

Получение дифференциальных сечений для процесса ассоциированного рождения Z бозона с фотоном в pp столкновениях с энергией $\sqrt{s} = 13$ TeV в эксперименте ATLAS

Казакова К.К.

Научные руководители: к.ф.-м.н. Солдатов Е.Ю.
Пятиизбянцева Д.Н.



НИЯУ МИФИ
26.12.2022



Мотивация и задачи

Мотивация:

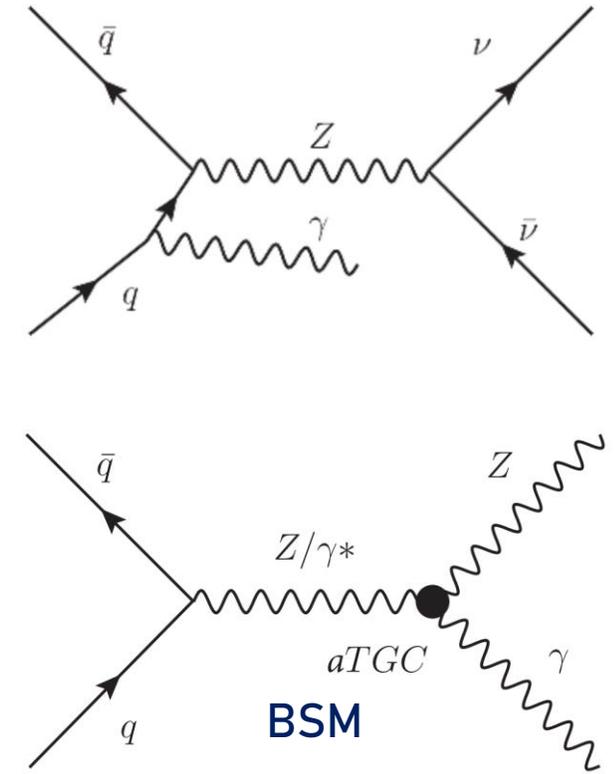
- Измерение сечений в рамках Стандартной модели (СМ) с точностью NNLO КХД поправок;
- Высокоточные измерения трехбозонных вершин, чувствительных к физике за пределами СМ. Одним из чувствительных процессов для поиска «новой физики» является $Z(\nu\nu)\gamma$.

Цель:

Получение дифференциальных сечений как функций различных переменных для процесса ассоциированного рождения $Z(\nu\nu)\gamma$.

Задачи:

- Оценка фона, обусловленного неверной идентификацией адронной струи как фотона ($jet \rightarrow \gamma$);
- Устранение искажений измеряемых данных из-за различных эффектов детектора;
- Получение дифференциальных сечений как функций переменных E_T^γ , E_T^{miss} , N_{jets} для дальнейшего сравнения наблюдений и предсказаний.



Фоны и определение фазового пространства

Сигнальный процесс: $Z(\nu\nu)\gamma$

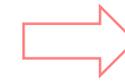
Фоновые процессы: $\gamma + \text{jets}$, $W(\rightarrow l\nu)\gamma$, $e \rightarrow \gamma$, $jet \rightarrow \gamma$ (14%), $Z(ll)\gamma$, $t\bar{t}\gamma$

Предотборы

Переменная	Ограничение
E_T^{miss}	> 130 ГэВ
E_T^γ	> 150 ГэВ
Число жёстких фотонов	$N_\gamma = 1$
Число лептонов	$N_e = 0, N_\mu = 0$

Отборы

Переменная	Ограничение
Значимость E_T^{miss}	> 11
$ \Delta\phi(\vec{p}_T^{\text{miss}}, \gamma) $	> 0.7
$ \Delta\phi(\vec{p}_T^{\text{miss}}, j_1) $	> 0.4



Область с такими
предотборами и
отборами образует
сигнальную область

Фон $jet \rightarrow \gamma$:

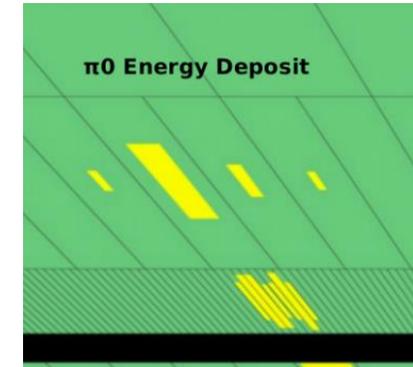
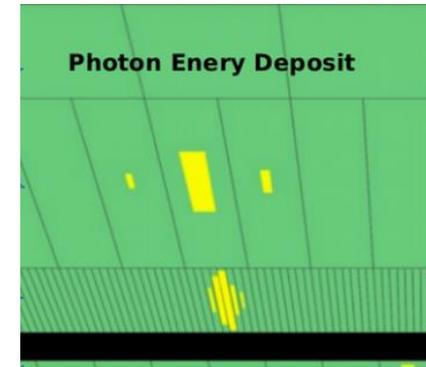
Пара фотонов от распада нейтральных мезонов дает сигнатуру

- ЭМ ливня схожую с сигнатурой ЭМ ливня от отдельного изолированного фотона из-за наложения откликов.

Отбор фотонов:

- Изоляционная рабочая точка FixedCutLoose:

Изоляционная рабочая точка	Калориметрическая изоляция	Трековая изоляция
FixedCutLoose	$E_T^{\text{cone}20} - 0.065 \cdot p_T^\gamma < 0$ ГэВ	$p_T^{\text{cone}20} / p_T^\gamma < 0.05$



- Фотон идентифицируется как «жёсткий», если он удовлетворяет всем критериям формы ЭМ ливня.

Метод слайсов для оценки $jet \rightarrow \gamma$

Стратегия:

1. Разделение фазового пространства на 4 ортогональные области на основе критерия изолированности фотонов и кинематических отборов.
2. Отношение количества событий $jet \rightarrow \gamma$ в K01 и K03 равно отношению количества событий $jet \rightarrow \gamma$ в K02 и C0.
3. Нормировка событий осуществляется в K03, где распределение $jet \rightarrow \gamma$ событий взято из K01 из данных.
4. Во избежание зависимости от изоляции, неизолрированные K01 и K02 разделяются на более мелкие области, т.н. слайсы:

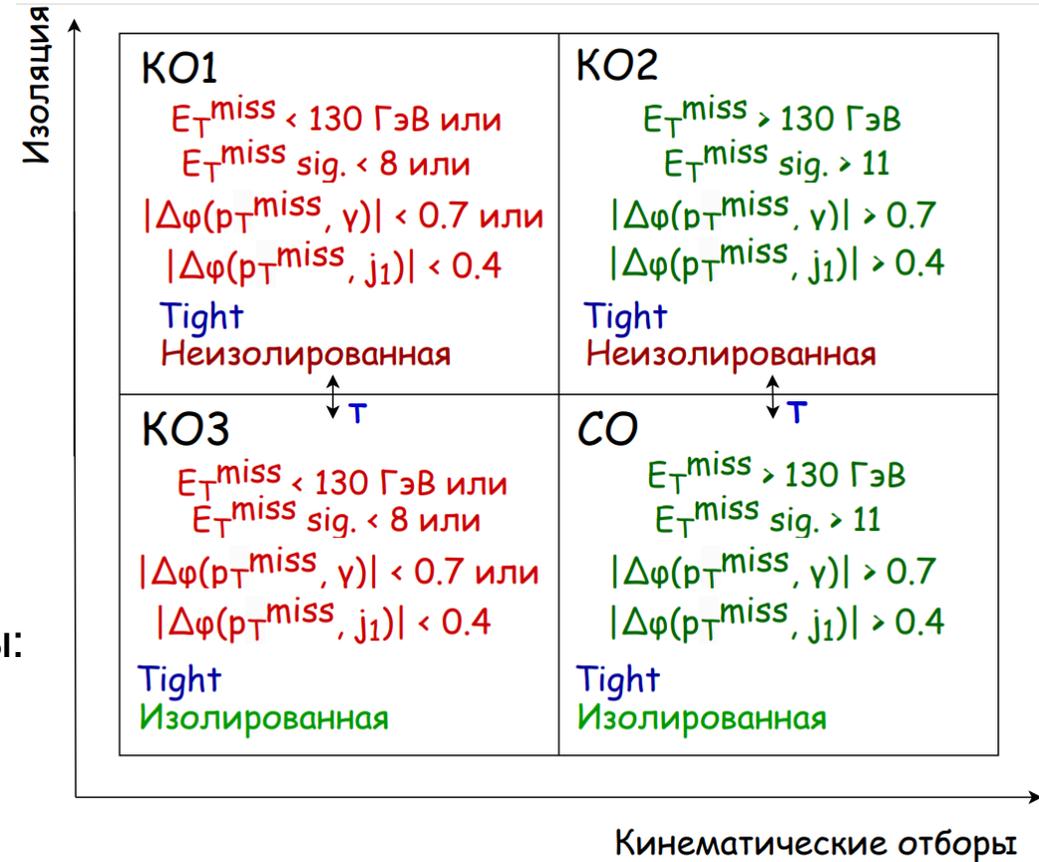
$$N_{CR1(i)}^{jet \rightarrow \gamma} = N_{CR1(i)}^{data} - N_{CR1(i)}^{Z(\nu\bar{\nu})\gamma} - N_{CR1(i)}^{bkg}$$

$$N_{FR(i)}^{jet \rightarrow \gamma} \approx T_{(i)} \cdot N_{CR1(i)}^{jet \rightarrow \gamma}$$

5. В итоге, оцененное количество событий $jet \rightarrow \gamma$ экстраполируется в сигнальную область:

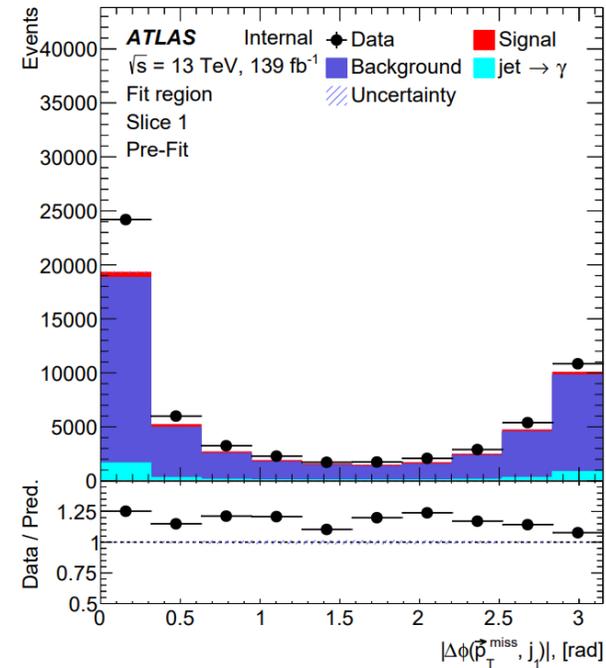
$$N_{SR(i)}^{jet \rightarrow \gamma} = T_{(i)} \cdot (N_{CR2(i)}^{data} - N_{CR2(i)}^{Z(\nu\bar{\nu})\gamma} - N_{CR2(i)}^{bkg})$$

Калориметрическую изоляцию можно определить как E_T^{cone20} / p_T \Rightarrow выбраны 5 изоляционных слайсов: [0.065 – 0.08, 0.08 – 0.095, 0.095 – 0.115, 0.115 – 0.14, 0.14 – +inf]

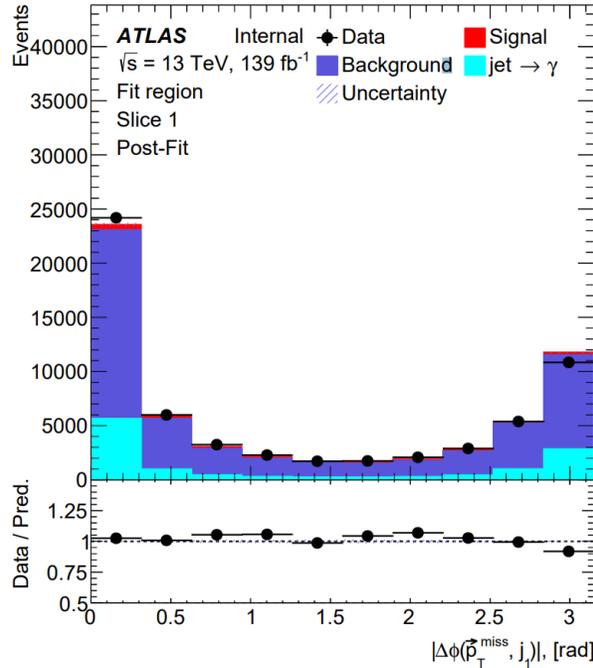


Процесс нормировки

- Нормировка осуществлена для 4-ех переменных: E_T^{miss} значимость E_T^{miss} , $|\Delta\phi(\vec{p}_T^{\text{miss}}, \gamma)|$ и $|\Delta\phi(\vec{p}_T^{\text{miss}}, j_1)|$
- Нормировочный параметр $T_{(i)}$ оценен для каждого слайса и переменной.



Нормировка



Слайс	T_1, E_T^{miss}	$T_2, \text{значимость } E_T^{\text{miss}}$
1	3.50 ± 0.08	3.42 ± 0.08
2	4.14 ± 0.09	3.94 ± 0.09
3	4.30 ± 0.10	4.04 ± 0.09
4	5.24 ± 0.12	4.97 ± 0.12
5	1.90 ± 0.04	1.77 ± 0.04

Слайс	$T_3, \Delta\phi(\vec{p}_T^{\text{miss}}, \gamma) $	$T_4, \Delta\phi(\vec{p}_T^{\text{miss}}, j_1) $
1	3.34 ± 0.07	3.42 ± 0.08
2	3.76 ± 0.08	3.89 ± 0.09
3	3.82 ± 0.09	3.99 ± 0.09
4	4.48 ± 0.10	4.82 ± 0.11
5	1.44 ± 0.04	1.62 ± 0.04

- Умножая оцененные $T_{(i)}$ на количество событий $jet \rightarrow \gamma$ в K02:

Слайс	$N_{SR(i)}^{jet \rightarrow \gamma}, E_T^{\text{miss}}$	$N_{SR(i)}^{jet \rightarrow \gamma}, \text{значимость } E_T^{\text{miss}}$	$N_{SR(i)}^{jet \rightarrow \gamma}, \Delta(E_T^{\text{miss}}, \gamma) $	$N_{SR(i)}^{jet \rightarrow \gamma}, \Delta(E_T^{\text{miss}}, j_1) $
1	1560 ± 80	1520 ± 80	1480 ± 80	1520 ± 80
2	1320 ± 80	1260 ± 80	1200 ± 80	1240 ± 80
3	1140 ± 80	1070 ± 70	1010 ± 70	1060 ± 70
4	1080 ± 80	1030 ± 80	930 ± 70	1000 ± 80
5	690 ± 40	640 ± 40	520 ± 30	590 ± 40

Значения $jet \rightarrow \gamma$ для каждого слайса для экстраполяции в CO

Результат оценки $jet \rightarrow \gamma$ событий

Точка экстраполяции $jet \rightarrow \gamma$ определена на основе МК в СО: $X = 0.012 \pm 0.010$

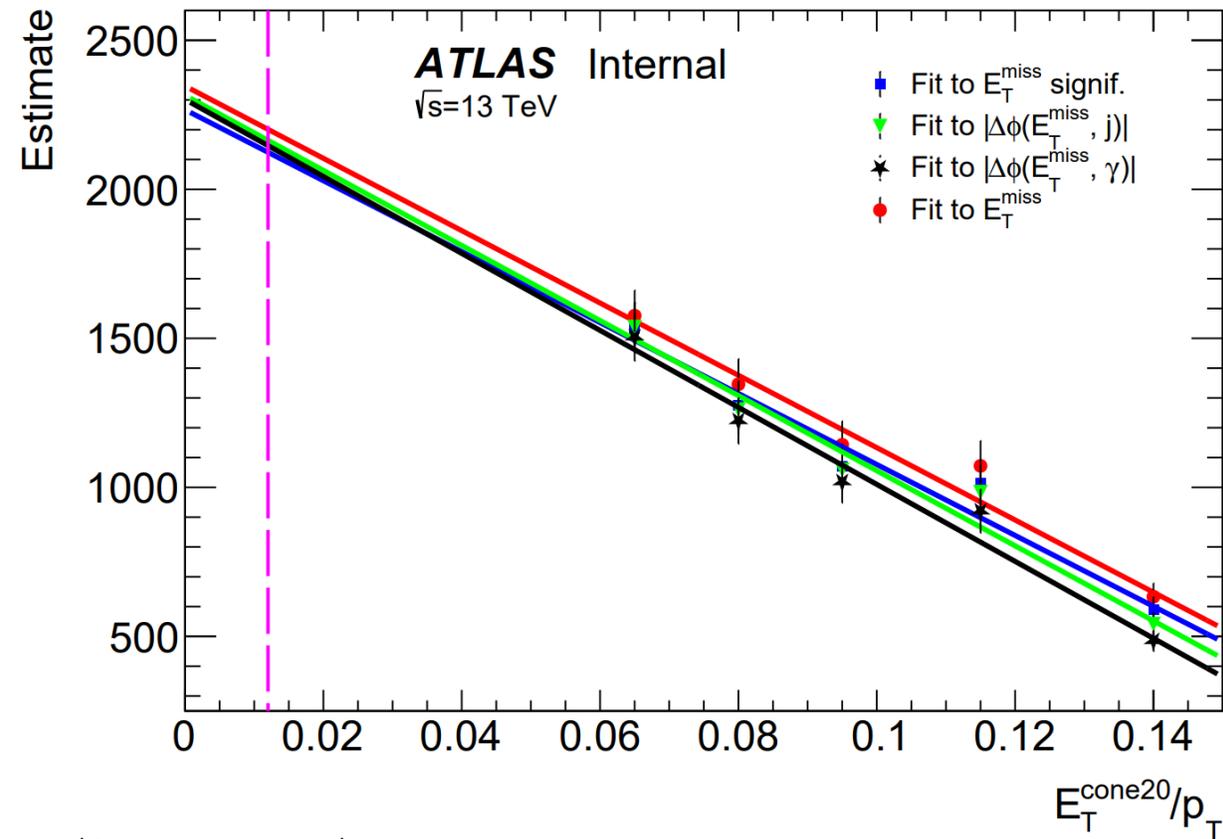
Переменная	Оценка $jet \rightarrow \gamma$ событий в СО
E_T^{miss}	2110 ± 120
E_T^{miss} sign.	2040 ± 120
$ \Delta(E_T^{miss}, j_1) $	2080 ± 120
$ \Delta(E_T^{miss}, \gamma) $	2070 ± 110

⇒ Оценка $jet \rightarrow \gamma$ составила 2070 ± 60 событий

Источники систематических погрешностей:

- Выбор точки экстраполяции (114 событий);
- Выбор МК генератора и модели партонного ливня для сигнального процесса (85 событий);
- Выбор различных переменных в точке экстраполяции (34 события);

Таким образом, оценка $jet \rightarrow \gamma$ в СО, полученная методом слайсов, составила 2070 ± 60 (стат.) ± 150 (сист.) событий, $\delta = 8\%$. Двумерный метод боковых интервалов (ABCD метод) предсказывает 2100 ± 100 (стат.) ± 300 (сист.) событий, $\delta = 15\%$.



Искажение данных детектором

- На основе данных и оцененных фонов можно получить наблюдаемое количество сигнальных событий.
- Однако из-за конечности покрытия фазового пространства детектором, не 100% эффективности и конечного разрешения, регистрируемые события «размываются».

$A_{Z\gamma}$ - фактор покрытия пространства детектором

$C_{Z\gamma}$ - коррекционный фактор потери сигнала

Эффективность отбора: $\varepsilon_{Z(\nu\bar{\nu})\gamma} = A_{Z\gamma} \cdot C_{Z\gamma}$

$$A_{Z\gamma} = \frac{N_{\text{gen}}^{\text{MC fid.}}}{N_{\text{gen}}^{\text{MC ex. fid.}}}$$

$$C_{Z\gamma} = \frac{N_{\text{rec}}^{\text{MC fid.}}}{N_{\text{gen}}^{\text{MC fid.}}}$$

Доверительная область:

Категория	Отбор
Фотоны	$E_T^\gamma > 150$ ГэВ $ \eta < 2.37$ кроме $1.37 < \eta < 1.52$
Струи	$ \eta < 4.5$ $p_T > 50$ ГэВ $\Delta R(\text{jet}, \gamma) > 0.3$
Лептоны	$N_l = 0$
Нейтрино	$p_T^{\nu\bar{\nu}} > 130$ ГэВ
События	$ \Delta\phi(\vec{p}_T^{\text{miss}}, \gamma) > 0.7$ $ \Delta\phi(\vec{p}_T^{\text{miss}}, j_1) > 0.4$ Значимость $p_T^{\nu\bar{\nu}} > 11$

Расширенная доверительная область:

Категория	Отбор
Фотоны	$E_T^\gamma > 150$ ГэВ $ \eta < 2.37$
Струи	$ \eta < 4.5$ $p_T > 50$ ГэВ $\Delta R(\text{jet}, \gamma) > 0.3$
Нейтрино	$p_T^{\nu\bar{\nu}} > 130$ ГэВ

Оценка коррекционных факторов на основе МК $Z(\nu\bar{\nu})\gamma$:

Коррекционный фактор	Значение
$A_{Z\gamma}$	0.9064 ± 0.0008
$C_{Z\gamma}$	0.7642 ± 0.0008



Для вычисления дифференциальных сечений необходимо провести экстраполяцию измерения, полученного в ограниченной области фазового пространства, к полному фазовому пространству.

Процедура «развёртывания»

- Цель процедуры «развёртывания» заключается в экстраполяции наблюдаемых измерений в истинные.

Пусть X - измеряемая величина, а y - измеренная величина. Тогда их связь: $\hat{R}X = y$

Матрица преобразования \hat{R} называется матрицей отклика, которая связывает величины X и y

$$R_{ij} = \frac{M_{ij}C_i}{A_j}, \text{ где } M_{ij} \text{ есть матрица миграции событий из разных уровней}$$

Процедура «развёртывания» осуществлена согласно **методу максимального правдоподобия** с помощью пакета TRExFitter. [Метод предполагает шаги:](#)

1. «Свёртка» (обратная операция «развёртыванию») сигнального распределения на генераторном уровне с помощью матрицы отклика;
2. Фитирование «свёрнутого» распределения данными за вычетом ожидаемых фонов;
3. Нормировка сигнального распределения на генераторном уровне с учетом коэффициентов, полученных в процессе фитирования;

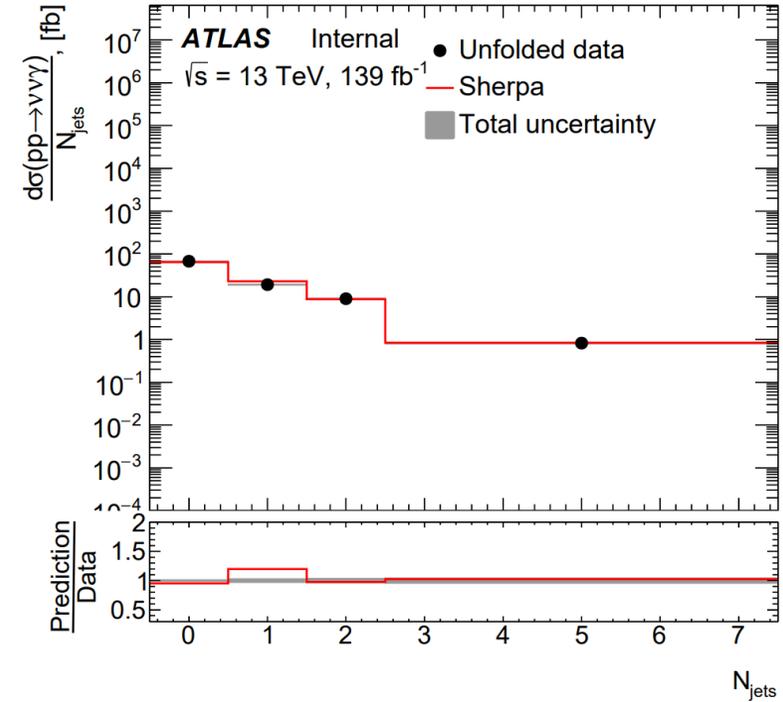
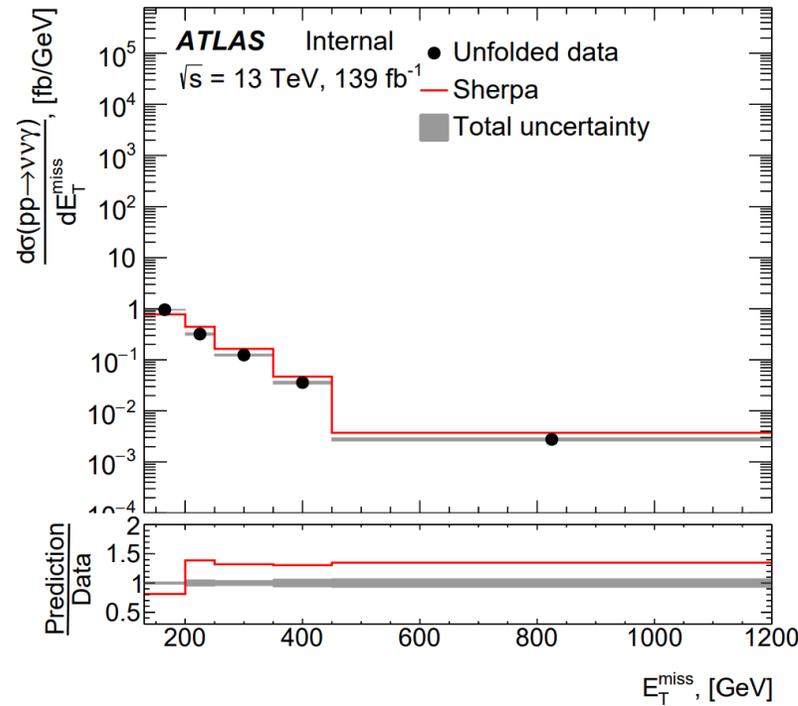
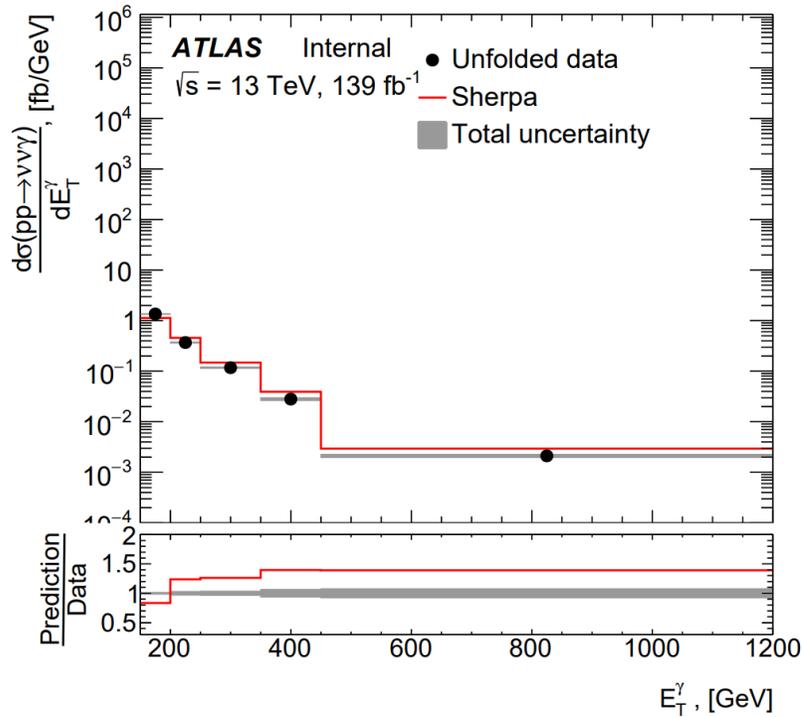
Таким образом, **дифференциальное сечение в расширенной области** может быть получено по формуле:

$$\frac{\Delta\sigma_i}{\Delta x_i} = \frac{1}{(\int \mathcal{L} dt) \cdot \Delta x_i \cdot C_i} \sum_j M_{ij}^{-1} \cdot A^j \cdot (d^j - b^j)$$

Дифференциальные сечения

- Измерения дифференциальных сечений произведены в расширенной доверительной области для переменных: E_T^γ , E_T^{miss} и N_{jets}

Переменная	Биннинг
E_T^γ , ГэВ	[150, 200], [200, 250], [250, 350], [350, 450], [450, 1200]
E_T^{miss} , ГэВ	[130, 200], [200, 250], [250, 350], [350, 450], [450, 1200]
N_{jets}	[-0.5, 0.5], [0.5, 1.5], [1.5, 2.5], [2.5, 7.5]



Также произведена проверка корректности работы метода путем применения процедуры «развёртывания» к сигнальным событиям на уровне реконструкции МК. Результаты совпадают с ожиданиями.

Заключение

Цель работы заключалась в получении дифференциальных сечений как функций различных переменных для процесса ассоциированного рождения $Z(\nu\nu)\gamma$. В соответствии с поставленными задачами, в результате:

- Разработан метод оценки фоновых событий $jet \rightarrow \gamma$, с помощью которого получена оценка таких событий в СО, которая составила 2070 ± 60 (стат.) ± 150 (сист.), $\delta = 8\%$. Точность данной оценки **выше** примерно **в 2 раза** по сравнению с точностью предсказания ABCD метода. Результаты согласуются в пределах погрешностей;
- Произведена процедура «развёртывания» измеренного сигнала;
- Получены дифференциальные сечения как функции переменных E_T^γ , E_T^{miss} и N_{jets} .

В дальнейшем планируется получить оценку формы $jet \rightarrow \gamma$ в СО по различным переменным методом слайсов. Также планируется получить дифференциальные сечения по другим переменным с учетом систематических погрешностей.

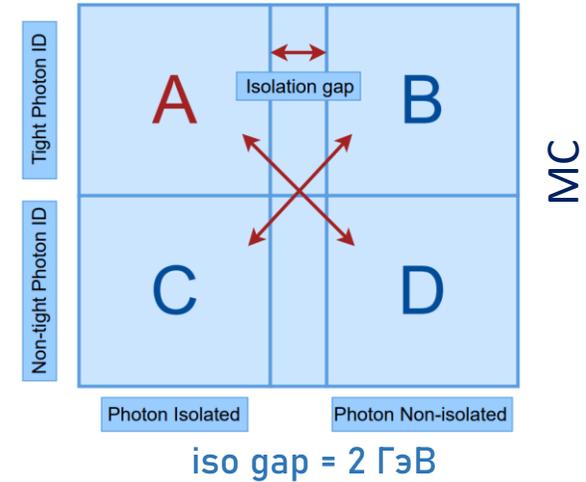
Спасибо за внимание!

BACK-UP

ABCD метод

- В качестве переменных используются идентификационные и изоляционные критерии для фотонов, которые не должны коррелировать
- Определяется несколько типов мягких фотонов (*loose*), для которых нарушаются различные критерии формы ЭМ ливня

$$R = \frac{N_A N_D}{N_C N_B}$$



Event yields for the data and non-jet $\rightarrow \gamma$ background processes

	Data	W_γ QCD	W_γ EWK	$e \rightarrow \gamma$	$tt\gamma$	$\gamma + \text{jet}$	$Z(l)\gamma$
A	26523 ± 163	3936 ± 23	136.3 ± 0.7	3039 ± 12	234 ± 3	5262 ± 53	285 ± 5
B	1475 ± 38	52 ± 4	1.86 ± 0.08	8.95 ± 0.03	1.3 ± 0.2	0.6 ± 0.4	1.0 ± 0.6
C	2568 ± 51	60 ± 2	2.16 ± 0.09	61.4 ± 0.2	4.2 ± 0.4	76 ± 6	4.8 ± 0.5
D	1443 ± 38	2.7 ± 0.6	0.17 ± 0.02	0.0715 ± 0.0002	0.35 ± 0.13	0 ± 0	0 ± 0

$$N_A^{\text{sig}} = \tilde{N}_A - R(\tilde{N}_B - c_B N_A^{\text{sig}}) \frac{\tilde{N}_C - c_C N_A^{\text{sig}}}{\tilde{N}_D - c_D N_A^{\text{sig}}}$$



$$N_A^{\text{sig}} = \frac{b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

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

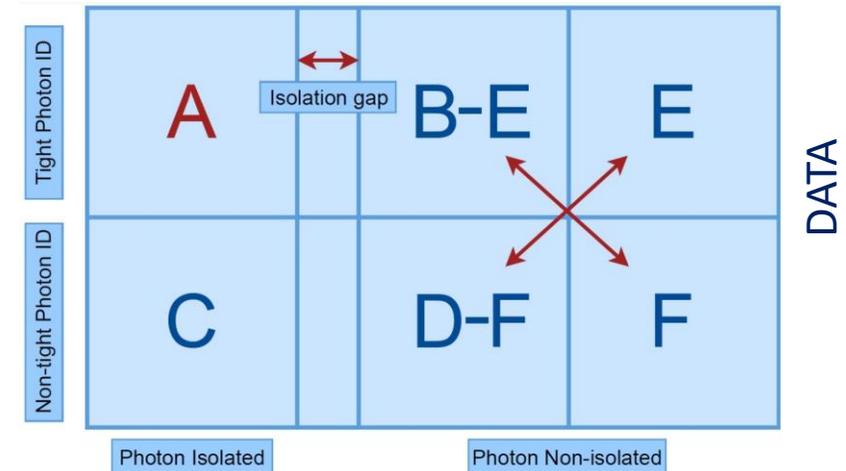
$$N_A^{\text{jet} \rightarrow \gamma} = 2078_{-97}^{+100}$$

Systematic uncertainties come from:

- non-tight definition and isolation gap choice
- different generators
- imperfect photon iso/ID modeling

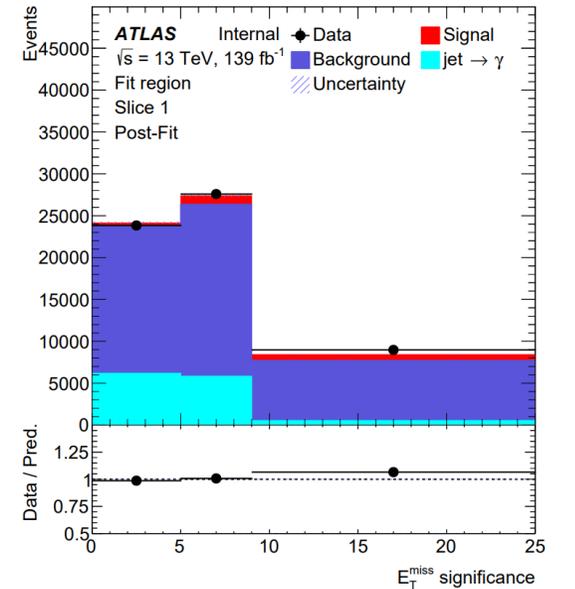
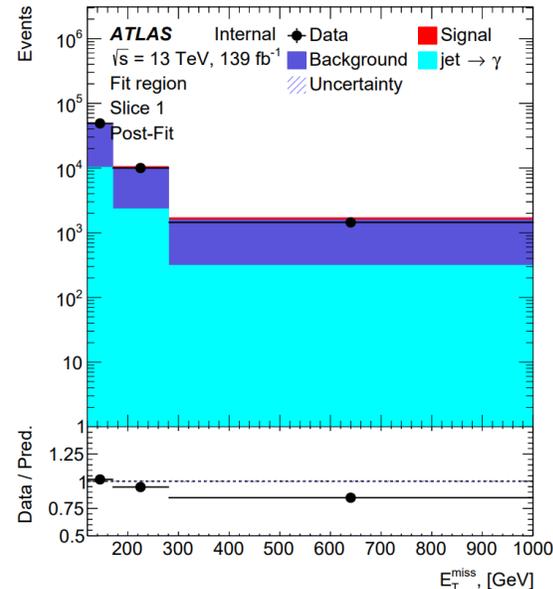
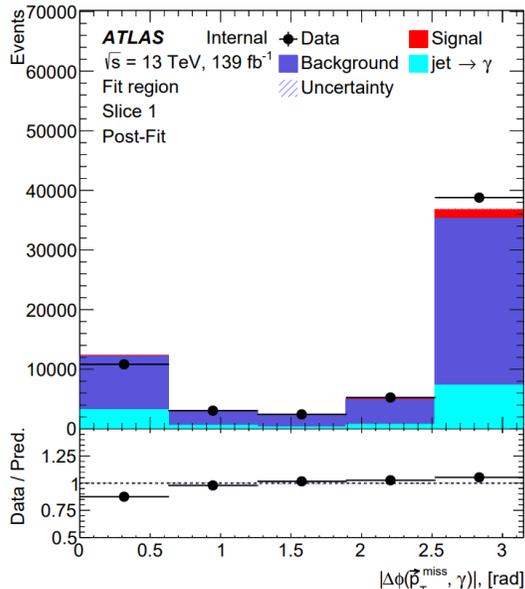
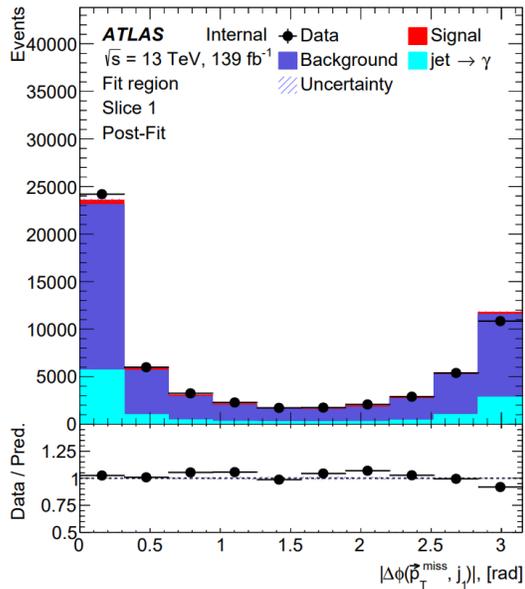
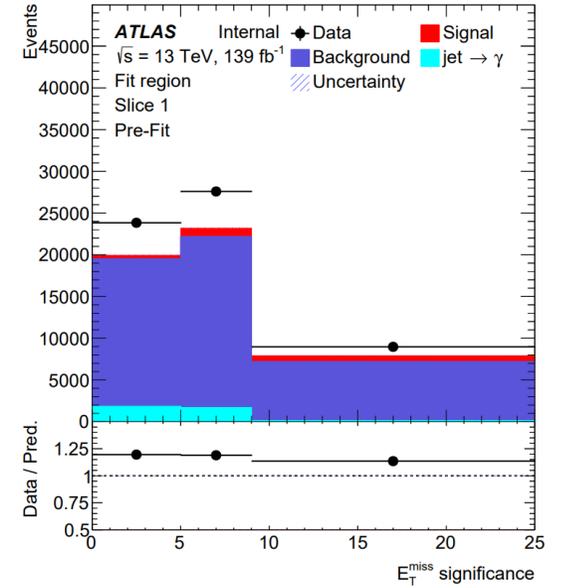
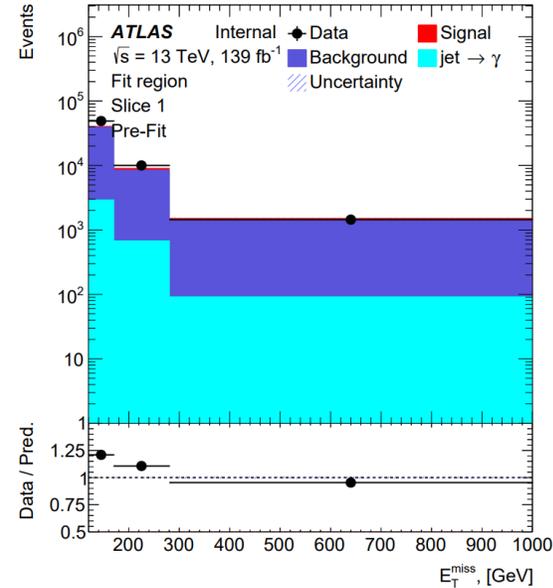
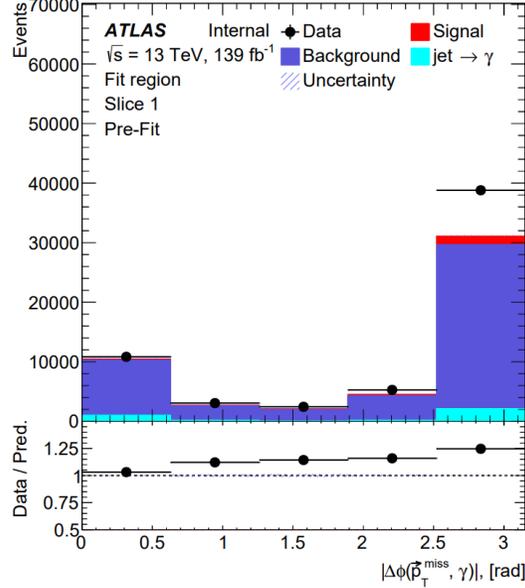
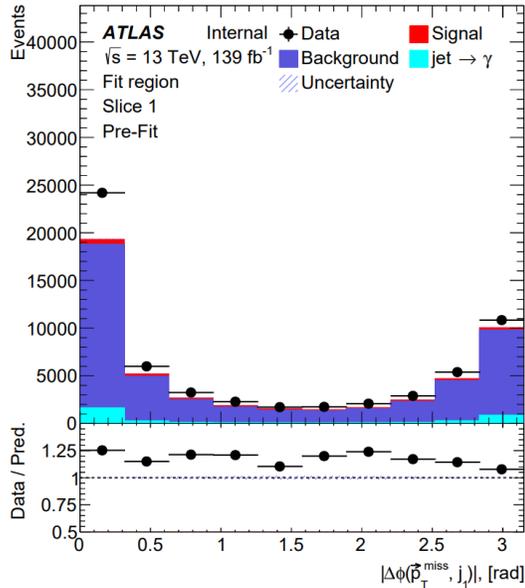


300 events



$$R_{\text{data}} = \frac{N_{B-E}^{\text{data}} N_F^{\text{data}}}{N_{D-F}^{\text{data}} N_E^{\text{data}}}$$

Нормировка $jet \rightarrow \gamma$ событий. Слайс 1



Оценка нормировочного фактора T

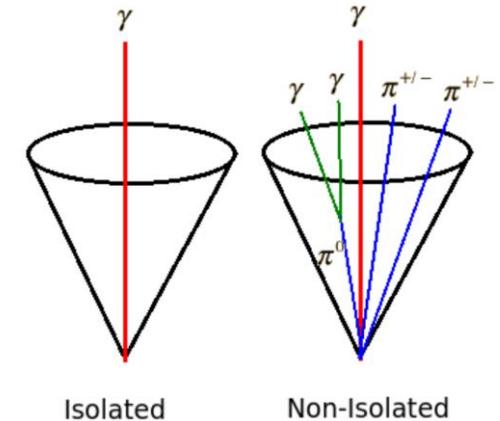
Оценка $T_{(i)}$ в области зазора по значимости E_T^{miss}

Слайс	Данные	Фон (кроме $jet \rightarrow \gamma$)	Сигнал	$jet \rightarrow \gamma$	T_i
0	6599 ± 80	4384 ± 39	1005 ± 3	1210 ± 70	-
1	379 ± 19	8.5 ± 1.2	4.90 ± 0.17	366 ± 19	3.3 ± 0.3
2	281 ± 71	5.5 ± 1.0	4.17 ± 0.14	271 ± 17	4.5 ± 0.4
3	273 ± 17	7.4 ± 1.6	4.54 ± 0.15	261 ± 17	4.6 ± 0.4
4	201 ± 14	5.4 ± 0.6	4.35 ± 0.14	191 ± 14	6.3 ± 0.6
5	271 ± 16	24.3 ± 1.6	20.8 ± 0.3	226 ± 16	5.4 ± 0.5

Слайс	$N_{CR2(i)}^{jet \rightarrow \gamma}$ в КО2
1	440 ± 20
2	320 ± 20
3	265 ± 17
4	207 ± 15
5	360 ± 20

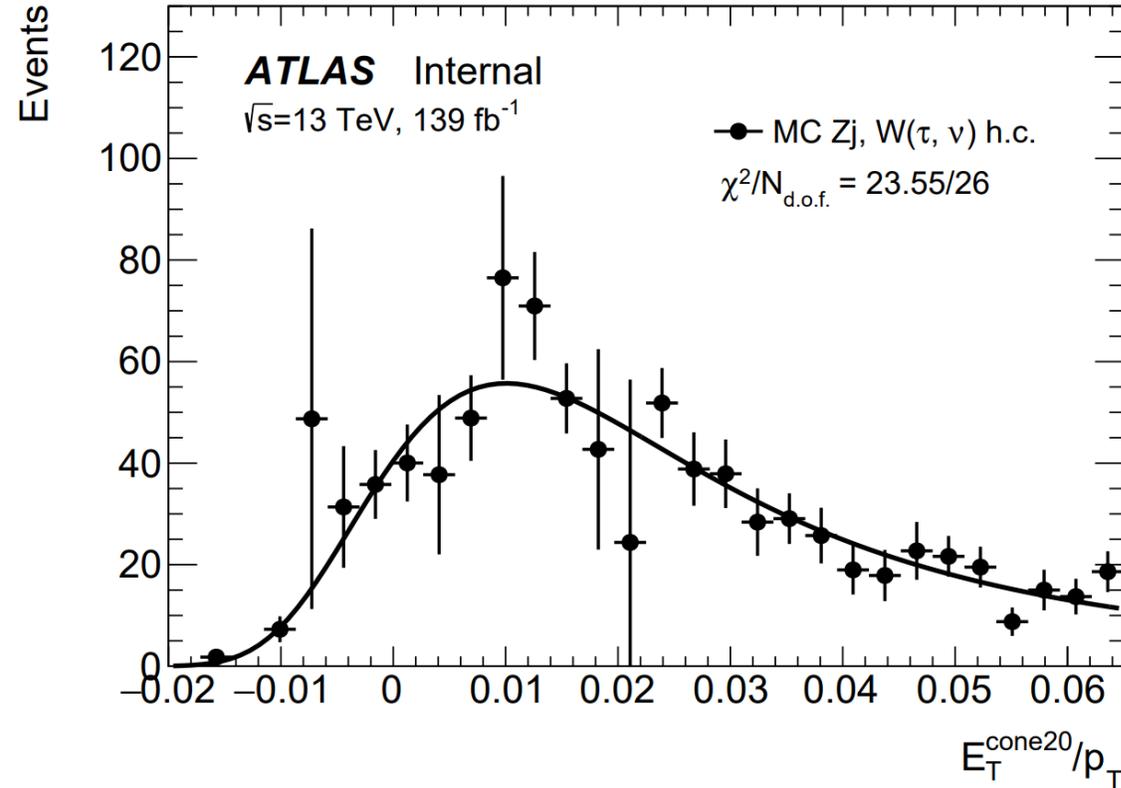
Оценка $T_{(i)}$ в КО1 и КО3:

Слайс	Данные	Фон (кроме $jet \rightarrow \gamma$)	Сигнал	$jet \rightarrow \gamma$	T_i
0	60391 ± 246	45293 ± 128	2072 ± 3	13027 ± 210	-
1	3730 ± 61	55 ± 5	5.70 ± 0.15	3669 ± 61	3.55 ± 0.08
2	3158 ± 56	34 ± 3	4.93 ± 0.13	3119 ± 56	4.18 ± 0.10
3	3083 ± 56	55 ± 4	5.81 ± 0.14	3022 ± 56	4.31 ± 0.11
4	2492 ± 50	30 ± 3	5.77 ± 0.15	2456 ± 50	5.30 ± 0.14
5	6930 ± 83	169 ± 6	40.3 ± 0.4	6721 ± 83	1.94 ± 0.04



$$\mathcal{L}(N_i^{\text{data}} | T) = \prod_{i=1}^{N_{\text{bins}}} \text{Pois}(N_i^{\text{data}} | N_i^{\text{sig}} + N_i^{\text{bkg}} + T \cdot N_i^{\text{jet} \rightarrow \gamma})$$

Результат оценки $jet \rightarrow \gamma$ событий



$$\bar{N} = \frac{\sum \frac{N_i}{\sigma_i^2}}{\sum \frac{1}{\sigma_i^2}}$$

Потерянный поперечный импульс \vec{p}_T^{miss}

Определяется как сумма поперечных импульсов частиц в конечном состоянии со знаком минус

$$\vec{p}_T^{\text{miss}} = - \sum \vec{p}_T^f$$

Систематические погрешности:

Переменная	Оценка $jet \rightarrow \gamma$ в точке $X = 0.002$
E_T^{miss}	2220 ± 120
$E_T^{\text{miss}} \text{ sign.}$	2150 ± 120
$ \Delta(E_T^{\text{miss}}, j_1) $	2200 ± 110
$ \Delta(E_T^{\text{miss}}, \gamma) $	2190 ± 110

Переменная	Оценка $jet \rightarrow \gamma$ (MadGraph + Herwig7)
E_T^{miss}	2200 ± 120
$E_T^{\text{miss}} \text{ sign.}$	2130 ± 120
$ \Delta(E_T^{\text{miss}}, j_1) $	2170 ± 120
$ \Delta(E_T^{\text{miss}}, \gamma) $	2150 ± 110

Значимость $E_T^{\text{miss}} = E_T^{\text{miss}^2} / (\sigma_L^2 (1 - \rho_{LT}^2))$

где σ_L - дисперсия измерения потерянного поперечного импульса в продольном направлении

ρ_{LT} - корреляционный фактор измерения продольной и поперечной компонент потерянного поперечного импульса

Процедура «развёртывания»

	$pp \rightarrow \nu\bar{\nu}\gamma$
Данные	26520 ± 160
$W\gamma$ QCD	3940 ± 20
$W\gamma$ EWK	136.3 ± 0.7
$e \rightarrow \gamma$	3039 ± 12
$t\bar{t}\gamma$	234 ± 3
$\gamma + \text{jet}$	5260 ± 50
$Z(l)\gamma$	285 ± 5
$N_{Z\gamma}^{\text{obs}}$	13630 ± 150

$$\int R(y, x) f(x) dx = g(y) \quad \Rightarrow \quad \hat{R}x = y$$

Элементы матрицы отклика r_{ij} являются вероятностями того, что с учетом фактора покрытия фазового пространства детектором и коррекционного фактора эффективности отборов, истинное значение x_j будет измерено как y_i

$$x_j = (M_{ij}^{-1} y_i) A_j = [M_{ij}^{-1} \cdot (d_i - b_i)] A_j / C_i$$

Элементы матрица миграции m_{ij} есть вероятность того, что истинное значение x_j будет измерено как y_i

$$R_{ij} = \frac{M_{ij} C_i}{A_j}$$

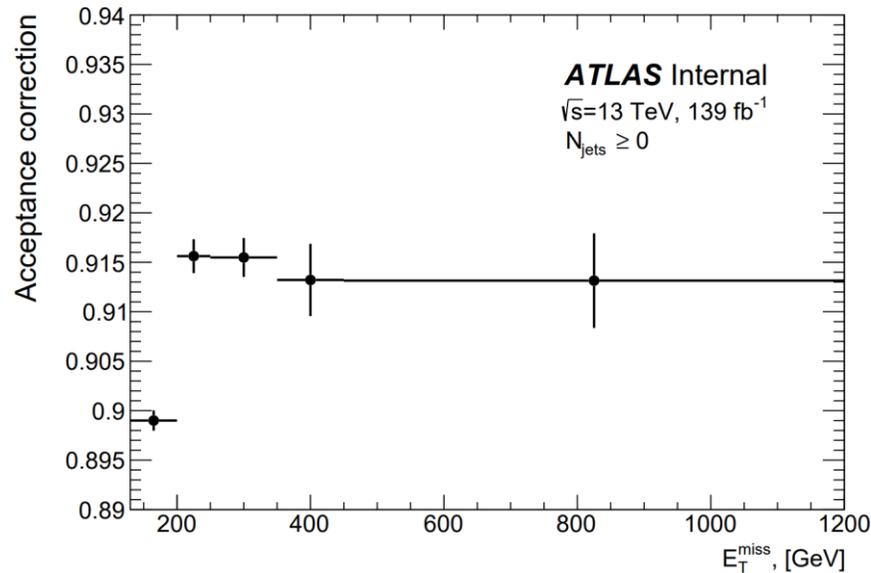
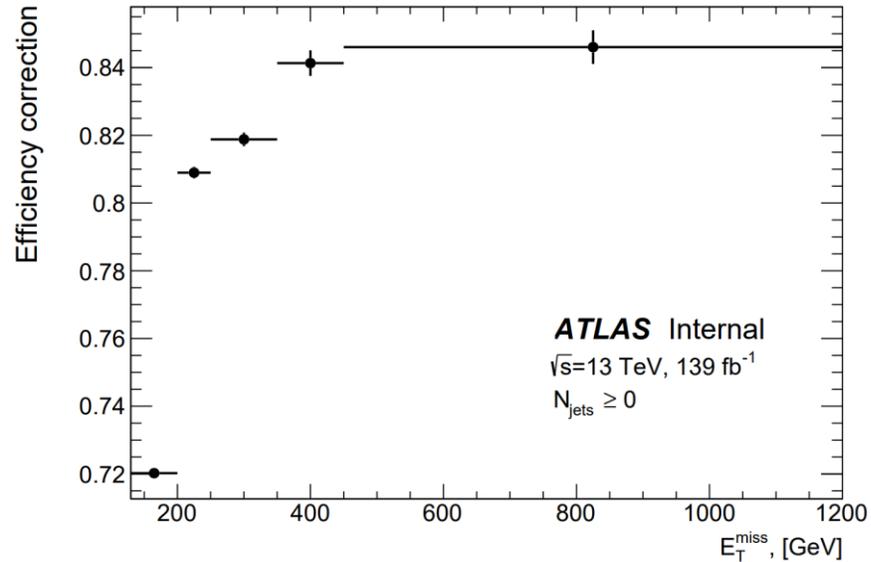
При построении обратной матрицы метод становится нестабильным из-за возникновения статистических флуктуаций (т.н. феномен Гиббса). Эту проблему можно решить, введя дополнительное слагаемое в функции правдоподобия – регуляризацию Тихонова

$$e^{-\frac{1}{2} \tau^2 \sum \delta_i^2}$$

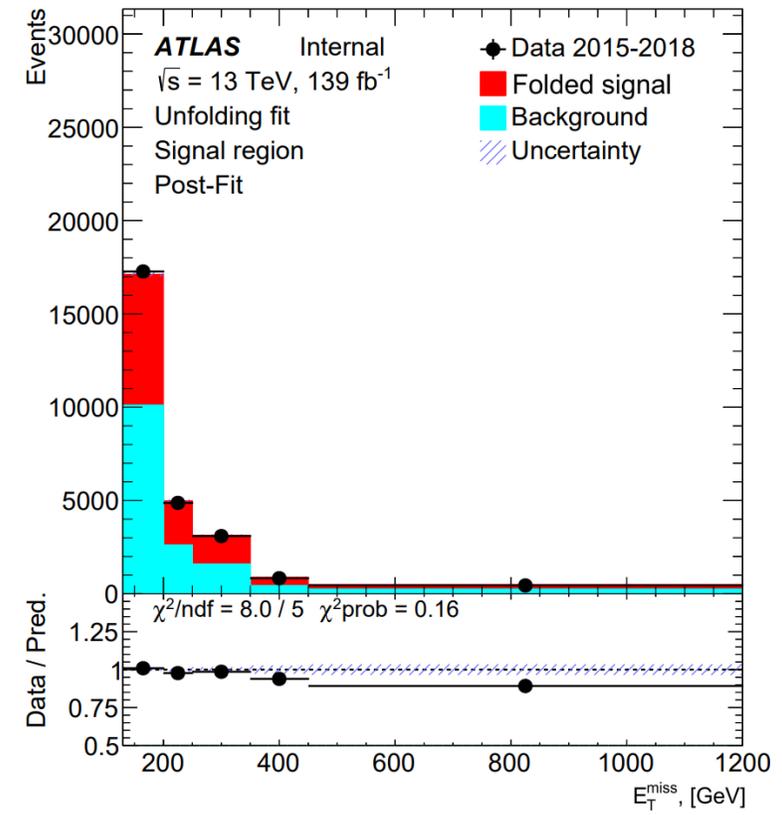
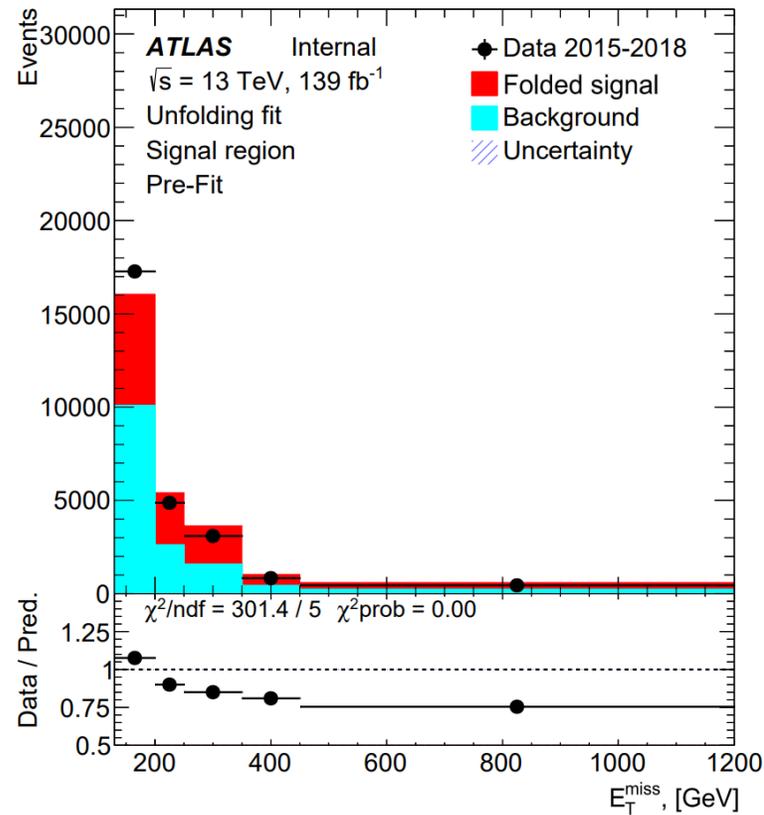
$$\frac{\Delta \sigma_i}{\Delta x_i} = \frac{N_i^{\text{unfold}}}{(\int \mathcal{L} dt) \cdot \Delta x_i}$$

$$\frac{\Delta \sigma_i}{\Delta x_i} = \frac{1}{(\int \mathcal{L} dt) \cdot \Delta x_i \cdot C_i} \sum_j M_{ij}^{-1} \cdot A^j \cdot (d^j - b^j)$$

Процедура «развёртывания»



Процесс фитирования данными за вычетом оцененного фона, т.е. ожидаемого сигнала, который был свернут посредством матрицы отклика:



Результаты проверки работы метода

Результаты применения процедуры развертывания к реконструированным сигнальным событиям:

