

Поиск аномальных вершин на основе процесса электрослабого рождения  $Z$ -бозона с фотоном в данных  $pp$ -столкновений с энергией 13 ТэВ в эксперименте ATLAS

Артур Семушин

НИЯУ МИФИ

26.01.2022

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

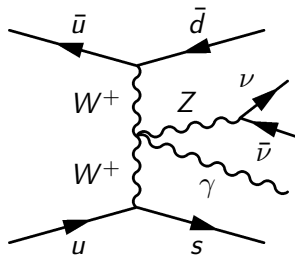
# Рассматриваемый процесс

Электрослабое рождение  $Z$ -бозона с фотоном.

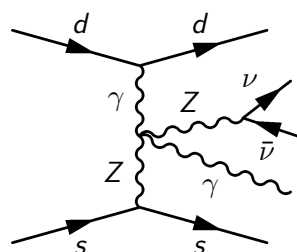
Сигнатура:  $\gamma$ , 2 струи (или более), недостающий поперечный импульс ( $E_T^{\text{miss}}$ ).

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

Диаграммы, включающие рассеяние векторных бозонов (четверные вершины):



Вершина  $WWZ\gamma$  —  
предсказывается СМ.



Вершина  $ZZ\gamma\gamma$  — не  
предсказывается СМ.

# Эффективная теория поля

Параметризация лагранжиана операторами высших размерностей:

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{\text{SM}} + \sum_i \sum_n \frac{F_{i,n}}{\Lambda^n} \mathcal{O}_i^{n+4} = \mathcal{L}_{\text{SM}} + \sum_i \sum_n f_{i,n} \mathcal{O}_i^{n+4} \quad (1)$$

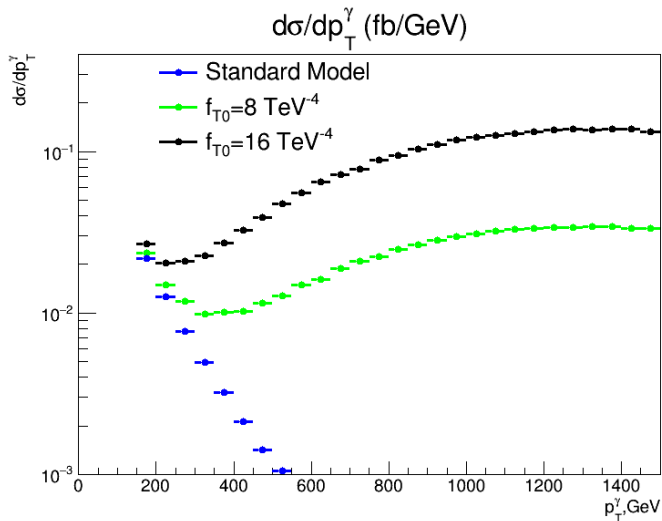
$f$  — размерная, но наблюдаемая константа связи.

Наиболее удобно изучать aQGC с помощью операторов размерности 8.

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

Задача — получение пределов на  $f$ .

# Рост сечения с энергией, выбор переменной $p_T^\gamma$



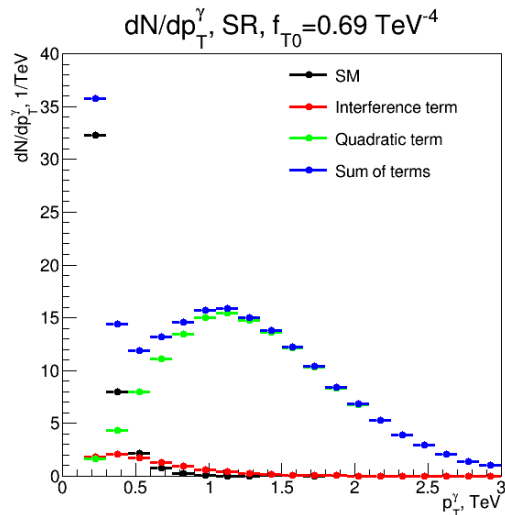
VBFNLO

$$p_T^\gamma > 150 \text{ ГэВ}$$
$$E_T^{\text{miss}} > 120 \text{ ГэВ.}$$

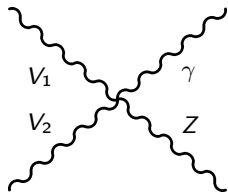
# Перевзвешивание распределений

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

Для моделирования отдельных слагаемых используется MadGraph5.



# Восстановление унитарности с помощью клиппинга



Рассеяние векторных бозонов (VBS)  $\rightarrow \hat{s}$ .  
Унитарность  $S$ -матрицы:  $SS^+ = 1$ .  
Унитарность нарушается при использовании EFT  $\rightarrow$  неограниченный рост сечения VBS с ростом  $\hat{s}$ .

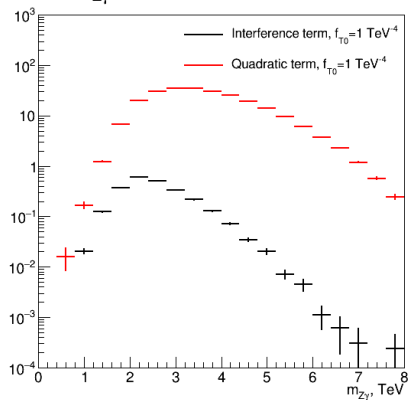
Клиппинг — выключение вклада новой физики при

$$\sqrt{\hat{s}} > E_{\text{clip}}.$$

$$\sqrt{\hat{s}} = m_{Z\gamma}.$$

$E_{\text{clip}}$  — свободный теоретический параметр.

$m_{Z\gamma}$  distribution, aQGC region



# 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  $\mu$ , в котором

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

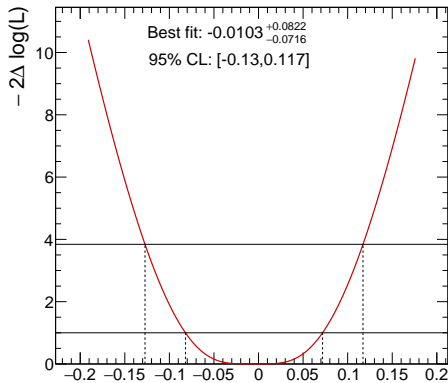
В пределе большой выборки распределение тестовой статистики  $f(t_\mu | \mu)$  сходится к распределению  $\chi^2$ .

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.

Пример:  $f_{T0}, p_T^\gamma > 900$  ГэВ.



# Оптимизация региона по ожидаемым пределам

$E_{\text{clip}}, \text{ TeV}$	$\infty$	1.8	1.7	1.6
$p_T^\gamma > 150 \text{ GeV}$	[-0.62; 0.58]	[-2.1; 1.8]	[-2.3; 1.9]	[-2.6; 2.2]
$p_T^\gamma > 300 \text{ GeV}$	[-0.36; 0.32]	[-1.24; 1]	[-1.4; 1.1]	[-1.6; 1.2]
$p_T^\gamma > 400 \text{ GeV}$	[-0.26; 0.23]	[-0.94; 0.75]	[-1.06; 0.83]	[-1.22; 0.95]
$p_T^\gamma > 500 \text{ GeV}$	[-0.21; 0.19]	[-0.81; 0.65]	[-0.93; 0.74]	[-1.08; 0.86]
$p_T^\gamma > 600 \text{ GeV}$	[-0.18; 0.16]	[-0.76; 0.63]	[-0.89; 0.73]	[-1.06; 0.87]
$p_T^\gamma > 700 \text{ GeV}$	[-0.16; 0.14]	[-0.78; 0.67]	[-0.94; 0.81]	[-1.2; 1]
$p_T^\gamma > 800 \text{ GeV}$	[-0.14; 0.13]	[-0.87; 0.77]	[-1.07; 0.96]	[-1.4; 1.2]
$p_T^\gamma > 900 \text{ GeV}$	[-0.13; 0.12]	[-1.02; 0.94]	[-1.3; 1.2]	[-1.6; 1.5]
$p_T^\gamma > 1000 \text{ GeV}$	[-0.12; 0.12]	[-1.3; 1.2]	[-1.6; 1.6]	[-2.1; 2]
$p_T^\gamma > 1100 \text{ GeV}$	[-0.12; 0.12]			
$p_T^\gamma > 1200 \text{ GeV}$	[-0.12; 0.11]			
$p_T^\gamma > 1300 \text{ GeV}$	[-0.13; 0.12]			
Bound	[-0.0; 0.0]	[-0.72; 0.72]	[-0.9; 0.9]	[-1.2; 1.2]

Результат оптимизации.

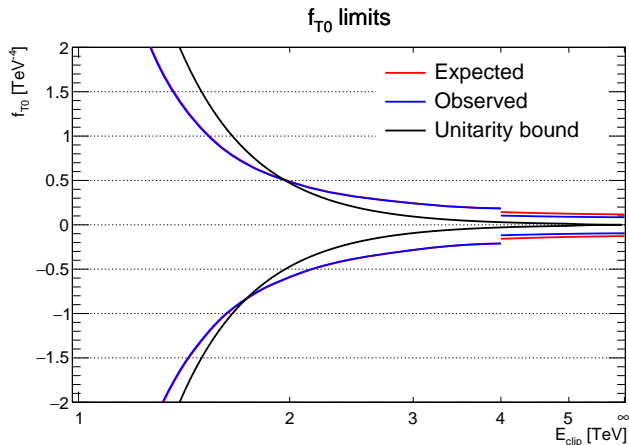
Выбранные регионы:

Для неунитаризованных пределов:  
 $p_T^\gamma > 900 \text{ ГэВ}$ .

Для унитаризованных пределов:  
 $p_T^\gamma > 600 \text{ ГэВ}$  для T-семейства и  
 $p_T^\gamma > 400 \text{ ГэВ}$  для M-семейства операторов.



# Результат



Неунитаризованные пределы.

Ожидаемые:  $[-0.13; 0.12]$  ТэВ<sup>-4</sup>.

Наблюдаемые:  $[-0.095; 0.085]$  ТэВ<sup>-4</sup>.

Унитаризованные пределы.

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

Ожидаемые:  $[-0.89; 0.73]$  ТэВ<sup>-4</sup>.

Наблюдаемые:  $[-0.88; 0.72]$  ТэВ<sup>-4</sup>.

## Модель без квадратичного слагаемого

С квадратичным слагаемым (обычный случай):

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

Без квадратичного слагаемого (линейный случай):

$$|\mathcal{A}|^2 = |\mathcal{A}_{\text{SM}}|^2 + \frac{F}{\Lambda^4} 2\text{Re}(\mathcal{A}_{\text{SM}}^\dagger \mathcal{A}_{\text{BSM}}) \geq 0$$

(положительность приводит к теоретическому ограничению на  $f$ ).

Результат оптимизации: выбран регион  $p_T^\gamma > 800$  ГэВ для Т-семейства и  $p_T^\gamma > 400$  ГэВ для М-семейства операторов (рассматривались только неунитаризованные пределы).

Результаты для  $f_{T0}$ :

Ожидаемые пределы:  $[-0.36; 1.38]$  ТэВ<sup>-4</sup>,  
Наблюдаемые пределы:  $[-0.36; 0.88]$  ТэВ<sup>-4</sup>.

Обычные пределы (для сравнения):

Ожидаемые:  $[-0.13; 0.12]$  ТэВ<sup>-4</sup>,  
Наблюдаемые:  $[-0.095; 0.085]$  ТэВ<sup>-4</sup>.

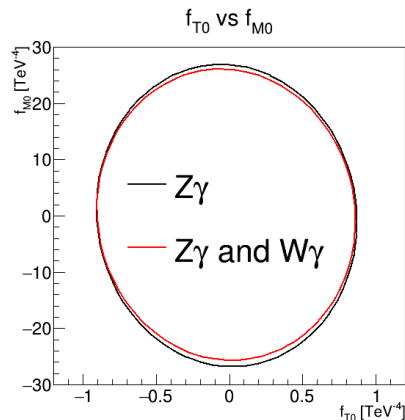
# Учет новой физики в фоновых процессах

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

Coefficient	Only $Z\gamma$ EFT	$Z\gamma$ and $W\gamma$ EFT
$f_{T0}$	[-0.752; 0.714]	[-0.750; 0.706]
$f_{M0}$	[-22.1; 22.2]	[-21.1; 21.5]

Улучшение:  $f_{T0}$  — 1%,  $f_{M0}$  — 5%.

Работа была представлена на Particles and Nuclei International Conference (PANIC2021).



# Заключение

- работа по получению пределов завершена;
- для некоторых коэффициентов удалось получить наилучшие в мире пределы.

# 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 $\gamma$	WW $\gamma\gamma$	ZZZZ	ZZZ $\gamma$	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		

## $CL_{s+b}$ и $CL_s$

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

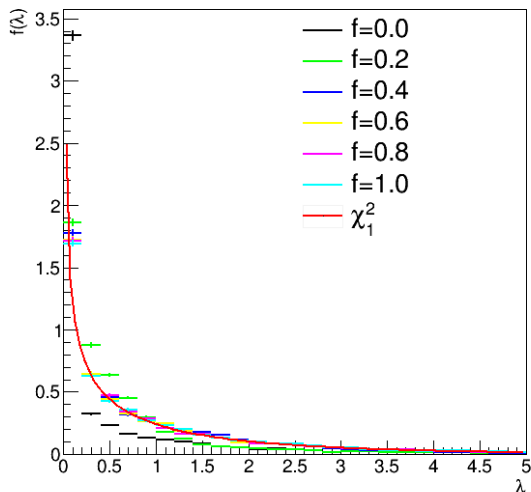
$$CL_s: p_{\mu}^s = \frac{p_{\mu}^{s+b}}{p_{\mu}^b} > \alpha = 0.05$$

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



# Применимость асимптотического распределения

$\lambda$  distribution



# Линейная интерполяция погрешностей

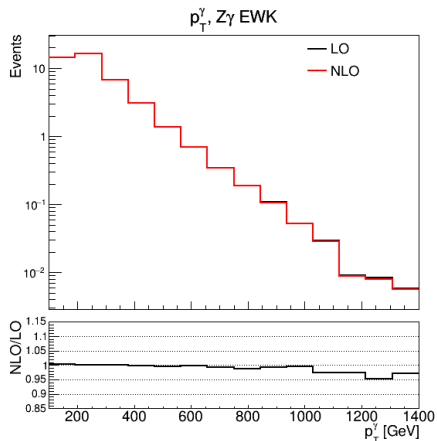
$\theta \sim N(0, 1)$  — параметр,  $\sigma^\pm$  — вариации.

$N_0$  — 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
$\infty$	[-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]

$E_{\text{clip}}, \text{TeV}$	$\infty$	5	4	3	2
$p_T > 150 \text{ GeV}$	[-0.62; 0.58]	[-0.66; 0.61]	[-0.73; 0.68]	[-0.95; 0.86]	[-1.7; 1.5]
$p_T > 300 \text{ GeV}$	[-0.36; 0.32]	[-0.38; 0.34]	[-0.42; 0.38]	[-0.55; 0.48]	[-1.02; 0.84]
$p_T > 400 \text{ GeV}$	[-0.26; 0.23]	[-0.27; 0.24]	[-0.31; 0.27]	[-0.41; 0.34]	[-0.77; 0.62]
$p_T > 500 \text{ GeV}$	[-0.21; 0.19]	[-0.22; 0.2]	[-0.25; 0.22]	[-0.33; 0.28]	[-0.65; 0.53]
$p_T > 600 \text{ GeV}$	[-0.18; 0.16]	[-0.19; 0.17]	[-0.21; 0.19]	[-0.29; 0.24]	[-0.59; 0.49]
$p_T > 700 \text{ GeV}$	[-0.16; 0.14]	[-0.17; 0.15]	[-0.19; 0.17]	[-0.26; 0.22]	[-0.58; 0.49]
$p_T > 800 \text{ GeV}$	[-0.14; 0.13]	[-0.15; 0.13]	[-0.17; 0.15]	[-0.24; 0.21]	[-0.61; 0.53]
$p_T > 900 \text{ GeV}$	[-0.13; 0.12]	[-0.14; 0.13]	[-0.16; 0.14]	[-0.23; 0.21]	[-0.69; 0.63]
$p_T > 1000 \text{ GeV}$	[-0.12; 0.12]	[-0.13; 0.12]	[-0.16; 0.14]	[-0.24; 0.22]	[-0.89; 0.84]
$p_T > 1100 \text{ GeV}$	[-0.12; 0.12]	[-0.13; 0.12]	[-0.16; 0.15]	[-0.26; 0.24]	[-1.2; 1.1]
$p_T > 1200 \text{ GeV}$	[-0.12; 0.11]	[-0.13; 0.12]	[-0.16; 0.15]	[-0.29; 0.27]	
$p_T > 1300 \text{ GeV}$	[-0.13; 0.12]	[-0.14; 0.14]	[-0.18; 0.17]	[-0.36; 0.35]	
Bound	[-0; 0]	[-0.012; 0.012]	[-0.029; 0.029]	[-0.093; 0.093]	[-0.47; 0.47]

# Оптимизация $f_{T0}$ [2]

$E_{clip}$ , TeV	1.8	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3	1
$p_T > 150$ GeV	[-2.1; 1.8]	[-2.3; 1.9]	[-2.6; 2.2]	[-2.9; 2.4]	[-3.4; 2.8]	[-3.9; 3.2]	[-7; 5.6]
$p_T > 300$ GeV	[-1.24; 1]	[-1.4; 1.1]	[-1.6; 1.2]	[-1.8; 1.4]	[-2.1; 1.6]	[-2.5; 1.9]	[-4.8; 3.7]
$p_T > 400$ GeV	[-0.94; 0.75]	[-1.06; 0.83]	[-1.22; 0.95]	[-1.4; 1.1]	[-1.7; 1.3]	[-2; 1.6]	[-4.3; 3.5]
$p_T > 500$ GeV	[-0.81; 0.65]	[-0.93; 0.74]	[-1.08; 0.86]	[-1.3; 1]	[-1.6; 1.2]	[-1.9; 1.6]	[-4.7; 4]
$p_T > 600$ GeV	[-0.76; 0.63]	<b>[-0.89; 0.73]</b>	[-1.06; 0.87]	[-1.3; 1.1]	[-1.6; 1.4]	[-2.1; 1.8]	[-5.4; 5]
$p_T > 700$ GeV	[-0.78; 0.67]	[-0.94; 0.81]	[-1.2; 1]	[-1.5; 1.3]	[-1.9; 1.7]	[-2.5; 2.3]	[-5.9; 5.7]
$p_T > 800$ GeV	[-0.87; 0.77]	[-1.07; 0.96]	[-1.4; 1.2]	[-1.7; 1.6]	[-2.2; 2]	[-2.9; 2.7]	[-6.5; 6.4]
$p_T > 900$ GeV	[-1.02; 0.94]	[-1.3; 1.2]	[-1.6; 1.5]	[-2.1; 2]	[-2.7; 2.5]	[-3.5; 3.4]	[-8.3; 8.3]
$p_T > 1000$ GeV	[-1.3; 1.2]	[-1.6; 1.6]	[-2.1; 2]	[-2.7; 2.6]	[-3.6; 3.4]	[-4.8; 4.7]	[-15; 15]
$p_T > 1100$ GeV							
$p_T > 1200$ GeV							
$p_T > 1300$ 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]

$E_{\text{clip}}, \text{TeV}$	$\infty$	5	4	3	2.9	2.8
$p_T > 150 \text{ GeV}$	[-0.61; 0.65]	[-0.64; 0.69]	[-0.7; 0.77]	[-0.89; 0.99]	[-0.92; 1.03]	[-0.96; 1.07]
$p_T > 300 \text{ GeV}$	[-0.34; 0.38]	[-0.35; 0.4]	[-0.39; 0.44]	[-0.5; 0.58]	[-0.51; 0.6]	[-0.54; 0.63]
$p_T > 400 \text{ GeV}$	[-0.24; 0.27]	[-0.25; 0.29]	[-0.28; 0.32]	[-0.36; 0.42]	[-0.37; 0.44]	[-0.39; 0.46]
$p_T > 500 \text{ GeV}$	[-0.19; 0.22]	[-0.2; 0.23]	[-0.23; 0.26]	[-0.29; 0.35]	[-0.3; 0.36]	[-0.32; 0.38]
$p_T > 600 \text{ GeV}$	[-0.16; 0.19]	[-0.17; 0.2]	[-0.19; 0.22]	[-0.25; 0.3]	[-0.27; 0.31]	[-0.28; 0.33]
$p_T > 700 \text{ GeV}$	[-0.15; 0.16]	[-0.15; 0.17]	[-0.17; 0.2]	[-0.23; 0.27]	[-0.24; 0.28]	[-0.26; 0.3]
$p_T > 800 \text{ GeV}$	[-0.13; 0.15]	[-0.14; 0.16]	[-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; 0.17]	[-0.22; 0.24]	[-0.23; 0.26]	[-0.25; 0.28]
$p_T > 1000 \text{ GeV}$	[-0.12; 0.13]	[-0.13; 0.14]	[-0.15; 0.16]	[-0.23; 0.25]	[-0.25; 0.27]	[-0.27; 0.29]
$p_T > 1100 \text{ GeV}$	[-0.12; 0.13]	[-0.13; 0.14]	[-0.15; 0.17]	[-0.25; 0.27]	[-0.27; 0.29]	[-0.3; 0.32]
$p_T > 1200 \text{ GeV}$	[-0.12; 0.13]	[-0.13; 0.14]	[-0.16; 0.17]	[-0.28; 0.3]		
$p_T > 1300 \text{ GeV}$	[-0.13; 0.14]	[-0.14; 0.15]	[-0.18; 0.19]	[-0.36; 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]	[-1; 1.2]	[-1.1; 1.2]	[-1.2; 1.3]	[-1.2; 1.4]	[-1.3; 1.5]	[-1.4; 1.6]
$p_T > 300 \text{ GeV}$	[-0.56; 0.66]	[-0.58; 0.69]	[-0.61; 0.73]	[-0.65; 0.78]	[-0.69; 0.83]	[-0.73; 0.89]	[-0.78; 0.96]
$p_T > 400 \text{ GeV}$	[-0.4; 0.49]	[-0.42; 0.51]	[-0.45; 0.54]	[-0.47; 0.58]	[-0.5; 0.62]	[-0.54; 0.67]	[-0.58; 0.72]
$p_T > 500 \text{ GeV}$	[-0.33; 0.4]	[-0.35; 0.42]	[-0.37; 0.45]	[-0.39; 0.48]	[-0.42; 0.52]	[-0.45; 0.56]	[-0.49; 0.61]
$p_T > 600 \text{ GeV}$	[-0.29; 0.35]	[-0.31; 0.37]	[-0.33; 0.39]	[-0.35; 0.43]	[-0.38; 0.46]	[-0.41; 0.5]	[-0.45; 0.55]
$p_T > 700 \text{ GeV}$	[-0.27; 0.32]	[-0.29; 0.34]	[-0.31; 0.36]	[-0.33; 0.4]	[-0.36; 0.43]	[-0.4; 0.48]	[-0.44; 0.53]
$p_T > 800 \text{ GeV}$	[-0.26; 0.3]	[-0.28; 0.32]	[-0.3; 0.35]	[-0.33; 0.38]	[-0.36; 0.42]	[-0.41; 0.47]	[-0.46; 0.53]
$p_T > 900 \text{ GeV}$	[-0.26; 0.3]	[-0.29; 0.32]	[-0.31; 0.35]	[-0.35; 0.39]	[-0.39; 0.44]	[-0.45; 0.51]	[-0.53; 0.59]
$p_T > 1000 \text{ GeV}$	[-0.29; 0.32]	[-0.32; 0.35]	[-0.36; 0.39]	[-0.41; 0.45]	[-0.47; 0.52]	[-0.56; 0.61]	[-0.67; 0.72]
$p_T > 1100 \text{ GeV}$	[-0.33; 0.36]	[-0.38; 0.41]	[-0.43; 0.46]	[-0.51; 0.54]	[-0.6; 0.64]	[-0.72; 0.77]	[-0.86; 0.91]
$p_T > 1200 \text{ GeV}$							
$p_T > 1300 \text{ GeV}$							
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 $f_{M0}$ [1]

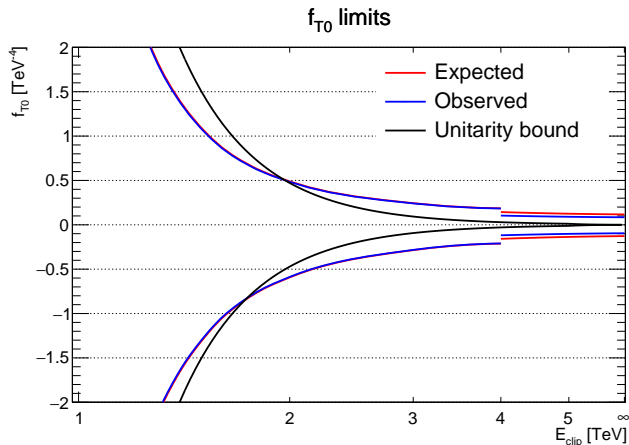
$E_{\text{clip}}, \text{TeV}$	$\infty$	5	4	3	2
$p_T > 150 \text{ GeV}$	[-25; 25]	[-25; 26]	[-26; 27]	[-30; 30]	[-42; 43]
$p_T > 300 \text{ GeV}$	[-14; 14]	[-14; 15]	[-15; 15]	[-17; 18]	[-25; 26]
$p_T > 400 \text{ GeV}$	[-10; 11]	[-11; 11]	[-11; 11]	[-13; 13]	[-19; 20]
$p_T > 500 \text{ GeV}$	[-8.7; 8.8]	[-8.9; 9]	[-9.3; 9.4]	[-11; 11]	[-17; 17]
$p_T > 600 \text{ GeV}$	[-7.6; 7.7]	[-7.8; 7.8]	[-8.2; 8.3]	[-9.7; 9.8]	[-16; 16]
$p_T > 700 \text{ GeV}$	[-7; 7]	[-7.1; 7.2]	[-7.6; 7.6]	[-9.2; 9.3]	[-17; 17]
$p_T > 800 \text{ GeV}$	[-6.5; 6.5]	[-6.7; 6.7]	[-7.2; 7.2]	[-9; 9]	[-19; 19]
$p_T > 900 \text{ GeV}$	<b>[-6.3; 6.3]</b>	[-6.5; 6.5]	[-7; 7]	[-9.2; 9.2]	[-23; 23]
$p_T > 1000 \text{ GeV}$	[-6.5; 6.5]	[-6.7; 6.7]	[-7.4; 7.4]	[-10; 10]	[-31; 31]
$p_T > 1100 \text{ GeV}$	[-6.7; 6.7]	[-7; 7]	[-7.8; 7.8]	[-11; 11]	[-39; 39]
$p_T > 1200 \text{ GeV}$	[-6.9; 6.9]	[-7.2; 7.2]	[-8.3; 8.3]	[-13; 13]	
$p_T > 1300 \text{ GeV}$	[-7.8; 7.8]	[-8.3; 8.3]	[-9.8; 9.8]	[-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	[-59; 61]	[-110; 120]	[-130; 140]	[-160; 170]	[-200; 210]	[-270; 280]
$p_T > 300$ GeV	[-36; 38]	[-74; 77]	[-92; 95]	[-120; 120]	[-160; 160]	[-220; 220]
$p_T > 400$ GeV	[-29; 30]	[-67; 68]	[-85; 85]	[-110; 110]	[-140; 140]	[-190; 190]
$p_T > 500$ GeV	[-28; 28]	[-70; 70]	[-88; 87]	[-110; 110]	[-140; 140]	[-190; 190]
$p_T > 600$ GeV	[-29; 29]	[-77; 77]	[-92; 92]	[-120; 120]	[-150; 150]	[-210; 210]
$p_T > 700$ GeV	[-35; 35]	[-85; 85]	[-100; 100]	[-140; 140]	[-180; 180]	[-260; 260]
$p_T > 800$ GeV	[-42; 42]	[-93; 93]	[-110; 120]	[-140; 140]	[-180; 180]	[-260; 260]
$p_T > 900$ GeV	[-47; 47]	[-110; 110]	[-140; 140]	[-170; 170]	[-250; 250]	[-400; 400]
$p_T > 1000$ GeV	[-58; 58]	[-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] TeV<sup>-4</sup>.

Observed: [-0.095; 0.085] TeV<sup>-4</sup>.

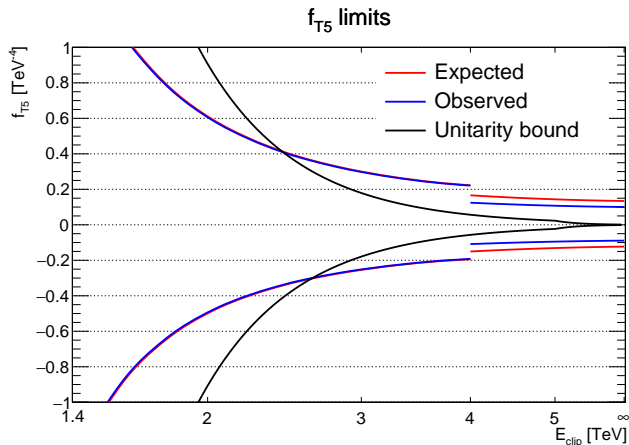
## Unitarized limits.

$E_{clip} = 1.7$  TeV.

Expected: [-0.89; 0.73] TeV<sup>-4</sup>.

Observed: [-0.88; 0.72] TeV<sup>-4</sup>.

# Результаты: $f_{T5}$



## Non-unitarized limits.

Expected:  $[-0.12; 0.13]$  TeV<sup>-4</sup>.

Observed:  $[-0.089; 0.100]$  TeV<sup>-4</sup>.

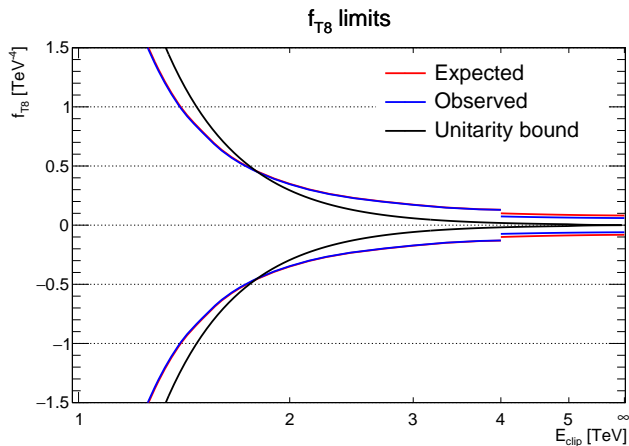
## Unitarized limits.

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

Expected:  $[-0.35; 0.43]$  TeV<sup>-4</sup>.

Observed:  $[-0.35; 0.42]$  TeV<sup>-4</sup>.

# Результаты: $f_{T8}$



## Non-unitarized limits.

Expected:  $[-0.081; 0.081]$  TeV<sup>-4</sup>.

Observed:  $[-0.060; 0.060]$  TeV<sup>-4</sup>.

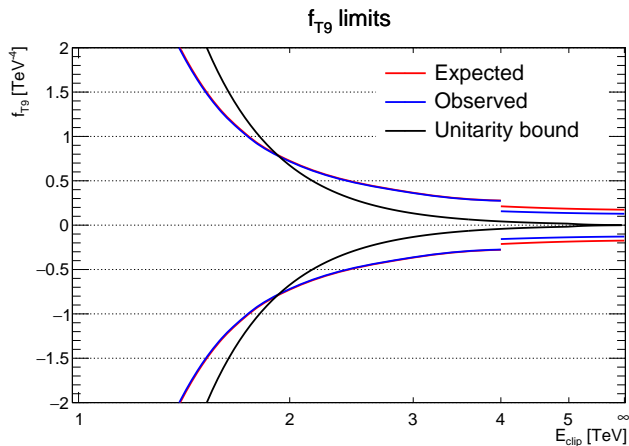
## Unitarized limits.

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

Expected:  $[-0.53; 0.53]$  TeV<sup>-4</sup>.

Observed:  $[-0.52; 0.52]$  TeV<sup>-4</sup>.

# Результаты: $f_{T9}$



## Non-unitarized limits.

Expected:  $[-0.17; 0.17]$  TeV<sup>-4</sup>.

Observed:  $[-0.13; 0.13]$  TeV<sup>-4</sup>.

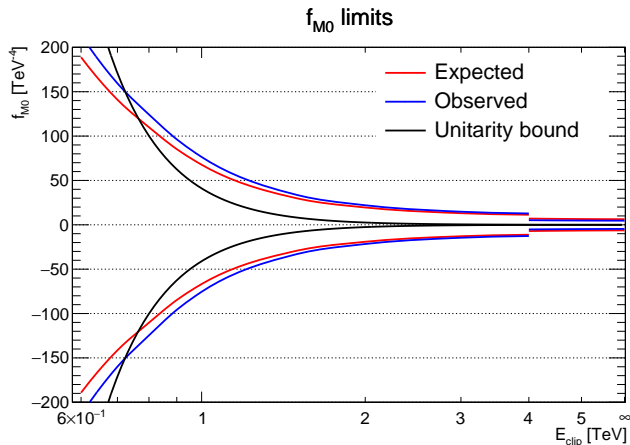
## Unitarized limits.

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

Expected:  $[-0.81; 0.81]$  TeV<sup>-4</sup>.

Observed:  $[-0.81; 0.80]$  TeV<sup>-4</sup>.

# Результаты: $f_{M0}$



## Non-unitarized limits.

Expected: [-6.3; 6.3] TeV<sup>-4</sup>.

Observed: [-4.7; 4.7] TeV<sup>-4</sup>.

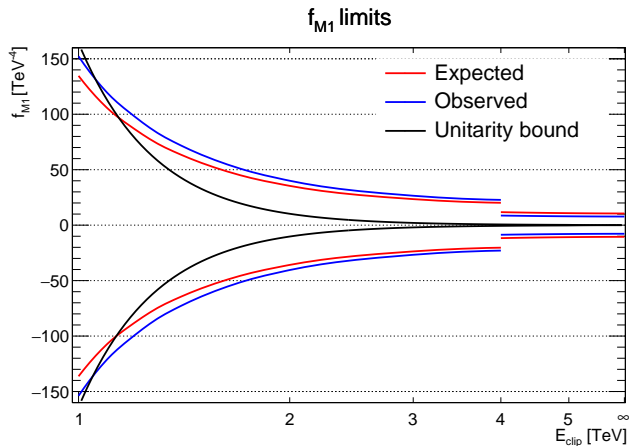
## Unitarized limits.

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

Expected: [-140; 140] TeV<sup>-4</sup>.

Observed: [-160; 160] TeV<sup>-4</sup>.

# Результаты: $f_{M1}$



## Non-unitarized limits.

Expected:  $[-11; 11] \text{ TeV}^{-4}$ .

Observed:  $[-7.8; 7.8] \text{ TeV}^{-4}$ .

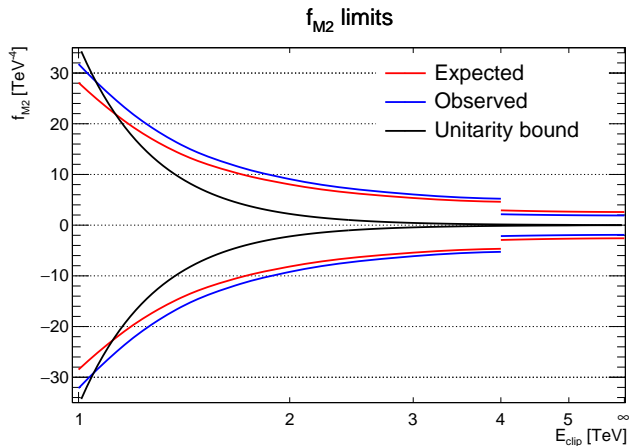
## Unitarized limits.

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

Expected:  $[-140; 130] \text{ TeV}^{-4}$ .

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

# Результаты: $f_{M2}$



## Non-unitarized limits.

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

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

## Unitarized limits.

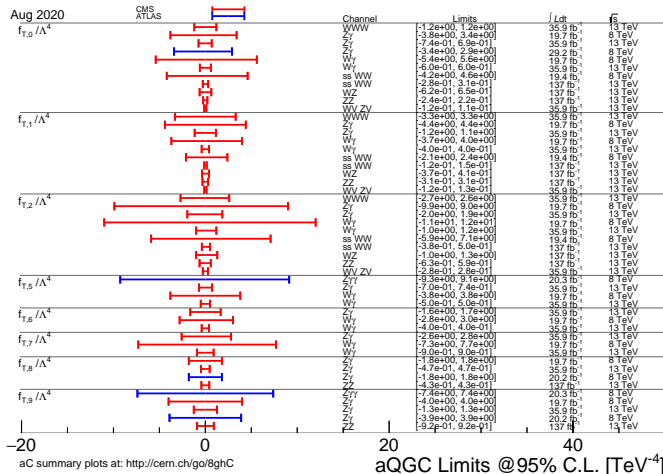
$E_{\text{clip}} = 1 \text{ TeV}$ .

Expected:  $[-28; 28] \text{ TeV}^{-4}$ .

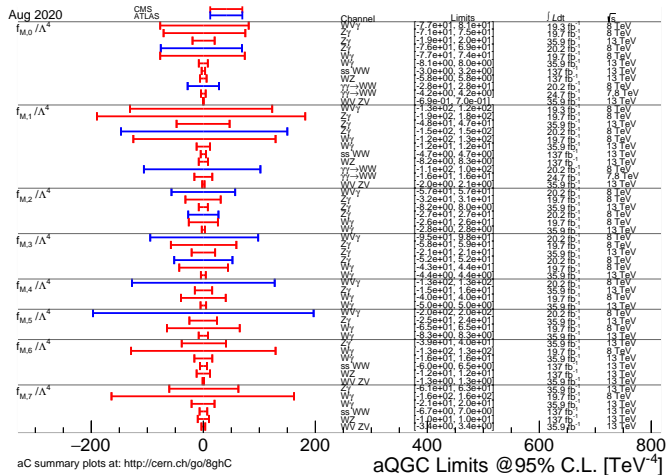
Observed:  $[-32; 32] \text{ TeV}^{-4}$ .



# 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%	<b>-2820, 23.1%</b>	-324, 13.5%
$p_T^{\gamma} > 700$ GeV	-0.51, 5%	0.505, 5%	-54.8, 9.4%	-75.7, 8.5%	<b>684, 25.9%</b>	-2110, 28.2%	<b>-353, 23.8%</b>
$p_T^{\gamma} > 800$ 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	<b>-0.113, 24.8%</b>	<b>0.113, 24.8%</b>	<b>-9.25, 27.7%</b>	<b>-14.3, 27.6%</b>			

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

Таким образом, дальнейшая оптимизация должна производиться с ограничением на  $p_T^{\gamma}$  не более жестким, чем 1100 ГэВ для T-семейства и 500 ГэВ для M-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]	<b>[-870; 850]</b>	<b>[-2800; 2800]</b>	<b>[-420; 430]</b>
$p_T^\gamma > 500$ 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	<b>[-0.36; 1.38]</b>	<b>[-1.37; 0.35]</b>	<b>[-35; 136]</b>	<b>[-53; 208]</b>			
$p_T^\gamma > 900$ GeV	[-0.25; 1.47]	[-1.48; 0.25]	<b>[-23; 136]</b>	[-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, $\text{TeV}^{-4}$	Observed limits, $\text{TeV}^{-4}$
$f_{T0}$	[-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]