

Поиск аномальных вершин в формализме вершинной функции для процесса рождения Z -бозона с фотоном в эксперименте АТЛАС

Студент гр. Б20-102: Чехонина Алёна Александровна,
Научный руководитель: Солдатов Е.Ю., к.ф.- м.н., доцент,
Научный консультант: Семушин А.Е., инженер

НИЯУ МИФИ

27.06.2024

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 произвести Монте-Карло моделирование рождения Z -бозона с фотоном с учетом вклада аномальных вершин в амплитуду и без него;
- 2 определить чувствительную к аномальным взаимодействиям переменную процесса;
- 3 поставить ожидаемые и наблюдаемые пределы на коэффициенты связи аномальных вершин;
- 4 установить, 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]

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

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

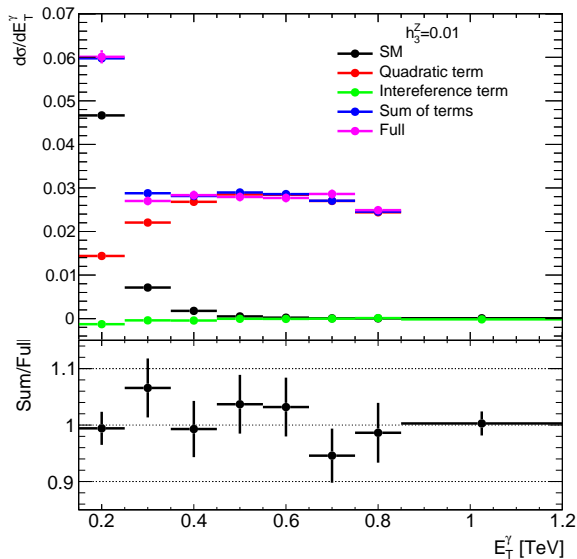
Метод декомпозиции и его проверка

В данной работе использовался метод декомпозиции, который является новым для исследования вершинных функций [4].

Метод заключается в том, что наборы генерируются отдельно для линейного, квадратичного слагаемого и слагаемого, отвечающего СМ.

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

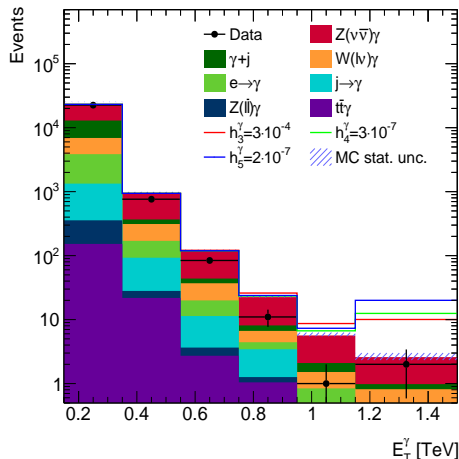
Для моделирования отдельных слагаемых используется **MadGraph5**.



Модель и отборы

- Систематическая погрешность принята равной 10%.
- В модели учитываются все фоновые процессы.
- Модель включает в себя полную симуляцию детектора АТЛАС в Geant4.
- Основные отборы [5]:
 $p_T^\gamma > 150$ ГэВ,
 $N_\gamma = 1$, $N_{e,\mu,\tau} = 0$,
 $E_T^{miss} > 130$ ГэВ,
 $N_{jet} \geq 0$.

В данной работе было проверено, что пределы в инклюзивном случае ($N_{jet} \geq 0$) получаются лучше, чем в эксклюзивном ($N_{jet} = 0$).



В рамках поиска чувствительных к аномальным взаимодействиям переменных были также рассмотрены: η_γ , E_T^{miss} и др. Подробности в back-up.

Постановка пределов

Сравнение ожидаемых и наблюдаемых пределов, полученных в данной работе, и опубликованных одномерных наблюдаемых пределов с доверительной вероятностью 95% [4]

Коэф.	Ожидаемые пределы	Наблюдаемые пределы	Опубликованные наблюдаемые пределы
h_3^γ	$(-2.2 \times 10^{-4}, 2.2 \times 10^{-4})$	$(-1.4 \times 10^{-4}, 1.7 \times 10^{-4})$	$(-3.7 \times 10^{-4}, 3.7 \times 10^{-4})$
h_3^Z	$(-2.0 \times 10^{-4}, 2.1 \times 10^{-4})$	$(-1.4 \times 10^{-4}, 1.4 \times 10^{-4})$	$(-3.2 \times 10^{-4}, 3.3 \times 10^{-4})$
h_4^γ	$(-2.1 \times 10^{-7}, 2.0 \times 10^{-7})$	$(-1.9 \times 10^{-7}, 1.8 \times 10^{-7})$	$(-4.4 \times 10^{-7}, 4.3 \times 10^{-7})$
h_4^Z	$(-2.0 \times 10^{-7}, 2.0 \times 10^{-7})$	$(-1.8 \times 10^{-7}, 1.8 \times 10^{-7})$	$(-4.5 \times 10^{-7}, 4.4 \times 10^{-7})$
h_5^γ	$(-1.0 \times 10^{-7}, 1.0 \times 10^{-7})$	$(-9.0 \times 10^{-8}, 9.3 \times 10^{-8})$	—
h_5^Z	$(-8.9 \times 10^{-8}, 1.2 \times 10^{-7})$	$(-6.8 \times 10^{-8}, 1.2 \times 10^{-7})$	—

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^γ . 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:

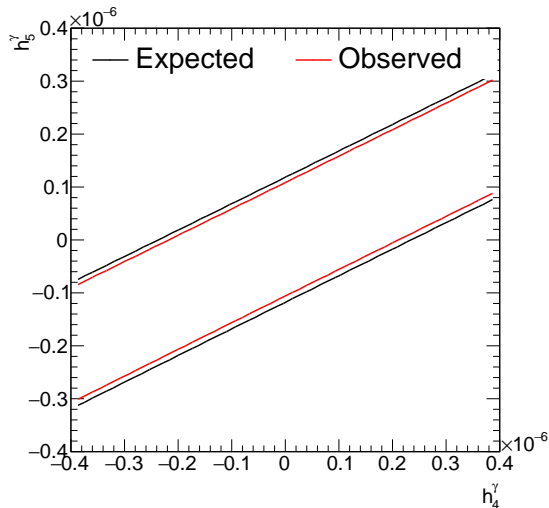
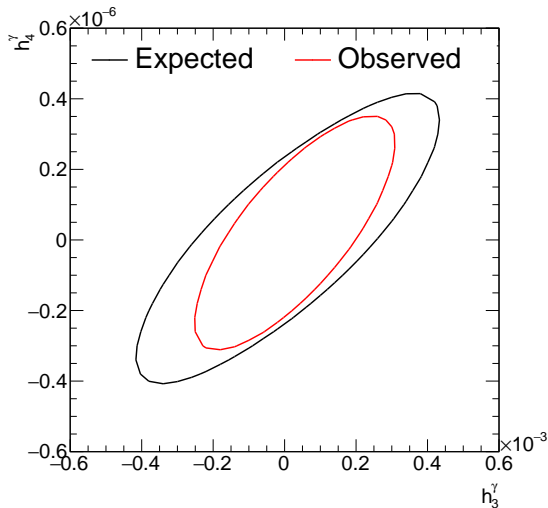
$$|h_4^Z| < \frac{12\sqrt{2}\pi v^2 m_Z^3}{s_W c_W (T_3 - Q s_W^2) \hat{s}^{5/2}}, \quad |h_4^\gamma| < \frac{12\sqrt{2}\pi v^2 m_Z^3}{s_W^2 c_W^2 |Q| \hat{s}^{5/2}}, \quad (5)$$

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

Унитарность нарушается при **10 ТэВ** для h_4^Z , h_5^Z и при **11 ТэВ** для h_4^γ , h_5^γ .

Двумерные пределы

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



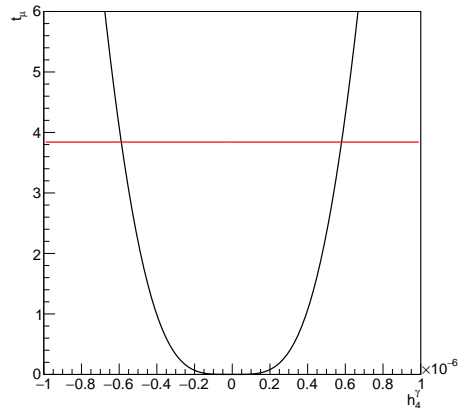
Вывод

- В данном анализе был реализован поиск чувствительных к аномальным взаимодействиям переменных. **Поперечная энергия фотона E_T^γ** оказалась наиболее чувствительной переменной.
- В работе были поставлены одномерные и двумерные, ожидаемые и наблюдаемые **пределы на шесть коэффициентов связи**.
- В рамках данного исследования получено **значительное улучшение пределов** на все коэффициенты связи по сравнению с опубликованными.
- 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.

Спасибо за внимание!

Back-Up

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



Получение границ унитарности

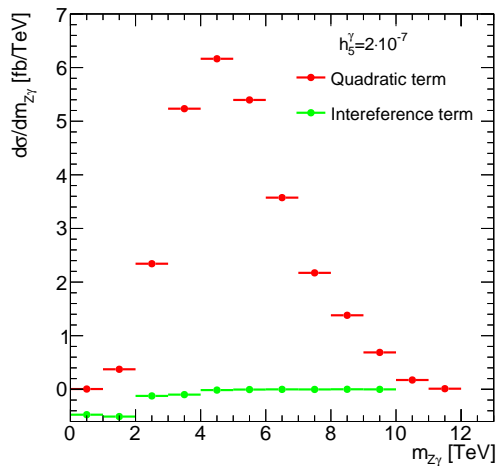
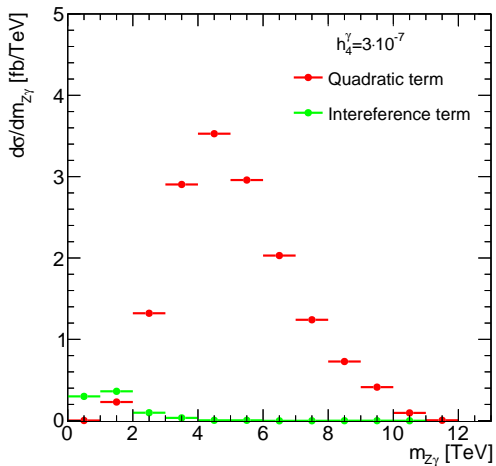
Амплитуда парциальной волны [2]:

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

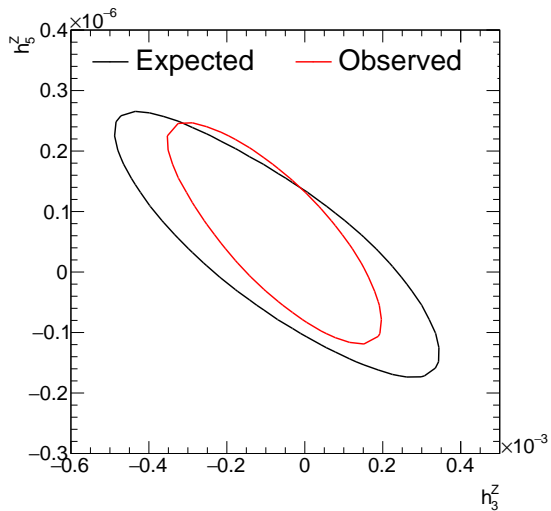
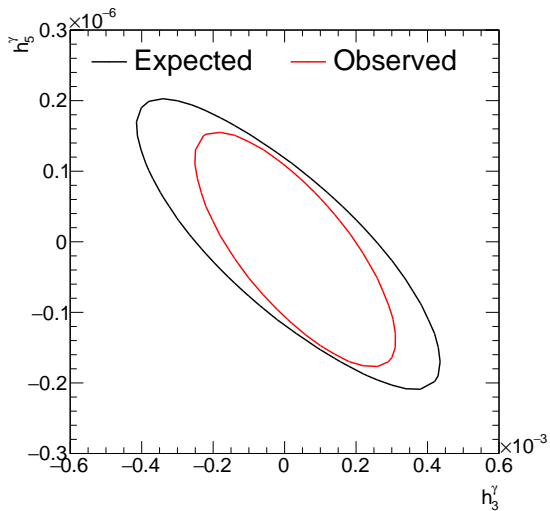
Из оптической теоремы следуют ограничения на амплитуды парциальных волн [6]:

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

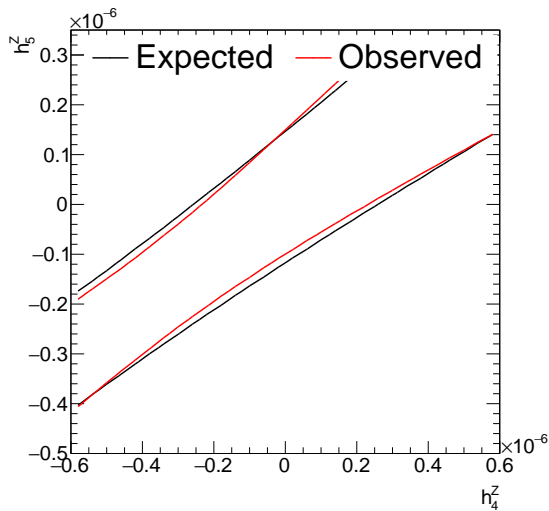
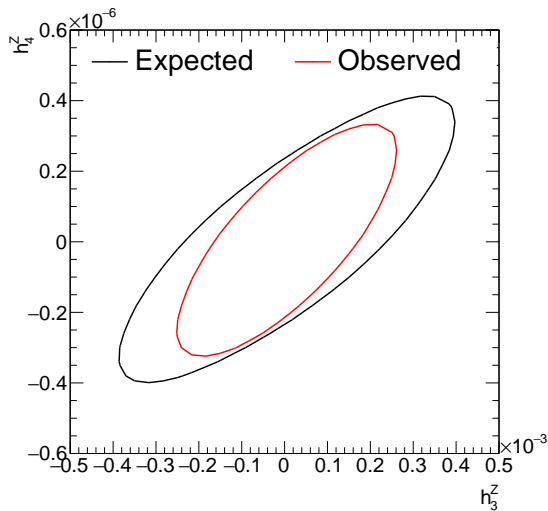
Распределения по $m_{Z\gamma}$



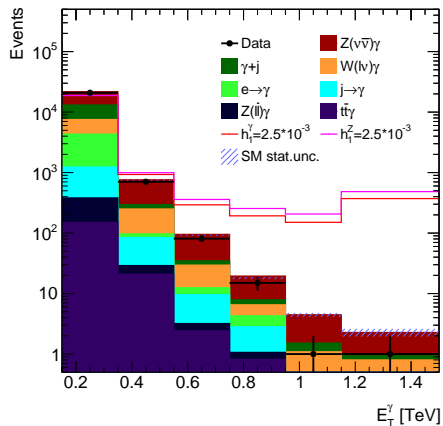
Двумерные пределы



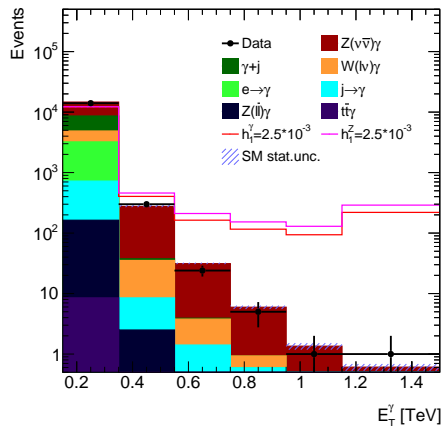
Двумерные пределы



Инклюзивный случай



Эксклюзивный случай

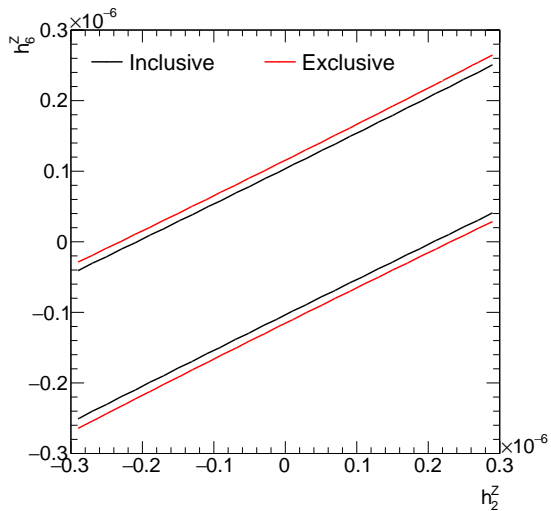
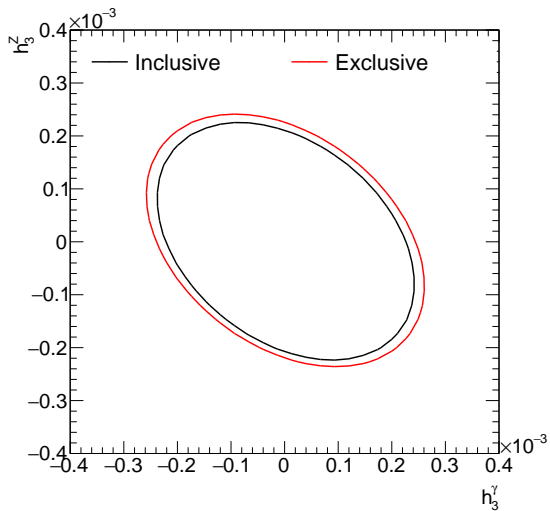


Постановка ожидаемых пределов в рамках предварительных проверок

Наилучшие пределы получены без вето на струи.

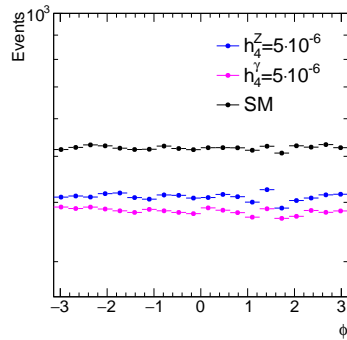
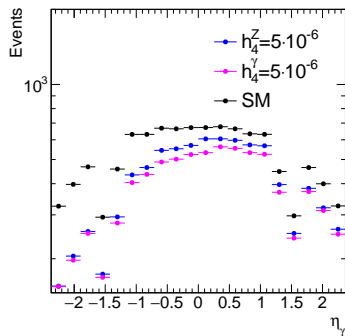
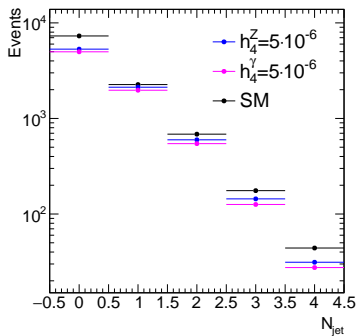
	Метод оптимизации		Пределы, основанные на распределении	
коэф.	Инклюзивный	Эксклюзивный	Инклюзивный	Инклюзивный
h_1^γ	$(-2.7 \times 10^{-4}, 2.8 \times 10^{-4})$	$(-2.6 \times 10^{-4}, 2.7 \times 10^{-4})$	$(-2.6 \times 10^{-4}, 2.6 \times 10^{-4})$	$(-2.6 \times 10^{-4}, 2.6 \times 10^{-4})$
h_1^Z	$(-2.4 \times 10^{-4}, 2.4 \times 10^{-4})$	$(-2.3 \times 10^{-4}, 2.3 \times 10^{-4})$	$(-2.2 \times 10^{-4}, 2.3 \times 10^{-4})$	$(-2.2 \times 10^{-4}, 2.3 \times 10^{-4})$
h_2^γ	$(-2.5 \times 10^{-7}, 2.5 \times 10^{-7})$	$(-2.7 \times 10^{-7}, 2.7 \times 10^{-7})$	$(-2.5 \times 10^{-7}, 2.5 \times 10^{-7})$	$(-2.5 \times 10^{-7}, 2.5 \times 10^{-7})$
h_2^Z	$(-2.3 \times 10^{-7}, 2.3 \times 10^{-7})$	$(-2.5 \times 10^{-7}, 2.5 \times 10^{-7})$	$(-2.2 \times 10^{-7}, 2.2 \times 10^{-7})$	$(-2.2 \times 10^{-7}, 2.2 \times 10^{-7})$
h_3^γ	$(-2.8 \times 10^{-4}, 2.7 \times 10^{-4})$	$(-2.6 \times 10^{-4}, 2.6 \times 10^{-4})$	$(-2.6 \times 10^{-4}, 2.6 \times 10^{-4})$	$(-2.6 \times 10^{-4}, 2.6 \times 10^{-4})$
h_3^Z	$(-2.4 \times 10^{-4}, 2.4 \times 10^{-4})$	$(-2.3 \times 10^{-4}, 2.3 \times 10^{-4})$	$(-2.2 \times 10^{-4}, 2.3 \times 10^{-4})$	$(-2.2 \times 10^{-4}, 2.3 \times 10^{-4})$
h_4^γ	$(-2.4 \times 10^{-7}, 2.4 \times 10^{-7})$	$(-2.7 \times 10^{-7}, 2.6 \times 10^{-7})$	$(-2.5 \times 10^{-7}, 2.4 \times 10^{-7})$	$(-2.5 \times 10^{-7}, 2.4 \times 10^{-7})$
h_4^Z	$(-2.4 \times 10^{-7}, 2.4 \times 10^{-7})$	$(-2.3 \times 10^{-7}, 2.3 \times 10^{-7})$	$(-2.2 \times 10^{-7}, 2.2 \times 10^{-7})$	$(-2.2 \times 10^{-7}, 2.2 \times 10^{-7})$
h_5^γ	$(-1.3 \times 10^{-7}, 1.3 \times 10^{-7})$	$(-1.5 \times 10^{-7}, 1.5 \times 10^{-7})$	$(-1.2 \times 10^{-7}, 1.2 \times 10^{-7})$	$(-1.2 \times 10^{-7}, 1.2 \times 10^{-7})$
h_5^Z	$(-1.1 \times 10^{-7}, 1.1 \times 10^{-7})$	$(-1.4 \times 10^{-7}, 1.4 \times 10^{-7})$	$(-1.1 \times 10^{-7}, 1.1 \times 10^{-7})$	$(-1.1 \times 10^{-7}, 1.1 \times 10^{-7})$
h_6^γ	$(-1.3 \times 10^{-7}, 1.3 \times 10^{-7})$	$(-1.5 \times 10^{-7}, 1.5 \times 10^{-7})$	$(-1.2 \times 10^{-7}, 1.2 \times 10^{-7})$	$(-1.2 \times 10^{-7}, 1.2 \times 10^{-7})$
h_6^Z	$(-1.1 \times 10^{-7}, 1.1 \times 10^{-7})$	$(-1.4 \times 10^{-7}, 1.3 \times 10^{-7})$	$(-1.1 \times 10^{-7}, 1.1 \times 10^{-7})$	$(-1.1 \times 10^{-7}, 1.1 \times 10^{-7})$

Двумерные пределы

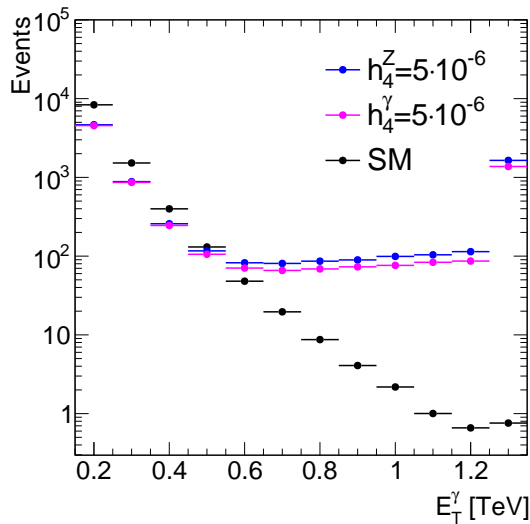
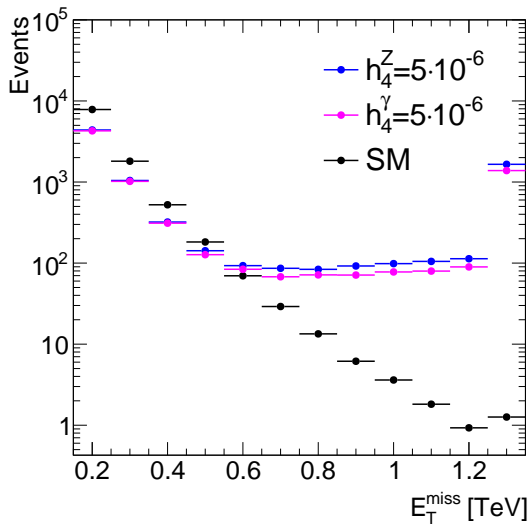


Поиск чувствительной к аномальным взаимодействиям переменной

В работе были рассмотрены следующие простые кинематические переменные: псевдобыстрота фотона, поперечная энергия фотона, недостающий поперечный импульс, количество адронных струй, азимутальный угол между фотоном и недостающим поперечным импульсом, множество других угловых переменных и их комбинаций. Примеры некоторых распределений:

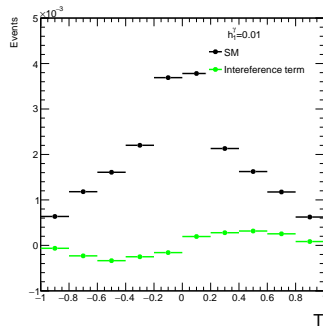
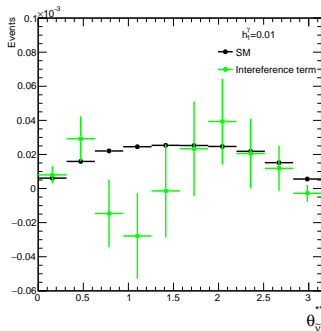
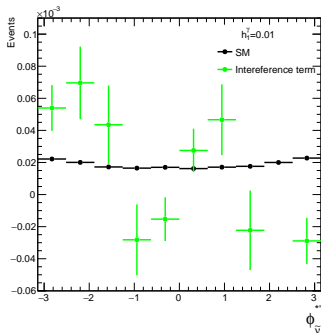


Поиск чувствительной к аномальным взаимодействиям переменной



Чувствительные к CP-нарушению переменные

- для $\bar{\nu}$ при распаде $Z \rightarrow \nu\bar{\nu}$ в система покоя Z -бозона
- ось z определена вдоль направления движения Z -бозона в системе покоя $Z+\gamma$
- новая ось x лежит в одной плоскости с осью z и направлением движения Z -бозона в системе покоя $Z+\gamma$, и имеет то же полярное направление, что и новая ось z
- ось y определена правилом правой руки



$$T = \sin(\phi_{\bar{\nu}}^{*'}) \cos(\theta_{\bar{\nu}}^{*'})$$

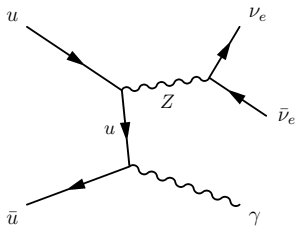
(11)

Исследуемый процесс

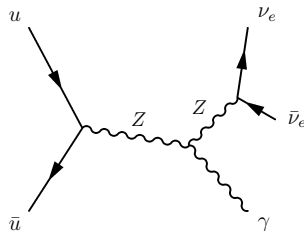
В данной работе исследуются нейтральные трехбозонные вершины на основе процесса рождения $Z(\nu\bar{\nu})\gamma$, т. к. данный процесс имеет высокую чувствительность к нейтральным трехбозонным взаимодействиям.

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 $Z(\nu\bar{\nu})\gamma$ [5]

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^{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	$(E_T^{\text{cone}20} - 0.065 \cdot p_T^\gamma) < 0$
Трековая изоляция	$p_T^{\text{cone}20} / p_T^\gamma < 0.05$
Разность азимутальных углов между p_T^{miss} и фотоном	$\Delta\phi(\vec{p}_T^{\text{miss}}, \gamma) > 0.6$
Разность азимутальных углов между p_T^{miss} и лидирующей струей	$\Delta\phi(\vec{p}_T^{\text{miss}}, j_1) > 0.3$
Количество адронных струй в инклюзивном случае	$N_{\text{jet}} \geq 0$
Количество адронных струй в эксклюзивном случае	$N_{\text{jet}} = 0$