

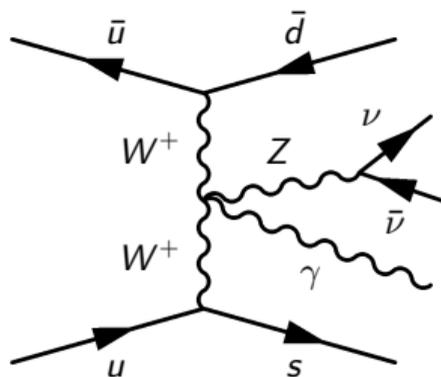
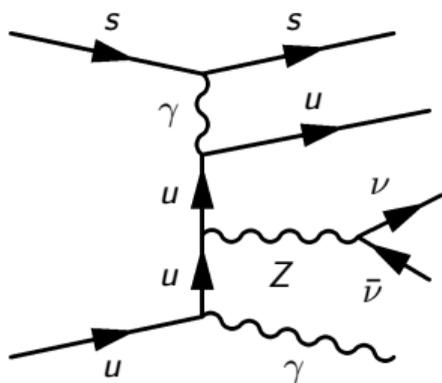
Поиск аномальных вершин на основе процесса электрослабого рождения Z -бозона с фотоном

Семушин А.Е.

НИЯУ МИФИ

02.07.2020

Электрослабое рождение Z -бозона с фотоном

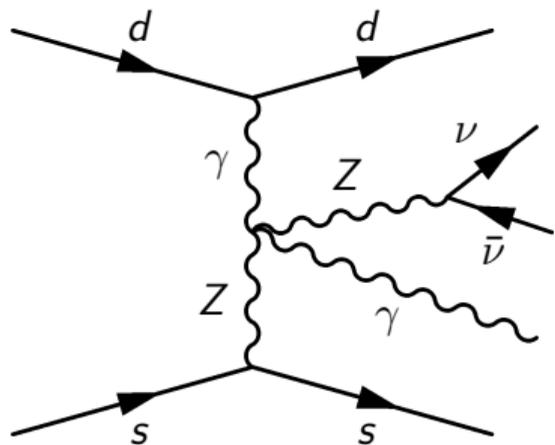


Регистрируемая сигнатура: 1 фотон, 2 (или более) адронные струи, потерянный поперечный импульс (от нейтрино).

Аномальные вершины, эффективная теория поля

Параметризация лагранжиана операторами высших размерностей:

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



Оператор размерности 8:

$$\mathcal{O}_{T0} = \text{Tr} \left[\hat{W}_{\mu\nu} \hat{W}^{\mu\nu} \right] \text{Tr} \left[\hat{W}_{\alpha\beta} \hat{W}^{\alpha\beta} \right] \quad (2)$$

Лагранжиан для получения одномерных пределов:

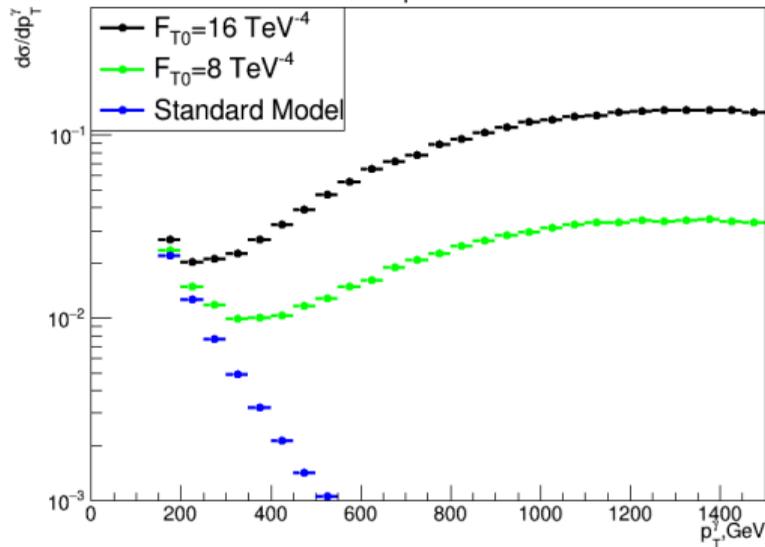
$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{\text{SM}} + f_{T0} \mathcal{O}_{T0} \quad (3)$$

$f_{T0} - ?$

Изучение влияния операторов размерности 8

VBFNLO, $pp \rightarrow Z\gamma jj$, $Z \rightarrow \nu_e \bar{\nu}_e$.

$d\sigma/dp_T^Y$ (fb/GeV)



Для получения ограничений на значения f нужно сравнивать экспериментальные данные с данными Монте-Карло моделирования. Реальное значение f лежит в непрерывном спектре, а Монте-Карло наборы можно создать лишь для дискретного набора значений \implies проблема перевзвешивания: нужно получать распределения для любого значения f .

Разложение амплитуды

f — мало \implies процесс идет не более, чем через 1 вершину новой физики \implies амплитуда процесса представима в виде

$$\mathcal{A} = \mathcal{A}_{\text{SM}} + f \mathcal{A}_{\text{NP}} \implies |\mathcal{A}|^2 = |\mathcal{A}_{\text{SM}}|^2 + f \cdot 2\text{Re}(\mathcal{A}_{\text{SM}} \mathcal{A}_{\text{NP}}^*) + f^2 |\mathcal{A}_{\text{NP}}|^2. \quad (4)$$

Полное сечение σ и нормированные на него распределения $\frac{d\sigma}{dx}$ тоже раскладываются на 3 члена:

$$\text{Full} = \text{SM} + \text{Interference} + \text{Quadratic}, \quad (5)$$

причем $\text{Interference} \sim f$, $\text{Quadratic} \sim f^2$.

Full, SM, Interference, Quadratic — полученные напрямую в генераторе полный процесс и отдельные члены. Reweighted($a \rightarrow b$) — перевзвешенный полный процесс.

$$\delta = \frac{\sigma_{\text{reweighted}} - \sigma_{\text{full}}}{\sigma_{\text{full}}}. \quad (6)$$

Методы перевзвешивания

1. Генерация интерференционных и квадратичных членов в MadGraph (для определенного значения коэффициента $f = a$).

$$\implies \text{Full}(f = b) = \text{SM} + \frac{b}{a} \text{Interference}(f = a) + \frac{b^2}{a^2} \text{Quadratic}(f = a) \quad (7)$$

2. Генерация полного процесса с противоположными значениями коэффициента (т.е. $f = \pm a$).

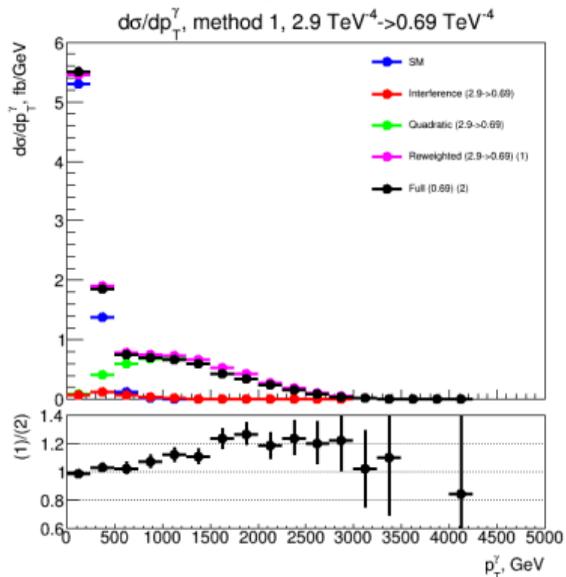
$$\text{Interference}(f = a) = \frac{\text{Full}(f=+a) - \text{Full}(f=-a)}{2}; \quad (8)$$

$$\text{Quadratic}(f = a) = \frac{\text{Full}(f=+a) + \text{Full}(f=-a) - 2 \cdot \text{SM}}{2}. \quad (9)$$

Метод 2 был представлен на Московской международной зимней школе физики в Вороново в 2020 году.

Проверка и сравнение методов перевзвешивания

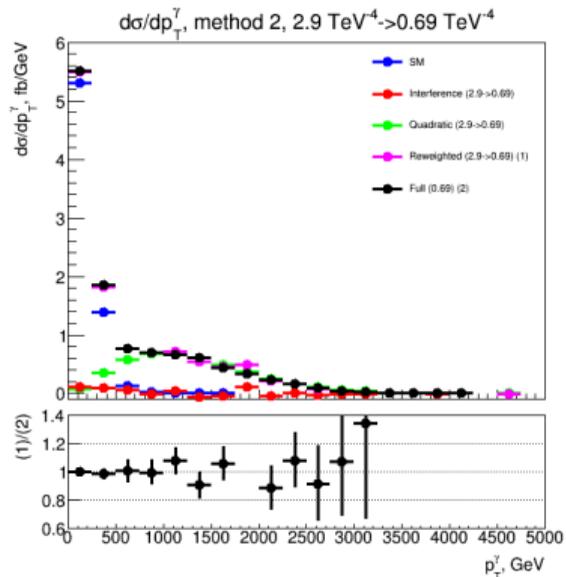
MadGraph, $pp \rightarrow Z\gamma jj$, $Z \rightarrow \nu\bar{\nu}$.



$$\sigma_{\text{full}} = 11.44 \text{ фб};$$

$$\sigma_{\text{reweighted}} = 11.95 \text{ фб};$$

$$\delta = 4.5\%.$$



$$\sigma_{\text{full}} = 11.44 \text{ фб};$$

$$\sigma_{\text{reweighted}} = 11.51 \text{ фб};$$

$$\delta = 0.6\%.$$

Окончательный выбор метода

Недостатки методов:

1 метод: большая погрешность перевзвешивания.

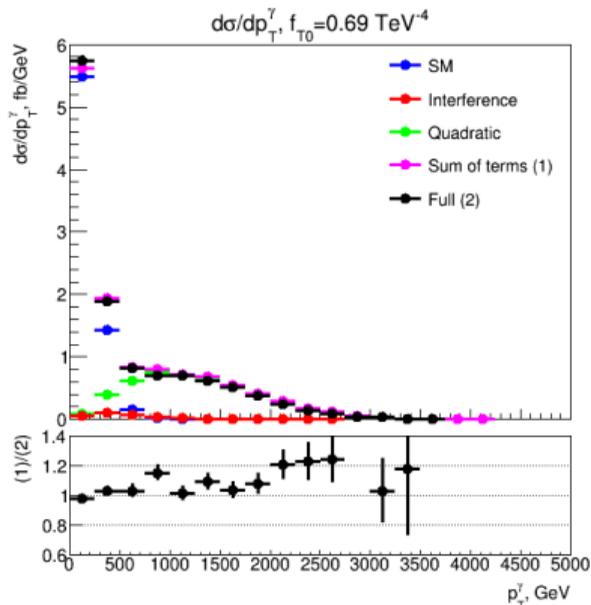
2 метод: громоздкость генераций, учет лишь полного процесса, увеличенные статистические ошибки интерференционного и квадратичного членов вследствие их пересчета из полных процессов с противоположными значениями коэффициента.

⇒ выбран 1 метод (метод декомпозиции).

Для генерации контрольных наборов значения коэффициентов были подобраны из двух соображений:

- Уменьшение ошибок, связанных с вкладами новой физики (для этого коэффициент нужно уменьшать);
- Значения коэффициента должно быть не меньше, чем получаемые пределы.

Контрольные наборы



$$\sigma_{SM} = 7.10; \sigma_{interference} = 0.312;$$

$$\sigma_{quadratic} = 4.87; \sigma_{full} = 11.94;$$

$$\sigma_{reweighted} = 12.28; \delta = 2.8\%.$$

⇒⇒⇒⇒

Отборы для
сигнального
региона:

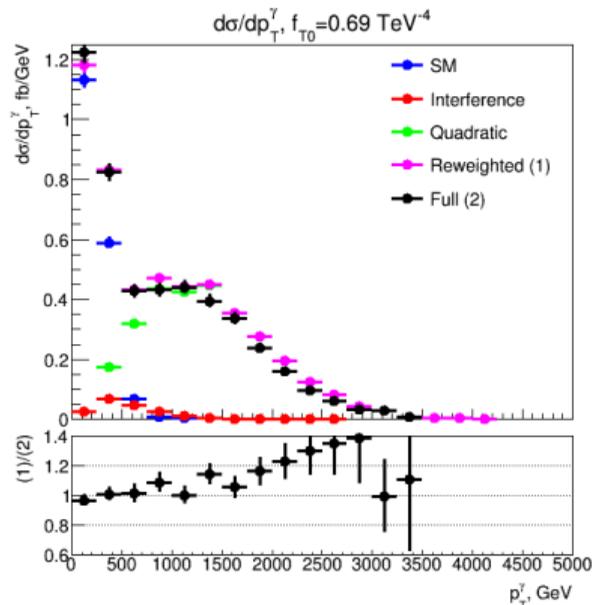
$$m_{jj} > 400 \text{ ГэВ};$$

$$p_T^\gamma > 150 \text{ ГэВ};$$

$$p_T^{\text{miss}} > 120 \text{ ГэВ};$$

$$\zeta(\gamma) < 0.6.$$

⇒⇒⇒⇒



$$\sigma_{SM} = 1.80; \sigma_{interference} = 0.189;$$

$$\sigma_{quadratic} = 2.94; \sigma_{full} = 4.70;$$

$$\sigma_{reweighted} = 4.93; \delta = 4.9\%.$$

Получение пределов

Ожидаемое число фоновых и сигнальных событий, а также систематики взяты из ATL-COM-PHYS-2019-1351.

Данные Азимова — сумма всех смоделированных фонов и сигнала (ожидаемое количество событий).

Регион поиска аномальных вершин: отборы сигнального региона + дополнительное ограничение снизу на p_T^γ .

Контрольные наборы — parton level. Симуляция уровня реконструкции (эффективности идентификации):

- 1 Умножение на $\int L dt = 139 \text{ фб}^{-1}$;
- 2 Нормировка СМ на ожидаемое количество событий (из статьи), нормировка интерференционного и квадратичного членов с тем же множителем.

Результаты и заключение

Полученные с помощью TGClim пределы:

f_{T0}	f_{T5}	f_{T8}	f_{T9}
(-0.22, 0.20)	(-0.21, 0.23)	(-0.11, 0.11)	(-0.23, 0.23)

f_{M0}	f_{M1}	f_{M2}
(-6.93, 6.93)	(-13.8, 13.7)	(-2.79, 2.77)

Полученные ожидаемые пределы более точны (ближе к 0), чем точнейшие полученные на этот момент экспериментальные пределы (коллаборацией CMS).

Таким образом, используя разработанные методики, можно получить лучшие в мире наблюдаемые пределы на коэффициенты при некоторых операторах.

BACKUP

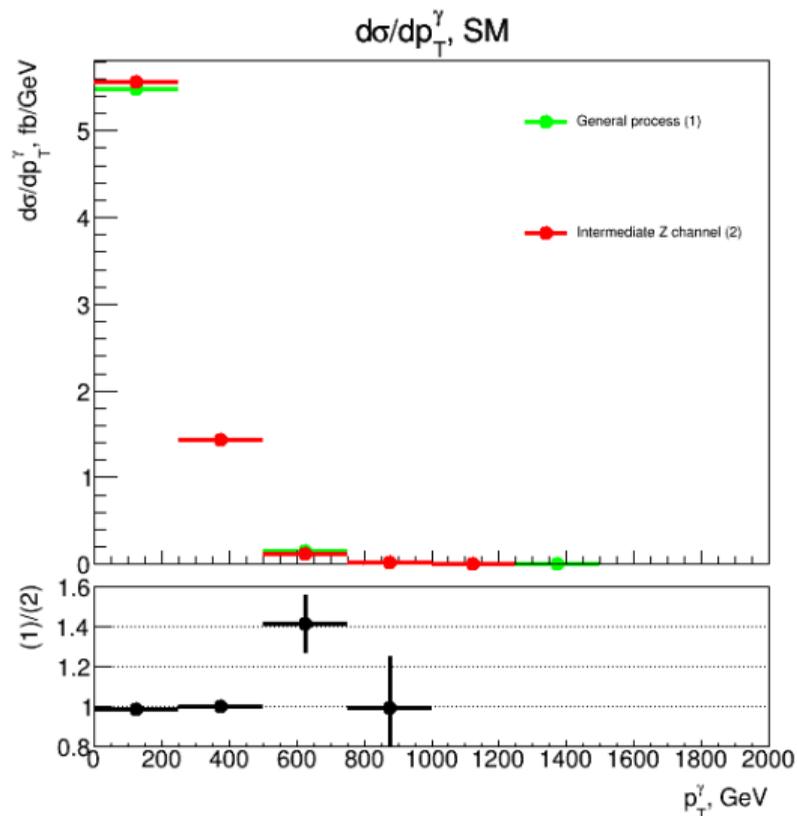
Генерируемые с помощью Монте-Карло процессы

Процесс, соответствующий сигнатуре γ , $2j$ и p_T^{miss} от $\nu\bar{\nu}$: $pp \rightarrow \nu\bar{\nu}\gamma jj$. Его основным каналом является процесс $pp \rightarrow Z\gamma jj$, $Z \rightarrow \nu\bar{\nu}$.

$$\sigma(\text{general}) = 7.10 \text{ фб};$$

$$\sigma(\text{intermediate } Z) = 6.84 \text{ фб};$$

$$\frac{\sigma(\text{general}) - \sigma(\text{intermediate } Z)}{\sigma(\text{general})} = 3.7\%.$$



Влияние операторов на вершины

Знаком X помечены те вершины, на которые оператор влияет. CM предсказывает следующие четверные вершины векторных (электрослабых) бозонов: $WWWW$, $WWZZ$, $WW\gamma\gamma$, $WWZ\gamma$.

Оператор	$WWWW$	$WWZZ$	$WWZ\gamma$	$WW\gamma\gamma$	$ZZZZ$	$ZZZ\gamma$	$ZZ\gamma\gamma$	$Z\gamma\gamma\gamma$	$\gamma\gamma\gamma\gamma$
\mathcal{O}_{T0}	X	X	X	X	X	X	X	X	X
\mathcal{O}_{T5}		X	X	X	X	X	X	X	X
\mathcal{O}_{T8}					X	X	X	X	X
\mathcal{O}_{T9}					X	X	X	X	X
\mathcal{O}_{M0}	X	X	X	X	X	X	X		
\mathcal{O}_{M1}	X	X	X	X	X	X	X		
\mathcal{O}_{M2}		X	X	X	X	X	X		
\mathcal{O}_{M3}		X	X	X	X	X	X		

Предельные значения (положительные)

Полученные коллаборацией ATLAS с run 1:

Оператор	\mathcal{O}_{T0}	\mathcal{O}_{T8}	\mathcal{O}_{T9}	\mathcal{O}_{M0}	\mathcal{O}_{M1}	\mathcal{O}_{M2}	\mathcal{O}_{M3}
$f_{\max}, \text{ТэВ}^{-4}$	2.9	1.8	3.9	69	150	27	52

Полученные коллаборацией CMS с неполного набора данных run 2:

Оператор	\mathcal{O}_{T0}	\mathcal{O}_{T5}	\mathcal{O}_{T8}	\mathcal{O}_{T9}	\mathcal{O}_{M0}	\mathcal{O}_{M1}	\mathcal{O}_{M2}
$f_{\max}, \text{ТэВ}^{-4}$	0.69	0.75	0.47	0.27	20.3	39.5	8.10

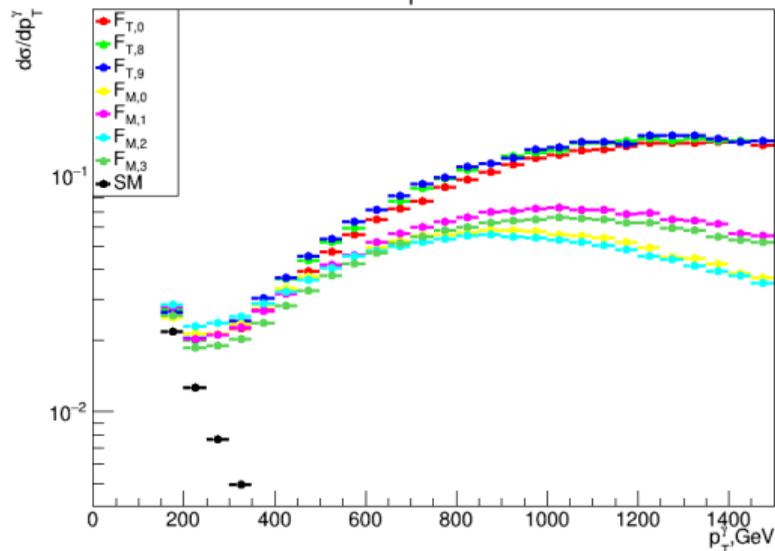
Полученные в данной работе, ожидаемые, с полного набора данных run 2:

Оператор	\mathcal{O}_{T0}	\mathcal{O}_{T5}	\mathcal{O}_{T8}	\mathcal{O}_{T9}	\mathcal{O}_{M0}	\mathcal{O}_{M1}	\mathcal{O}_{M2}
$f_{\max}, \text{ТэВ}^{-4}$	0.20	0.23	0.11	0.23	6.93	13.7	2.77

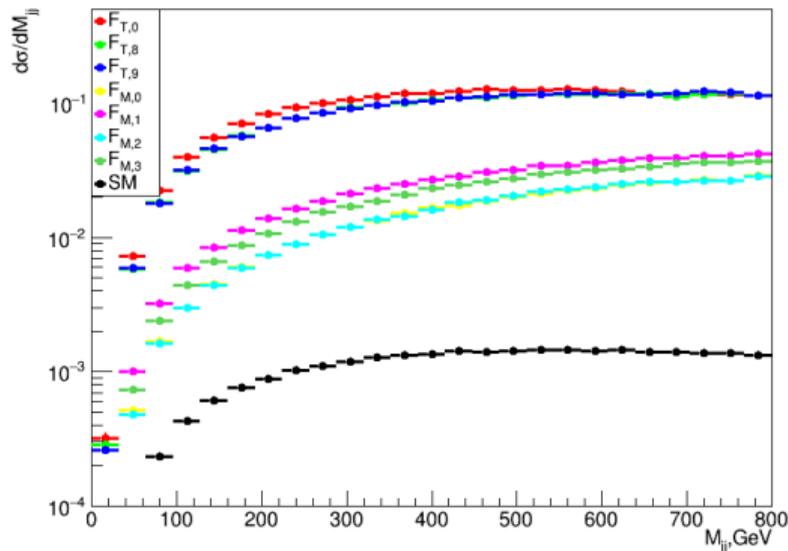
Распределения на одной картинке для всех операторов (p_T^γ , m_{jj})

VBFNLO, значения коэффициентов — предельные ATLAS.

$d\sigma/dp_T^\gamma$ (fb/GeV)

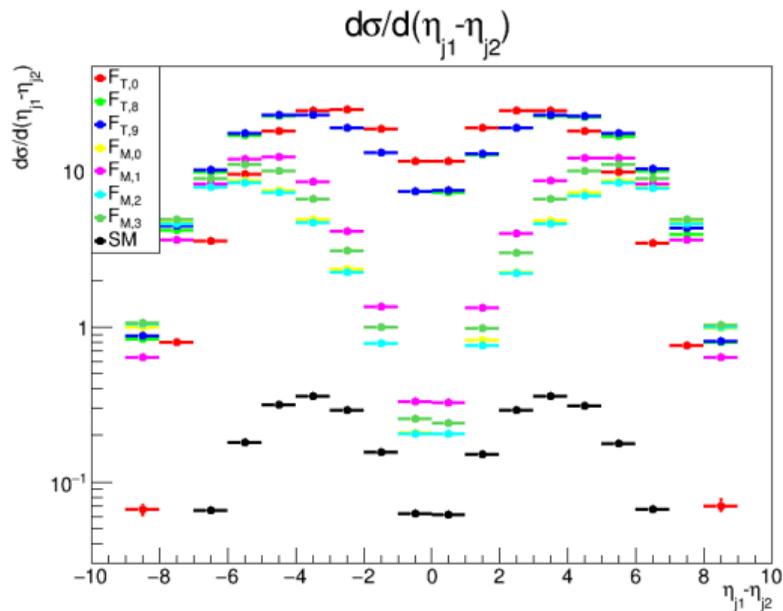
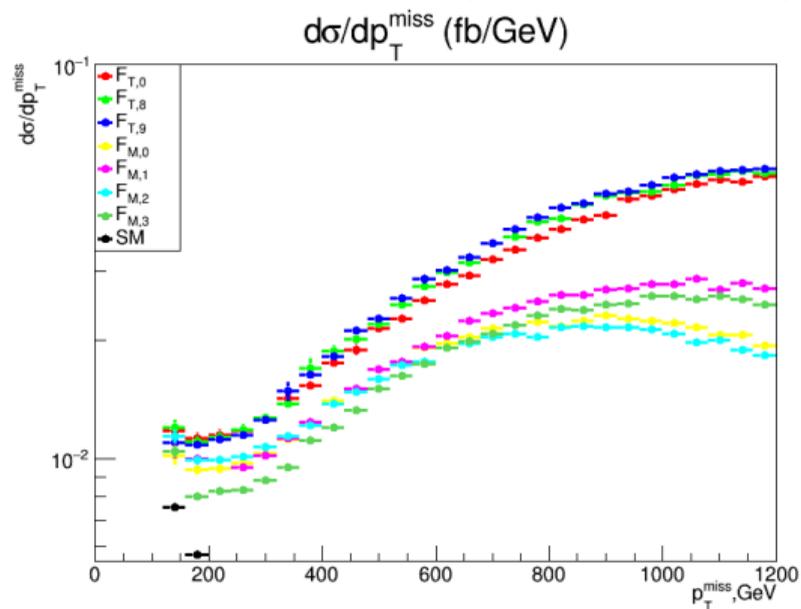


$d\sigma/dM_{jj}$ (fb/GeV)

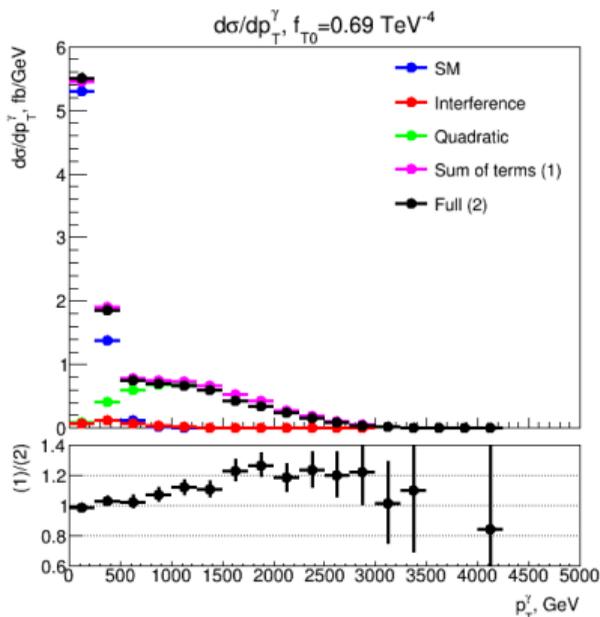


Распределения на одной картинке для всех операторов ($p_T^{\text{miss}}, \eta_{j_1} - \eta_{j_2}$)

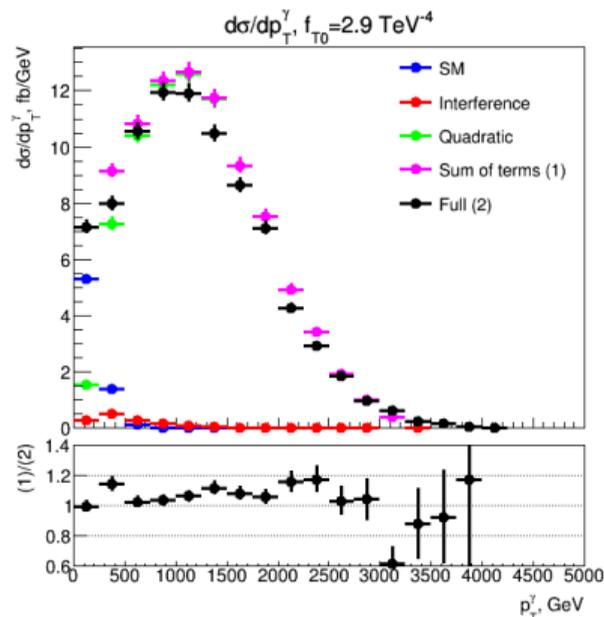
VBFNLO, значения коэффициентов — предельные ATLAS.



Метод 1: сравнение суммы членов и полного процесса



$\sigma_{\text{full}} = 11.44 \text{ fb}, \sigma_{\text{sum}} = 12.0 \text{ fb};$
 $\delta = 4.9\%$



$\sigma_{\text{full}} = 86.7 \text{ fb}, \sigma_{\text{sum}} = 92.9 \text{ fb};$
 $\delta = 7.2\%$

Сигнальный регион (ATL-COM-PHYS-2019-1351)

$$m_{jj} > 400 \text{ ГэВ};$$

$$p_T^\gamma > 150 \text{ ГэВ};$$

$$p_T^{\text{miss}} > 120 \text{ ГэВ};$$

$$\zeta(\gamma) < 0.6.$$

$$\zeta(\gamma) = \left| \frac{\eta(\gamma) - \frac{\eta(j_1) + \eta(j_2)}{2}}{\eta(j_1) - \eta(j_2)} \right| \text{ — центральность фотона.}$$

Систематики (ATL-COM-PHYS-2019-1351)

Для получения пределов на значения коэффициентов используются следующие систематические ошибки:

- 1 Неопределённость интегральной светимости — 0.017;
- 2 Неидеальность работы триггера — 0.015 (эффективность работы триггера составляет 98.5%)

Ожидаемые сигнал и фоны (ATL-COM-PHYS-2019-1351) [1]

Порог на p_T^γ , ГэВ		150	250	300	400	500	600
$Z\gamma$ EWK	События	43.4	17.7	11.71	5.29	2.48	1.18
	Стат. ош. (абс.)	0.2	0.1	0.08	0.06	0.04	0.03
	Сист. ош. (отн.)	0.395					
$Z\gamma$ QCD	События	80	34	20	8.2	4.6	2.1
	Стат. ош. (абс.)	8	5	4	2.6	1.9	1.3
	Сист. ош. (отн.)	0.1					
$W\gamma$ QCD	События	74	27	17.3	6.7	2.5	0.85
	Стат. ош. (абс.)	4	2.2	1.7	1.1	0.6	0.34
	Сист. ош. (отн.)	0.111					
$W\gamma$ EWK	События	22.9	8.8	6.1	2.69	1.1	0.48
	Стат. ош. (абс.)	1	0.6	0.5	0.33	0.21	0.14
	Сист. ош. (отн.)	0.223					
$W \rightarrow e\nu, t, t\bar{t}$	События	14.3	3.4	1.73	0.77	0.26	0.16
	Стат. ош. (абс.)	0.7	0.31	0.21	0.13	0.08	0.07
	Сист. ош. (отн.)	0.07					

Ожидаемые сигнал и фоны (ATL-COM-PHYS-2019-1351) [2]

Порог на p_T^γ , ГэВ		150	250	300	400	500	600
$t\bar{t}\gamma$	События	15.6	7.5	5.1	2.2	0.63	0.45
	Стат. ош. (абс.)	1.1	0.8	0.6	0.4	0.22	0.2
	Сист. ош. (отн.)	0.531					
γ +jet	События	14	3.5	3.5	0.8	0.4	0.3
	Стат. ош. (абс.)	8	3.3	3.3	0.9	0.4	0.4
	Сист. ош. (отн.)	0.342					
Z +jets	События	6	2	1.5	0.7	0.3	0.2
	Стат. ош. (абс.)	7	4	3.4	2.3	1.6	1.1
	Сист. ош. (отн.)	0					
$(Z \rightarrow l\bar{l}) + \gamma$	События	1.41	0.5	0.38	0.14	0.09	0.05
	Стат. ош. (абс.)	0.26	0.15	0.13	0.06	0.05	0.08
	Сист. ош. (отн.)	0.643					

Полученные для использования в TGClim веса

Порог на ρ_T^γ		150	250	300	400	500	600
f_{T0}	Инт. член	6.59	6.27	6.01	4.87	4.26	3.0
	Квадр. член	148.9	162.3	171.5	170.0	181.0	158.0
f_{T5}	Инт. член	-6.83	-6.29	-6.06	-4.92	-4.24	-2.94
	Квадр. член	140.6	152.9	161.4	159.3	168.7	147.0
f_{T8}	Инт. член	0.0345	0.0327	0.0324	0.0250	0.0213	0.0172
	Квадр. член	569.2	617.8	650.3	635.8	669.1	577.9
f_{T9}	Инт. член	0.0210	0.0163	0.0126	0.0108	0.0123	0.00850
	Квадр. член	126.0	136.8	144.1	140.7	148.0	127.3
f_{M0}	Инт. член	-0.30838	-0.0464	-0.0346	-0.0166	-0.00723	-0.00274
	Квадр. член	0.168	0.179	0.185	0.176	0.177	0.145
f_{M1}	Инт. член	0.0270	0.0153	0.0115	0.00562	0.00378	0.00126
	Квадр. член	0.0409	0.0440	0.0461	0.0443	0.0452	0.0381
f_{M2}	Инт. член	0.186	0.107	0.084	0.0384	0.0198	0.00992
	Квадр. член	1.09	1.15	1.20	1.13	1.12	0.913