

Поиск аномальных вершин на основе процессов рождения пар электрослабых нейтральных бозонов в данных pp -столкновений с энергией 13 ТэВ в эксперименте ATLAS

Артур Семушин

НИЯУ МИФИ

31.05.2022

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

Аномальные вершины и эффективная теория поля

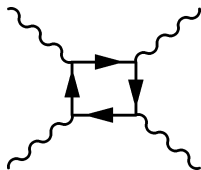
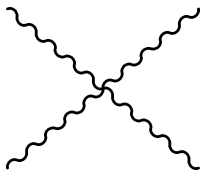
Параметризация лагранжиана операторами высших размерностей:

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{\text{SM}} + \mathcal{L}_5 + \mathcal{L}_6 + \mathcal{L}_7 + \mathcal{L}_8 + \dots = \mathcal{L}_{\text{SM}} + \sum_i \sum_n \frac{f_{i,n}}{\Lambda^n} \mathcal{O}_i^{n+4}. \quad (1)$$

$f_{i,n}/\Lambda^n$ — коэффициент перед i -м оператором размерности 8.

Бозонные операторы нечетных размерностей запрещены.

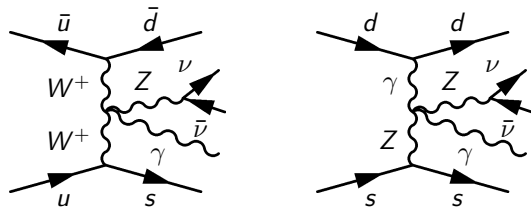
Аномальные вершины — проявления физики вне СМ.



Электрослабое рождение $Z\gamma$ и аномальные четверные вершины

Сигнальный процесс: $pp \rightarrow \nu\bar{\nu}\gamma jj$.

Сигнатура: фотон с большой поперечной энергией E_T^γ , большой потерянный поперечный импульс E_T^{miss} , 2 (или более) струи.



$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{\text{SM}} + \sum_i \frac{f_i}{\Lambda^4} \mathcal{O}_i$$

Операторы размерности 8 позволяют исследовать аномальные четверные вершины без вклада тройных.

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

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

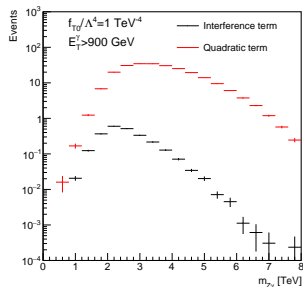
Рассматриваемые в работе коэффициенты: f_{T0}/Λ^4 , f_{T5}/Λ^4 , f_{T8}/Λ^4 , f_{T9}/Λ^4 , f_{M0}/Λ^4 , f_{M1}/Λ^4 , f_{M2}/Λ^4 .
В докладе демонстрируется на примере f_{T0}/Λ^4 .

Клиппинг и оптимизация

Унитарность S -матрицы: $SS^\dagger = 1$.

Клиппинг — выключение вкладов новой физики при $\sqrt{\hat{s}} > E_c$.

$\sqrt{\hat{s}}$ — инвариант рассеяния бозонов
 $\rightarrow \sqrt{\hat{s}} = m_{Z\gamma}$.



E_T^γ — одна из самых чувствительных переменных.

$E_c, \text{ TeV}$	∞	1.8	1.7	1.6
$E_T^\gamma > 150 \text{ GeV}$	[-0.71; 0.66]	[-2.3; 2]	[-2.6; 2.2]	[-2.9; 2.5]
$E_T^\gamma > 500 \text{ GeV}$	[-0.22; 0.19]	[-0.83; 0.67]	[-0.95; 0.77]	[-1.11; 0.89]
$E_T^\gamma > 600 \text{ GeV}$	[-0.18; 0.16]	[-0.76; 0.63]	[-0.89; 0.74]	[-1.06; 0.88]
$E_T^\gamma > 700 \text{ GeV}$	[-0.15; 0.14]	[-0.77; 0.66]	[-0.93; 0.8]	[-1.14; 0.99]
$E_T^\gamma > 800 \text{ GeV}$	[-0.14; 0.12]	[-0.86; 0.76]	[-1.06; 0.95]	[-1.3; 1.2]
$E_T^\gamma > 900 \text{ GeV}$	[-0.13; 0.12]	[-1.01; 0.93]	[-1.3; 1.2]	[-1.6; 1.5]
$E_T^\gamma > 1000 \text{ GeV}$	[-0.12; 0.11]	[-1.3; 1.2]	[-1.6; 1.5]	[-2.1; 2]
$E_T^\gamma > 1100 \text{ GeV}$	[-0.12; 0.11]			
$E_T^\gamma > 1200 \text{ GeV}$	[-0.12; 0.11]			
$E_T^\gamma > 1300 \text{ GeV}$	[-0.13; 0.12]			
Bound	[-0; 0]	[-0.72; 0.72]	[-0.9; 0.9]	[-1.2; 1.2]

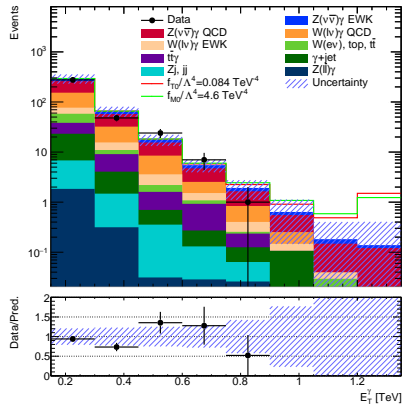
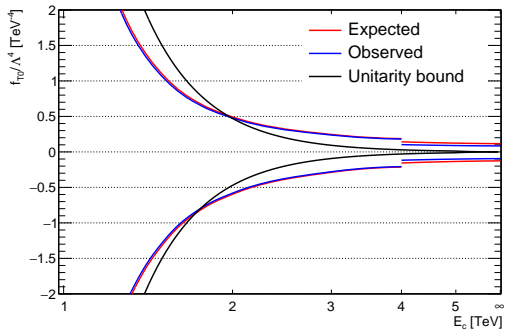
Выбранные пороги:

- для неунитаризованных пределов: $E_T^\gamma > 900 \text{ ГэВ}$;
- для унитаризованных пределов: $E_T^\gamma > 600 \text{ ГэВ}$ для Т-семейства и $E_T^\gamma > 400 \text{ ГэВ}$ для М-семейства.

Результаты

Пределы на f_{T0}/Λ^4 :

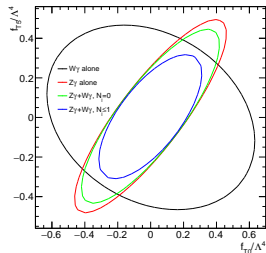
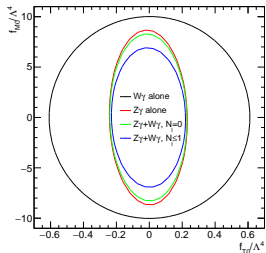
	Неунит.	Унит., $E_c = 1.7$ ТэВ	Линейные
Ожид.	[-0.13; 0.12]	[-0.89; 0.74]	[-0.38; 1.36]
Набл.	[-0.094; 0.084]	[-0.87; 0.71]	[-0.38; 0.84]



Учет аномальных вкладов в фонах

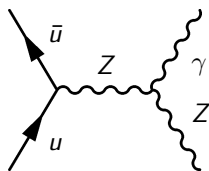
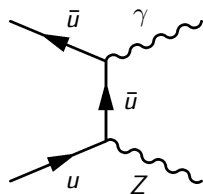
Некоторые фоновые процессы (в частности, $W\gamma$) могут содержать такую же новую физику, как и $Z\gamma$. Это приводит к корректировке пределов.

Coef.	$Z\gamma$ alone	$Z\gamma + W\gamma$	Improv.
f_{T0}/Λ^4	[-0.204; 0.192]	[-0.202; 0.190]	1%
f_{T5}/Λ^4	[-0.202; 0.216]	[-0.198; 0.212]	2%
f_{M0}/Λ^4	[-7.24; 7.21]	[-6.92; 6.90]	4%
f_{M2}/Λ^4	[-2.90; 2.90]	[-2.74; 2.75]	5%



Инклюзивное рождение $Z\gamma$ и нейтральные тройные вершины

Сигнатура: фотон с большой поперечной энергией E_T^γ , большой потерянный поперечный импульс E_T^{miss} , любое количество струй.



Нейтральные тройные бозонные вершины доступны, начиная с операторов размерности 8.

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{\text{SM}} + \sum_i \frac{c_i}{\Lambda^4} (\mathcal{O}_i + \mathcal{O}_i^\dagger)$$

$$\mathcal{O}_{\tilde{B}W} = i\Phi^\dagger \tilde{B}_{\mu\nu} W^{\mu\rho} \{D_\rho, D^\nu\} \Phi$$

Сравнение использования распределения и одного оптимизированного бина

Число струй	Переменная	Оптимизация		Распределение
		Порог	Пределы [ТэВ ⁻⁴]	Пределы [ТэВ ⁻⁴]
$N_j = 0$	E_T^γ	> 1100 GeV	[-0.33; 0.33]	[-0.29; 0.28]
	E_T^{miss}	> 1100 GeV	[-0.33; 0.33]	[-0.29; 0.28]
	$p_T\text{-balance}$	< 0.002	[-3.3; 3.0]	[-2.0; 1.9]
	$ \Delta\varphi(\gamma, Z) $	> 3.1	[-7.2; 7.2]	[-3.9; 3.9]
	$ \eta_\gamma $	< 0.8	[-8.3; 8.4]	[-4.5; 4.5]
$N_j = 1$	E_T^γ	> 1100 GeV	[-0.42; 0.41]	[-0.36; 0.36]
$N_j \geq 2$	E_T^γ	> 1200 GeV	[-0.65; 0.64]	[-0.57; 0.57]

Использование распределения позволяет достичь большей чувствительности.

Заключение

- Работа по постановке пределов на аномальные четверные вершины с использованием данных второго сеанса работы эксперимента ATLAS завершена.
- Работа по поправкам к пределам, вызванным аномальным вкладами фоновых процессов завершается.
- Работа по постановке пределов на нейтральные тройные вершины с использованием данных второго сеанса работы эксперимента ATLAS начата. Оценка чувствительности позволяет заключить, что в рамках этой работы могут быть поставлены наилучшие пределы на некоторые коэффициенты.

BACK-UP

Определения всех операторов размерности 8

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

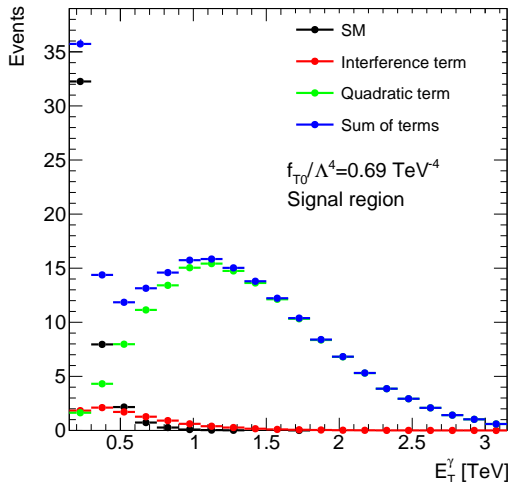
Влияние операторов размерности 8 на четверные вершины

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

Метод декомпозиции

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

Для моделирования отдельных слагаемых используется MadGraph5.



Используемые статистический метод и тестовая статистика

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

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

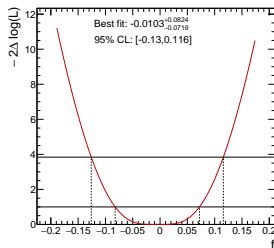
Метод CL_{s+b} : доверительный интервал — регион в пространстве параметров интереса μ , в котором

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

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 $t_\mu = 3.84$.

Погрешности не были симметризованы для большей точности, использовалась линейная интерполяция.

Для постановки пределов используется программа EFTfun.
Параметр интереса: f_{T0}/Λ^4 .
Регион: $E_T^\gamma > 900$ ГэВ.



CL_{s+b} и CL_s

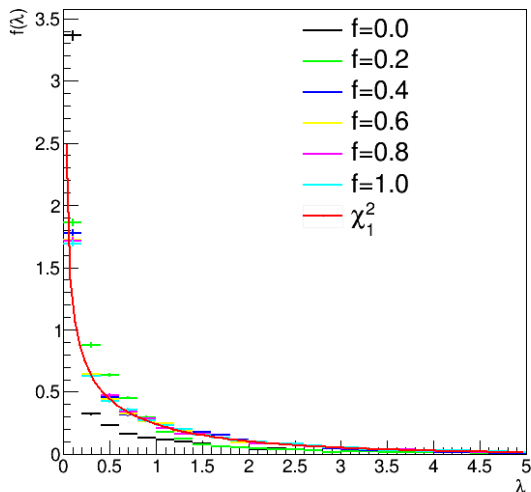
$$CL_{s+b}: p_{\mu}^{s+b} = \int_{t_{\mu}^{\text{obs}}}^{\infty} f(t_{\mu}|\mu) dt_{\mu} > \alpha = 0.05$$

$$CL_s: p_{\mu}^s = \frac{p_{\mu}^{s+b}}{p_{\mu}^b} > \alpha = 0.05$$

$$p_{\mu}^b = \int_{t_{\mu}^{\text{obs}}}^{\infty} f(t_{\mu}|0) dt_{\mu}$$

Применимость асимптотического распределения

λ distribution



Линейная интерполяция погрешностей

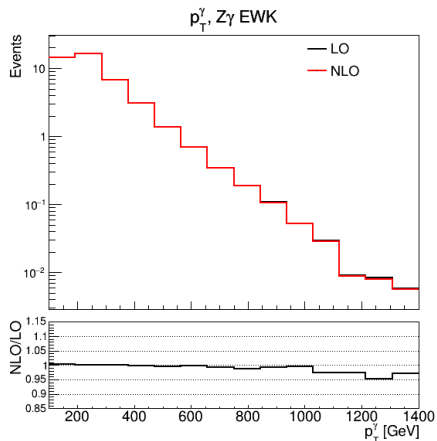
$\theta \sim N(0, 1)$ — параметр, σ^\pm — вариации.

N_0 — ожидаемое из МК количество событий.

Количество событий, поправленное на погрешность:

$$N = N_0 \cdot \begin{cases} (1 - \sigma_- \theta) & , \theta < 0, \\ (1 + \sigma_+ \theta) & , \theta > 0. \end{cases}$$

NLO поправка



$f_{T0}, p_T^\gamma > 1000$ GeV

$E_{\text{clip}}, \text{TeV}$	LO	NLO
∞	[-0.126; 0.118]	[-0.126; 0.118]
5	[-0.136; 0.127]	[-0.136; 0.127]
4	[-0.159; 0.147]	[-0.159; 0.147]
3	[-0.242; 0.222]	[-0.243; 0.222]
2	[-0.905; 0.848]	[-0.908; 0.852]

Оптимизация f_{T0} [1]

$E_{\text{clip}}, \text{TeV}$	∞	5	4	3	2
$p_T > 150 \text{ GeV}$	[-0.71; 0.66]	[-0.75; 0.7]	[-0.83; 0.77]	[-1.08; 0.99]	[-1.9; 1.7]
$p_T > 300 \text{ GeV}$	[-0.39; 0.35]	[-0.41; 0.37]	[-0.46; 0.41]	[-0.6; 0.52]	[-1.1; 0.91]
$p_T > 400 \text{ GeV}$	[-0.27; 0.25]	[-0.29; 0.26]	[-0.33; 0.29]	[-0.43; 0.37]	[-0.81; 0.66]
$p_T > 500 \text{ GeV}$	[-0.22; 0.19]	[-0.23; 0.2]	[-0.26; 0.22]	[-0.34; 0.29]	[-0.67; 0.54]
$p_T > 600 \text{ GeV}$	[-0.18; 0.16]	[-0.19; 0.17]	[-0.21; 0.19]	[-0.29; 0.25]	[-0.6; 0.49]
$p_T > 700 \text{ GeV}$	[-0.15; 0.14]	[-0.16; 0.15]	[-0.19; 0.16]	[-0.25; 0.22]	[-0.58; 0.49]
$p_T > 800 \text{ GeV}$	[-0.14; 0.12]	[-0.15; 0.13]	[-0.17; 0.15]	[-0.24; 0.21]	[-0.6; 0.53]
$p_T > 900 \text{ GeV}$	[-0.13; 0.12]	[-0.13; 0.12]	[-0.16; 0.14]	[-0.23; 0.2]	[-0.69; 0.62]
$p_T > 1000 \text{ GeV}$	[-0.12; 0.11]	[-0.13; 0.12]	[-0.15; 0.14]	[-0.24; 0.22]	[-0.88; 0.82]
$p_T > 1100 \text{ GeV}$	[-0.12; 0.11]	[-0.13; 0.12]	[-0.16; 0.15]	[-0.25; 0.24]	[-1.2; 1.1]
$p_T > 1200 \text{ GeV}$	[-0.12; 0.11]	[-0.13; 0.12]	[-0.16; 0.15]	[-0.28; 0.27]	
$p_T > 1300 \text{ GeV}$	[-0.13; 0.12]	[-0.14; 0.14]	[-0.18; 0.17]	[-0.35; 0.34]	
Bound	[-0; 0]	[-0.012; 0.012]	[-0.029; 0.029]	[-0.093; 0.093]	[-0.47; 0.47]

Оптимизация f_{T0} [2]

$E_{\text{clip}}, \text{TeV}$	1.8	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3	1
$p_T > 150 \text{ GeV}$	[-2.3; 2]	[-2.6; 2.2]	[-2.9; 2.5]	[-3.3; 2.8]	[-3.8; 3.2]	[-4.4; 3.7]	[-7.8; 6.4]
$p_T > 300 \text{ GeV}$	[-1.3; 1.1]	[-1.5; 1.2]	[-1.7; 1.4]	[-1.9; 1.5]	[-2.3; 1.8]	[-2.7; 2.1]	[-5.2; 4.1]
$p_T > 400 \text{ GeV}$	[-0.99; 0.79]	[-1.12; 0.89]	[-1.3; 1]	[-1.5; 1.2]	[-1.8; 1.4]	[-2.1; 1.7]	[-4.6; 3.7]
$p_T > 500 \text{ GeV}$	[-0.83; 0.67]	[-0.95; 0.77]	[-1.11; 0.89]	[-1.3; 1.1]	[-1.6; 1.3]	[-2; 1.6]	[-4.8; 4.1]
$p_T > 600 \text{ GeV}$	[-0.76; 0.63]	[-0.89; 0.74]	[-1.06; 0.88]	[-1.3; 1.1]	[-1.6; 1.4]	[-2.1; 1.8]	[-5.4; 5]
$p_T > 700 \text{ GeV}$	[-0.77; 0.66]	[-0.93; 0.8]	[-1.14; 0.99]	[-1.5; 1.3]	[-1.9; 1.7]	[-2.5; 2.2]	[-5.9; 5.6]
$p_T > 800 \text{ GeV}$	[-0.86; 0.76]	[-1.06; 0.95]	[-1.3; 1.2]	[-1.7; 1.6]	[-2.2; 2]	[-2.9; 2.7]	[-6.5; 6.3]
$p_T > 900 \text{ GeV}$	[-1.01; 0.93]	[-1.3; 1.2]	[-1.6; 1.5]	[-2; 1.9]	[-2.6; 2.5]	[-3.5; 3.4]	[-8.3; 8.2]
$p_T > 1000 \text{ GeV}$	[-1.3; 1.2]	[-1.6; 1.5]	[-2.1; 2]	[-2.6; 2.5]	[-3.5; 3.4]	[-4.7; 4.6]	[-15; 15]
$p_T > 1100 \text{ GeV}$							
$p_T > 1200 \text{ GeV}$							
$p_T > 1300 \text{ GeV}$							
Bound	[-0.72; 0.72]	[-0.9; 0.9]	[-1.2; 1.2]	[-1.5; 1.5]	[-2; 2]	[-2.6; 2.6]	[-7.5; 7.5]

Оптимизация f_{T5} [1]

$E_{\text{clip}}, \text{TeV}$	∞	5	4	3	2.9	2.8
$p_T > 150 \text{ GeV}$	[-0.69; 0.74]	[-0.73; 0.78]	[-0.8; 0.87]	[-1; 1.1]	[-1.1; 1.2]	[-1.1; 1.2]
$p_T > 300 \text{ GeV}$	[-0.37; 0.41]	[-0.39; 0.43]	[-0.43; 0.48]	[-0.54; 0.62]	[-0.56; 0.65]	[-0.58; 0.68]
$p_T > 400 \text{ GeV}$	[-0.26; 0.29]	[-0.27; 0.3]	[-0.3; 0.34]	[-0.38; 0.45]	[-0.39; 0.47]	[-0.41; 0.49]
$p_T > 500 \text{ GeV}$	[-0.2; 0.23]	[-0.21; 0.24]	[-0.23; 0.27]	[-0.3; 0.36]	[-0.31; 0.37]	[-0.33; 0.39]
$p_T > 600 \text{ GeV}$	[-0.17; 0.19]	[-0.17; 0.2]	[-0.2; 0.22]	[-0.26; 0.3]	[-0.27; 0.32]	[-0.28; 0.33]
$p_T > 700 \text{ GeV}$	[-0.14; 0.16]	[-0.15; 0.17]	[-0.17; 0.19]	[-0.23; 0.27]	[-0.24; 0.28]	[-0.25; 0.3]
$p_T > 800 \text{ GeV}$	[-0.13; 0.14]	[-0.14; 0.15]	[-0.16; 0.18]	[-0.22; 0.25]	[-0.23; 0.26]	[-0.24; 0.28]
$p_T > 900 \text{ GeV}$	[-0.12; 0.13]	[-0.13; 0.14]	[-0.15; 0.16]	[-0.21; 0.24]	[-0.23; 0.25]	[-0.24; 0.27]
$p_T > 1000 \text{ GeV}$	[-0.12; 0.13]	[-0.13; 0.14]	[-0.15; 0.16]	[-0.23; 0.25]	[-0.24; 0.27]	[-0.26; 0.29]
$p_T > 1100 \text{ GeV}$	[-0.12; 0.13]	[-0.13; 0.14]	[-0.15; 0.16]	[-0.25; 0.27]	[-0.27; 0.29]	[-0.3; 0.32]
$p_T > 1200 \text{ GeV}$	[-0.12; 0.12]	[-0.13; 0.14]	[-0.16; 0.17]	[-0.28; 0.29]		
$p_T > 1300 \text{ GeV}$	[-0.13; 0.13]	[-0.14; 0.15]	[-0.18; 0.18]	[-0.35; 0.37]		
Bound	[-0; 0]	[-0.023; 0.023]	[-0.057; 0.057]	[-0.18; 0.18]	[-0.21; 0.21]	[-0.24; 0.24]

Оптимизация f_{T5} [2]

$E_{\text{clip}}, \text{TeV}$	2.7	2.6	2.5	2.4	2.3	2.2	2.1
$p_T > 150 \text{ GeV}$	[-1.1; 1.3]	[-1.2; 1.3]	[-1.3; 1.4]	[-1.3; 1.5]	[-1.4; 1.6]	[-1.5; 1.7]	[-1.6; 1.8]
$p_T > 300 \text{ GeV}$	[-0.61; 0.71]	[-0.64; 0.75]	[-0.67; 0.79]	[-0.71; 0.84]	[-0.75; 0.89]	[-0.8; 0.96]	[-0.86; 1.03]
$p_T > 400 \text{ GeV}$	[-0.43; 0.51]	[-0.45; 0.54]	[-0.47; 0.57]	[-0.5; 0.61]	[-0.53; 0.65]	[-0.57; 0.7]	[-0.61; 0.76]
$p_T > 500 \text{ GeV}$	[-0.34; 0.41]	[-0.36; 0.44]	[-0.38; 0.46]	[-0.41; 0.49]	[-0.43; 0.53]	[-0.47; 0.57]	[-0.51; 0.63]
$p_T > 600 \text{ GeV}$	[-0.29; 0.35]	[-0.31; 0.37]	[-0.33; 0.4]	[-0.35; 0.43]	[-0.38; 0.46]	[-0.41; 0.5]	[-0.45; 0.55]
$p_T > 700 \text{ GeV}$	[-0.27; 0.31]	[-0.28; 0.34]	[-0.3; 0.36]	[-0.33; 0.39]	[-0.36; 0.43]	[-0.39; 0.47]	[-0.44; 0.52]
$p_T > 800 \text{ GeV}$	[-0.26; 0.3]	[-0.28; 0.32]	[-0.3; 0.34]	[-0.33; 0.38]	[-0.36; 0.42]	[-0.4; 0.47]	[-0.46; 0.53]
$p_T > 900 \text{ GeV}$	[-0.26; 0.29]	[-0.28; 0.32]	[-0.31; 0.35]	[-0.35; 0.39]	[-0.39; 0.44]	[-0.45; 0.5]	[-0.52; 0.58]
$p_T > 1000 \text{ GeV}$	[-0.29; 0.31]	[-0.32; 0.35]	[-0.35; 0.39]	[-0.4; 0.44]	[-0.47; 0.51]	[-0.55; 0.6]	[-0.65; 0.71]
$p_T > 1100 \text{ GeV}$	[-0.33; 0.36]	[-0.37; 0.4]	[-0.43; 0.46]	[-0.5; 0.54]	[-0.6; 0.63]	[-0.72; 0.76]	[-0.85; 0.9]
$p_T > 1200 \text{ GeV}$							
$p_T > 1300 \text{ GeV}$							
Bound	[-0.27; 0.27]	[-0.32; 0.32]	[-0.37; 0.37]	[-0.44; 0.44]	[-0.52; 0.52]	[-0.62; 0.62]	[-0.75; 0.75]

Оптимизация f_{T5} [3]

$E_{\text{clip}}, \text{TeV}$	2	1.8	1.6	1.4	1.2	1
$p_T > 150 \text{ GeV}$	[-1.7; 2]	[-2; 2.4]	[-2.5; 2.9]	[-3.2; 3.8]	[-4.3; 5.1]	[-6.4; 7.3]
$p_T > 300 \text{ GeV}$	[-0.92; 1.12]	[-1.1; 1.4]	[-1.4; 1.7]	[-1.8; 2.2]	[-2.5; 3.1]	[-4; 5]
$p_T > 400 \text{ GeV}$	[-0.67; 0.83]	[-0.81; 1.02]	[-1; 1.3]	[-1.4; 1.8]	[-2; 2.6]	[-3.6; 4.4]
$p_T > 500 \text{ GeV}$	[-0.55; 0.69]	[-0.69; 0.86]	[-0.9; 1.13]	[-1.3; 1.6]	[-2; 2.4]	[-4; 4.5]
$p_T > 600 \text{ GeV}$	[-0.5; 0.61]	[-0.64; 0.79]	[-0.89; 1.08]	[-1.4; 1.6]	[-2.3; 2.6]	[-4.6; 4.9]
$p_T > 700 \text{ GeV}$	[-0.5; 0.59]	[-0.67; 0.79]	[-0.99; 1.15]	[-1.6; 1.8]	[-2.7; 2.9]	[-5.3; 5.5]
$p_T > 800 \text{ GeV}$	[-0.53; 0.61]	[-0.77; 0.87]	[-1.2; 1.3]	[-2; 2.1]	[-3.2; 3.3]	[-6.2; 6.4]
$p_T > 900 \text{ GeV}$	[-0.63; 0.7]	[-0.95; 1.04]	[-1.5; 1.6]	[-2.3; 2.4]	[-3.6; 3.7]	[-6.7; 6.8]
$p_T > 1000 \text{ GeV}$	[-0.81; 0.87]	[-1.2; 1.3]	[-1.9; 2]	[-2.9; 2.9]	[-4.4; 4.4]	[-8.4; 8.4]
$p_T > 1100 \text{ GeV}$	[-1; 1.1]					
$p_T > 1200 \text{ GeV}$						
$p_T > 1300 \text{ GeV}$						
Bound	[-0.91; 0.91]	[-1.4; 1.4]	[-2.2; 2.2]	[-3.8; 3.8]	[-7; 7]	[-15; 15]

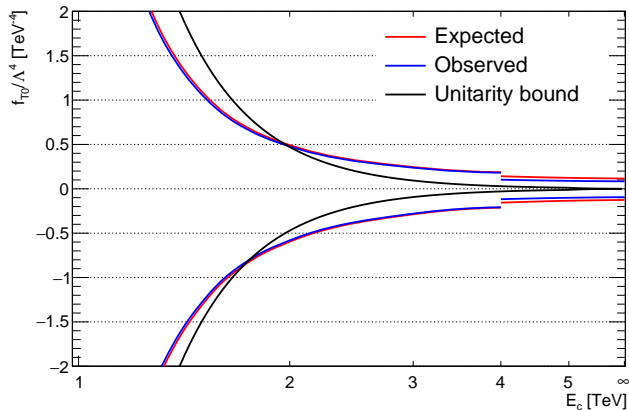
Оптимизация f_{M0} [1]

$E_{\text{clip}}, \text{TeV}$	∞	5	4	3	2
$p_T > 150 \text{ GeV}$	[-28; 29]	[-29; 29]	[-30; 30]	[-34; 35]	[-48; 49]
$p_T > 300 \text{ GeV}$	[-15; 16]	[-16; 16]	[-16; 17]	[-19; 19]	[-27; 28]
$p_T > 400 \text{ GeV}$	[-11; 11]	[-11; 11]	[-12; 12]	[-14; 14]	[-20; 21]
$p_T > 500 \text{ GeV}$	[-9; 9]	[-9.1; 9.2]	[-9.6; 9.7]	[-11; 11]	[-17; 18]
$p_T > 600 \text{ GeV}$	[-7.7; 7.7]	[-7.8; 7.9]	[-8.3; 8.3]	[-9.8; 9.9]	[-16; 16]
$p_T > 700 \text{ GeV}$	[-6.9; 6.9]	[-7; 7.1]	[-7.5; 7.5]	[-9.1; 9.1]	[-17; 17]
$p_T > 800 \text{ GeV}$	[-6.5; 6.5]	[-6.6; 6.6]	[-7.1; 7.1]	[-8.9; 8.9]	[-18; 19]
$p_T > 900 \text{ GeV}$	[-6.2; 6.2]	[-6.4; 6.4]	[-7; 7]	[-9.1; 9.1]	[-23; 23]
$p_T > 1000 \text{ GeV}$	[-6.4; 6.4]	[-6.6; 6.6]	[-7.3; 7.2]	[-10; 10]	[-31; 31]
$p_T > 1100 \text{ GeV}$	[-6.6; 6.6]	[-6.9; 6.9]	[-7.7; 7.7]	[-11; 11]	[-38; 38]
$p_T > 1200 \text{ GeV}$	[-6.8; 6.8]	[-7.2; 7.2]	[-8.2; 8.2]	[-13; 13]	
$p_T > 1300 \text{ GeV}$	[-7.7; 7.7]	[-8.2; 8.2]	[-9.6; 9.6]	[-18; 18]	
Bound	[-0; 0]	[-0.066; 0.066]	[-0.16; 0.16]	[-0.51; 0.51]	[-2.6; 2.6]

Оптимизация f_{M0} [2]

E_{clip} , TeV	1.5	1	0.9	0.8	0.7	0.6
$p_T > 150$ GeV	[-67; 70]	[-130; 130]	[-150; 160]	[-180; 190]	[-230; 240]	[-310; 320]
$p_T > 300$ GeV	[-39; 41]	[-81; 83]	[-100; 103]	[-130; 130]	[-170; 170]	[-240; 240]
$p_T > 400$ GeV	[-31; 31]	[-71; 72]	[-90; 90]	[-120; 120]	[-150; 150]	[-200; 200]
$p_T > 500$ GeV	[-28; 29]	[-72; 72]	[-90; 89]	[-110; 110]	[-150; 150]	[-200; 200]
$p_T > 600$ GeV	[-29; 30]	[-78; 77]	[-93; 93]	[-120; 120]	[-150; 150]	[-210; 210]
$p_T > 700$ GeV	[-34; 34]	[-84; 83]	[-100; 100]	[-130; 130]	[-180; 180]	[-260; 260]
$p_T > 800$ GeV	[-41; 41]	[-92; 92]	[-110; 110]	[-140; 140]	[-180; 180]	[-260; 260]
$p_T > 900$ GeV	[-47; 47]	[-100; 100]	[-140; 140]	[-170; 170]	[-250; 250]	[-400; 400]
$p_T > 1000$ GeV	[-57; 57]	[-140; 140]				
$p_T > 1100$ GeV						
$p_T > 1200$ GeV						
$p_T > 1300$ GeV						
Bound	[-8.1; 8.1]	[-41; 41]	[-63; 63]	[-100; 100]	[-170; 170]	[-320; 320]

Результаты: f_{T0}



Non-unitarized limits.

Expected: $[-0.13; 0.12] \text{ TeV}^{-4}$.

Observed: $[-0.094; 0.084] \text{ TeV}^{-4}$.

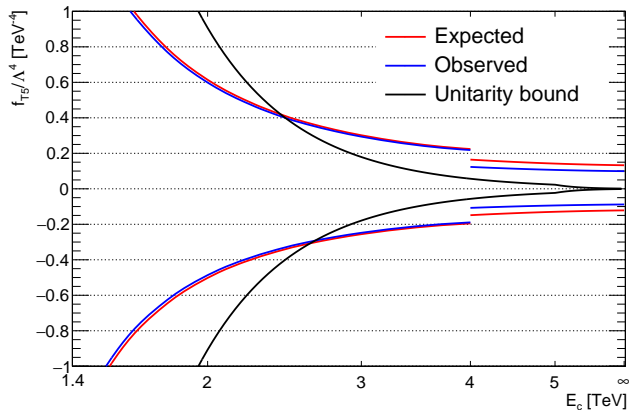
Unitarized limits.

$E_{\text{clip}} = 1.7 \text{ TeV}$.

Expected: $[-0.89; 0.74] \text{ TeV}^{-4}$.

Observed: $[-0.87; 0.71] \text{ TeV}^{-4}$.

Результаты: f_{T5}



Non-unitarized limits.

Expected: $[-0.12; 0.13] \text{ TeV}^{-4}$.

Observed: $[-0.088; 0.099] \text{ TeV}^{-4}$.

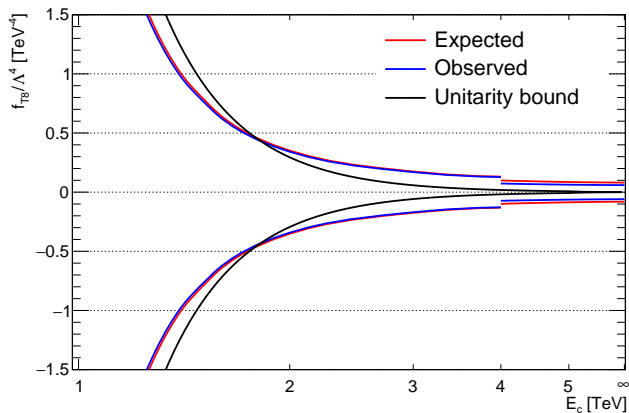
Unitarized limits.

$E_{\text{clip}} = 2.4 \text{ TeV}$.

Expected: $[-0.35; 0.43] \text{ TeV}^{-4}$.

Observed: $[-0.34; 0.42] \text{ TeV}^{-4}$.

Результаты: f_{T8}



Non-unitarized limits.

Expected: $[-0.080; 0.081]$ TeV⁻⁴.

Observed: $[-0.059; 0.059]$ TeV⁻⁴.

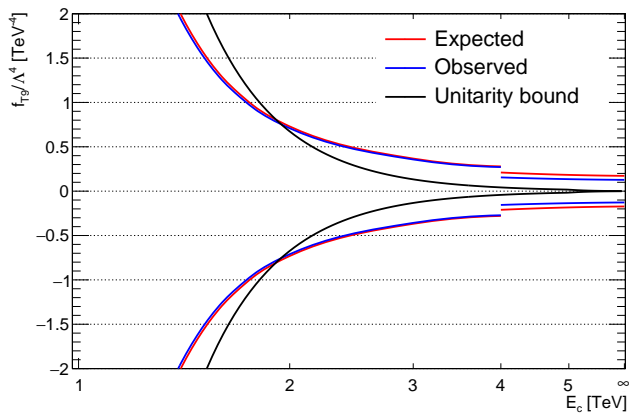
Unitarized limits.

$E_{\text{clip}} = 1.7$ TeV.

Expected: $[-0.53; 0.53]$ TeV⁻⁴.

Observed: $[-0.52; 0.52]$ TeV⁻⁴.

Результаты: f_{T9}



Non-unitarized limits.

Expected: $[-0.17; 0.17] \text{ TeV}^{-4}$.

Observed: $[-0.13; 0.13] \text{ TeV}^{-4}$.

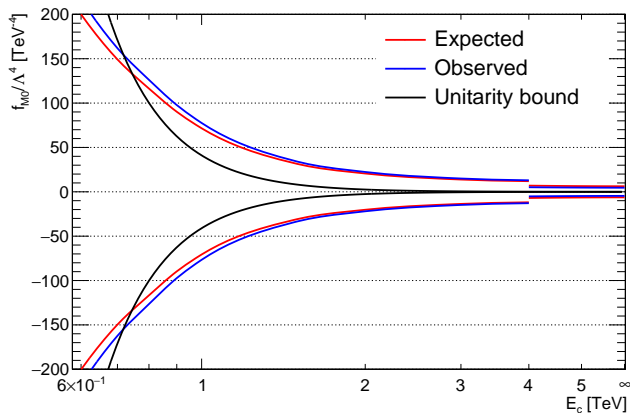
Unitarized limits.

$E_{\text{clip}} = 1.9 \text{ TeV}$.

Expected: $[-0.82; 0.82] \text{ TeV}^{-4}$.

Observed: $[-0.79; 0.79] \text{ TeV}^{-4}$.

Результаты: f_{M0}



Non-unitarized limits.

Expected: $[-6.2; 6.2] \text{ TeV}^{-4}$.

Observed: $[-4.6; 4.6] \text{ TeV}^{-4}$.

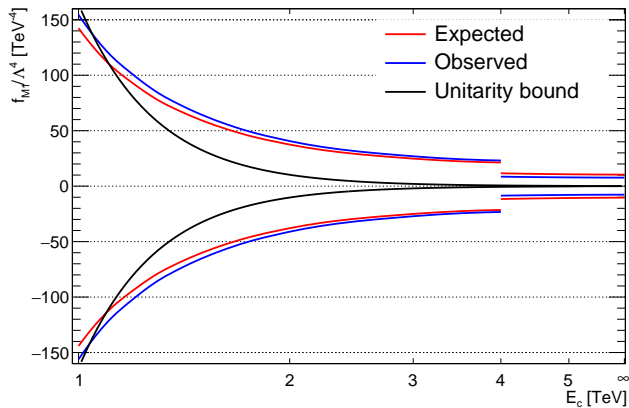
Unitarized limits.

$E_{\text{clip}} = 0.7 \text{ TeV}$.

Expected: $[-150; 150] \text{ TeV}^{-4}$.

Observed: $[-160; 160] \text{ TeV}^{-4}$.

Результаты: f_{M1}



Non-unitarized limits.

Expected: $[-10; 10] \text{ TeV}^{-4}$.

Observed: $[-7.7; 7.7] \text{ TeV}^{-4}$.

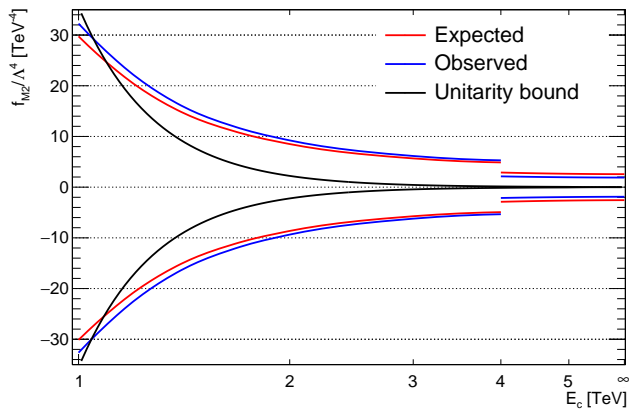
Unitarized limits.

$E_{\text{clip}} = 1 \text{ TeV}$.

Expected: $[-140; 140] \text{ TeV}^{-4}$.

Observed: $[-160; 150] \text{ TeV}^{-4}$.

Результаты: f_{M2}



Non-unitarized limits.

Expected: $[-2.6; 2.6] \text{ TeV}^{-4}$.

Observed: $[-1.9; 1.9] \text{ TeV}^{-4}$.

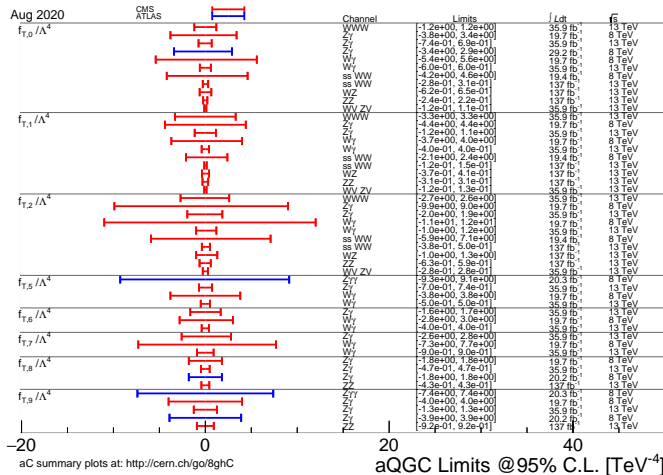
Unitarized limits.

$E_{\text{clip}} = 1 \text{ TeV}$.

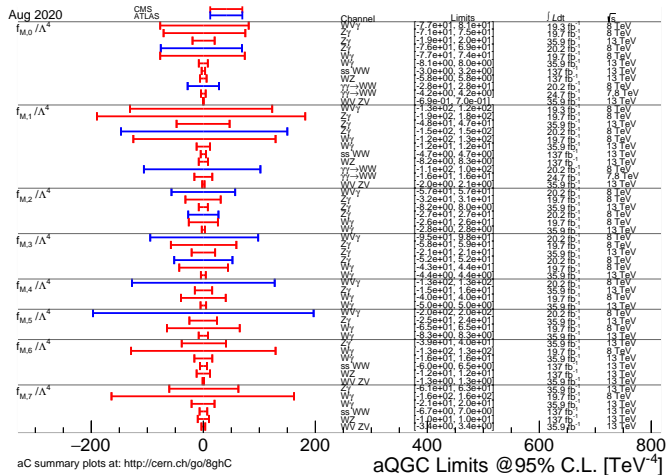
Expected: $[-30; 30] \text{ TeV}^{-4}$.

Observed: $[-33; 32] \text{ TeV}^{-4}$.

Имеющиеся наблюдаемые пределы, T-семейство



Имеющиеся наблюдаемые пределы, M-семейство



Теоретический линейный предел: определение

С квадратичным слагаемым (обычный случай):

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{\text{SM}} + f\mathcal{O} \rightarrow \mathcal{A} = \mathcal{A}_{\text{SM}} + f\mathcal{A}_{\text{BSM}} \rightarrow |\mathcal{A}|^2 = |\mathcal{A}_{\text{SM}}|^2 + f2\text{Re}(\mathcal{A}_{\text{SM}}^\dagger \mathcal{A}_{\text{BSM}}) + f^2|\mathcal{A}_{\text{BSM}}|^2$$

Без квадратичного слагаемого (линейный случай):

$$|\mathcal{A}|^2 = |\mathcal{A}_{\text{SM}}|^2 + f2\text{Re}(\mathcal{A}_{\text{SM}}^\dagger \mathcal{A}_{\text{BSM}}) \geq 0, \quad \mathcal{A}_{\text{SM}} = \mathcal{A}_{\text{EWK}} + \mathcal{A}_{\text{QCD}}$$

$$\rightarrow N_{Z\gamma} = N_{\text{SM}} + fN_{\text{int}} \geq 0$$

Это условие приводит к теоретическому ограничению на f :

$$N_{\text{int}} > 0 \rightarrow f_{\text{min}} = -\frac{N_{\text{SM}}}{N_{\text{int}}}, \quad N_{\text{int}} < 0 \rightarrow f_{\text{max}} = -\frac{N_{\text{SM}}}{N_{\text{int}}}$$

Теоретический линейный предел: результаты

Coef.	f_{T0}	f_{T5}	f_{T8}	f_{T9}	f_{M0}	f_{M1}	f_{M2}
$p_T^{\gamma} > 150$ GeV	-12.6, 0.8%	12.6, 0.8%	-1430, 5.5%	-1940, 4.6%	2130, 2.7%	-6950, 3.1%	-1060, 2.4%
$p_T^{\gamma} > 300$ GeV	-3.92, 1.3%	3.91, 1.3%	-446, 5.8%	-585, 4.8%	1080, 4.4%	-3400, 4.9%	-526, 3.9%
$p_T^{\gamma} > 400$ GeV	-2.11, 1.8%	2.11, 1.8%	-235, 6.3%	-311, 5.3%	878, 6.8%	-2830, 7.7%	-431, 6%
$p_T^{\gamma} > 500$ GeV	-1.23, 2.7%	1.22, 2.7%	-132, 6.9%	-179, 6%	752, 10.5%	-2510, 12.3%	-386, 9.7%
$p_T^{\gamma} > 600$ GeV	-0.773, 3.6%	0.765, 3.6%	-85.1, 8%	-118, 7.2%	651, 15.2%	-2820, 23.1%	-324, 13.5%
$p_T^{\gamma} > 700$ GeV	-0.51, 5%	0.505, 5%	-54.8, 9.4%	-75.7, 8.5%	684, 25.9%	-2110, 28.2%	-353, 23.8%
$p_T^{\gamma} > 800$ GeV	-0.355, 7.1%	0.353, 7%	-34.5, 10.7%	-53, 10.6%	993, 57.3%	-3070, 62.9%	-385, 39.1%
$p_T^{\gamma} > 900$ GeV	-0.247, 9.4%	0.248, 9.4%	-22.6, 12.9%	-35.9, 12.9%	-4460, 395.9%	-5630, 184.4%	-296, 47.7%
$p_T^{\gamma} > 1000$ GeV	-0.2, 11.9%	0.199, 11.9%	-17.6, 15.4%	-28, 15.5%	-904, 108.9%	2230, 100%	-341, 73.3%
$p_T^{\gamma} > 1100$ GeV	-0.159, 16.5%	0.156, 16.5%	-12.9, 19.7%	-20.6, 19.7%			
$p_T^{\gamma} > 1200$ GeV	-0.113, 24.8%	0.113, 24.8%	-9.25, 27.7%	-14.3, 27.6%			

Разрешим статистической ошибке теоретического предела быть не более 20% (это гарантирует, что флуктуация в 5σ не изменит знак предела).

Таким образом, дальнейшая оптимизация должна производиться с ограничением на p_T^{γ} не более жестким, чем 1100 ГэВ для Т-семейства и 500 ГэВ для М-семейства.

Линейные пределы: оптимизация

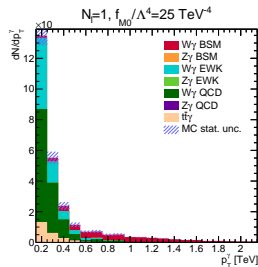
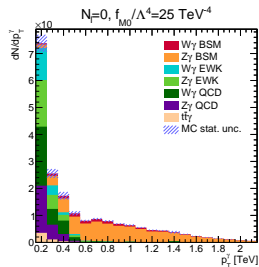
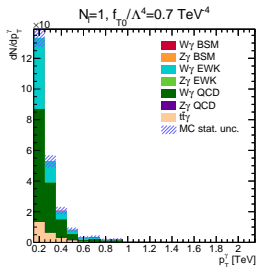
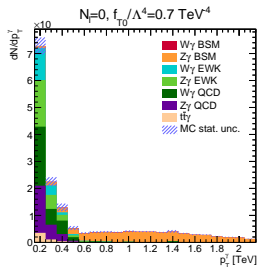
Coef.	f_{T0}	f_{T5}	f_{T8}	f_{T9}	f_{M0}	f_{M1}	f_{M2}
$p_T^\gamma > 150$ GeV	[-10.2; 8.5]	[-8.5; 10.2]	[-1170; 970]	[-1600; 1300]	[-1400; 1700]	[-5600; 4700]	[-860; 710]
$p_T^\gamma > 300$ GeV	[-3.7; 3.3]	[-3.3; 3.7]	[-420; 380]	[-550; 500]	[-910; 1010]	[-3200; 2900]	[-490; 450]
$p_T^\gamma > 400$ GeV	[-2.0; 2.1]	[-2.1; 2.0]	[-230; 230]	[-300; 310]	[-870; 850]	[-2800; 2800]	[-420; 430]
$p_T^\gamma > 500$ GeV	[-1.2; 1.7]	[-1.6; 1.2]	[-130; 180]	[-180; 240]	[-1030; 750]	[-2500; 3500]	[-390; 530]
$p_T^\gamma > 600$ GeV	[-0.77; 1.46]	[-1.44; 0.77]	[-85; 162]	[-120; 220]			
$p_T^\gamma > 700$ GeV	[-0.51; 1.40]	[-1.38; 0.51]	[-55; 151]	[-76; 209]			
$p_T^\gamma > 800$ GeV	[-0.36; 1.38]	[-1.37; 0.35]	[-35; 136]	[-53; 208]			
$p_T^\gamma > 900$ GeV	[-0.25; 1.47]	[-1.48; 0.25]	[-23; 136]	[-36; 217]			
$p_T^\gamma > 1000$ GeV	[-0.20; 1.74]	[-1.74; 0.20]	[-18; 155]	[-28; 247]			
$p_T^\gamma > 1100$ GeV	[-0.16; 2.10]	[-2.05; 0.16]	[-13; 172]	[-21; 274]			

Результат оптимизации (выбор региона): $p_T^\gamma > 800$ ГэВ для Т-семейства и $p_T^\gamma > 400$ ГэВ для М-семейства.

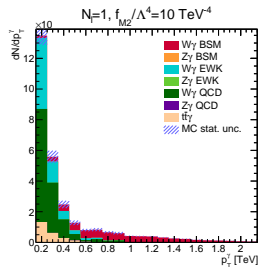
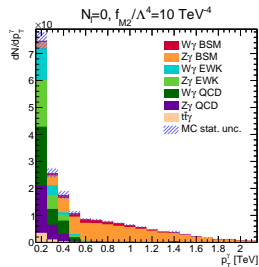
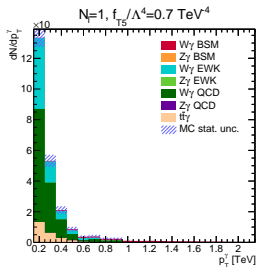
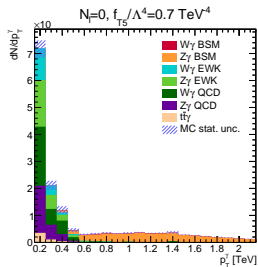
Линейные пределы: результаты

Coef.	Expected limits, TeV^{-4}	Observed limits, TeV^{-4}
f_{T0}	[-0.36; 1.38]	[-0.36; 0.88]
f_{T5}	[-1.37; 0.35]	[-0.87; 0.35]
f_{T8}	[-35; 136]	[-35; 86]
f_{T9}	[-53; 208]	[-53; 132]
f_{M0}	[-870; 850]	[-1110; 670]
f_{M1}	[-2800; 2800]	[-2200; 3600]
f_{M2}	[-420; 430]	[-330; 540]

Учет аномальных вкладов в фонах: модель [1]



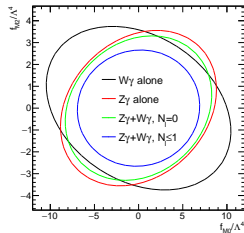
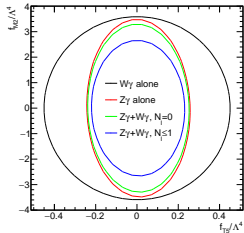
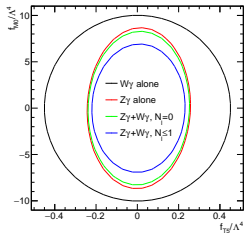
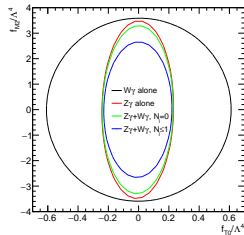
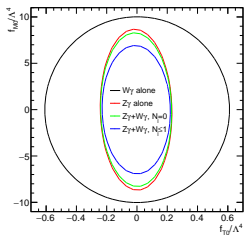
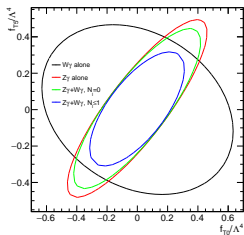
Учет аномальных вкладов в фонах: модель [1]



Учет аномальных вкладов в фонах: результаты [1]

Coef.	$Z\gamma$ alone	$W\gamma$ alone	$Z\gamma + W\gamma, N_l = 0$	Improv., $N_l = 0$	$Z\gamma + W\gamma, N_l \leq 1$	Improv., $N_l \leq 1$
f_{T0}	[-0.204; 0.192]	[-0.486; 0.489]	[-0.202; 0.190]	1%	[-0.193; 0.183]	5%
f_{T5}	[-0.202; 0.216]	[-0.360; 0.361]	[-0.198; 0.212]	2%	[-0.183; 0.194]	10%
f_{M0}	[-7.24; 7.21]	[-8.01; 8.01]	[-6.92; 6.90]	4%	[-5.79; 5.77]	20%
f_{M2}	[-2.90; 2.90]	[-2.87; 2.87]	[-2.74; 2.75]	5%	[-2.22; 2.22]	23%

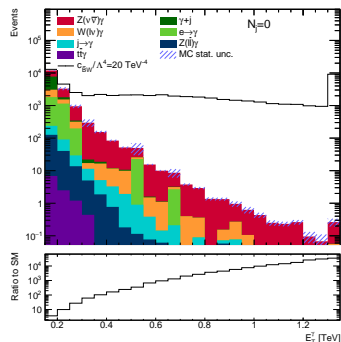
Учет аномальных вкладов в фонах: результаты [2]



Исследование влияния количества струй и поиск чувствительных переменных

Самая чувствительная переменная — E_T^γ (независимо от количества струй).

Число струй	Пределы
0	[-0.29; 0.28]
1	[-0.36; 0.36]
≥ 2	[-0.57; 0.57]
0,1	[-0.25; 0.24]
Любое	[-0.24; 0.23]



Обнаружены следующие переменные, позволяющие уточнить пределы с 1 или двумя и более струями от 2% до 12%: p_T -balance($Z\gamma$), $|\Delta\varphi(\gamma, E_T^{\text{miss}})|$, E_T^{miss} , p_T -balance($Z\gamma jj$).