

# Поиск аномальных вершин с применением формализма вершинной функции для процесса рождения $Z$ -бозона с фотоном в эксперименте АТЛАС

Студент гр. М24-114: Чехонина Алёна Александровна,  
Научный руководитель: Солдатов Е.Ю., к.ф.- м.н., доцент,  
Научный консультант: Семушин А.Е.

НИЯУ МИФИ

20.06.2025

**Цель работы:** развитие метода постановки ограничений и получение наиболее строгих в мире пределов на константы связи в формализме вершинной функции.

В рамках поставленной цели нужно выполнить следующие **задачи**:

- 1 рассчитать теоретическое интегральное и дифференциальное сечение  $Z(\nu\bar{\nu})\gamma$ ;
- 2 определить чувствительную к аномальным взаимодействиям переменную процесса;
- 3 поставить пределы на коэффициенты связи аномальных вершин, используя программное обеспечение коллаборации АТЛАС — EFTfun;
- 4 оценить влияние отборов на адронные струи на пределы;
- 5 проверить, являются ли полученные пределы унитаризованными.

# Теоретическое введение

Вершинная функция [1, 2, 3]

$$\Gamma_{Z\gamma V}^{\alpha\beta\mu}(q_1, q_2, P) = \frac{i(P^2 - m_V^2)}{m_Z^2} \left\{ h_1^V (q_2^\mu g^{\alpha\beta} - q_2^\alpha g^{\mu\beta}) + \frac{h_2^V}{m_Z^2} P^\alpha [(Pq_2)g^{\mu\beta} - q_2^\mu P^\beta] - \right. \\ \left. - \left( h_3^V + h_5^V \frac{P^2}{m_Z^2} \right) \epsilon^{\mu\alpha\beta\rho} q_{2\rho} - \frac{h_4^V}{m_Z^2} P^\alpha \epsilon^{\mu\beta\rho\sigma} P_\rho q_{1\sigma} + \frac{h_6^V}{m_Z^2} P^2 [q_2^\alpha g^{\mu\beta} - q_2^\mu g^{\alpha\beta}] \right\}. \quad (1)$$

Аномальная добавка [1, 2, 3]

$$\mathcal{L} = \frac{e}{m_Z^2} \left\{ -[h_1^\gamma \partial^\sigma A_{\sigma\mu} + h_1^Z \partial^\sigma Z_{\sigma\mu}] Z_\beta A^{\mu\beta} - \left[ \frac{h_2^\gamma}{m_Z^2} \partial_\alpha \partial_\beta \partial^\rho A_{\rho\mu} + \frac{h_2^Z}{m_Z^2} \partial_\alpha \partial_\beta (\partial^2 + m_Z^2) Z_\mu \right] Z^\alpha A^{\mu\beta} - \right. \\ - [h_3^\gamma \partial_\sigma A^{\sigma\rho} + h_3^Z \partial_\sigma Z^{\sigma\rho}] Z^\alpha \tilde{A}_{\rho\alpha} + \left[ \frac{h_4^\gamma}{2m_Z^2} \partial^2 \partial^\sigma A^{\rho\alpha} + \frac{h_4^Z}{2m_Z^2} (\partial^2 + m_Z^2) \partial^\sigma A^{\rho\alpha} \right] Z_\sigma \tilde{A}_{\rho\alpha} - \\ \left. - \left[ \frac{h_5^\gamma}{m_Z^2} \partial^2 \partial_\sigma A^{\rho\sigma} + \frac{h_5^Z}{m_Z^2} \partial^2 \partial_\sigma Z^{\rho\sigma} \right] Z^\alpha \tilde{A}_{\rho\alpha} - \left[ \frac{h_6^\gamma}{m_Z^2} \partial^2 \partial_\sigma A^{\rho\sigma} + \frac{h_6^Z}{m_Z^2} \partial^2 \partial_\sigma Z^{\rho\sigma} \right] Z^\alpha A_{\rho\alpha} \right\}. \quad (2)$$

На коэффициенты связи —  $h_i^V$  — можно поставить ограничения.

# Теоретические интегральное и дифференциальные сечения

Перед тем, как моделировать аномальные взаимодействия, нужно смоделировать предсказание Стандартной модели.

- POWHEG [4]: NNLO(QCD)+PS
- Sherpa 2.2.2 [5]: NLO(QCD)+PS
- Sherpa 2.2.11 [5]: NLO(QCD)+PS

Интегральное сечение:

- POWHEG  $109.5 \pm 0.7$  фб
- Sherpa 2.2.2  $117.2 \pm 0.1$  фб
- Sherpa 2.2.11  $104.9 \pm 0.1$  фб

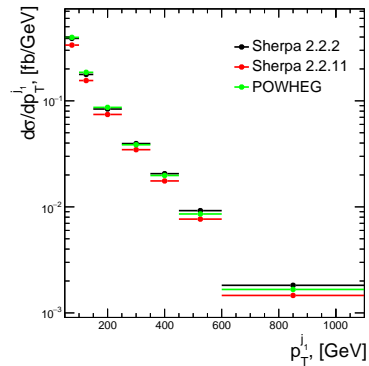
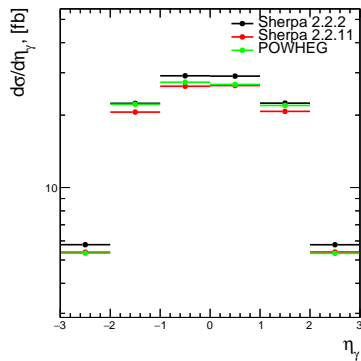
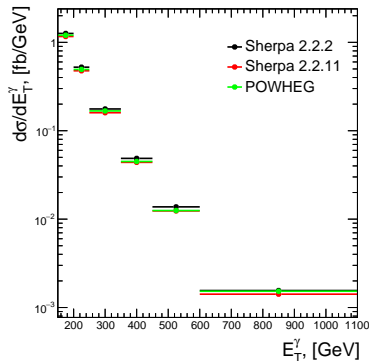
Отборы [5]:

- Фотоны:  $N_\gamma = 1$ ,  $E_T^\gamma > 150$  ГэВ,  $|\eta| < 2.37$
- Струи:  $|\eta| < 4.5$ ,  $p_T > 50$  ГэВ,  
 $\Delta R(jet, \gamma) > 0.3$
- Нейтрино:  $p_T^{\nu\bar{\nu}} > 130$  ГэВ

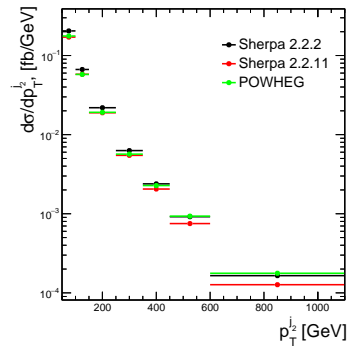
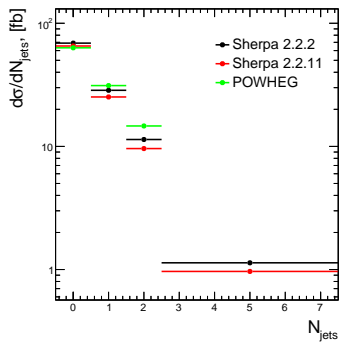
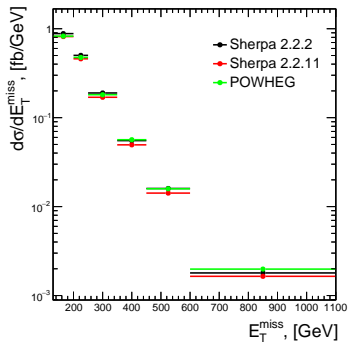
Дифференциальные сечения

рассчитаны для восьми кинематических переменных:  $p_T^\gamma$ ,  $E_T^{miss}$ ,  $N_{jets}$ ,  $\eta_\gamma$ ,  $p_T^{j_1}$ ,  $p_T^{j_2}$ ,  $|\Delta\phi(j_1, j_2)|$ ,  $|\Delta\phi(Z, j)|$

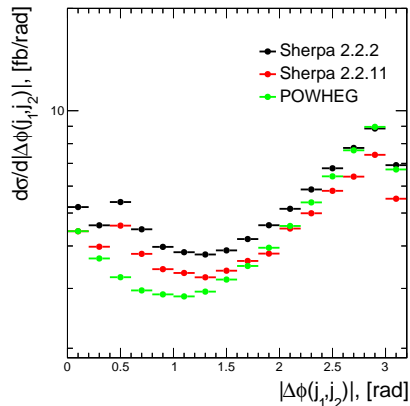
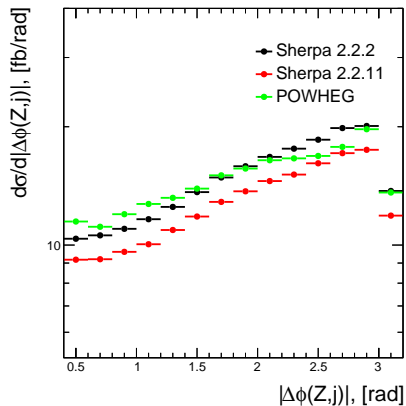
# Теоретические дифференциальные сечения



# Теоретические дифференциальные сечения



# Теоретические дифференциальные сечения

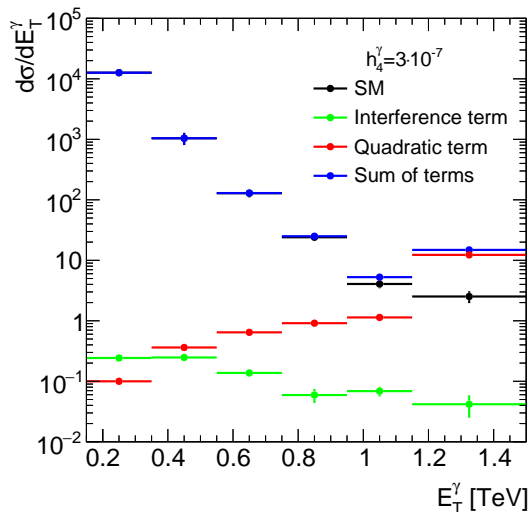


# Метод декомпозиции и его проверка

В данной работе использовался **метод декомпозиции**, который является новым для исследования вершинных функций. Метод заключается в том, что наборы генерируются отдельно для линейного, квадратичного слагаемого и слагаемого, отвечающего СМ.

$$\begin{aligned}\mathcal{A} &= \mathcal{A}_{\text{SM}} + h_i \mathcal{A}_i \\ |\mathcal{A}|^2 &= |\mathcal{A}_{\text{SM}}|^2 + h_i 2\text{Re}\mathcal{A}_{\text{SM}}^\dagger \mathcal{A}_i + h_i^2 |\mathcal{A}_i|^2\end{aligned}\quad (3)$$

Для моделирования отдельных слагаемых используется **MadGraph5** [6].





# Модель и отборы

- Систематическая погрешность принята равной 10%.
- В модели учитываются все фоновые процессы [3, 7].
- Модель включает в себя полную симуляцию детектора АТЛАС в Geant4 [8].

- Основные отборы [5]:

$$p_T^\gamma > 150 \text{ ГэВ},$$

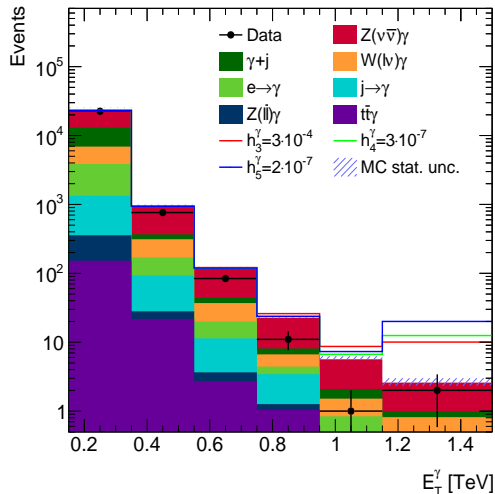
$$N_\gamma = 1, N_{e,\mu,\tau} = 0,$$

$$E_T^{\text{miss}} > 130 \text{ ГэВ},$$

$$p_T^{\text{jet}} > 50 \text{ ГэВ}$$

**Инклюзивный случай:**  $N_{\text{jet}} \geq 0$

**Эксклюзивный случай:**  $N_{\text{jet}} = 0$



# Постановка пределов

Сравнение ожидаемых одномерных пределов в инклюзивном и эксклюзивном случае с доверительной вероятностью 95%.

Коэф.	$N_{jet} \geq 0$	$N_{jet} = 0$
$h_3^\gamma$	$(-2.2 \times 10^{-4}, 2.2 \times 10^{-4})$	$(-2.3 \times 10^{-4}, 2.4 \times 10^{-4})$
$h_3^Z$	$(-2.0 \times 10^{-4}, 2.1 \times 10^{-4})$	$(-2.1 \times 10^{-4}, 2.1 \times 10^{-4})$
$h_4^\gamma$	$(-2.0 \times 10^{-7}, 2.0 \times 10^{-7})$	$(-2.2 \times 10^{-7}, 2.2 \times 10^{-7})$
$h_4^Z$	$(-2.0 \times 10^{-7}, 2.0 \times 10^{-7})$	$(-2.2 \times 10^{-7}, 2.2 \times 10^{-7})$
$h_5^\gamma$	$(-1.0 \times 10^{-7}, 1.0 \times 10^{-7})$	$(-1.1 \times 10^{-7}, 1.1 \times 10^{-7})$
$h_5^Z$	$(-8.9 \times 10^{-8}, 1.2 \times 10^{-7})$	$(-1.1 \times 10^{-7}, 1.1 \times 10^{-7})$

# Унитаризация

Границы унитарности для двух коэффициентов связи [3]:

$$|h_3^Z| < \frac{6\sqrt{2}\pi v^2 m_Z}{s_W c_W (T_3 - Q s_W^2) \hat{s}^{3/2}}, \quad |h_3^\gamma| < \frac{6\sqrt{2}\pi v^2 m_Z}{s_W^2 c_W^2 |Q| \hat{s}^{3/2}}. \quad (4)$$

Унитарность нарушается при **17 ТэВ** для  $h_3^Z$  и при **18 ТэВ** для  $h_3^\gamma$ . Полученные значения превышают энергию в системе центра масс  $\sqrt{s}=13$  ТэВ, в рамках которой проводится анализ.

Так как границы унитарности для других интересующих коэффициентов связи не определены в указанной выше работе, они были посчитаны в рамках текущего анализа:

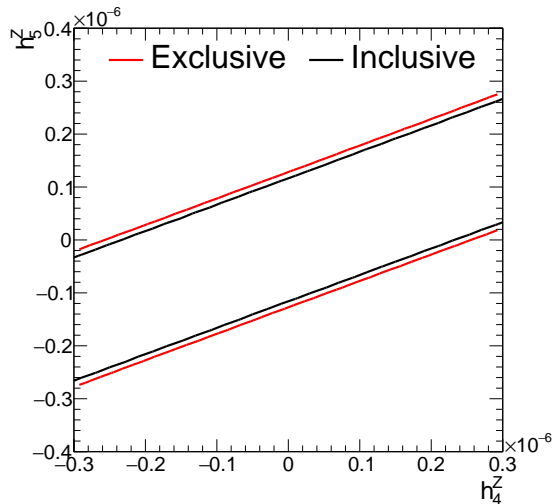
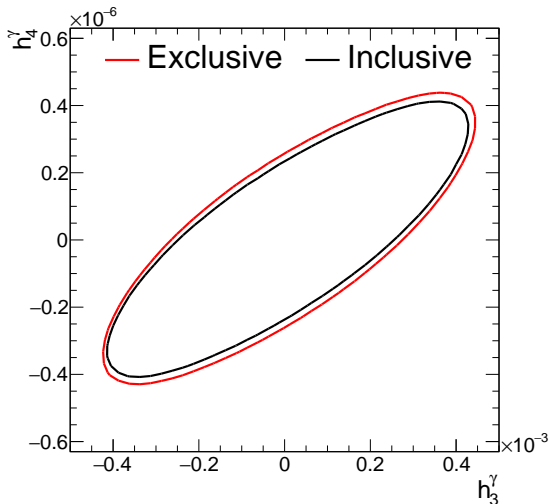
$$|h_4^Z| < \frac{12\sqrt{2}\pi v^2 m_Z^3}{s_W c_W (T_3 - Q s_W^2) \hat{s}^{5/2}}, \quad |h_4^\gamma| < \frac{12\sqrt{2}\pi v^2 m_Z^3}{s_W^2 c_W^2 |Q| \hat{s}^{5/2}}, \quad (5)$$

$$|h_5^Z| < \frac{6\sqrt{2}\pi v^2 m_Z^3}{s_W c_W (T_3 - Q s_W^2) \hat{s}^{5/2}}, \quad |h_5^\gamma| < \frac{6\sqrt{2}\pi v^2 m_Z^3}{s_W^2 c_W^2 |Q| \hat{s}^{5/2}}. \quad (6)$$

Унитарность нарушается при **10 ТэВ** для  $h_4^Z$ ,  $h_5^Z$  и при **11 ТэВ** для  $h_4^\gamma$ ,  $h_5^\gamma$ .

## Двумерные пределы

$$|\mathcal{A}|^2 = |\mathcal{A}_{\text{SM}}|^2 + h_i^2 |\mathcal{A}_i|^2 + h_j^2 |\mathcal{A}_j|^2 + h_i 2\text{Re}\mathcal{A}_{\text{SM}}^\dagger \mathcal{A}_i + h_j 2\text{Re}\mathcal{A}_{\text{SM}}^\dagger \mathcal{A}_j + h_i h_j 2\text{Re}\mathcal{A}_i^\dagger \mathcal{A}_j \quad (7)$$



## Вывод

- В работе были поставлены ожидаемые одномерные и двумерные **пределы на шесть коэффициентов связи**.
- Поставленные одномерные и двумерные пределы на коэффициенты связи **в инклюзивном случае оказались лучше**, чем в эксклюзивном, поэтому в дальнейшем будет использоваться инклюзивный отбор фазового пространства.
- Пределы, полученные с помощью программного обеспечения **EFTfun** совпали с пределами, полученными ранее с помощью упрощенного кода.
- Проверено, что полученные пределы на коэффициенты связи являются **унитаризованными** в условиях работы эксперимента АТЛАС.
- Также установлено, что новые коэффициенты  $h_5^V$  являются **полностью коррелирующими** с коэффициентами  $h_4^V$  соответственно.
- Получены **теоретические интегральное и дифференциальные сечения** для процесса  $Z(\nu\bar{\nu})\gamma$ .

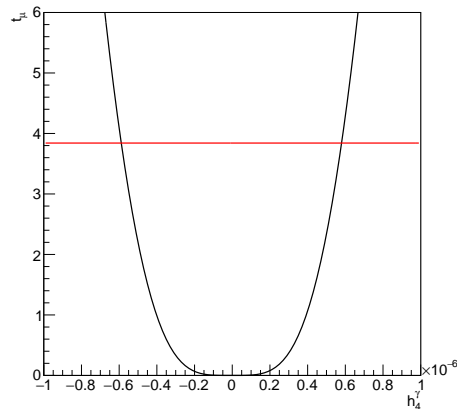
В дальнейшем планируется:

- оценить систематическую погрешность для полученных теоретических сечений;
- добавить систематические погрешности от разных источников в статистическую модель для постановки пределов.

Спасибо за внимание!

# Back-Up

$$t_{\mu} = -2 \ln \frac{L(\mu, \hat{\hat{\theta}}(\mu))}{L(\hat{\mu}, \hat{\theta})} \quad (8)$$

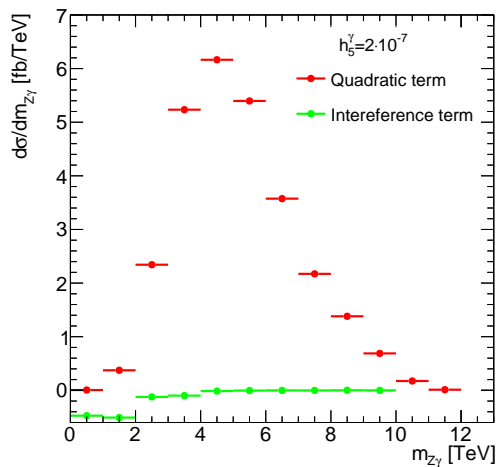
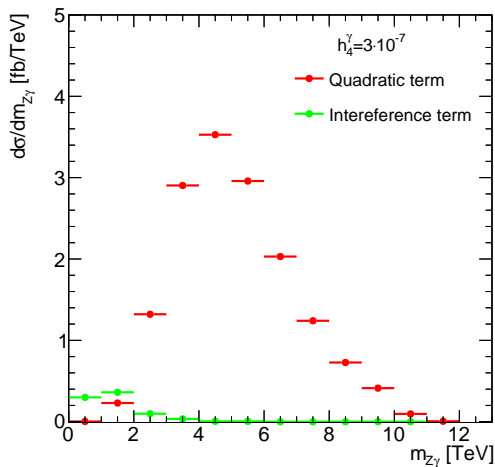




## Зависимость пределов от систематической погрешности

Коэф.	10%	20%	30%
$h_3^\gamma$	$(-2.16551, 2.23631) \times 10^{-4}$	$(-2.16553, 2.23631) \times 10^{-4}$	$(-2.16554, 2.23631) \times 10^{-4}$
$h_3^Z$	$(-2.03273, 2.07239) \times 10^{-4}$	$(-2.03274, 2.0724) \times 10^{-4}$	$(-2.03274, 2.0724) \times 10^{-4}$

# Распределения по $m_{Z\gamma}$



# Получение границ унитарности

Амплитуда парциальной волны [2]:

$$a_J = \frac{1}{32\pi} e^{i(\nu' - \nu)\phi} \int_{-1}^1 d(\cos\theta) d_{\nu', \nu}^J(\cos\theta) \mathcal{T}^{s_f s_{\bar{f}}, \lambda_Z \lambda_\gamma}. \quad (9)$$

Из оптической теоремы следуют ограничения на амплитуды парциальных волн [8]:

$$|a_J| < \frac{1}{2}. \quad (10)$$

# Амплитуды рассеяния

$$h_4^\gamma : \quad \mathcal{T}^{s_f s_{\bar{f}}}(0\pm) = -\frac{\sqrt{2}Qe^2}{8m_Z^5} \sqrt{\hat{s}}(\hat{s} - m_Z^2)^2 (\delta_{s_f, \frac{1}{2}} - \delta_{s_f, -\frac{1}{2}} \mp \cos\theta), \quad (11)$$

$$h_5^\gamma : \quad \mathcal{T}^{s_f s_{\bar{f}}}(0\pm) = \frac{\sqrt{2}Qe^2}{4m_Z^5} \hat{s}^{3/2} (\hat{s} - m_Z^2) (\delta_{s_f, \frac{1}{2}} - \delta_{s_f, -\frac{1}{2}} \mp \cos\theta), \quad (12)$$

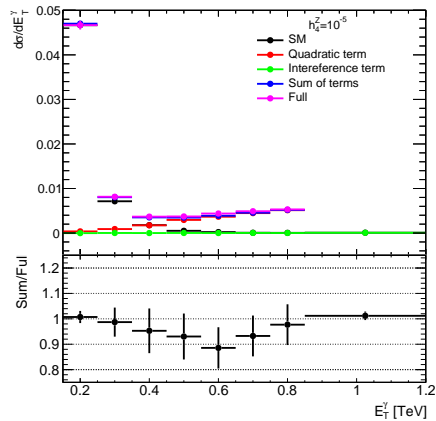
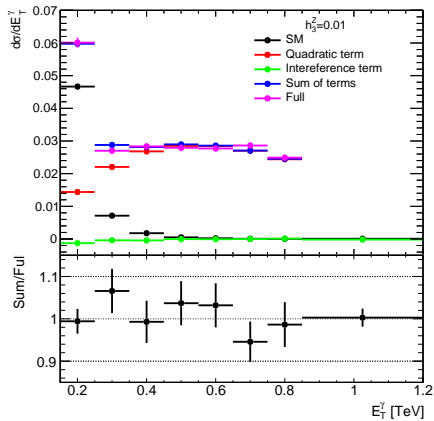
$$h_5^\gamma : \quad \mathcal{T}^{s_f s_{\bar{f}}} \begin{pmatrix} -- & -+ \\ +- & ++ \end{pmatrix} = \frac{Qe^2}{2m_Z^4} \hat{s}(\hat{s} - m_Z^2) \sin\theta \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}, \quad (13)$$

$$h_4^Z : \quad \mathcal{T}^{s_f s_{\bar{f}}}(0\pm) = \frac{\sqrt{2}(T_3 - Qs_W^2)e^2}{8c_W s_W m_Z^2} \hat{s}^{1/2} (\hat{s} - m^2)^2 (\delta_{s_f, \frac{1}{2}} - \delta_{s_f, -\frac{1}{2}} \mp \cos\theta), \quad (14)$$

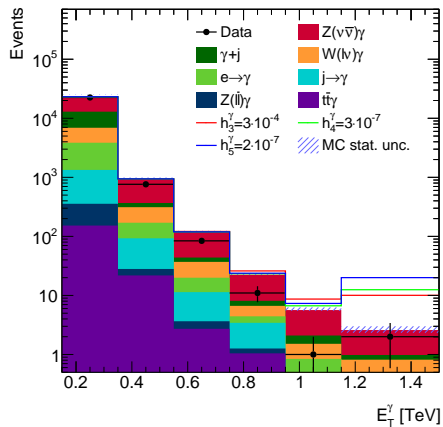
$$h_5^Z : \quad \mathcal{T}^{s_f s_{\bar{f}}}(0\pm) = \frac{\sqrt{2}(T_3 - Qs_W^2)e^2}{4c_W s_W m_Z^2} \hat{s}^{3/2} (\hat{s} - m^2) (\delta_{s_f, \frac{1}{2}} - \delta_{s_f, -\frac{1}{2}} \mp \cos\theta), \quad (15)$$

$$h_5^Z : \quad \mathcal{T}^{s_f s_{\bar{f}}} \begin{pmatrix} -- & -+ \\ +- & ++ \end{pmatrix} = \frac{(T_3 - Qs_W^2)e^2}{2m_Z^4 s_W c_W} \hat{s}(\hat{s} - m_Z^2) \sin\theta \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}. \quad (16)$$

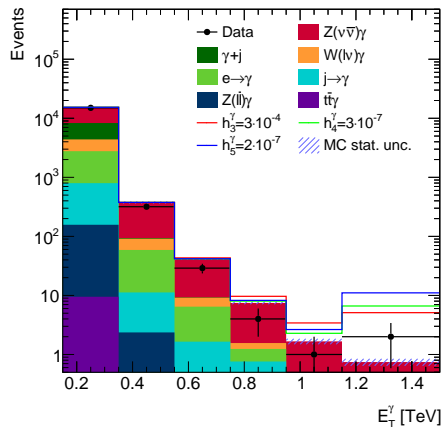
# Проверка метода декомпозиции



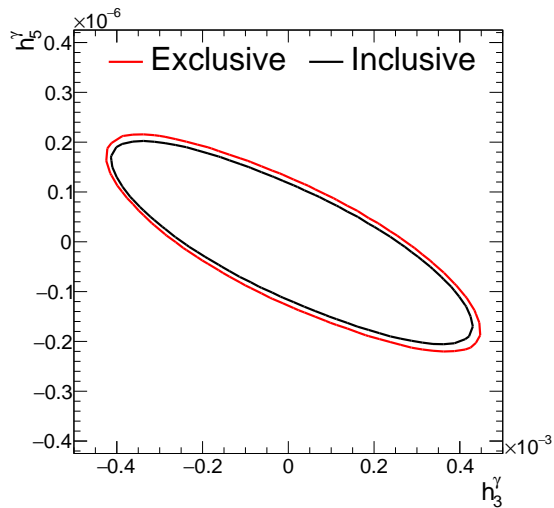
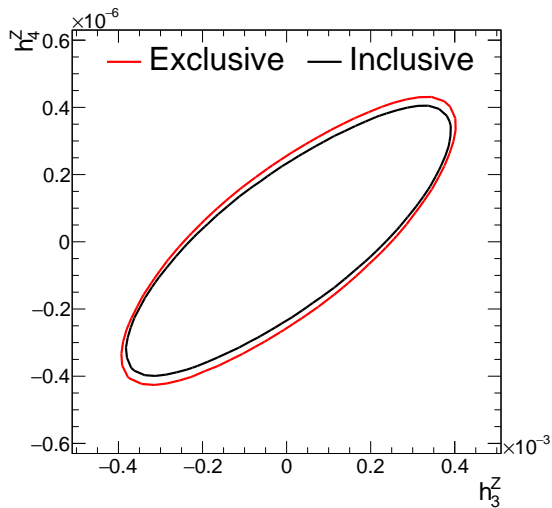
## Инклюзивный случай



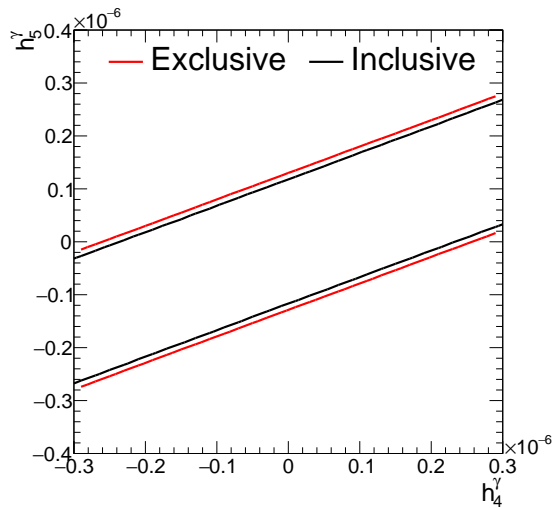
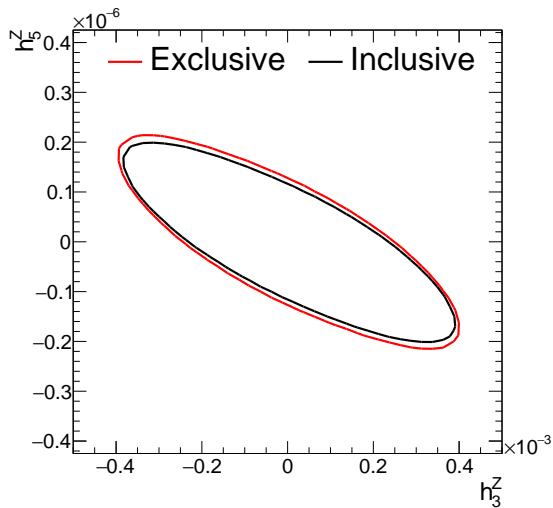
## Эксклюзивный случай



## Двумерные пределы



## Двумерные пределы



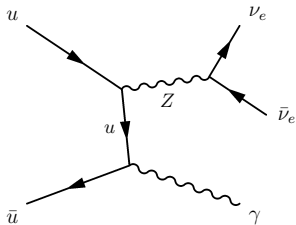


# Исследуемый процесс

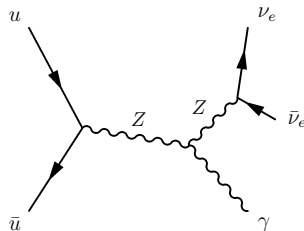
В данной работе исследуются нейтральные трехбозонные вершины на основе процесса рождения  $Z(\nu\bar{\nu})\gamma$ , т. к. данный процесс имеет высокую чувствительность к нейтральным трехбозонным взаимодействиям.

Диаграммы Фейнмана рождения  $Z(\nu\bar{\nu})\gamma$ :

в рамках СМ



за пределами СМ — включает в себя аномальную вершину



## Критерии отбора событий для сигнального процесса $Z(\nu\bar{\nu})\gamma$ [7]

Число жестких фотонов	$N_\gamma = 1$
Координатная переменная фотона	$ \text{ph\_z\_point}  < 250 \text{ мм}$
Поперечный импульс фотона	$p_T^\gamma > 150 \text{ ГэВ}$
Недостающий поперечный импульс	$E_T^{\text{miss}} > 130 \text{ ГэВ}$
Число лептонов	$(N_\mu + N_e + N_\tau) = 0$
Значимость $E_T^{\text{miss}}$ , определяемая как $ \vec{E}_T^{\text{miss}} ^2/(\sigma_L^2(1 - \rho_{LT}^2))$	$E_T^{\text{miss}} \text{ significance} > 11$
Калориметрическая изоляция	$(E_T^{\text{cone20}} - 0.065 \cdot p_T^\gamma) < 0$
Трековая изоляция	$p_T^{\text{cone20}}/p_T^\gamma < 0.05$
Разность азимутальных углов между $p_T^{\text{miss}}$ и фотоном	$\Delta\phi(\vec{p}_T^{\text{miss}}, \gamma) > 0.6$
Разность азимутальных углов между $p_T^{\text{miss}}$ и лидирующей струей	$\Delta\phi(\vec{p}_T^{\text{miss}}, j_1) > 0.3$
<hr/>	
Количество адронных струй в инклюзивном случае	$N_{\text{jet}} \geq 0$
Количество адронных струй в эксклюзивном случае	$N_{\text{jet}} = 0$