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

07.05.2024

Введение

Цель работы: развитие метода постановки ограничений, получение более строгих пределов на константы связи в вершинном формализме. В рамках поставленной цели нужно выполнить следующие **задачи**:

1. определить чувствительную к аномальным взаимодействиям переменную процесса;
2. поставить пределы на коэффициенты связи;
3. оценить влияние отборов на адронные струи на пределы;
4. установить, являются ли полученные пределы унитаризованными.

Теоретическое введение

Вершинная функция [1, 2, 3]

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

Аномальная добавка [1, 2, 3]

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

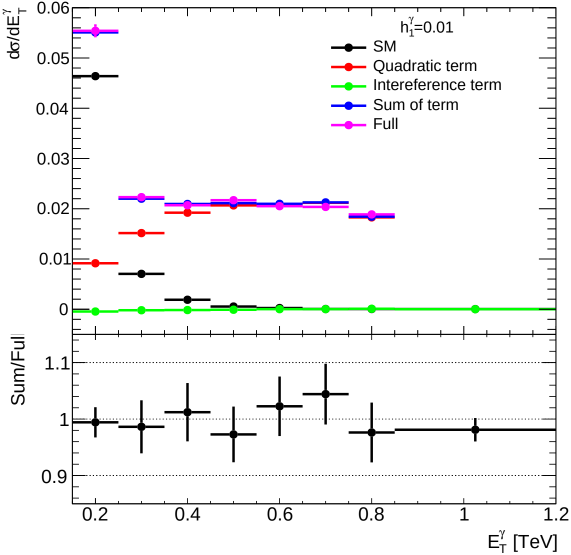
На коэффициенты связи — h_i^V — можно поставить ограничения.

Метод декомпозиции и его проверка

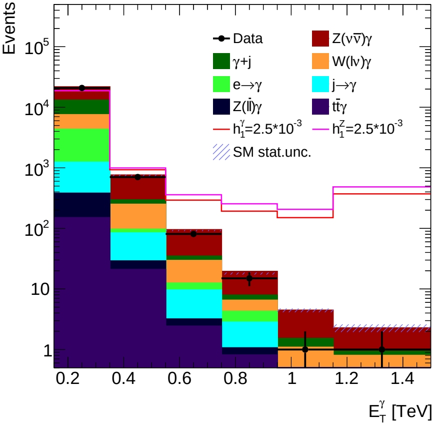
В данной работе использовался **метод декомпозиции**, который является новым для исследования вершинных функций [4].
Метод заключается в том, что наборы генерируются отдельно для линейного, квадратичного слагаемого и слагаемого, отвечающего СМ.

$$\begin{aligned} \mathcal{A} &= \mathcal{A}_{\mathsf{SM}} + h_i \mathcal{A}_i \\ |\mathcal{A}|^2 &= |\mathcal{A}_{\mathsf{SM}}|^2 + h_i 2\mathrm{Re}\mathcal{A}_{\mathsf{SM}}{}^{\dagger}\mathcal{A}_i + h_i^2 |\mathcal{A}_i|^2 \end{aligned} \tag{3}$$

Для моделирования отдельных слагаемых используется **MadGraph5**.



- Монте-Карло моделирование аномальных вкладов: **MadGraph5**.
- Систематическая погрешность принята равной 10%.
- В модели учитываются все фоновые процессы.
- Основные отборы [5]:
  $p_T^{\gamma} > 150$ ГэВ,
  $N_{\gamma} = 1,\ N_{e,\mu} = 0$,
  $E_T^{miss} > 130$ ГэВ,
  Инклюзивный случай: $N_{jet} \geqslant 0$
  Эксклюзивный случай: $N_{jet} = 0$



Постановка ожидаемых пределов

Наилучшие пределы получены без вето на струи.

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

Сравнение ожидаемых полученных в данной работе и опубликованных одномерных пределов с доверительной вероятностью 95% [4, 6]

Коэф.	Полученные пределы	Опубликованные пределы
h_1^γ	$(-2.6\times10^{-4}, 2.6\times10^{-4})$	$(-3.7\times10^{-4}, 3.7\times10^{-4})$
h_1^Z	$(-2.2\times10^{-4}, 2.3\times10^{-4})$	$(-3.3\times10^{-4}, 3.3\times10^{-4})$
h_2^γ	$(-2.5\times10^{-7}, 2.5\times10^{-7})$	—
h_2^Z	$(-2.2\times10^{-7}, 2.2\times10^{-7})$	—
h_3^γ	$(-2.6\times10^{-4}, 2.6\times10^{-4})$	$(-3.7\times10^{-4}, 3.7\times10^{-4})$
h_3^Z	$(-2.2\times10^{-4}, 2.3\times10^{-4})$	$(-3.2\times10^{-4}, 3.3\times10^{-4})$
h_4^γ	$(-2.5\times10^{-7}, 2.4\times10^{-7})$	$(-4.4\times10^{-7}, 4.3\times10^{-7})$
h_4^Z	$(-2.2\times10^{-7}, 2.2\times10^{-7})$	$(-4.5\times10^{-7}, 4.4\times10^{-7})$
h_5^γ	$(-1.2\times10^{-7}, 1.2\times10^{-7})$	—
h_5^Z	$(-1.1\times10^{-7}, 1.1\times10^{-7})$	—
h_6^γ	$(-1.2\times10^{-7}, 1.2\times10^{-7})$	—
h_6^Z	$(-1.1\times10^{-7}, 1.1\times10^{-7})$	—

Унитаризация

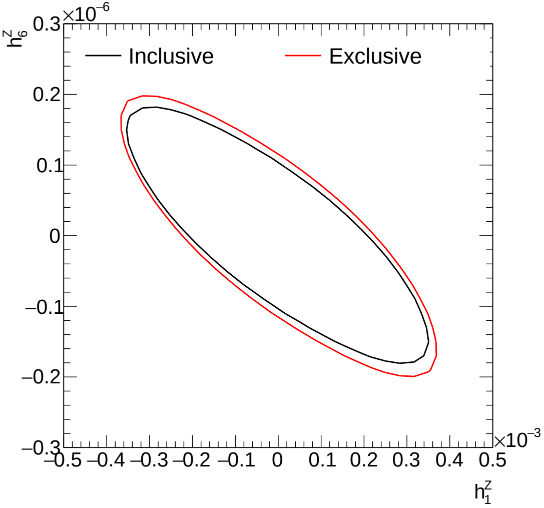
Границы унитарности для четырех коэффициентов связи [3]

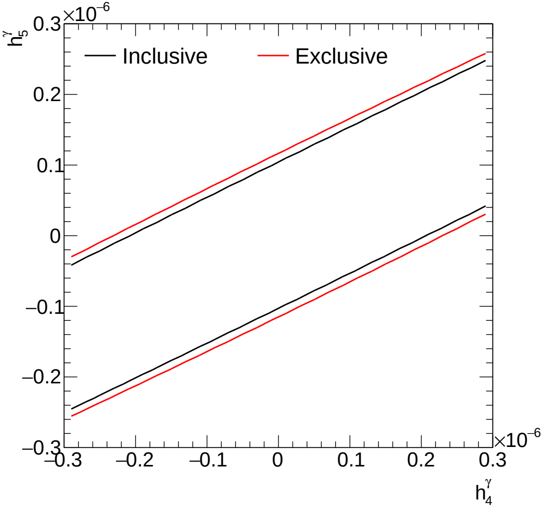
$$|h^{\gamma}_{3,1}| < \frac{6\sqrt{2}\pi v^2 m_Z}{s^2_W c^2_W |Q| \hat{s}^{3/2}}, \qquad |h^{Z}_{3,1}| < \frac{6\sqrt{2}\pi v^2 m_Z}{s_W c_W (T_3 - Q s^2_W) \hat{s}^{3/2}}. \tag{4}$$

Унитарность нарушается при **17 ТэВ** для $h^{\gamma}_{3,1}$ и при **15 ТэВ** для $h^{Z}_{3,1}$.
Полученные значения превышают энергию центра масс $\sqrt{s}$=13 ТэВ, в рамках которой проводится анализ.

Двумерные пределы

$$|\mathcal{A}|^2 = |\mathcal{A}_{\text{SM}}|^2 + h_i^2|\mathcal{A}_i|^2 + h_j^2|\mathcal{A}_j|^2 + h_i 2\text{Re}\mathcal{A}_{\text{SM}}{}^{\dagger}\mathcal{A}_i + h_j 2\text{Re}\mathcal{A}_{\text{SM}}^{\dagger}\mathcal{A}_j + h_i h_j 2\text{Re}\mathcal{A}_i^{\dagger}\mathcal{A}_j \quad (5)$$





Вывод

- Поставленные одномерные и двумерные пределы на коэффициенты связи **в инклюзивном случае оказались лучше**, чем в эксклюзивном,
- В рамках данного исследования получено **значительное улучшение пределов** на все коэффициенты связи по сравнению с опубликованными.
- Полученные пределы для коэффициентов $h^Z_{3,1}$ и $h^\gamma_{3,1}$ являются **унитаризованными** в условиях работы эксперимента АТЛАС.
- Также установлено, что новые коэффициенты h^V_5, h^V_6 являются **полностью коррелирующими** с коэффициентами h^V_4, h^V_2 соответственно.

Дальнейшие планы:

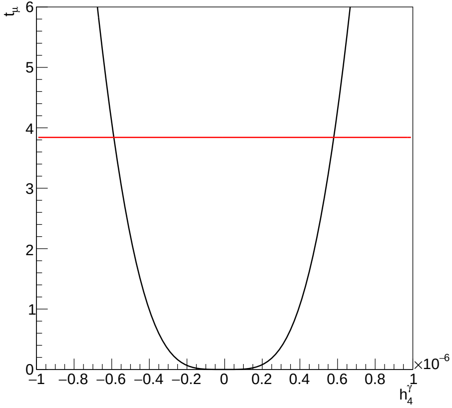
- Создать улучшенную статистическую модель, и проверить полученные результаты для нее. Наборы для аномальный вкладов, включающие полную симуляцию детектора АТЛАС, уже заказаны,т.е. в ближайшее время будут получены более точные результаты.
- Проверить, являются ли пределы на коэффициенты h^γ_4, h^Z_4 унитаризованными.

Спасибо за внимание!

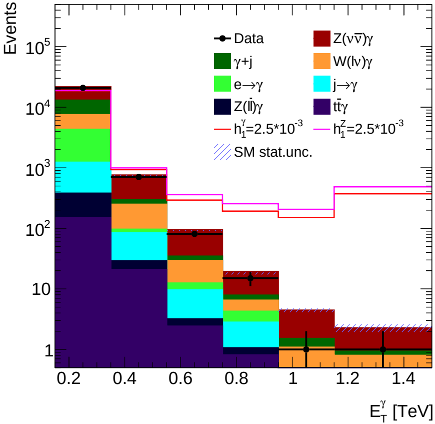
Back-Up

Статистический метод

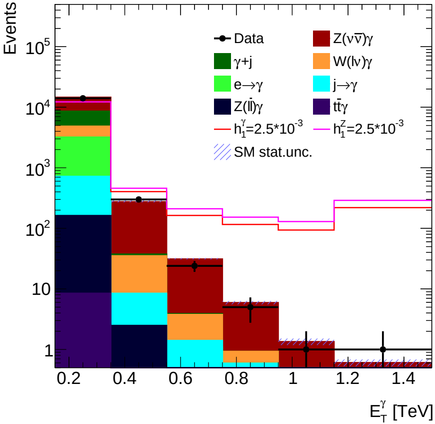
$$t_\mu = -2\ln\frac{L(\mu,\hat{\hat{\theta}}(\mu))}{L(\hat{\mu},\hat{\theta})} \qquad (6)$$



Инклюзивный случай



Эксклюзивный случай



Двумерные пределы