

Исследование поправок к пределам на аномальные четверные бозонные вершины, вызванных аномальными вкладами в фоновых процессах, на основе процессов рождения $Z\gamma$ и $W\gamma$ в условиях второго сеанса работы эксперимента ATLAS

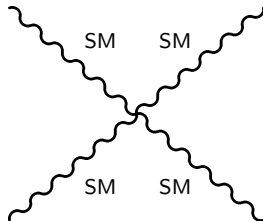
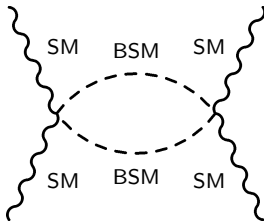
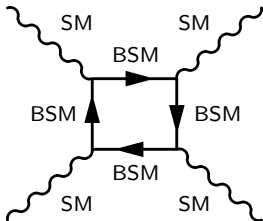
Артур Семушин

НИЯУ МИФИ

28.07.2022

Аномальные вершины

Аномальные вершины — косвенные проявления физики вне СМ.



В работе исследуются аномальные четверные бозонные вершины.

Предсказываются СМ: $WWWW$, $WWZZ$, $WWZ\gamma$, $WW\gamma\gamma$.

Не предсказываются СМ: $ZZZZ$, $ZZZ\gamma$, $ZZ\gamma\gamma$, $Z\gamma\gamma\gamma$, $\gamma\gamma\gamma\gamma$.

Эффективная теория поля

Эффективная теория поля — модельнонезависимый подход для косвенного поиска новой физики. Параметризация лагранжиана операторами высших размерностей:

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{\text{SM}} + \mathcal{L}_5 + \mathcal{L}_6 + \mathcal{L}_7 + \mathcal{L}_8 + \dots = \mathcal{L}_{\text{SM}} + \sum_{d>4} \sum_i \frac{f_i^{(d)}}{\Lambda^{d-4}} \mathcal{O}_i^{(d)}. \quad (1)$$

Λ — энергетический масштаб новой физики,

$f_i^{(d)}/\Lambda^{d-4}$ — коэффициент Вильсона перед i -м оператором размерности d .

Методика рассматривается на примере четырех операторов размерности 8:

$$\begin{aligned} \mathcal{O}_{\text{T0}} &= \text{Tr} \left[\hat{W}_{\mu\nu} \hat{W}^{\mu\nu} \right] \text{Tr} \left[\hat{W}_{\alpha\beta} \hat{W}^{\alpha\beta} \right], & \mathcal{O}_{\text{T5}} &= \text{Tr} \left[\hat{W}_{\mu\nu} \hat{W}^{\mu\nu} \right] B_{\alpha\beta} B^{\alpha\beta}, \\ \mathcal{O}_{\text{M0}} &= \text{Tr} \left[\hat{W}_{\mu\nu} \hat{W}^{\mu\nu} \right] \left[(D_\beta \Phi)^\dagger D^\beta \Phi \right], & \mathcal{O}_{\text{M2}} &= B_{\mu\nu} B^{\mu\nu} \left[(D_\beta \Phi)^\dagger D^\beta \Phi \right]. \end{aligned} \quad (2)$$

Соответствующие коэффициенты Вильсона: f_{T0}/Λ^4 , f_{T5}/Λ^4 , f_{M0}/Λ^4 , f_{M2}/Λ^4 .

Амплитуда и поправки к пределам

Рассматриваются одномерные и двумерные пределы на коэффициенты Вильсона.

Одномерная параметризация:

$$|\mathcal{A}|^2 = \left| \mathcal{A}_{\text{SM}} + \frac{f}{\Lambda^4} \mathcal{A}_{\text{BSM}} \right|^2 = |\mathcal{A}_{\text{SM}}|^2 + \frac{f}{\Lambda^4} 2\text{Re} \mathcal{A}_{\text{SM}}^\dagger \mathcal{A}_{\text{BSM}} + \frac{f^2}{\Lambda^8} |\mathcal{A}_{\text{BSM}}|^2 \quad (3)$$

Классический подход к постановке пределов: аномальные вклады учитываются только для сигнального процесса.

Если в природе какой-либо коэффициент $f \neq 0$, то аномальные вклады на древесном уровне появятся также и у некоторых фоновых процессов $\implies$ поправки к пределам.

Процессы и регионы

Монте-Карло моделирование: MADGRAPH5_AMC@NLO + PYTHIA (адронизация) + DELPHES3 (симуляция детектора с геометрией ATLAS).

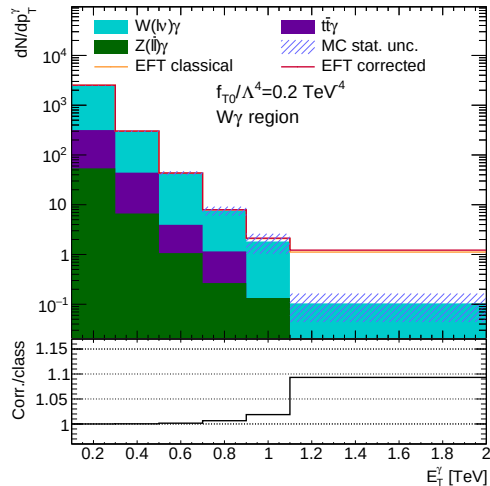
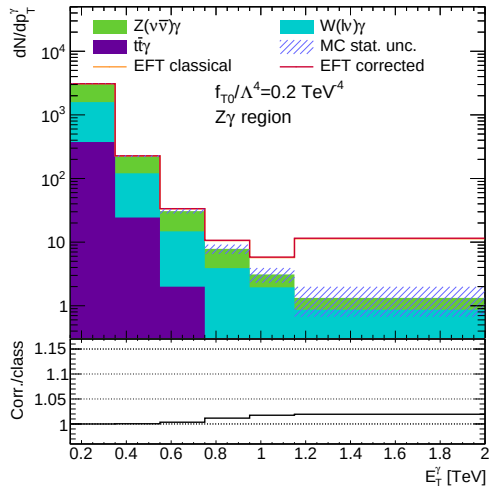
$\sqrt{s} = 13 \text{ ТэВ}$, 139 фб^{-1} .

Методика применена к процессам рождения $Z(\nu\bar{\nu})\gamma$ и $W(\ell\nu)\gamma$, сигнатура: 1 фотон, 2 или более струи, недостающий поперечный импульс и 0 (1) лептон в регионе $Z\gamma$ ($W\gamma$).

Реконструкция объектов базируется на [ATLAS Run I \$Z\(\nu\bar{\nu}\)\gamma\$ study](#), отбор событий базируется на [ATLAS Run I \$Z\(\nu\bar{\nu}\)\gamma\$ study](#) и [CMS Run II \$W\(\ell\nu\)\gamma\$ study](#).

$Z\gamma$ region	$W\gamma$ region
$E_T^\gamma > 150 \text{ GeV}$	$E_T^\gamma > 100 \text{ GeV}$
$E_T^{\text{miss}} > 100 \text{ GeV}$	$E_T^{\text{miss}} > 30 \text{ GeV}$
$ \Delta\varphi(\vec{p}_T^{\text{miss}}, \gamma jj) > 3\pi/4$	$p_T^\ell > 30 \text{ GeV}$
$ \Delta\varphi(\vec{p}_T^{\text{miss}}, \gamma) > \pi/2$	$m_T^W > 30 \text{ GeV}$
$ \Delta\varphi(\vec{p}_T^{\text{miss}}, j) > 1$	$ m_{e\gamma} - m_Z > 10 \text{ GeV}$
$\Delta R > 0.4$ for any objects pair	$\Delta R > 0.5$ for any objects pair
	$ \Delta\eta_{jj} > 2.5$

Модель



Результаты (одномерные)

$Z\gamma$ регион

Коэфф.	Класс. пред. [ТэВ^{-4}]	Попр. пред. [ТэВ^{-4}]	Уточнение
f_{T0}/Λ^4	[-0.125; 0.119]	[-0.124; 0.118]	0.8%
f_{T5}/Λ^4	[-0.125; 0.132]	[-0.122; 0.129]	2.3%
f_{M0}/Λ^4	[-6.04; 6.04]	[-5.58; 5.57]	7.7%
f_{M2}/Λ^4	[-2.42; 2.42]	[-2.20; 2.20]	9.1%

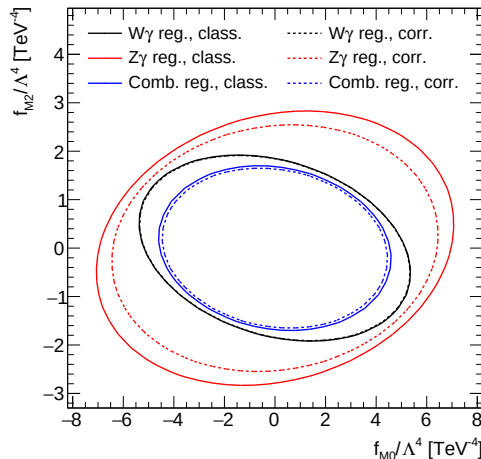
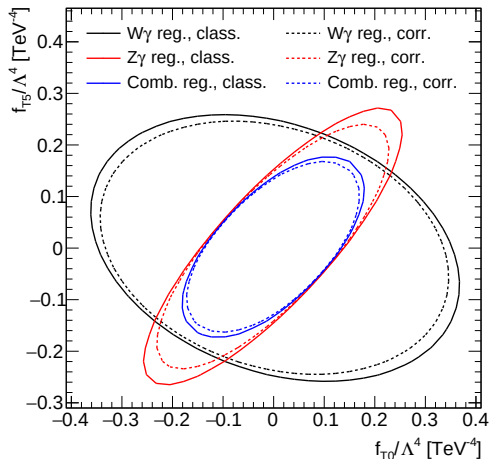
$W\gamma$ регион

Коэфф.	Класс. пред. [ТэВ^{-4}]	Попр. пред. [ТэВ^{-4}]	Уточнение
f_{T0}/Λ^4	[-0.286; 0.292]	[-0.274; 0.278]	4.5%
f_{T5}/Λ^4	[-0.204; 0.206]	[-0.196; 0.198]	3.9%
f_{M0}/Λ^4	[-4.30; 4.28]	[-4.29; 4.27]	0.2%
f_{M2}/Λ^4	[-1.54; 1.54]	[-1.53; 1.53]	0.6%

Комбинация

Коэфф.	Класс. пред. [ТэВ^{-4}]	Попр. пред. [ТэВ^{-4}]	Уточнение
f_{T0}/Λ^4	[-0.120; 0.115]	[-0.119; 0.113]	1.3%
f_{T5}/Λ^4	[-0.114; 0.119]	[-0.111; 0.116]	2.6%
f_{M0}/Λ^4	[-3.86; 3.85]	[-3.76; 3.75]	2.6%
f_{M2}/Λ^4	[-1.42; 1.42]	[-1.39; 1.39]	2.1%

Результаты (двумерные)

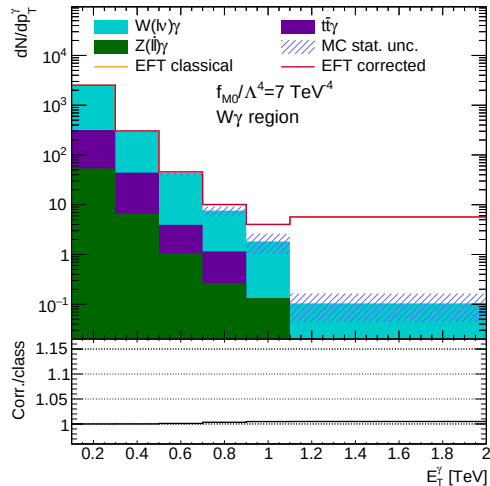
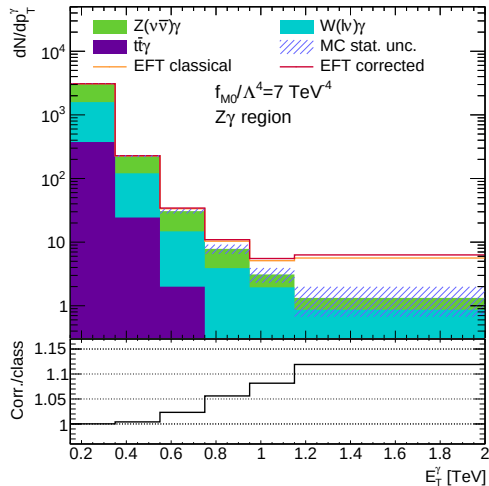


Заключение

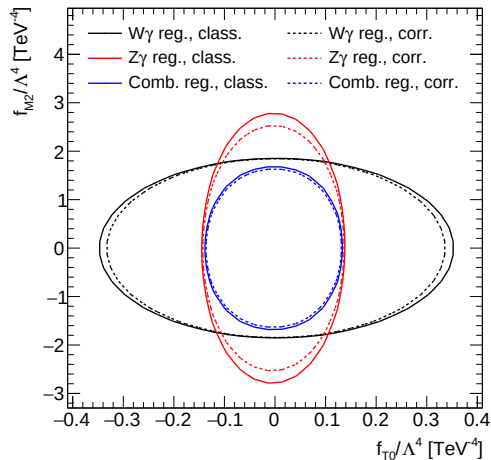
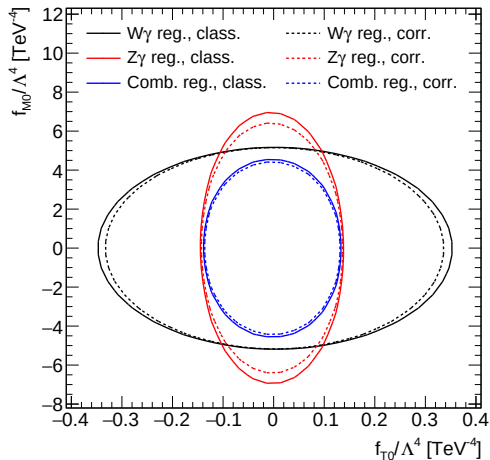
- В работе представлен метод учета аномальных вкладов в фоновых процессах.
- В общем случае при чувствительности Run II поправки приводят к улучшению пределов и не пренебрежимо малы.
- Данный метод будет применен в будущем при постановке экспериментальных пределов на коэффициенты Вильсона.
- Планируется проверить поправки к пределам на другие аномальные вершины (например, нейтральные тройные бозонные вершины).

BACK-UP

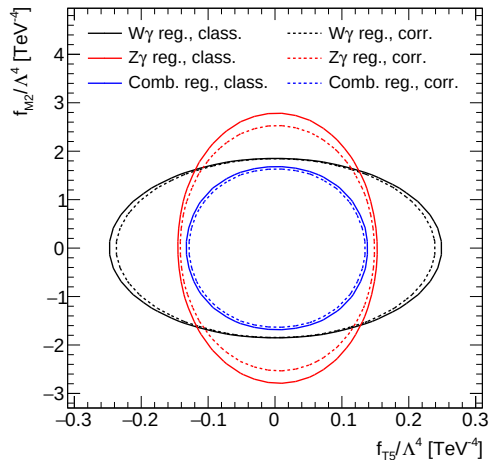
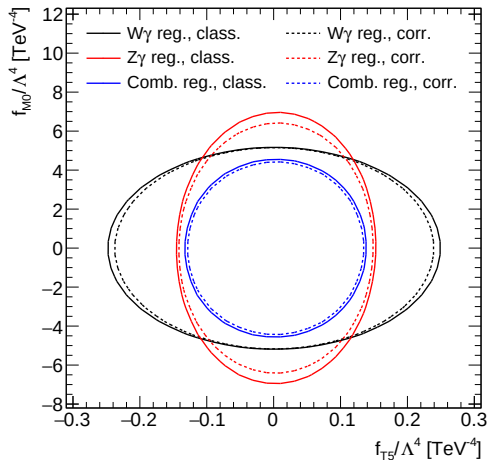
Модель (f_{M0}/Λ^4)



Результаты (двумерные) [2]



Результаты (двумерные) [3]



Базис операторов

$$\mathcal{O}_{T0} = \text{Tr} [\hat{W}_{\mu\nu} \hat{W}^{\mu\nu}] \text{Tr} [\hat{W}_{\alpha\beta} \hat{W}^{\alpha\beta}],$$

$$\mathcal{O}_{T1} = \text{Tr} [\hat{W}_{\alpha\nu} \hat{W}^{\mu\beta}] \text{Tr} [\hat{W}_{\mu\beta} \hat{W}^{\alpha\nu}],$$

$$\mathcal{O}_{T2} = \text{Tr} [\hat{W}_{\alpha\mu} \hat{W}^{\mu\beta}] \text{Tr} [\hat{W}_{\beta\nu} \hat{W}^{\nu\alpha}],$$

$$\mathcal{O}_{T5} = \text{Tr} [\hat{W}_{\mu\nu} \hat{W}^{\mu\nu}] [B_{\alpha\beta} B^{\alpha\beta}],$$

$$\mathcal{O}_{T6} = \text{Tr} [\hat{W}_{\alpha\nu} \hat{W}^{\mu\beta}] [B_{\mu\beta} B^{\alpha\nu}],$$

$$\mathcal{O}_{T7} = \text{Tr} [\hat{W}_{\alpha\mu} \hat{W}^{\mu\beta}] [B_{\beta\nu} B^{\nu\alpha}],$$

$$\mathcal{O}_{T8} = [B_{\mu\nu} B^{\mu\nu}] [B_{\alpha\beta} B^{\alpha\beta}],$$

$$\mathcal{O}_{T9} = [B_{\alpha\mu} B^{\mu\beta}] [B_{\beta\nu} B^{\nu\alpha}].$$

$$\mathcal{O}_{M0} = \text{Tr} [\hat{W}_{\mu\nu} \hat{W}^{\mu\nu}] [(D_\beta \Phi)^\dagger D^\beta \Phi],$$

$$\mathcal{O}_{M1} = \text{Tr} [\hat{W}_{\mu\nu} \hat{W}^{\nu\beta}] [(D_\beta \Phi)^\dagger D^\mu \Phi],$$

$$\mathcal{O}_{M2} = [B_{\mu\nu} B^{\mu\nu}] [(D_\beta \Phi)^\dagger D^\beta \Phi],$$

$$\mathcal{O}_{M3} = [B_{\mu\nu} B^{\nu\beta}] [(D_\beta \Phi)^\dagger D^\mu \Phi],$$

$$\mathcal{O}_{M4} = [(D_\mu \Phi)^\dagger \hat{W}_{\beta\nu} D^\mu \Phi] B^{\beta\nu},$$

$$\mathcal{O}_{M5} = [(D_\mu \Phi)^\dagger \hat{W}_{\beta\nu} D^\nu \Phi] B^{\beta\mu} + \text{h.c.},$$

$$\mathcal{O}_{M7} = [(D_\mu \Phi)^\dagger \hat{W}_{\beta\nu} \hat{W}^{\beta\mu} D^\nu \Phi].$$

$$\mathcal{O}_{S0} = [(D_\mu \Phi)^\dagger D_\nu \Phi] [(D^\mu \Phi)^\dagger D^\nu \Phi],$$

$$\mathcal{O}_{S1} = [(D_\mu \Phi)^\dagger D^\mu \Phi] [(D_\nu \Phi)^\dagger D^\nu \Phi].$$

Влияние операторов на вершины

Оператор	WWWW	WWZZ	WWZ γ	WW $\gamma\gamma$	ZZZZ	ZZZ γ	ZZ $\gamma\gamma$	Z $\gamma\gamma\gamma$	$\gamma\gamma\gamma\gamma$
$\mathcal{O}_{T0}, \mathcal{O}_{T1}, \mathcal{O}_{T2}$	○	○	○	○	○	○	○	○	○
$\mathcal{O}_{T5}, \mathcal{O}_{T6}, \mathcal{O}_{T7}$		○	○	○	○	○	○	○	○
$\mathcal{O}_{T8}, \mathcal{O}_{T9}$					○	○	○	○	○
$\mathcal{O}_{M0}, \mathcal{O}_{M1}, \mathcal{O}_{M7}$	○	○	○	○	○	○	○		
$\mathcal{O}_{M2}, \mathcal{O}_{M3}, \mathcal{O}_{M4}, \mathcal{O}_{M5}$		○	○	○	○	○	○		
$\mathcal{O}_{S0}, \mathcal{O}_{S1}$	○	○			○				

Статистический метод

μ — вектор параметров интереса, θ — вектор несущественных параметров, реализующих неопределенности.

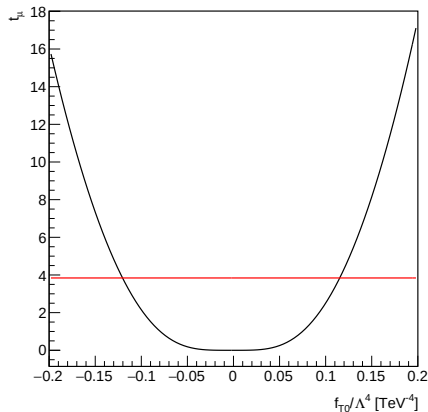
Тестовая статистика: $t_\mu = -2 \ln \frac{L(\mu, \hat{\theta}(\mu))}{L(\hat{\mu}, \hat{\theta})}$.

Метод CL_{s+b} : доверительный интервал на уровне доверия 95% — область в пространстве параметров интереса μ , в которой

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

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

Нахождение одномерных (двумерных) пределов 95% CL сводится к решению уравнения $t_\mu^{\text{obs}} = 3.84(5.99)$.



Функция правдоподобия

$$L(\mu, \theta) = \prod_i \frac{(N_{\text{pred}}^i(\mu, \theta))^{N_{\text{data}}^i}}{N_{\text{data}}^i!} e^{-N_{\text{pred}}^i(\mu, \theta)} \times \prod_j \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\theta_j^2/2}. \quad (4)$$

$$N_{\text{pred}}^i(\mu, \theta) = \left(N_0^i(1 + \sigma_0^i \theta_0^i) + \frac{f}{\Lambda^4} N_1^i(1 + \sigma_1^i \theta_1^i) + \frac{f^2}{\Lambda^8} N_2^i(1 + \sigma_2^i \theta_2^i) \right) (1 + \sigma_{\text{syst}} \theta_{\text{syst}}), \quad (5)$$

$$N_{\text{pred}}^i(\mu, \theta) = \left(N_0^i(1 + \sigma_0^i \theta_0^i) + \frac{f_1}{\Lambda^4} N_{1,1}^i(1 + \sigma_{1,1}^i \theta_{1,1}^i) + \frac{f_2}{\Lambda^4} N_{1,2}^i(1 + \sigma_{1,2}^i \theta_{1,2}^i) + \right. \\ \left. + \frac{f_1^2}{\Lambda^8} N_{2,1}^i(1 + \sigma_{2,1}^i \theta_{2,1}^i) + \frac{f_2^2}{\Lambda^8} N_{2,2}^i(1 + \sigma_{2,2}^i \theta_{2,2}^i) + \frac{f_1 f_2}{\Lambda^8} N_{12}^i(1 + \sigma_{12}^i \theta_{12}^i) \right) (1 + \sigma_{\text{syst}} \theta_{\text{syst}}). \quad (6)$$