\text{data}}^i}}{N_{\text{data}}^i!} e^{-N_{\text{pred}}^i(\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\theta})} \times \prod_j \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\theta_j^2/2}, \quad (1)$$

$$N_{\text{pred}}(\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\theta}) = \left( N_0(1 + \sigma_0\theta_0) + \frac{f}{\Lambda^4} N_1(1 + \sigma_1\theta_1) + \frac{f^2}{\Lambda^8} N_2(1 + \sigma_2\theta_2) \right) \times (1 + \sigma_{\text{sys}}\theta_{\text{sys}}) \quad (2)$$

$$N_{\text{pred}}(\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\theta}) = \left( N_0(1 + \sigma_0\theta_0) + \frac{f_1}{\Lambda^4} N_{1,1}(1 + \sigma_{1,1}\theta_{1,1}) + \frac{f_2}{\Lambda^4} N_{1,2}(1 + \sigma_{1,2}\theta_{1,2}) + \frac{f_1^2}{\Lambda^8} N_{2,1}(1 + \sigma_{2,1}\theta_{2,1}) + \frac{f_2^2}{\Lambda^8} N_{2,2}(1 + \sigma_{2,2}\theta_{2,2}) + \frac{f_1 f_2}{\Lambda^8} N_{12}(1 + \sigma_{12}\theta_{12}) \right) \times (1 + \sigma_{\text{sys}}\theta_{\text{sys}}) \quad (3)$$

# Optimal observables

Parameterization by one operator:

$$\begin{aligned}\mathcal{M}^2 &= |\mathcal{M}_{\text{SM}} + C\mathcal{M}_{\text{BSM}}|^2 = |\mathcal{M}_{\text{SM}}|^2 + C \cdot 2\text{Re}(\mathcal{M}_{\text{SM}}^\dagger \mathcal{M}_{\text{BSM}}) + C^2 |\mathcal{M}_{\text{BSM}}|^2 = \\ &= |\mathcal{M}_{\text{SM}}|^2 \left( 1 + C \frac{2\text{Re}(\mathcal{M}_{\text{SM}}^\dagger \mathcal{M}_{\text{BSM}})}{|\mathcal{M}_{\text{SM}}|^2} + C^2 \frac{|\mathcal{M}_{\text{BSM}}|^2}{|\mathcal{M}_{\text{SM}}|^2} \right)\end{aligned}$$

Optimal observables (for operator  $\mathcal{O}_i$ ):

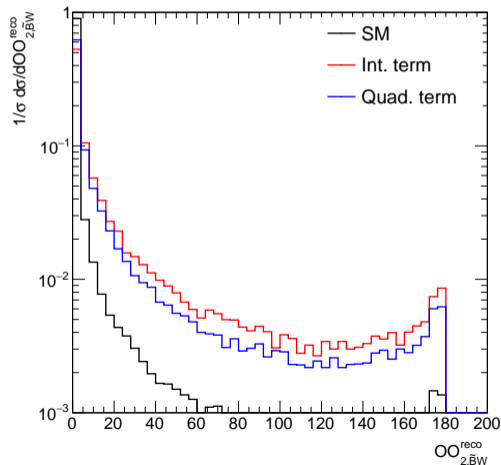
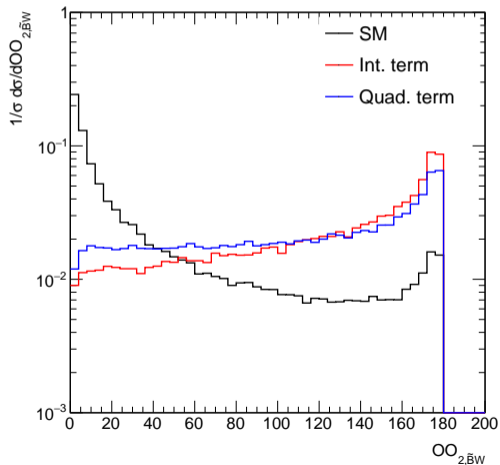
$$OO_{1,i} = 1 \text{ TeV}^{-4} \cdot \frac{2\text{Re}(\mathcal{M}_{\text{SM}}^\dagger \mathcal{M}_{\text{BSM}})}{|\mathcal{M}_{\text{SM}}|^2}; \quad OO_{2,i} = 1 \text{ TeV}^{-8} \cdot \frac{|\mathcal{M}_{\text{BSM}}|^2}{|\mathcal{M}_{\text{SM}}|^2}$$

- OOs are different for different operators.
- Reconstruction of OOs for  $pp \rightarrow \nu\bar{\nu}\gamma$  is impossible. Proposal of reco-level OOs: process  $pp \rightarrow Z\gamma$  and

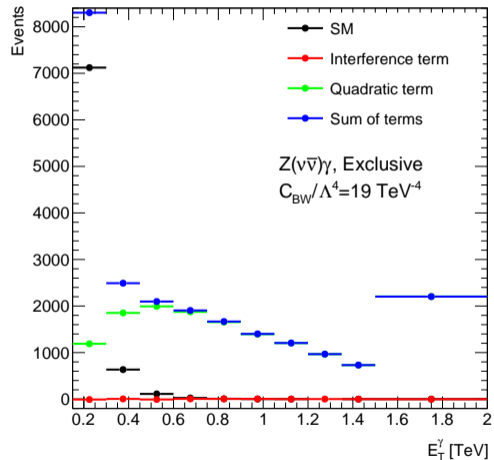
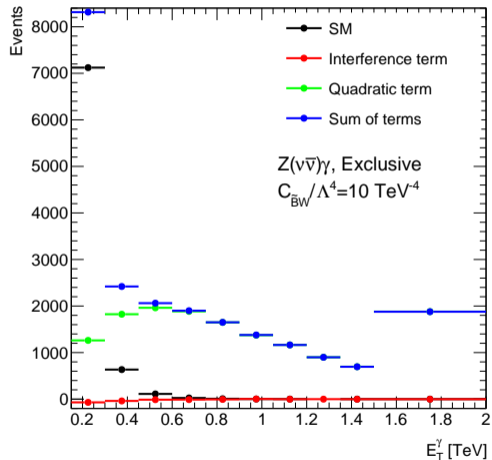
$$OO_{1,i}^{\text{reco}} = 1 \text{ TeV}^{-4} \cdot \frac{2\text{Re}(\mathcal{M}_{\text{SM}}^\dagger \mathcal{M}_{\text{BSM}})}{|\mathcal{M}_{\text{SM}}|^2} (p_z^Z = 0); \quad OO_{2,i}^{\text{reco}} = 1 \text{ TeV}^{-8} \cdot \frac{|\mathcal{M}_{\text{BSM}}|^2}{|\mathcal{M}_{\text{SM}}|^2} (p_z^Z = 0)$$

# $OO_{2,\tilde{B}W}$

Simple example for subprocess  $u\bar{u} \rightarrow Z\gamma$ .



# Декомпозиция



# Составной аномальный сигнал для четверных вершин [1]

Coefficient	Class. lim. [ $\text{TeV}^{-4}$ ]	Corr. lim. [ $\text{TeV}^{-4}$ ]	Improvement
Integrated luminosity of $139 \text{ fb}^{-1}$			
$f_{T0}/\Lambda^4$	[-0.125; 0.119]	[-0.124; 0.118]	1.3%
$f_{T5}/\Lambda^4$	[-0.125; 0.132]	[-0.122; 0.128]	2.7%
$f_{M0}/\Lambda^4$	[-6.04; 6.05]	[-5.57; 5.57]	7.8%
$f_{M2}/\Lambda^4$	[-2.42; 2.42]	[-2.20; 2.20]	9.1%
Integrated luminosity of $300 \text{ fb}^{-1}$			
$f_{T0}/\Lambda^4$	[-0.102; 0.096]	[-0.100; 0.095]	1.3%
$f_{T5}/\Lambda^4$	[-0.101; 0.107]	[-0.098; 0.104]	2.6%
$f_{M0}/\Lambda^4$	[-4.95; 4.95]	[-4.57; 4.57]	7.6%
$f_{M2}/\Lambda^4$	[-1.98; 1.98]	[-1.81; 1.81]	8.9%



# Составной аномальный сигнал для четверных вершин [2]

