

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Кафедра физики элементарных частиц №40

Защита выпускной квалификационной работы бакалавра

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



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

Москва 2023

Мотивация

Проблемы СМ:

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

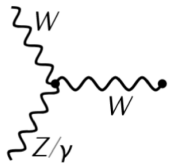


Рис.: Электрослабые трехбозонные вершины в СМ

Измеряется сечение ассоциированного рождения $Z + \gamma$ в pp столкновениях

$Z \rightarrow$ адроны

$Z \rightarrow$ заряженные лептоны

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

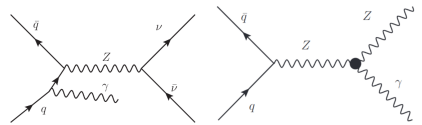


Рис.: Изучаемые диаграммы (правая содержит запрещенную в СМ вершину)

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	$N_\mu = 0, N_e = 0$
E_T^{miss} значимость	> 11
$p_T^{SoftTerm}$	< 16 ГэВ

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

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

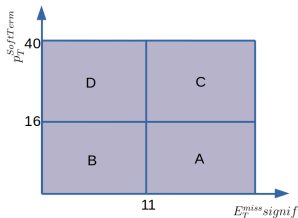
- $\tau\nu\gamma$ и $l\nu\gamma$ от $W\gamma$, где $\tau \rightarrow h$ или когда e или μ не восстановлены или вне покрытия детектора;
- $\gamma + jet$;
- $W(e\nu)$, t и $t\bar{t}$, где $e \rightarrow \gamma$;
- $Z(\nu\bar{\nu}) + jets$, где $jet \rightarrow \gamma$;
- $Z(l\bar{l}) + \gamma$, где $\tau \rightarrow h$ 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	$\gamma + jet$	$W\gamma$	$Z(l\bar{l})\gamma$	$e \rightarrow \gamma$	$j \rightarrow \gamma$	$t\bar{t}\gamma$
кол-во событий	21650 ± 150	6450 ± 70	3390 ± 20	240 ± 4	2510 ± 11	670 ± 50	175 ± 3
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

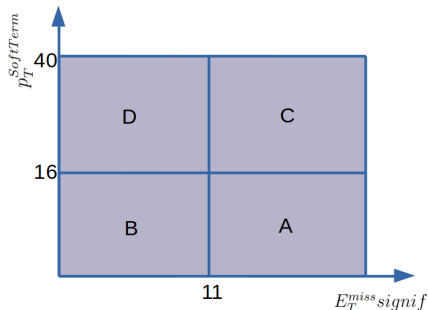
$$R = \frac{N_A^{\gamma+jet} N_D^{\gamma+jet}}{N_B^{\gamma+jet} N_C^{\gamma+jet}}$$

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

	data	$W\gamma$	$Z(\ell)\gamma$	$e \rightarrow \gamma$	$j \rightarrow \gamma$	$tt\gamma$
A	21650 ± 150	3390 ± 20	240 ± 4	2510 ± 11	670 ± 50	175 ± 3
B	14560 ± 120	1570 ± 12	96 ± 3	514 ± 5	310 ± 70	328 ± 4
C	4840 ± 70	710 ± 10	46 ± 2	361 ± 4	220 ± 40	59 ± 2
D	4320 ± 70	372 ± 6	23 ± 1	131 ± 2	90 ± 10	104 ± 2

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

ABCD-метод (2)



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

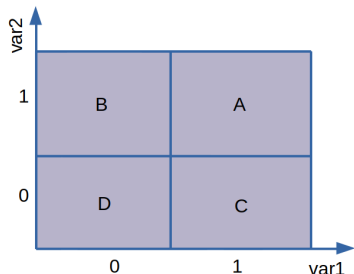
$$\tilde{N}_i = N_i - N_i^{bkg}$$

Разрешаем систему относительно $N_A^{Z(\nu\bar{\nu})\gamma}$:

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

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

ABCD-метод. Логические конфигурации

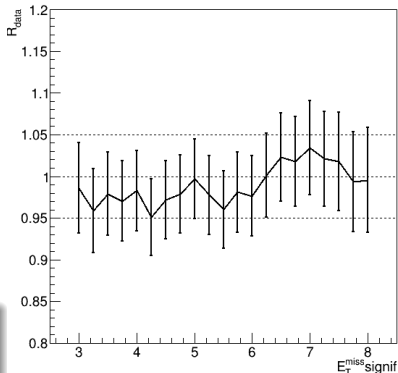
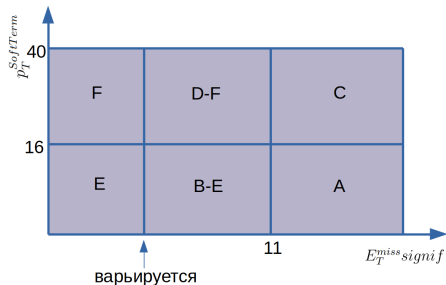


Переменная	Отборы	R	ΔR
var1 var2	$E_T^{miss} \text{ signif} > 11$ $\Delta\phi(\gamma, p_T^{miss}) > 0.6 \ \&\& \ \Delta\phi(j_1, p_T^{miss})$	6.26	0.16
var1 var2	$p_T^{miss} > 130 \text{ ГэВ} \ \&\& \ E_T^{miss} \text{ signif} > 11$ $\Delta\phi(\gamma, p_T^{miss}) > 0.6 \ \&\& \ \Delta\phi(j_1, p_T^{miss})$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

Таблица: Исследованные логические конфигурации для ABCD-метода

R оценивается на основе Монте-Карло моделирования. Ни одна из рассмотренных конфигураций не может считаться удовлетворительной, т.к. при попытках произвести дальнейшие расчеты возникают неправдоподобные результаты. В связи с этим встает вопрос о достоверности результатов оценки R из моделирования.

Расширенный ABCD-метод (оценка R из данных)



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

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

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

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

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

Сравнение оценки R из данных и из Монте-Карло

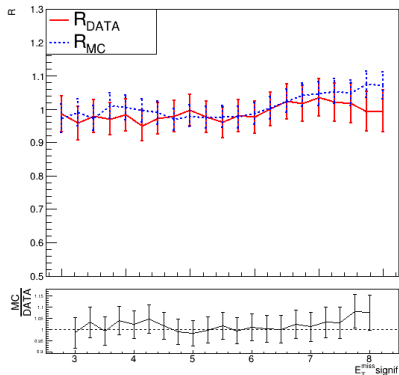


Рис.: Сравнение R_{data} и R_{mc} при отборе E_T^{miss} значимость < 11

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

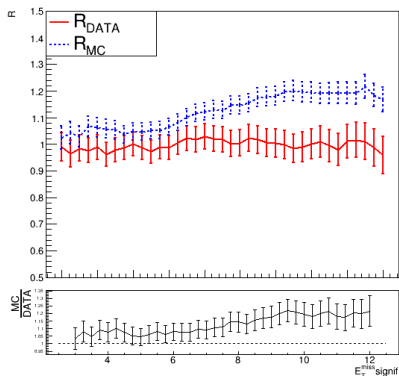


Рис.: Сравнение R_{data} и R_{mc} при отборе E_T^{miss} значимость < 15

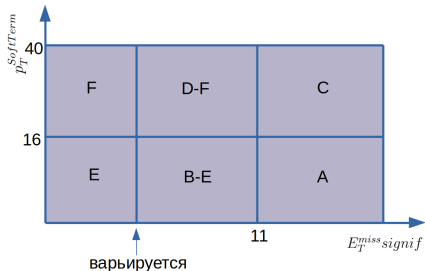
Сравнить оценку из данных и из Монте-Карло можно только в расширенной области. С этой целью вводится R_{mc} . Для определения тренда сигнальный отбор по E_T^{miss} значимости поднимается с 11 до 15.

Оценка + погрешности(1)

Статистическая погрешность: 4730^{+940}_{-920}

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



Варьируются только отборы, не связанные с определением сигнальной области

Оценка + погрешности(2)

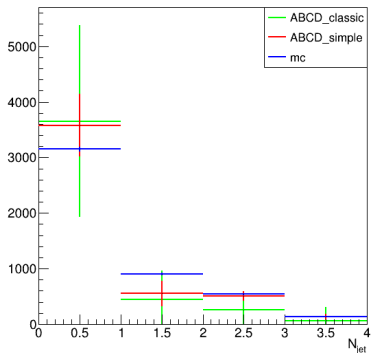
Тип	Источник	Отклонение	Отн. отклонение
статистическая		+940	19.9%
		-920	19.5%
систематическая	флуктуации R	+640	13.5%
систематическая	параметры утечки сигнала	-550	11.5%
систематическая	верхний отбор по $p_T^{SoftTerm}$	-250	5.2%
		+90	2.0%
		-80	1.6%

Таблица: Источники погрешности для оценки фона $\gamma + jet$ с учетом перенормировки фона $jet \rightarrow \gamma$

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

$$4730^{+940+690}_{-920-600}$$

Распределение по множественности струй



Способ оценки	Оценка	
	Интегральная	Сумма побинно
Монте-Карло	6450 ± 70	6450 ± 70
Упрощенный ABCD-метод	4860 ± 360	4800 ± 600
Классический ABCD-метод	4730^{+940}_{-920}	4400 ± 1800

Таблица: Число событий фона $\gamma + jet$ в сигнальной области, оцененное разными способами. Указанные погрешности являются статистическими

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 $\gamma + jet$:
 $4730^{+940+690}_{-920-600}$
- Оценена форма распределения для данного фона по множественности струй из данных

Резерв (1)

R	Центр. знач.	Отклонение	Отн. отклонение
1.00	4730		
1.05	5370	+640	13.5%
0.95	4180	-550	11.5%

Таблица: Систематическая погрешность от флуктуаций R

Резерв (2)

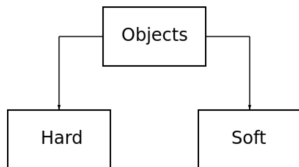
Отбор	Центр. знач.	Отклонение	Отн. отклонение
$p_T^{\text{Soft Term}} < 40$ ГэВ	4730		
$p_T^{\text{Soft Term}} < 36$ ГэВ	4820	+90	2.0%
$p_T^{\text{Soft Term}} < 44$ ГэВ	4650	-80	1.6%

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	0.1843 ± 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.	4730	4480	-250	5.2%

Таблица: Систематическая погрешность от ошибки в определении коэффициентов утечки c_i

Резерв (3)



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 (4)

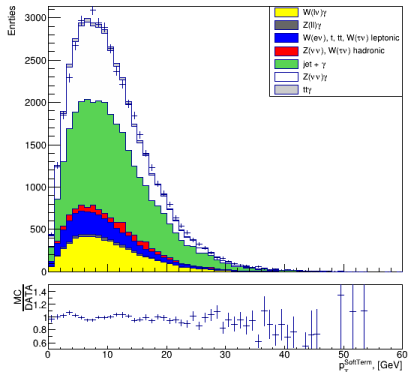
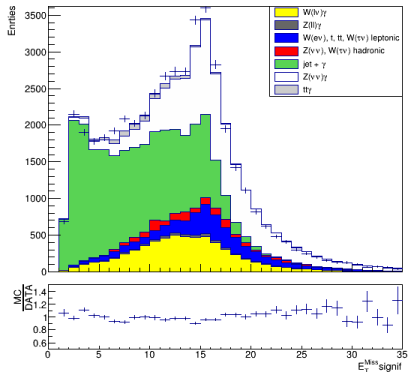


Рис.: Распределения по E_T^{miss} значимость и p_T^{SoftTerm} , построенные без отборов на эти переменные

Резерв (5)

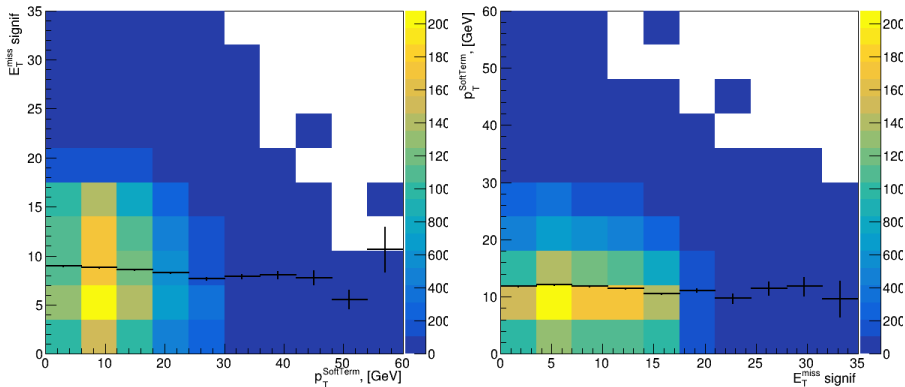


Рис.: Профильные гистограммы для установления корреляции по переменным E_T^{miss} значимость и p_T^{SoftTerm} . Сняты отборы только по этим переменным

Резерв (6)

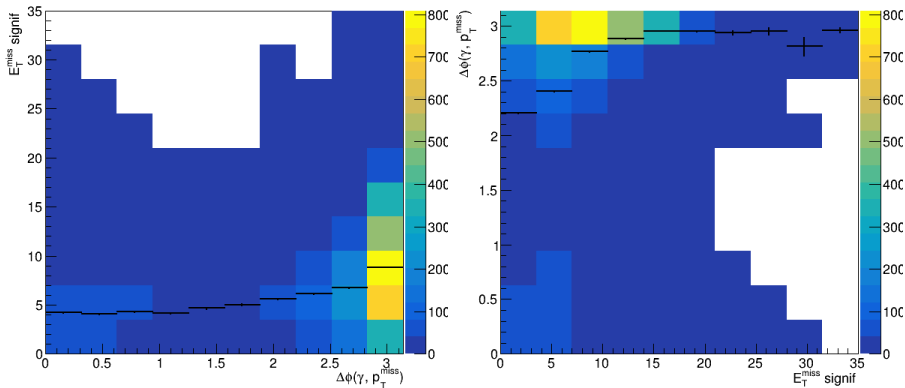


Рис.: Профильные гистограммы для установления корреляции по переменным E_T^{miss} значимость и $\Delta\phi(\gamma, p_T^{miss})$. Сняты угловые отборы и отбор по E_T^{miss} значимость

Резерв (7)

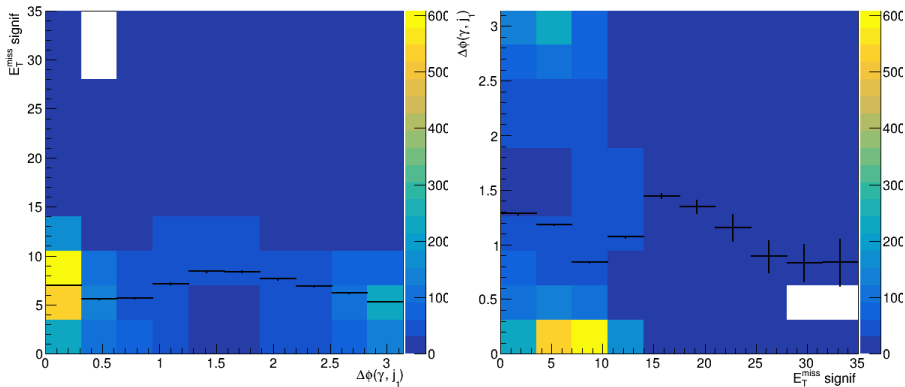


Рис.: Профильные гистограммы для установления корреляции по переменным E_T^{miss} значимость и $\Delta\phi(\gamma, j_1)$. Сняты угловые и отбор по E_T^{miss} значимость