

Определение количества фона $jet + \gamma$ для процесса $Z\gamma \rightarrow (\nu\bar{\nu})\gamma$ в эксперименте ATLAS

Защита преддипломной практики



Науч. руководитель: Е. Ю. Солдатов
Студент: Л. Л. Симбирягин

Москва 2023

Мотивация

Проблемы СМ:

- Проблема иерархии масс
- Масса нейтрино отлична от нуля
- Не описывает гравитационное взаимодействие, частицы скрытой массы и т.д.

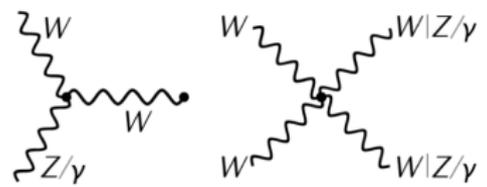


Рис.: Электрослабые бозонные вершины в СМ

Измеряется сечение ассоциированного рождения $Z + \gamma$

$Z \rightarrow$ адроны

$Z \rightarrow$ заряженные лептоны

$Z \rightarrow \nu\bar{\nu}$

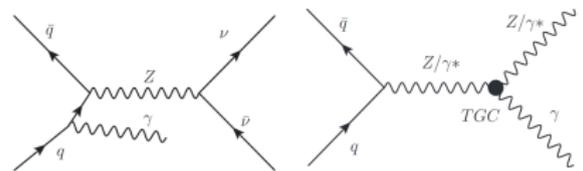


Рис.: Изучаемые диаграммы (правая содержит запрещенную в СМ вершину)

Важный этап - оценка фонов

Отборы и фоны

| Величина | отбор |
|----------------------------------|-------------------------|
| $\Delta\phi(j_1, p_T^{miss})$ | > 0.4 (если есть струи) |
| $\Delta\phi(\gamma, p_T^{miss})$ | > 0.7 |
| p_T^{miss} | > 130 ГэВ |
| p_T^γ | > 150 ГэВ |
| N_γ | = 1 |
| $E_{T}^{cone20} / p_T^\gamma$ | < 0.065 |
| $p_T^{cone20} / p_T^\gamma$ | < 0.05 |
| $ \Delta z $ | < 250 мм |
| лептонное вето | $N_\gamma = 0, N_e = 0$ |
| E_T^{miss} значимость | > 11 |
| $p_T^{SoftTerm}$ | < 16 ГэВ |

$$E_T^{miss} = |\vec{p}_T^{miss}|$$

$$E_T^{miss} \text{ значимость} = \frac{E_T^{miss}}{\sqrt{\sigma_L^2(1 - \rho_{LT}^2)}}$$

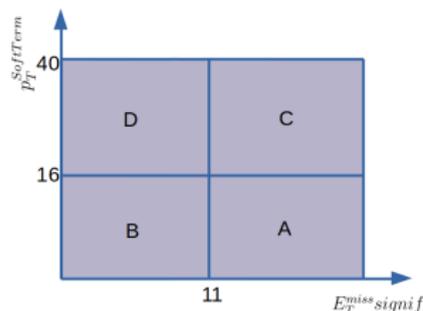
- $\tau\nu\gamma$ и $l\nu\gamma$ от $W\gamma$, где $\tau \rightarrow h$ или когда e или μ не восстановлены или вне покрытия детектора;
- $\gamma + jet$;
- $W(e\nu)$, t и $t\bar{t}$, где $e \rightarrow \gamma$;
- $Z(\nu\bar{\nu}) + jets$, где $s jet \rightarrow \gamma$;
- $Z(l\bar{l}) + \gamma$, где $\tau \rightarrow h$ или когда e или μ не восстановлены или вне покрытия детектора;

Оценку фона $\gamma + jet$ необходимо производить из данных, так как он возникает вследствие неверной идентификации объекта
Фон $\gamma + jet$ является доминирующим

| | data | $\gamma + jet$ | $W\gamma$ | $Z(l\bar{l})\gamma$ | $e \rightarrow \gamma$ | $j \rightarrow \gamma$ | $tt\gamma$ |
|----------------|-----------------|----------------|---------------|---------------------|------------------------|------------------------|-----------------|
| кол-во событий | 21649 ± 147 | 6451 ± 73 | 3386 ± 21 | 240 ± 4 | 2511 ± 11 | 665 ± 53 | 174.9 ± 2.8 |
| доля, % | | 29.8 | 15.6 | 1.1 | 11.6 | 3.1 | 0.8 |

Таблица: Число событий для данных и фонов в сигнальной области

ABCD-метод (1)



Основные допущения:

- Отсутствие корреляции между базисными переменными ($R = 1$)
- Коэффициенты утечки сигнала c_i верно предсказываются Монте-Карло

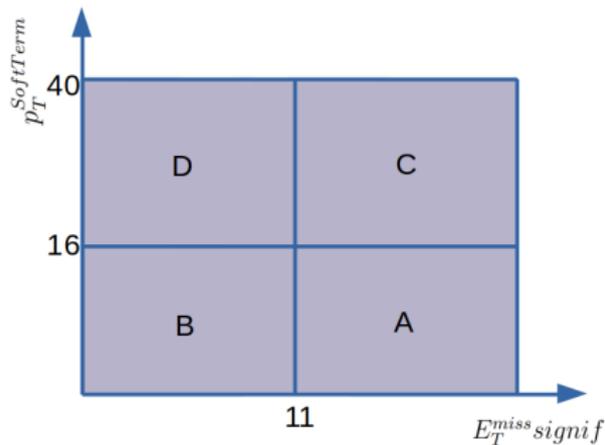
$$R = \frac{N_A^{\gamma+jet} N_D^{\gamma+jet}}{N_B^{\gamma+jet} N_C^{\gamma+jet}}$$

$$c_i = \frac{N_i^{Z(\nu\bar{\nu})\gamma}}{N_A^{Z(\nu\bar{\nu})\gamma}}$$

| | data | $W\gamma$ | $Z(l\bar{l})\gamma$ | $e \rightarrow \gamma$ | $j \rightarrow \gamma$ | $tt\gamma$ |
|---|-----------------|---------------|---------------------|------------------------|------------------------|-----------------|
| A | 21649 ± 147 | 3386 ± 21 | 240 ± 4 | 2511 ± 11 | 665 ± 53 | 174.9 ± 2.8 |
| B | 14559 ± 121 | 1565 ± 12 | 96.3 ± 2.5 | 514 ± 5 | 310 ± 71 | 327.8 ± 3.9 |
| C | 4835 ± 70 | 707 ± 10 | 46.1 ± 1.8 | 361 ± 4 | 217 ± 40 | 58.5 ± 1.7 |
| D | 4321 ± 66 | 372 ± 6 | 23.1 ± 1.3 | 130.5 ± 2.4 | 85 ± 10 | 103.9 ± 2.2 |

Таблица: Число событий для данных и фонов кроме $\gamma + jet$

ABCD-метод (2)



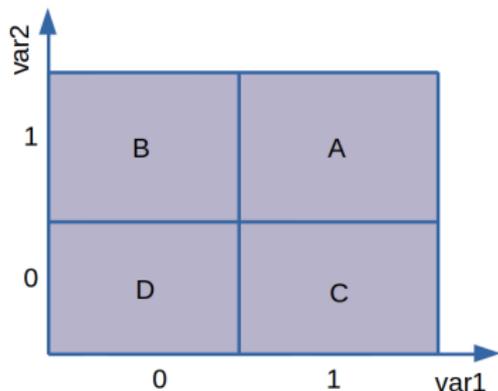
$$\begin{cases} N_A = N_A^{Z(\nu\bar{\nu})\gamma} + N_A^{bkg} + N_A^{\gamma+jet} \\ N_B = c_B N_A^{Z(\nu\bar{\nu})\gamma} + N_B^{bkg} + N_B^{\gamma+jet} \\ N_C = c_C N_A^{Z(\nu\bar{\nu})\gamma} + N_C^{bkg} + N_C^{\gamma+jet} \\ N_D = c_D N_A^{Z(\nu\bar{\nu})\gamma} + N_D^{bkg} + N_D^{\gamma+jet} \end{cases}$$

$$\tilde{N}_i = N_i - N_i^{bkg}$$

$$N_A^{Z(\nu\bar{\nu})\gamma} = \frac{b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

$$\begin{cases} a = c_D - R c_C c_B \\ b = \tilde{N}_D + c_D \tilde{N}_A - R(c_B \tilde{N}_C + c_C \tilde{N}_B) \\ c = \tilde{N}_A \tilde{N}_D - R \tilde{N}_C \tilde{N}_B. \end{cases}$$

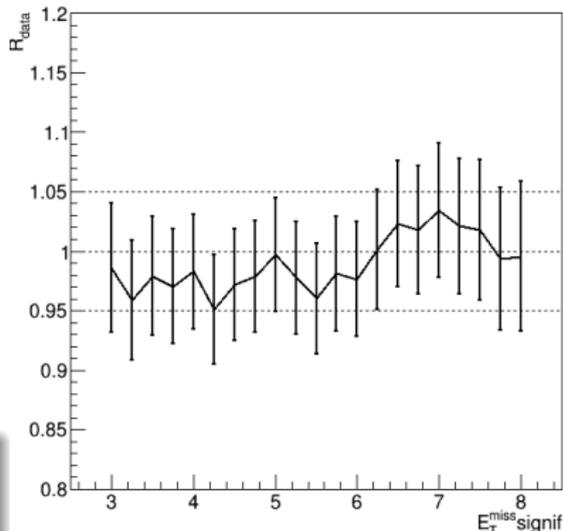
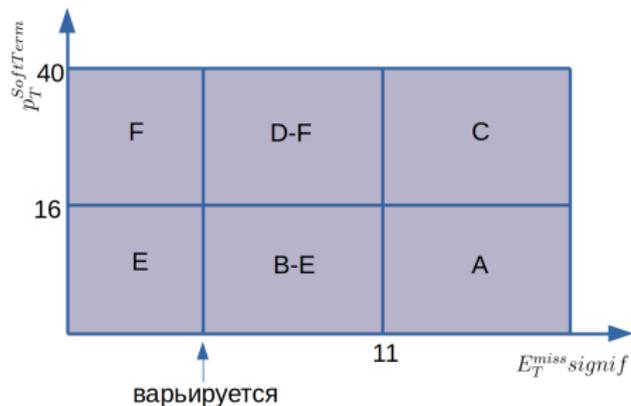
ABCD-метод. Логические конфигурации



| Переменная | Отборы | R | ΔR |
|------------|---|------|------------|
| var1 | $E_T^{miss} \text{ signif} > 11$ | 6.26 | 0.16 |
| var2 | $\Delta\phi(\gamma, p_T^{miss}) > 0.6 \ \&\& \ \Delta\phi(j_1, p_T^{miss})$ | | |
| var1 | $p_T^{miss} > 130 \text{ ГэВ} \ \&\& \ E_T^{miss} \text{ signif} > 11$ | 5.96 | 0.14 |
| var2 | $\Delta\phi(\gamma, p_T^{miss}) > 0.6 \ \&\& \ \Delta\phi(j_1, p_T^{miss})$ | | |
| var1 | $E_T^{miss} \text{ signif} > 11$ | 1.29 | 0.04 |
| var2 | $p_T^{SoftTerm} < 16 \text{ ГэВ}$ | | |
| var1 | $p_T^{miss} > 130 \text{ ГэВ}$ | 1.40 | 0.15 |
| var2 | $p_T^{SoftTerm} < 16 \text{ ГэВ}$ | | |
| var1 | $E_T^{miss} \text{ signif} > 11 \ \&\& \ p_T^{miss} > 130 \text{ ГэВ}$ | 1.33 | 0.04 |
| var2 | $p_T^{SoftTerm} < 16 \text{ ГэВ}$ | | |
| var1 | $E_T^{miss} \text{ signif} > 11 \ \&\& \ \Delta\phi(\gamma, p_T^{miss}) > 0.6 \ \&\& \ \Delta\phi(j_1, p_T^{miss})$ | 1.22 | 0.03 |
| var2 | $p_T^{SoftTerm} < 16 \text{ ГэВ}$ | | |

Таблица: Исследованные логические конфигурации для ABCD-метода

Расширенный ABCD-метод



$$R_{mc}^{SR} = \frac{N_A^{\gamma+jet(mc)} N_D^{\gamma+jet(mc)}}{N_B^{\gamma+jet(mc)} N_C^{\gamma+jet(mc)}} \rightarrow$$

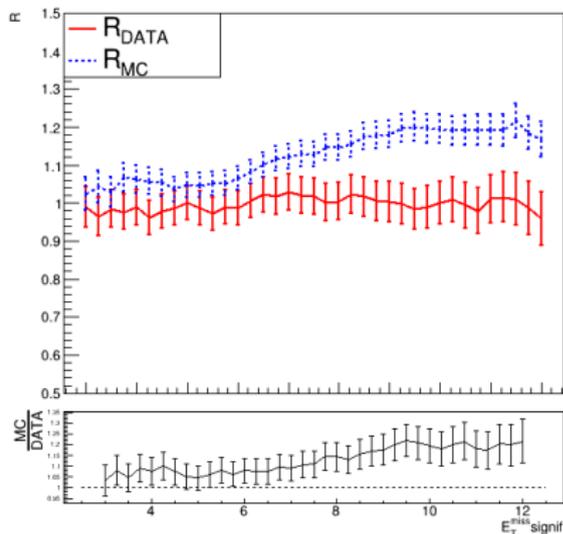
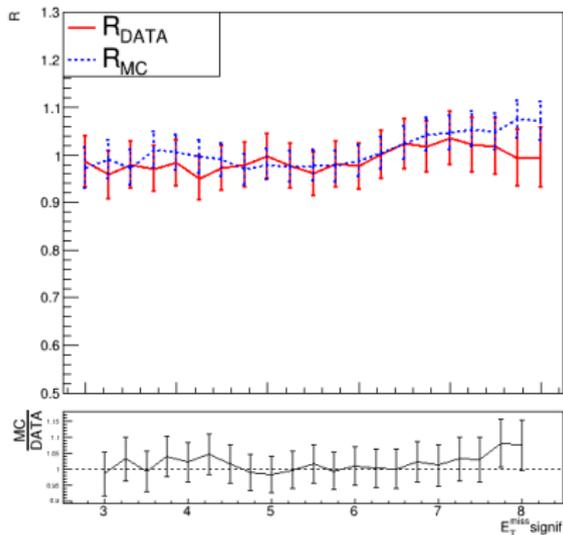
$$\rightarrow R_{data} = \frac{N_{B-E}^{\gamma+jet(data)} N_F^{\gamma+jet(data)}}{N_{D-F}^{\gamma+jet(data)} N_E^{\gamma+jet(data)}}$$

$$N_i^{\gamma+jet(data)} = N_i^{data} - N_i^{Z(\nu\bar{\nu})\gamma} - N_i^{bkg}$$

$$R_{mc}^{SR} = 1.29 \pm 0.04$$

$$R_{data} = 1.00 \pm 0.05$$

Сравнение оценки R из данных и из Монте-Карло



$$R_{mc} = \frac{N_{B-E}^{\gamma+jet(mc)} N_F^{\gamma+jet(mc)}}{N_{D-F}^{\gamma+jet(mc)} N_E^{\gamma+jet(mc)}}$$

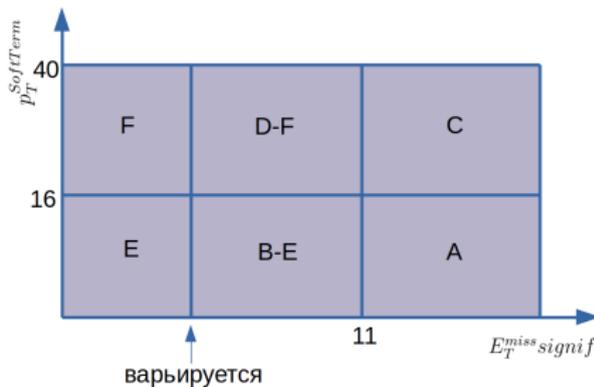
Сравнить оценку из данных и из Монте-Карло можно только в расширенной области. С этой целью вводится R_{mc} . Для определения тренда сигнальный отбор по E_T^{miss} значимости поднимается с 11 до 15.

Оценка + погрешности (1)

Статистическая погрешность: 5481^{+772}_{-754}

Систематическая погрешность обусловлена:

- Зависимостью значения R от положения границы по переменной $E_T^{miss\ signif}$ для регионов E и F
- Величиной верхнего ограничивающего значения по переменной $p_T^{SoftTerm}$
- Определением коэффициентов утечки сигнала c_i



| R | Центр. знач. | Отклонение | Отн. отклонение |
|------|--------------|------------|-----------------|
| 1.00 | 5481 | | |
| 1.05 | 6233 | +752 | 13.7% |
| 0.95 | 4841 | -640 | 11.7% |

Таблица: Систематическая погрешность от значения R

Оценка + погрешности (2)

| Отбор | Центр. знач. | Отклонение | Отн. отклонение |
|-----------------------------------|--------------|------------|-----------------|
| $p_T^{\text{Soft Term}} < 40$ ГэВ | 5481 | | |
| $p_T^{\text{Soft Term}} < 36$ ГэВ | 5579 | +98 | 1.8% |
| $p_T^{\text{Soft Term}} < 44$ ГэВ | 5390 | -91 | 1.7% |

Таблица: Систематическая погрешность от варьирования верхнего ограничения на $p_T^{\text{Soft Term}}$

| c_i | Sherpa 2.2 | MadGraph+Pythia8 | Отклонение | Отн. отклонение |
|--------------|-----------------------|----------------------|------------|-----------------|
| c_B | 0.1595 ± 0.0003 | 0.1420 ± 0.0013 | -0.0175 | 11.0% |
| c_C | 0.1844 ± 0.0004 | 0.1874 ± 0.0016 | +0.003 | 1.6% |
| c_D | 0.03483 ± 0.00015 | 0.0287 ± 0.0006 | -0.00613 | 17.6% |
| Центр. знач. | 5481^{+772}_{-754} | 5229^{+777}_{+759} | -252 | 4.6% |

Таблица: Систематическая погрешность от ошибки в определении коэффициентов утечки c_i

Оценка + погрешности (3)

| Тип | Источник | Отклонение | Отн. отклонение |
|-----------------|-----------------------------------|------------|-----------------|
| статистическая | | +772 | 14.1% |
| | | -754 | 13.8% |
| систематическая | флуктуации R | +752 | 13.7% |
| | | -640 | 11.7% |
| систематическая | параметры утечки сигнала | -252 | 4.6% |
| систематическая | верхний отбор по $p_T^{SoftTerm}$ | +98 | 1.8% |
| | | -91 | 1.7% |

Таблица: Источники погрешности для оценки фона $\gamma + jet$

Итоговая оценка числа событий $\gamma + jet$ в сигнальном регионе с учетом статистической и систематической погрешности составляет

$$5436_{-754-694}^{+772+799} \text{ событий}$$

Заключение

В ходе проделанной работы

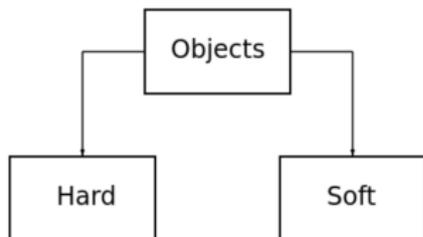
- Изучен ABCD-метод для оценки фоновых процессов
- Подобрана конфигурация областей, используемых в методе
- Произведено сравнение данных с результатами моделирования
- Получено центральное значение, а также статистическая и систематическая погрешности для числа событий $\gamma + jet$:

$$5436^{+772+799}_{-754-694}$$

Также планируется

- Предпринять попытку оценки формы распределений по кинематическим переменным для данного фона

Резерв (1)



К *SoftTerm* относятся сигналы детектора, ассоциированные с первичной вершиной, но не ассоциированные ни с одним из восстановленных объектов. Прежде всего это мягкие адронные струи или низкоэнергетическая адронная активность в калориметре.

Переменная E_T^{cone20} представляет собой энергосодержание в электромагнитном калориметре в конусе с раствором $\Delta R = 0.2$ вокруг фотонного кандидата, а p_T^{cone20} есть сумма поперечных импульсов в том же самом конусе.

$$\Delta R = \sqrt{\Delta\eta^2 + \Delta\phi^2}$$

$$\vec{p}_T^{miss} = -\sum \vec{p}_T^e - \sum \vec{p}_T^\mu - \sum \vec{p}_T^\gamma - \sum \vec{p}_T^{jets} - \sum \vec{p}_T^{SoftTerm}$$

Резерв (2)

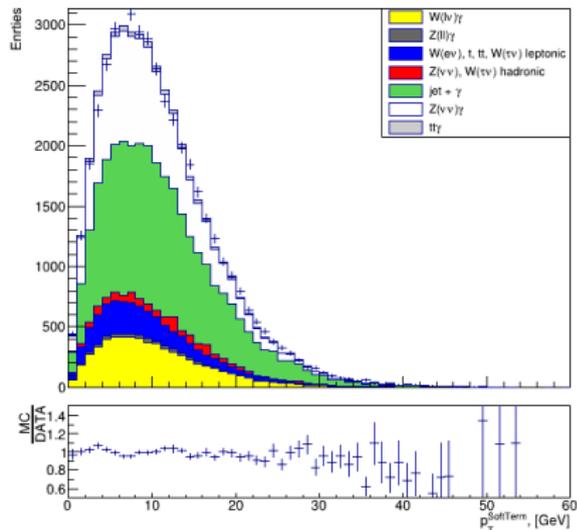
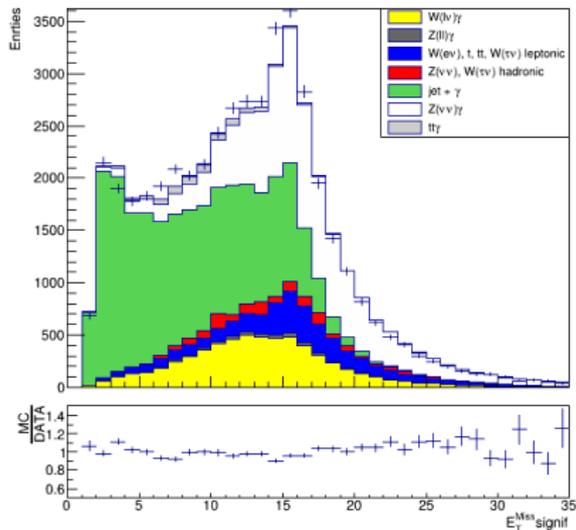


Рис.: Распределения по E_T^{miss} значимость и p_T^{SoftTerm} , построенные без отборов на эти переменные

Резерв (3)

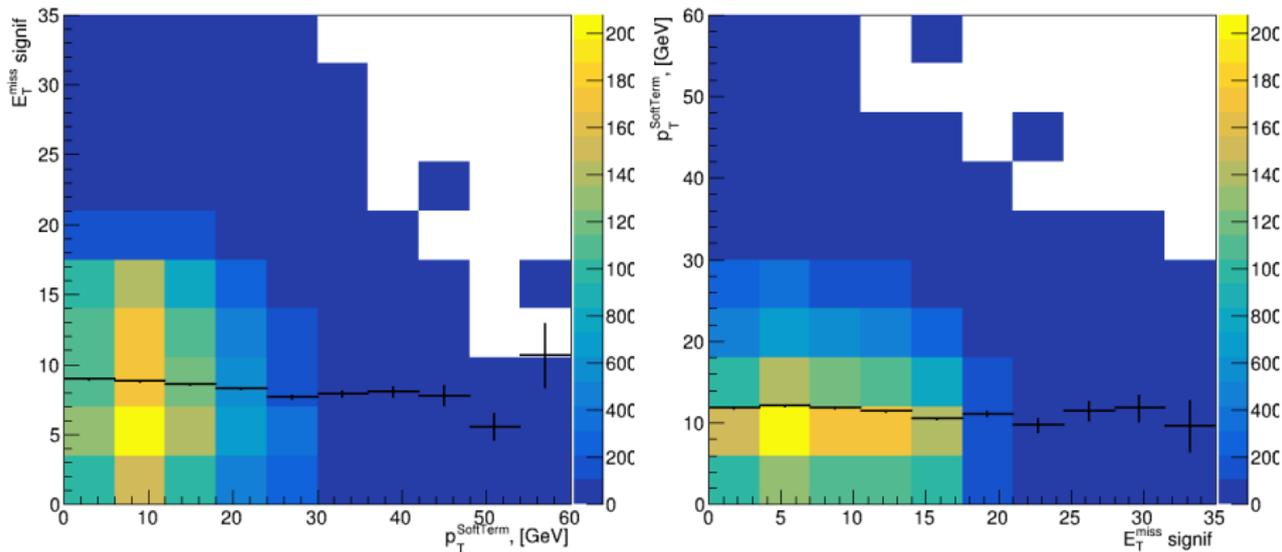


Рис.: Профильные гистограммы для установления корреляции по переменным $E_T^{\text{miss}} \text{ значимость}$ и p_T^{SoftTerm} . Сняты отборы только по этим переменным

Резерв (4)

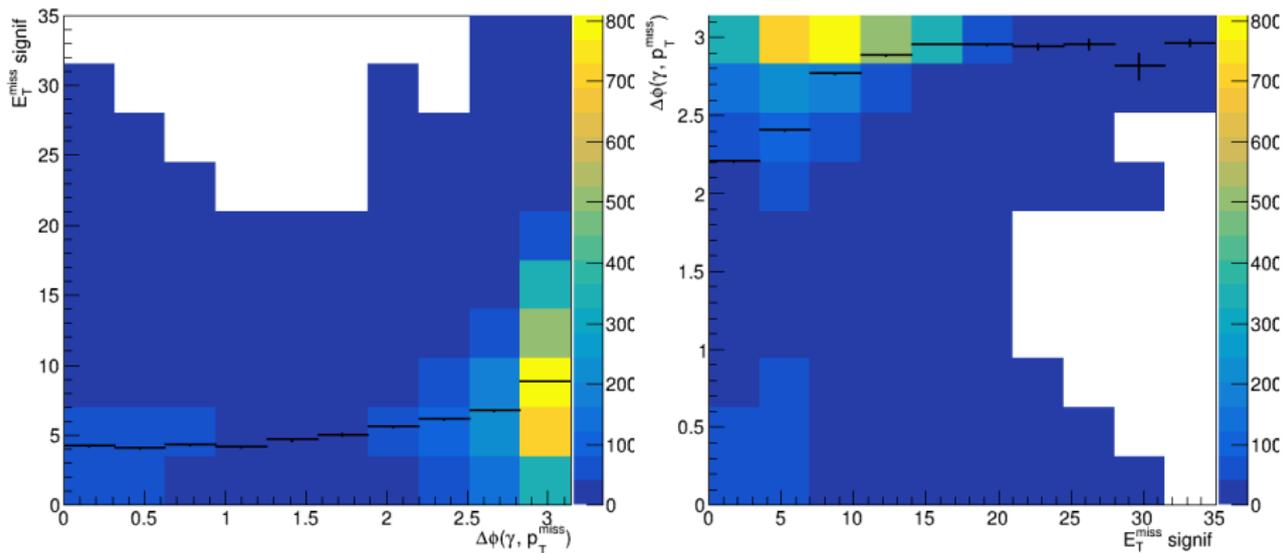


Рис.: Профильные гистограммы для установления корреляции по переменным E_T^{miss} значимость и $\Delta\phi(\gamma, p_T^{\text{miss}})$. Сняты угловые отборы и отбор по E_T^{miss} значимость

Резерв (5)

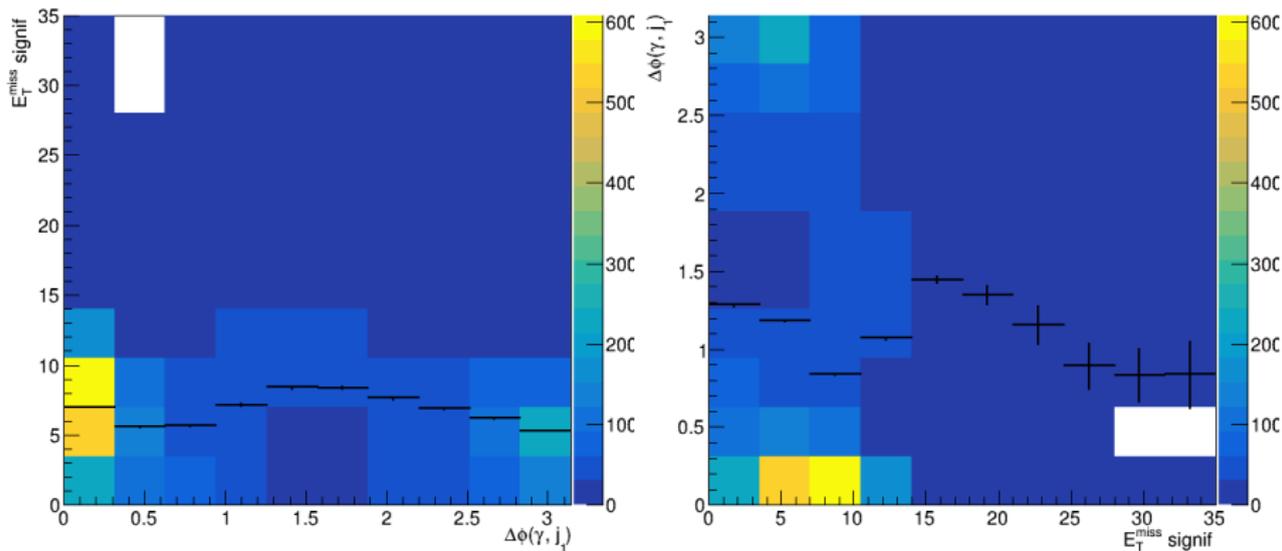


Рис.: Профильные гистограммы для установления корреляции по переменным E_T^{miss} значимость и $\Delta\phi(\gamma, j_1)$. Сняты угловые и отбор по E_T^{miss} значимость