

# 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.

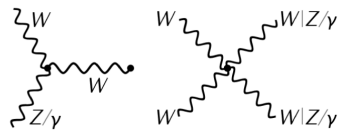


Рис.: Электрослабые бозонные вершины в СМ

Измеряется сечение ассоциированного рождения  $Z + \gamma$

$Z \rightarrow$  адроны

$Z \rightarrow$  заряженные лептоны

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

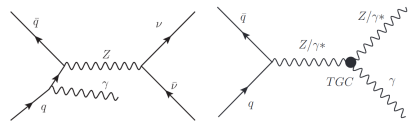


Рис.: Изучаемые диаграммы (правая содержит запрещенную в СМ вершину)

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
$p_T^\gamma$	> 150 ГэВ
$N_\gamma$	= 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

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

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

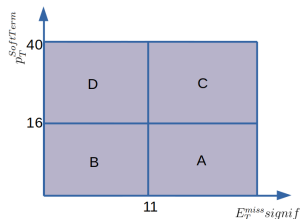
- $\tau\nu\gamma$  и  $l\nu\gamma$  от  $W\gamma$ , где  $\tau \rightarrow h$  или когда  $e$  или  $\mu$  не восстановлены или вне покрытия детектора;
- $\gamma + jet$ ;
- $W(e\nu)$ ,  $t$  и  $t\bar{t}$ , где  $e \rightarrow \gamma$ ;
- $Z(\nu\bar{\nu}) + jets$ , где  $s jet \rightarrow \gamma$ ;
- $Z(l\bar{l}) + \gamma$ , где  $\tau \rightarrow h$  или когда  $e$  или  $\mu$  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	$21649 \pm 147$	$6451 \pm 73$	$3386 \pm 21$	$240 \pm 4$	$2511 \pm 11$	$665 \pm 53$	$174.9 \pm 2.8$
доля, %		<b>29.8</b>	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

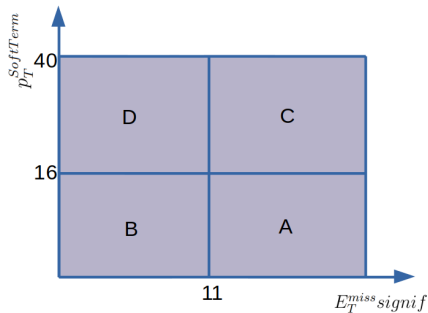
$$R = \frac{N_A^{\gamma+jet} N_D^{\gamma+jet}}{N_B^{\gamma+jet} N_C^{\gamma+jet}}$$

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

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

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

# ABCD-метод (2)



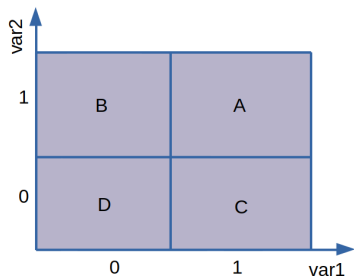
$$\begin{cases} N_A = N_A^{Z(\nu\bar{\nu})\gamma} + N_A^{\text{bkg}} + N_A^{\gamma+\text{jet}} \\ N_B = c_B N_A^{Z(\nu\bar{\nu})\gamma} + N_B^{\text{bkg}} + N_B^{\gamma+\text{jet}} \\ N_C = c_C N_A^{Z(\nu\bar{\nu})\gamma} + N_C^{\text{bkg}} + N_C^{\gamma+\text{jet}} \\ N_D = c_D N_A^{Z(\nu\bar{\nu})\gamma}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

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

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

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

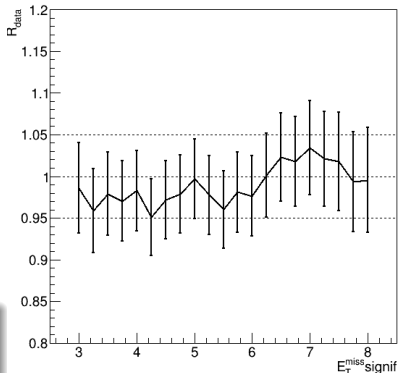
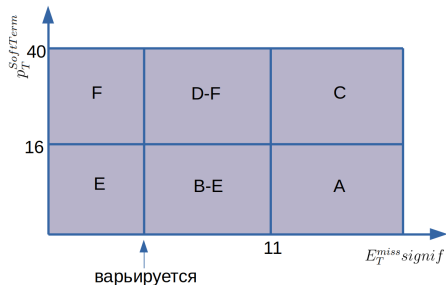
# ABCD-метод. Логические конфигурации



Переменная	Отборы	R	$\Delta R$
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



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

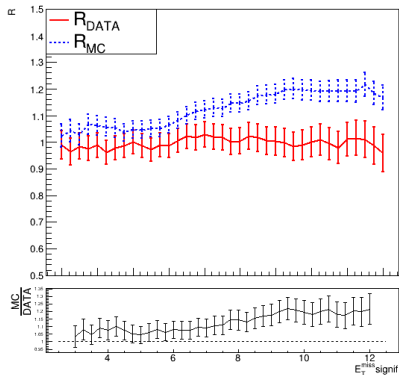
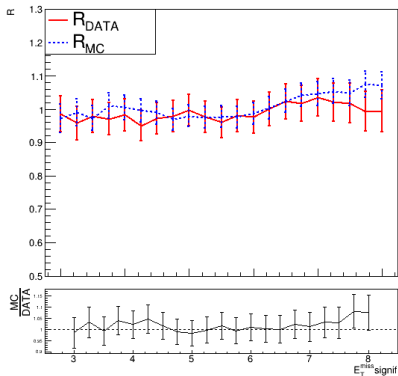
$$\rightarrow R_{data} = \frac{N_{B-E}^{\gamma+jet(data)} N_F^{\gamma+jet(data)}}{N_{D-F}^{\gamma+jet(data)} N_E^{\gamma+jet(data)}}$$

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

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

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

# 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 сигналный отбор по  $E_T^{\text{miss}}$  значимости поднимается с 11 до 15.

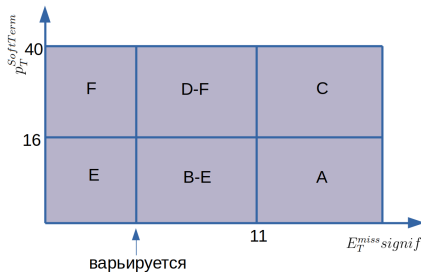


# Оценка + погрешности (1)

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
$c_B$	$0.1595 \pm 0.0003$	$0.1420 \pm 0.0013$	-0.0175	11.0%
$c_C$	$0.1844 \pm 0.0004$	$0.1874 \pm 0.0016$	+0.003	1.6%
$c_D$	$0.03483 \pm 0.00015$	$0.0287 \pm 0.0006$	-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

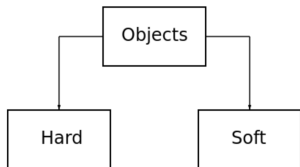
- Изучен ABCD-метод для оценки фоновых процессов
- Подобрана конфигурация областей, используемых в методе
- Произведено сравнение данных с результатами моделирования
- Получено центральное значение, а также статистическая и систематическая погрешности для числа событий  $\gamma + jet$ :

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

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 энерговыделение 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)

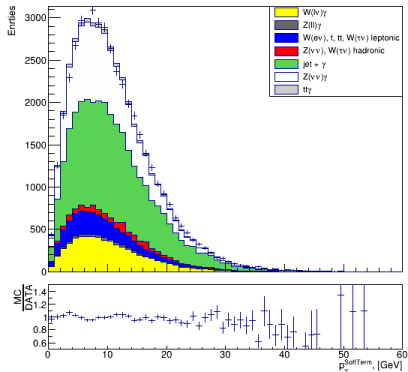
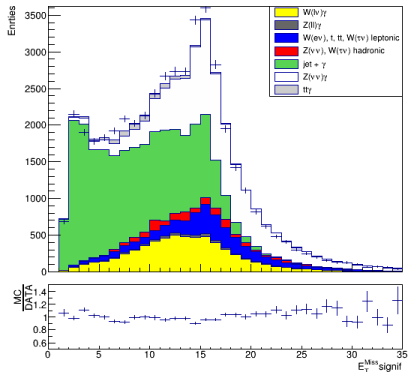


Рис.: Распределения по  $E_T^{\text{miss}}$  значимость и  $p_T^{\text{SoftTerm}}$ , построенные без отборов на эти переменные

# Резерв (3)

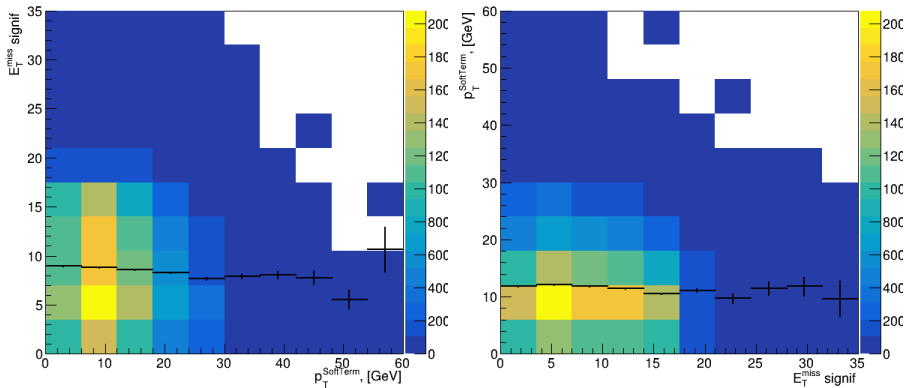


Рис.: Профильные гистограммы для установления корреляции по переменным  $E_T^{\text{miss}} \text{ значимость}$  и  $p_T^{\text{SoftTerm}}$ . Сняты отборы только по этим переменным

# Резерв (4)

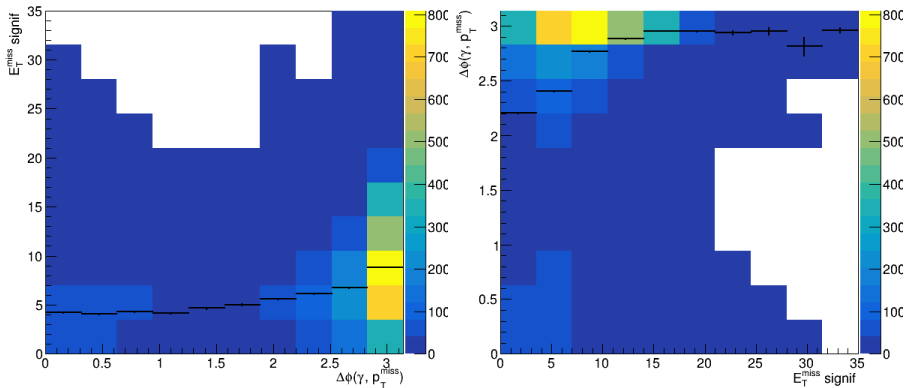


Рис.: Профильные гистограммы для установления корреляции по переменным  $E_T^{\text{miss}}$  значимость и  $\Delta\phi(\gamma, p_T^{\text{miss}})$ . Сняты угловые отборы и отбор по  $E_T^{\text{miss}}$  значимость



# Резерв (5)

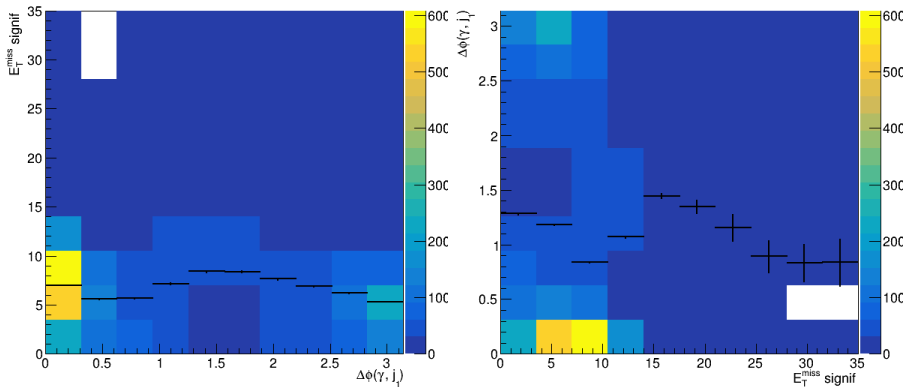


Рис.: Профильные гистограммы для установления корреляции по переменным  $E_T^{\text{miss}}$  значимость и  $\Delta\phi(\gamma, j_1)$ . Сняты угловые и отбор по  $E_T^{\text{miss}}$  значимость