Аномальные тройные и четверные вершины в электрослабой модели

Артур Семушин

НИЯУ МИФИ

18.06.2024

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.

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

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:

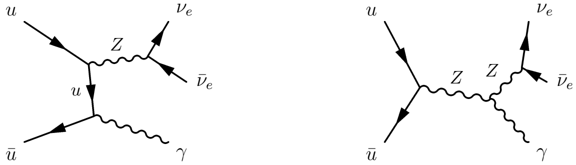
$$|\mathcal{A}|^2 = |\mathcal{A}_{\mathrm{SM}}|^2 + \frac{C}{\Lambda^4} 2\mathrm{Re}\, \mathcal{A}_{\mathrm{SM}}^{\dagger} \mathcal{A}_{\mathrm{BSM}} + \frac{C^2}{\Lambda^8} |\mathcal{A}_{\mathrm{BSM}}|^2$$

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 фб$^{-1}$).

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



Эти вершины параметризуются с помощью специального базиса операторов размерности 8:

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

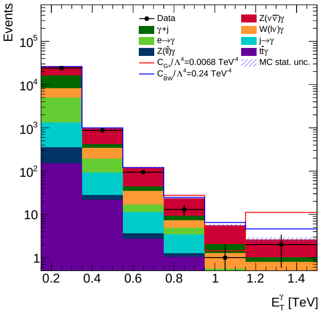
$$\mathcal{O}_{BB} = i\Phi^\dagger B_{\mu\nu}B^{\mu\rho}\left\{D_\rho, D^\nu\right\}\Phi + \text{h.c.}, \qquad \mathcal{O}_{WW} = i\Phi^\dagger \hat{W}_{\mu\nu}\hat{W}^{\mu\rho}\left\{D_\rho, D^\nu\right\}\Phi + \text{h.c.},$$

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

Одномерные пределы, нарушение унитарности

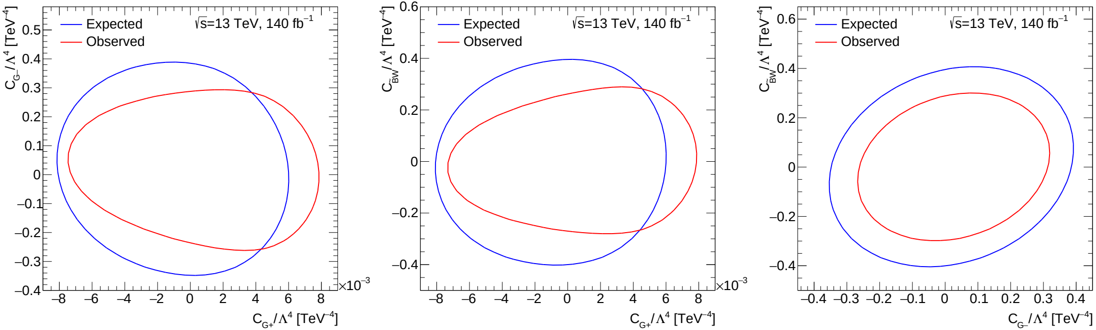
- Для моделирования аномальных вкладов в сечение (генерации наборов событий) была создана модель (в `FeynRules`), включающая в себя все рассматриваемые операторы. Модель была проверена, одобрена коллаборацией ATLAS и использована для создания наборов событий с полной симуляцией детектора.

Coef.	Exp. limits [TeV^{-4}]	Obs. limits [TeV^{-4}]	$\sqrt{s_{\max}}$ [TeV]
C_{G+}/Λ^4	[-0.0065; 0.0047]	[-0.0045; 0.0068]	11.2
C_{G-}/Λ^4	[-0.30; 0.34]	[-0.21; 0.27]	22.3
$C_{\tilde{B}W}/\Lambda^4$	[-0.35; 0.34]	[-0.25; 0.24]	15.8
C_{BW}/Λ^4	[-0.63; 0.63]	[-0.45; 0.45]	19.9
C_{BB}/Λ^4	[-0.25; 0.25]	[-0.18; 0.18]	25.5
C_{WW}/Λ^4	[-1.3; 1.3]	[-0.90; 0.90]	16.2



- Операторы имеют высокие размерности $\Longrightarrow$ в теории нарушается унитарность.
- В последнем столбце — энергия начального/конечного состояния в системе центра масс, при которой нарушается унитарность.
- Установленные в работе пределы не нарушают унитарность в терминах унитарности парциальных волн.

Двумерные пределы



Учет аномальных вкладов фонового процесса

• Ненулевой коэффициент Вильсона влияет на все физические процессы.
• Кроме сигнального процесса $(Z(\nu\bar{\nu})\gamma)$, значительный аномальный вклад содержит фон $W(\ell\nu)\gamma$.

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

Coef.	Exp. limits [TeV^{-4}]	Improvement, exp.	Obs. limits [TeV^{-4}]	Improvement, obs.
C_{G+}/Λ^4	[-0.0061; 0.0045]	4.9%	[-0.0044; 0.0063]	4.7%
$C_{\tilde{B}W}/\Lambda^4$	[-0.33; 0.32]	6.4%	[-0.23; 0.22]	5.8%
C_{BW}/Λ^4	[-0.60; 0.60]	5.1%	[-0.42; 0.42]	5.6%

• Возможная проблема подхода: фон $W(\ell\nu)\gamma$ оценивается получением нормировочного множителя из фита в контрольном регионе. Этот множитель может содержать все возможные аномальные вклады.
• Возможный ответ на критику: наибольший вклад в фит в контрольном регионе вносят события с большим количеством событий СМ, поэтому он не чувствителен к аномальным вершинам.

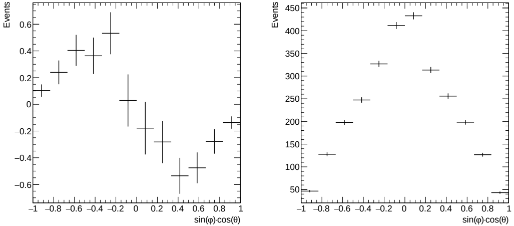
Исследования CP-нарушения

- Для получения пределов использовалась нечувствительная к CP-нарушению переменная $\Longrightarrow$ пределы на коэффициенты Вильсона ставились только по CP-сохраняющим вкладам.
- CP-чувствительная переменная — такая переменная, которая позволит разделить интерференцию на положительный и отрицательный вклады.
- Каналы, рассматриваемые для данного исследования: $Z(\nu\bar{\nu})\gamma$, $ZZ(\ell\ell\nu\bar{\nu})$, $Z(\ell\ell)\gamma$ (ранее такие переменные не использовались ни в одном из этих каналов).

Угловые CP-чувствительные переменные

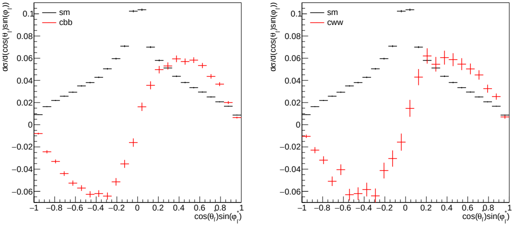
- Необходимо измерить направление вылета лептона в специальной системе координат (делается буст и поворот осей). Переменная: $\sin\varphi\cos\theta$.
- Неприменимо в канале $Z(\nu\bar{\nu})\gamma$.

$ZZ(\ell\ell\nu\bar{\nu})$



- Коэффициент: C_{BB}/Λ^4.
- Неидеальное восстановление переменной.
- Оценены пределы: $[-300; 300]$ ТэВ$^{-4}$.

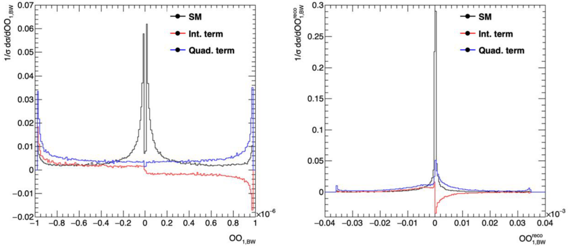
$Z(\ell\ell)\gamma$



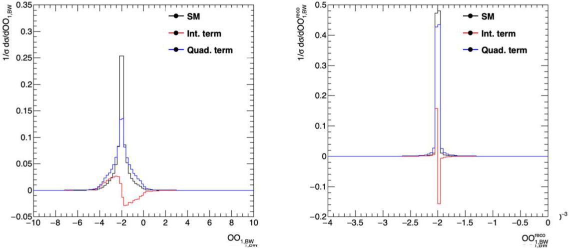
- Коэффициенты: C_{BB}/Λ^4, C_{WW}/Λ^4.

- Интерференционная оптимальная наблюдаемая: $OO_1 = 2\mathrm{Re}\left(\mathcal{M}^*_{\mathrm{SM}}\mathcal{M}_{\mathrm{BSM}}\right)/|\mathcal{M}_{\mathrm{SM}}|^2$.
- В случае, если конечный Z-бозон не идентифицируется, его продольный импульс зануляется для восстановления данной переменной.
- Рассмотрена в каналах $Z(\nu\bar{\nu})\gamma$, $ZZ(\ell\ell\nu\bar{\nu})$.

$Z(\nu\bar{\nu})\gamma$



$ZZ(\ell\ell\nu\bar{\nu})$



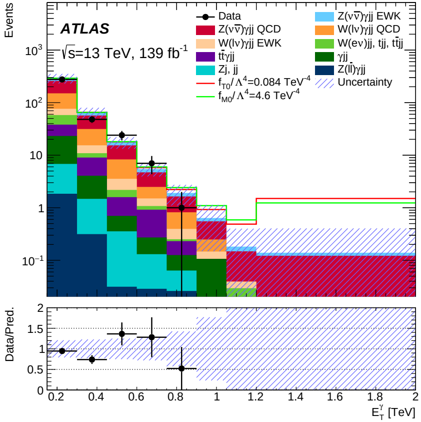
- Коэффициент: C_{BW}/Λ^4.
- Начальное состояние — не pp, а $u\bar{u}$. Необходимо суммирование по начальным состоянием и интегрирование по их энергиям.

Пересмотр пределов на аномальные четверные вершины [1]

- Рассматриваемое конечное состояние: $Z(\nu\bar{\nu})\gamma jj$.
- Предыдущая структура функции правдоподобия — 1 бин:

1. $E_T^\gamma > 900$ ГэВ, неунитаризованные пределы.
2. $E_T^\gamma > 600$ (400) ГэВ, унитаризованные пределы.

- Неудобно для комбинации разных каналов.
- Новая структура — 8 бинов.



Пересмотр пределов на аномальные четверные вершины [2]

1 бин с $E_T^\gamma > 900$ GeV, опубликованное

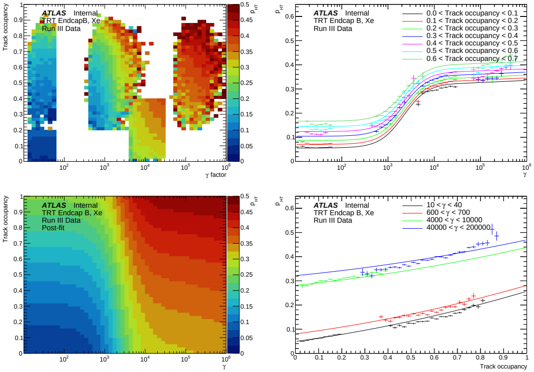
Coefficient	Observed [TeV^{-4}]	Expected [TeV^{-4}]
f_{T0}/Λ^4	[-0.094; 0.084]	[-0.13; 0.12]
f_{T5}/Λ^4	[-0.088; 0.099]	[-0.12; 0.13]
f_{T8}/Λ^4	[-0.059; 0.059]	[-0.081; 0.080]
f_{T9}/Λ^4	[-0.13; 0.13]	[-0.17; 0.17]
f_{M0}/Λ^4	[-4.6; 4.6]	[-6.2; 6.2]
f_{M1}/Λ^4	[-7.7; 7.7]	[-10; 10]
f_{M2}/Λ^4	[-1.9; 1.9]	[-2.6; 2.6]

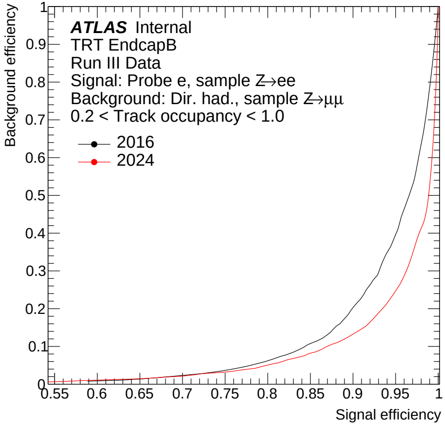
8 бинов, новые, для комбинации

Coefficient	Observed [TeV^{-4}]	Expected [TeV^{-4}]
f_{T0}/Λ^4	[-0.093; 0.084]	[-0.11; 0.10]
f_{T5}/Λ^4	[-0.088; 0.098]	[-0.11; 0.12]
f_{T8}/Λ^4	[-0.059; 0.059]	[-0.072; 0.072]
f_{T9}/Λ^4	[-0.13; 0.13]	[-0.15; 0.15]
f_{M0}/Λ^4	[4.6; 4.6]	[-5.7; 5.7]
f_{M1}/Λ^4	[-7.7; 7.6]	[-9.5; 9.5]
f_{M2}/Λ^4	[-1.9; 1.9]	[-2.3; 2.3]

Калибровка метода правдоподобия идентификации электронов в TRT

- Предыдущая калибровка была сделана в 2016 году.
- Метод базируется на разной вероятности испустить фотоны переходного излучения у электронов и пионов.





Заключение

Результаты:

• Поставлены предварительные ожидаемые и наблюдаемые пределы на 6 коэффициентов Вильсона нейтральных трехбозонных вершин для процесса рождения $Z(\nu\bar{\nu})\gamma$. Они являются более точными, чем установленные и опубликованные ранее.

• Пределы проверены на унитарность (все унитаризованы) и на улучшение с помощью аномальных вкладов фона (улучшение 5%).

• Восстановлены два типа CP-чувствительных переменных для трех разных каналов. Планируется их использование при установке пределов и поиске CP-нарушения (впервые).

• Улучшены пределы на аномальные четырехбозонные вершины, усовершенствована структура правдоподобия для комбинации анализов.

• Завершена калибровка метода правдоподобия идентификации частиц в TRT.

Планы:

• Работа над оптимальными наблюдаемыми для анализа $Z(\nu\bar{\nu})\gamma$ (поиск CP-нарушения).

• Усовершенствование идентификации частиц в TRT.

BACK-UP

Используемые статистический метод и тестовая статистика

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

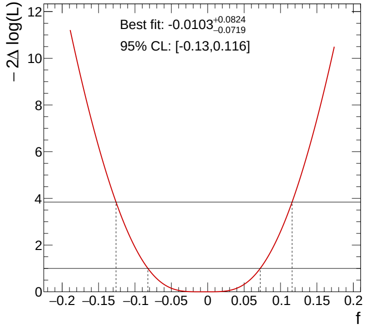
$$\lambda(\mu) = \frac{L(\mu, \hat{\hat{\theta}}(f))}{L(\hat{\mu}, \hat{\theta})}$$ — отношение правдоподобия.

Метод CL$_{s+b}$: доверительный интервал — регион в пространстве параметров интереса μ, в котором

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

В пределе большой выборки распределение тестовой статистики $f(t_\mu|\mu)$ сходится к распределению $\chi^2_{\mathrm{dim}(\mu)}$. Нахождение пределов (95% CL) сводится к условию $t_\mu = 3.84$.

Параметр интереса: f_{T0}/Λ^4.
Регион: $E_T^\gamma > 900$ ГэВ.



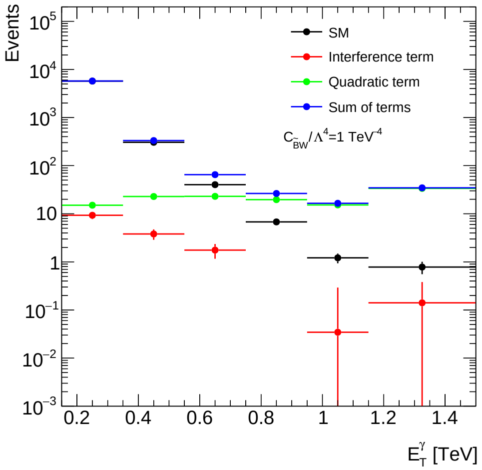
Функция правдоподобия

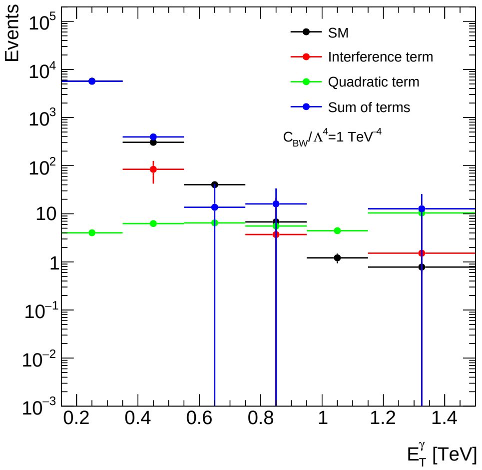
$$L(\boldsymbol{\mu},\boldsymbol{\theta}) = \prod_i \frac{(N^i_{\text{pred}}(\boldsymbol{\mu},\boldsymbol{\theta}))^{N^i_{\textbf{data}}}}{N^i_{\text{data}}!} e^{-N^i_{\textbf{pred}}(\boldsymbol{\mu},\boldsymbol{\theta})} \times \prod_j \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\theta_j^2/2}, \tag{1}$$

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

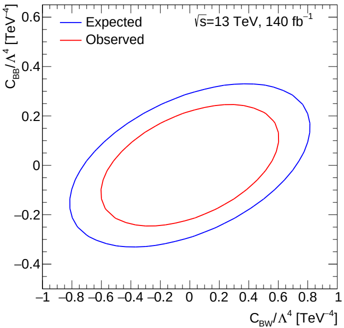
$$N_{\text{pred}}(\boldsymbol{\mu},\boldsymbol{\theta}) = \Bigg(N_0(1+\sigma_0\theta_0) + \frac{f_1}{\Lambda^4} N_{1,1}(1+\sigma_{1,1}\theta_{1,1}) + \frac{f_2}{\Lambda^4} N_{1,2}(1+\sigma_{1,2}\theta_{1,2}) + \\ + \frac{f_1^2}{\Lambda^8} N_{2,1}(1+\sigma_{2,1}\theta_{2,1}) + \frac{f_2^2}{\Lambda^8}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

Декомпозиция

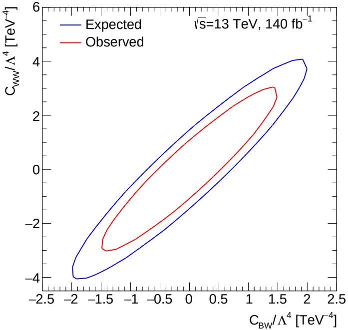




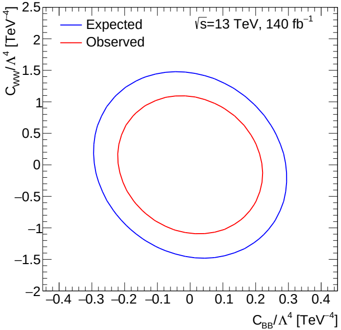
2D limits



Expected
Observed
√s=13 TeV, 140 fb−1
CBB/Λ4 [TeV−4]
CBW/Λ4 [TeV−4]



Expected
Observed
√s=13 TeV, 140 fb−1
CWW/Λ4 [TeV−4]
CBW/Λ4 [TeV−4]



Expected
Observed
√s=13 TeV, 140 fb−1
CWW/Λ4 [TeV−4]
CBB/Λ4 [TeV−4]