

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

Казакова К.К.

Научный руководитель: к.ф.-м.н. Солдатов Е.Ю.



Выпускная квалификационная  
работа магистра  
28.06.2024



# Мотивация и задачи

## Мотивация:

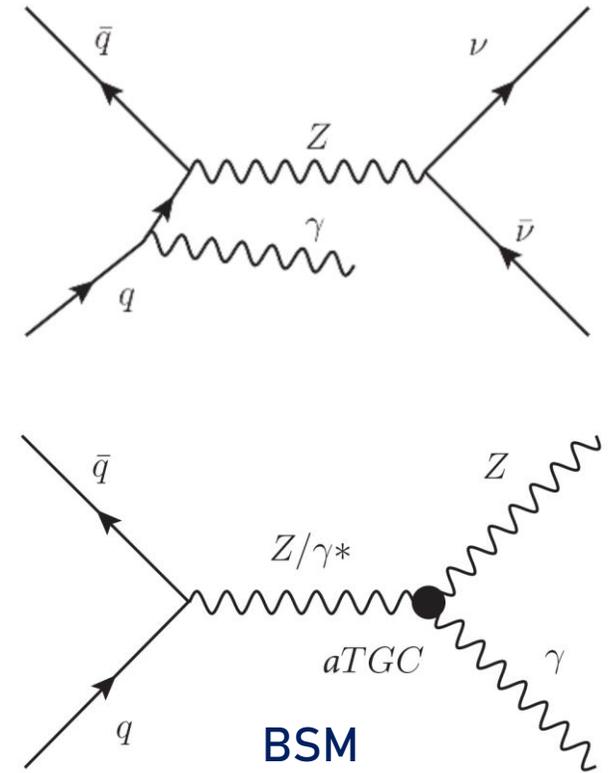
- Измерение дифференциальных сечений  $Z(\nu\nu)\gamma$  для проверки Стандартной модели (СМ) с точностью NNLO КХД и NLO ЭС поправок;
- Поиск аномальных тройных вершин в виду чувствительности процесса  $Z(\nu\nu)\gamma$  к проявлениям «новой физики».

## Цель:

- Получение дифференциальных сечений для процесса  $Z(\nu\nu)\gamma$ .

## Задачи:

- Оценка фона, обусловленного неверной идентификацией адронной струи как фотона ( $\text{jet} \rightarrow \gamma$ ), а также оценка формы распределения;
- Построение стабильной статистической модели и оценка доминирующих фоновых процессов, а также оценка силы сигнала  $Z(\nu\nu)\gamma$ ;
- Получение интегрального и дифференциальных сечений как функций различных переменных с использованием процедуры «развертывания».



# Фазовое пространство и фоновые процессы

- Сигнальная область (СО) определена на основе максимизации значимости сигнала:

## Предотборы

Переменная	Ограничение
$E_T^{\text{miss}}$	$> 120$ ГэВ
$E_T^\gamma$	$> 150$ ГэВ
Число жёстких изолированных фотонов	$N_\gamma = 1$
Число лептонов	$N_e = 0, N_\mu = 0,$ $N_\tau = 0$

## Отборы

Переменная	Ограничение
$E_T^{\text{miss}}$	$> 130$ ГэВ
Значимость $E_T^{\text{miss}}$	$> 11$
$ \Delta\phi(\vec{p}_T^{\text{miss}}, \gamma) $	$> 0.6$
$ \Delta\phi(\vec{p}_T^{\text{miss}}, j_1) $	$> 0.3$



Область с такими  
предотборами и  
отборами образует  
**сигнальную  
область (СО)**

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

Критерии изолированности:

Изоляционная рабочая точка	Калориметрическая изоляция	Трековая изоляция
FixedCutLoose	$E_T^{\text{cone20}} - 0.065 \cdot p_T^\gamma < 0$ ГэВ	$p_T^{\text{cone20}} / p_T^\gamma < 0.05$

- Вклад фоновых процессов для  $Z(\nu\nu)\gamma$  в наблюдаемые данные:

- 35% •  $\gamma$ +jets – фит данных с использованием контрольных областей (КО) (форма из МК);
- 15% •  $W(l\nu)\gamma$  и  $t\bar{t}\gamma$  – фит данных с использованием КО (форма из МК);
- 11% •  $e \rightarrow \gamma$  – оценка вклада из данных;
- 8% •  $\text{jet} \rightarrow \gamma$  – оценка ABCD методом (форма из метода интервалов);
- 0.9% •  $Z(\text{ll})\gamma$  – на основе МК.

# jet $\rightarrow \gamma$ : 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;

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

В ABCD областях на МК

	<i>loose'</i> 2	<i>loose'</i> 3	<i>loose'</i> 4	<i>loose'</i> 5
$R_{MC}$	$1.1 \pm 0.2$	$1.1 \pm 0.2$	$1.1 \pm 0.2$	$1.4 \pm 0.3$

$M_{cut}$ , ГэВ	<i>loose'</i> 2	<i>loose'</i> 3	<i>loose'</i> 4	<i>loose'</i> 5
МК				
4.5	$1.18 \pm 0.19$	$1.15 \pm 0.16$	$1.08 \pm 0.13$	$1.11 \pm 0.13$
7.5	$1.12 \pm 0.14$	$1.16 \pm 0.13$	$1.10 \pm 0.11$	$1.11 \pm 0.11$
10.5	$1.15 \pm 0.14$	$1.16 \pm 0.13$	$1.11 \pm 0.11$	$1.12 \pm 0.11$

На основе данных

4.5	$0.99 \pm 0.11$	$1.05 \pm 0.11$	$1.07 \pm 0.09$	$1.09 \pm 0.09$
7.5	$1.13 \pm 0.11$	$1.09 \pm 0.09$	$1.06 \pm 0.08$	$1.05 \pm 0.08$
10.5	$1.00 \pm 0.10$	$0.99 \pm 0.09$	$0.96 \pm 0.07$	$0.96 \pm 0.07$

Оценки в B-E, E, D-F и F областях

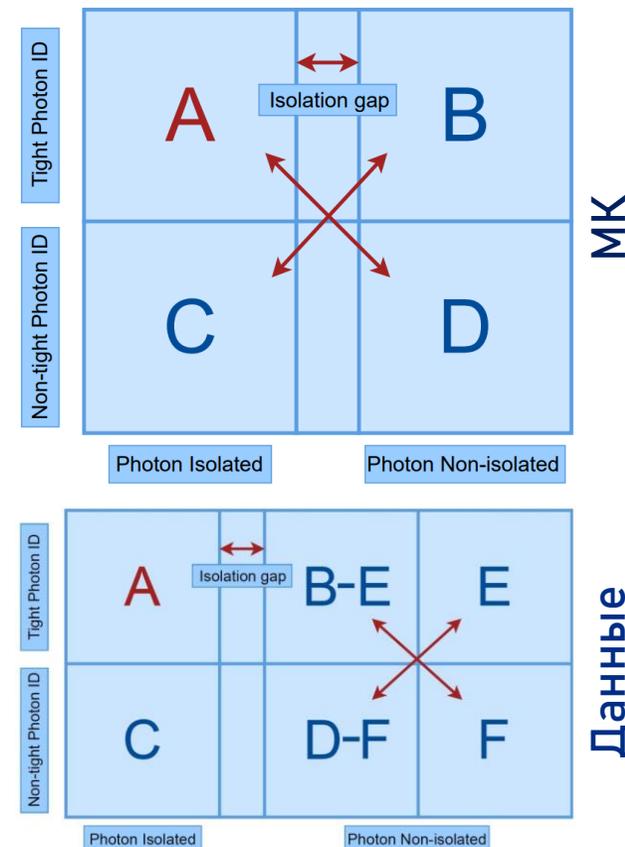
$$\begin{cases} N_A = N_A^{sig} + N_A^{bkg} + N_A^{jet \rightarrow \gamma}, \\ N_B = c_B N_A^{sig} + N_B^{bkg} + N_B^{jet \rightarrow \gamma}, \\ \dots \end{cases}$$



Оценка jet  $\rightarrow \gamma$  в CO составила  $1770 \pm 160$  (стат.)  $\pm 350$  (сист.) событий.

	$R_{data}$	$R'_{MC}$	$R_{MC}$
<i>loose'</i> 2	$0.99 \pm 0.11$	$1.18 \pm 0.19$	$1.1 \pm 0.2$
<i>loose'</i> 3	$1.05 \pm 0.11$	$1.15 \pm 0.16$	$1.1 \pm 0.2$
<i>loose'</i> 4	$1.07 \pm 0.09$	$1.08 \pm 0.13$	$1.1 \pm 0.2$
<i>loose'</i> 5	$1.09 \pm 0.09$	$1.11 \pm 0.13$	$1.4 \pm 0.3$

Итоговые оценки R факторов на данных и МК



# jet $\rightarrow$ $\gamma$ : метод интервалов

- Форму jet  $\rightarrow$   $\gamma$  фона невозможно правильно смоделировать с помощью МК. Поэтому для оценки формы jet  $\rightarrow$   $\gamma$  фона используется адаптированный метод интервалов.
- В методе интервалов фазовое пространство разделяется на две ортогональные области на основе калориметрической изоляции фотона.
- Неизолированная область разделяется на 4 независимых интервала.



⇒ Выбраны 4 интервала: [0.065, 0.090, 0.115, 0.140, 0.165].

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

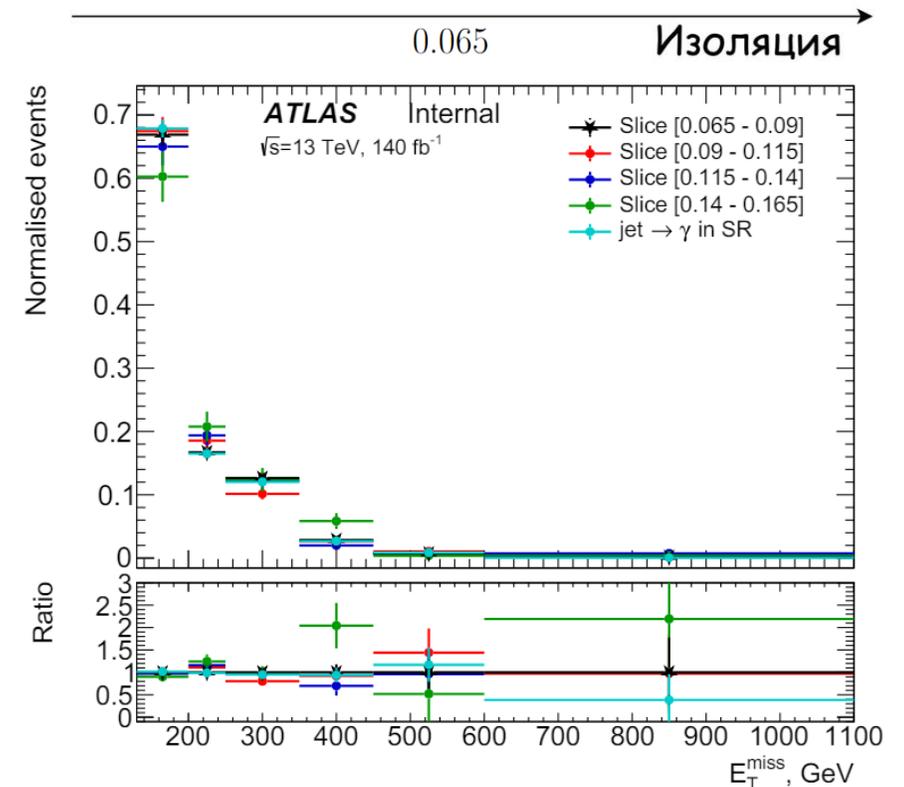
$$H_{jet \rightarrow \gamma}^{[0.A,0.B]} = H_{data}^{[0.A,0.B]}[X] - H_{sig}^{[0.A,0.B]}[X] - H_{bkg}^{[0.A,0.B]}[X]$$

$$\Delta^{CR}[X] = \left( \frac{H_{jet \rightarrow \gamma}^{[0.A_1,0.B_1]}[X] - H_{jet \rightarrow \gamma}^{[0.A_3,0.B_3]}[X]}{2} + \frac{H_{jet \rightarrow \gamma}^{[0.A_2,0.B_2]}[X] - H_{jet \rightarrow \gamma}^{[0.A_4,0.B_4]}[X]}{2} \right)$$

⇒ Форма jet  $\rightarrow$   $\gamma$  в сигнальной области:

$$H_{jet \rightarrow \gamma}^{SR} = H_{jet \rightarrow \gamma}^{[0.A_1,0.B_1]}[X] + 2 \cdot \Delta^{CR}[X]$$

Корректирующее слагаемое



# Метод максимального правдоподобия

- КО  $W\gamma$  определяется аналогично СО, за исключением инверсии отбора на  $N$  лептонов  $> 0$ ;
- КО  $\nu_j$  определяется аналогично СО, за исключением инверсии отбора на значимость  $MET < 11$ .

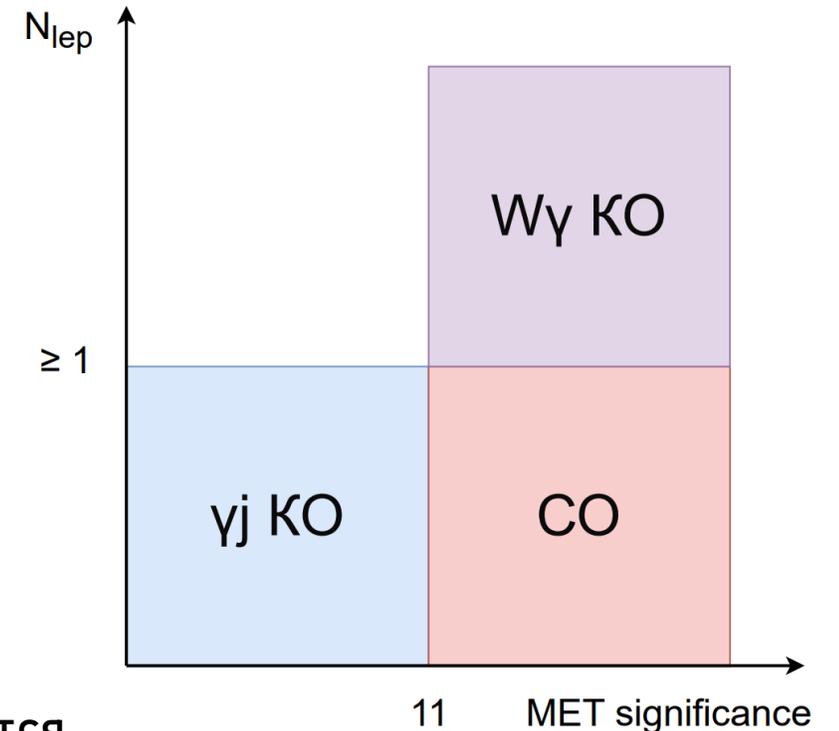
Для реализации процедуры **фитирования вводятся три свободных параметра**:  $\mu_{Z\gamma}$ ,  $\mu_{W\gamma}$  и  $\mu_{\nu_j}$  (параметры интереса, ПИ).

Сила сигнала: 
$$\mu_{Z\gamma} = \mu = \frac{\nu_{\text{meas.}}^s}{\nu_{\text{SM}}^s} = \frac{\sigma_{\text{fid, meas.}}^s}{\sigma_{\text{fid, SM}}^s}$$

- Для учета систематических погрешностей и ограничений на нормировку фоновых процессов в статистическую модель включается **набор подстроечных параметров  $\theta$**  (ПП). Тогда функция правдоподобия имеет вид:

$$\mathcal{L}(\mu, \theta) = \prod_r \left[ \prod_i^{\text{bins} \in r} \text{Pois}(N_i^{\text{data}} | \mu \nu_i^s \eta^s(\theta) + \nu_i^b \eta^b(\theta)) \right] \cdot \prod_i^{\text{mis. par.}} \mathcal{L}(\theta_i)$$

- Измерение параметров интереса  $\mu$  и подстроечных параметров  $\theta$  осуществляется **путем максимизации функции правдоподобия**.



# Процедура фитирования

- Для получения результатов применяется трехэтапная процедура фитирования:
  1. Фитирование в  $W\gamma$  и  $\gamma_j$  КО для первичной оценки нормировочных коэффициентов для фонов и для отладки используемых систематических погрешностей (background only fit);
  2. Фитирование в  $W\gamma$  и  $\gamma_j$  КО и в СО с использованием данных Азимова (ожд. фоны + сигнал). Это позволит получить ожидаемую значимость и ожидаемые погрешности для ПИ.
  3. Фитирование в  $W\gamma$  и  $\gamma_j$  КО и СО с использованием наблюдаемых данных.

	СО	$W\gamma$ КО	$\gamma_j$ КО
$\mu_{Z\gamma}$	✓		
$\mu_{W\gamma}$	✓	✓	✓
$\mu_{\gamma_j}$	✓	✓	✓

## Систематические погрешности:

- Погрешности, связанные с триггером и светимостью;
- Экспериментальные погрешности на энергию и импульс объектов, на эффективность реконструкции и идентификации;
- Теоретические погрешности, связанные с вариацией структурных функций и константы  $\alpha_s$ ;
- Теоретические погрешности, связанные с вариацией масштабов перенормировки  $\mu_R$  и факторизации  $\mu_F$ ;
- Теоретические погрешности, связанные с моделированием партонных ливней и сопутствующих событий.

# Результаты фитирования

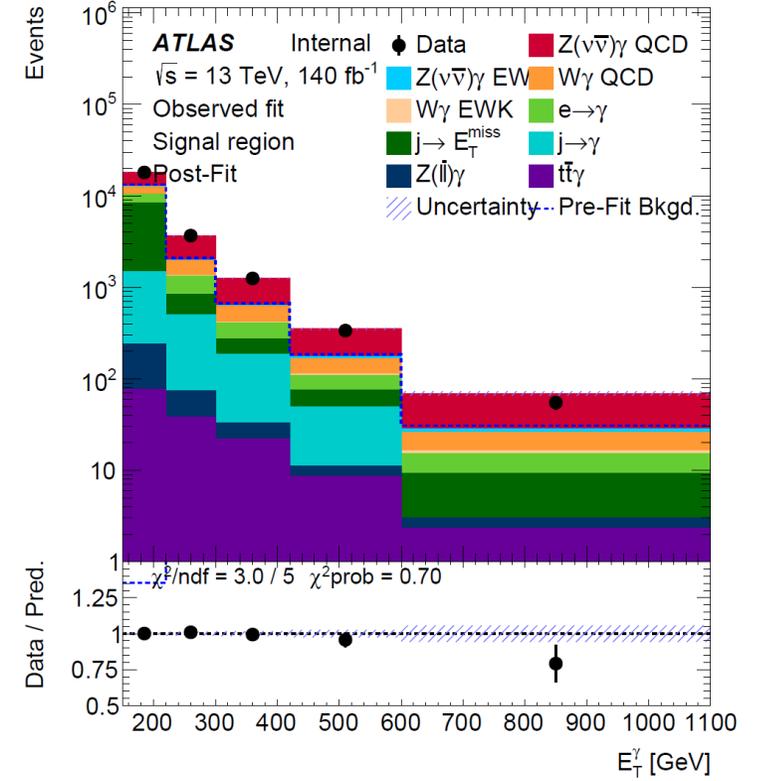
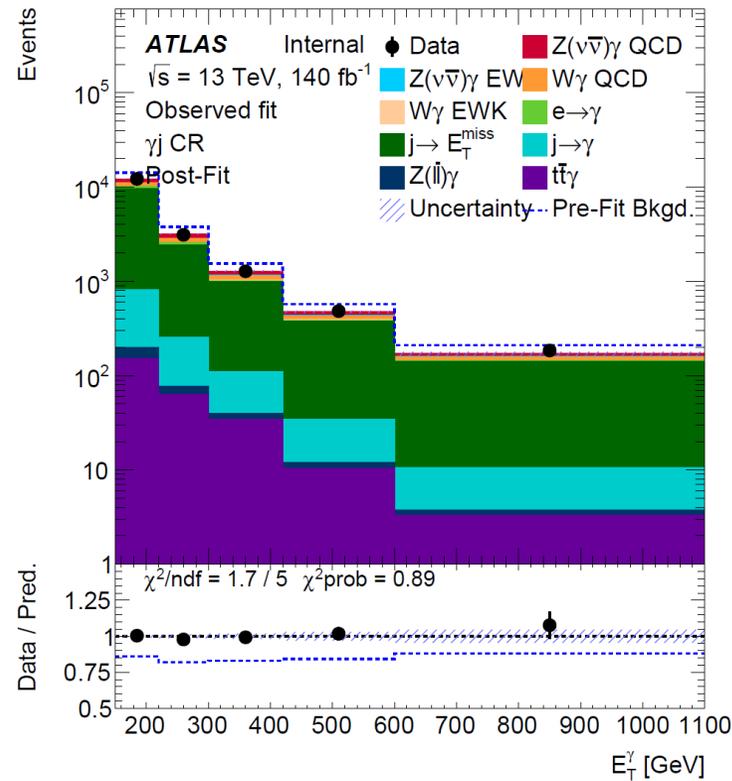
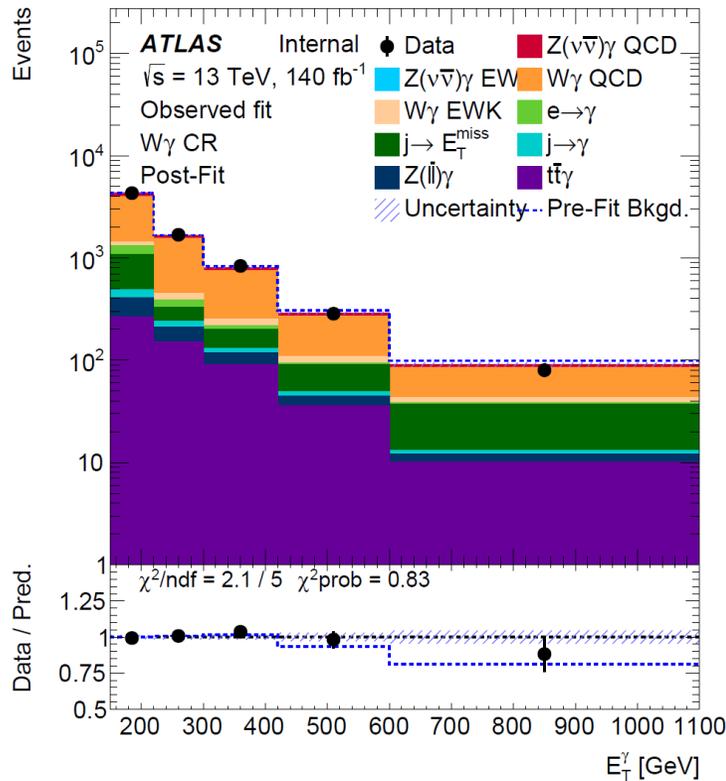
- Фитирование в КО:

$\mu_{W\gamma} = 0.94 \pm 0.13$  (стат.  $\oplus$  сист.), и  
 $\mu_{\gamma j} = 0.75 \pm 0.11$  (стат.  $\oplus$  сист.).

- Фитирование на данных Азимова:

$\mu_{Z\gamma} = 1.00 \pm 0.07$  (стат.  $\oplus$  сист.),  $\mu_{W\gamma} = 0.94 \pm 0.13$  (стат.  $\oplus$  сист.),  
 $\mu_{\gamma j} = 0.75 \pm 0.11$  (стат.  $\oplus$  сист.). Ожидаемая значимость 69  $\sigma$ .

- Результаты фитирования реальными данными:



- $\mu_{Z\gamma} = 0.72 \pm 0.06$  (стат.  $\oplus$  сист.),  $\mu_{W\gamma} = 0.88 \pm 0.12$  (стат.  $\oplus$  сист.) и  $\mu_{\gamma j} = 0.82 \pm 0.10$  (стат.  $\oplus$  сист.).

- Наблюдаемая значимость сигнала: 52  $\sigma$ , интегральное сечение  $\sigma = 93 \pm 8$  (стат.  $\oplus$  сист.) фбн.

# 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

$C_{Z\gamma}$  - фактор эффективности отборов сигнала

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

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

## 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)  > 0.6$ $ \Delta\phi(\vec{p}_T^{\text{miss}}, j_1)  > 0.3$ 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 $Z(\nu\nu)\gamma$ :

	Значение
$A_{Z\gamma}$	$0.9157 \pm 0.0008 \pm 0.0210$
$C_{Z\gamma}$	$0.7497 \pm 0.0007 \pm 0.0577$



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:  $\hat{R}X = Y$

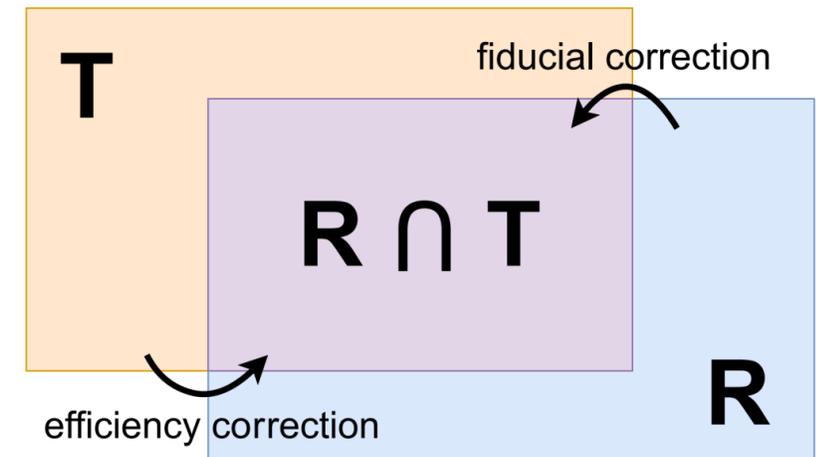
Матрица преобразования  $\hat{R}$  называется матрицей отклика, которая связывает величины  $X$  и  $Y$

$$R_{ij} = \frac{1}{\alpha_i} \varepsilon_j M_{ij} \quad M_{ij} = \frac{N_{ij}^{\text{det.} \cap \text{fid.}}}{N_j^{\text{det.} \cap \text{fid.}}} \quad \alpha_i = \frac{N_i^{\text{det.} \cap \text{fid.}}}{N_i^{\text{det.}}} \quad \varepsilon_j = \frac{N_j^{\text{det.} \cap \text{fid.}}}{N_j^{\text{fid.}}}$$

Процедура «развёртывания» осуществлена согласно ММП.

Метод предполагает следующие шаги:

- «Свёртка» сигнального распределения на уровне генератора с помощью  $\hat{R}$ ;
- Фитирование «свёрнутого» распределения данными за вычетом ожидаемых фонов;
- Нормировка сигнального распределения на уровне генератора на коэффициенты фита в каждом бине;

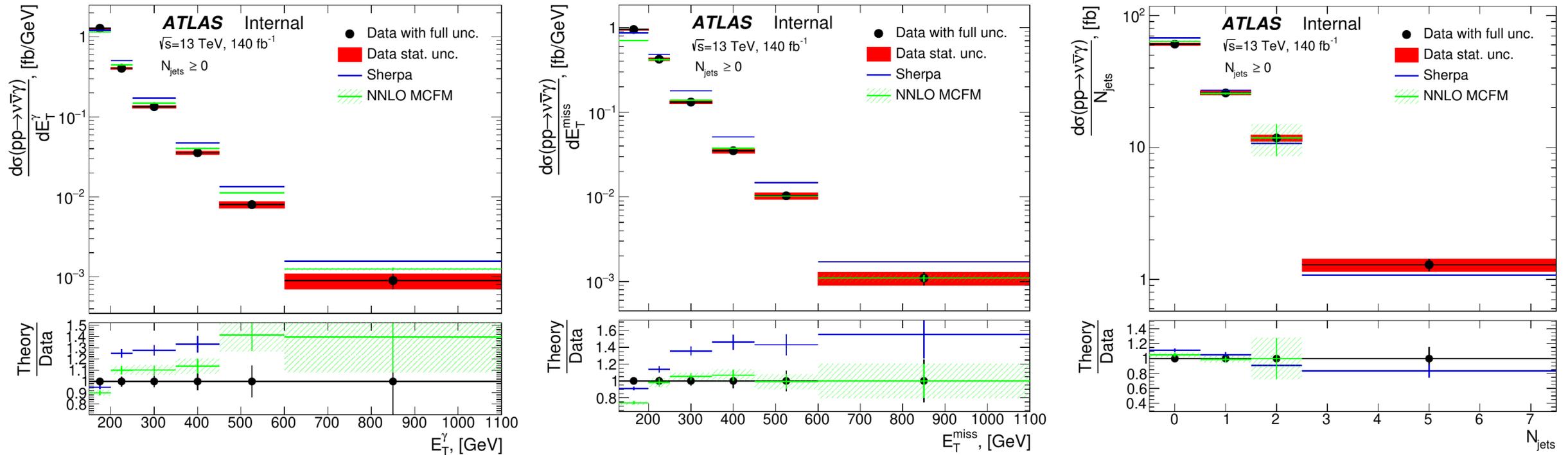


Дифференциальное сечение в расширенной области может быть вычислено как:

$$\frac{\Delta \sigma_j}{\Delta x_j} = \frac{N_j^{\text{unfold}}}{(\int \mathcal{L} dt) \cdot \Delta x_j}$$

# Дифференциальные сечения

- Измерения дифференциальных сечений проведены в расширенной доверительной области для 6-ти переменных:  $E_T^\gamma$ ,  $E_T^{\text{miss}}$ ,  $N_{\text{jets}}$ ,  $\eta_\gamma$ ,  $p_T^{j1}$ ,  $p_T^{j2}$ .  $\sigma_{\text{theor}} = 101 \pm 2$  (стат.  $\oplus$  сист.) фбн



- Полученные результаты измерений сравниваются с предсказаниями генератора Sherpa (CM), а также с предсказаниями генератора MCFM на уровне точности NNLO КХД (CM).
- Проведена валидация полученных измерений. Результаты совпадают с ожиданиями.
- В силу хорошего согласия в высокоэнергетической области аномальные вершины не найдены и работа может далее использоваться для постановки пределов.

Больше распределений в [back up](#)

# Заключение

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

- Получена оценка  $\text{jet} \rightarrow \gamma$  событий в СО, которая составила  $1770 \pm 160$  (стат.)  $\pm 350$  (сист.).
- Адаптирован метод интервалов для оценки  $\text{jet} \rightarrow \gamma$  событий, и получены оценки распределений в СО для различных переменных.
- Построена стабильная статистическая модель, в которую были добавлены экспериментальные и теоретические систематические погрешности.
- Осуществлена процедура фитирования и получены нормировочные коэффициенты для фоновых процессов  $W(l\nu)\gamma$ ,  $t\bar{t}\gamma$  и  $\gamma+\text{jets}$ , также оценена сила сигнала  $Z(\nu\nu)\gamma$ , значение которой составило  $\mu_{Z\gamma} = 0.72 \pm 0.06$  (стат.  $\oplus$  сист.).
- Получено значение интегрального сечения, которое составило  $\sigma = 93 \pm 8$  (стат.  $\oplus$  сист.) фбн.
- Произведена процедура «развёртывания» и получены дифференциальные сечения как функции 6-ти переменных:  $E_T^\gamma$ ,  $E_T^{\text{miss}}$ ,  $N_{\text{jets}}$ ,  $\eta_\gamma$ ,  $p_T^{j1}$ ,  $p_T^{j2}$ . Проведена валидация измерений.

В силу хорошего согласия в высокоэнергетической области аномальные вершины не найдены и работа может далее использоваться для постановки пределов.

## Спасибо за внимание!

**BACK-UP**

# Оптимизация отборов

Variable	1	2	3	4
$E_T^{miss} \text{ signif.}$		> 11		—
$\Delta\phi(E_T^{miss}, \gamma)$		> 0.6		—
$\Delta\phi(E_T^{miss}, j_1)$		> 0.3		—
$E_T^{miss}, \text{ GeV}$		>130		—
Signal				
Z( $\nu\nu$ ) $\gamma$ QCD	9928 $\pm$ 8	10021 $\pm$ 8	10711 $\pm$ 8	13934 $\pm$ 9
Z( $\nu\nu$ ) $\gamma$ EWK	151.6 $\pm$ 0.3	153.6 $\pm$ 0.3	166.3 $\pm$ 0.3	312.3 $\pm$ 0.4
Total signal	10080 $\pm$ 8	10175 $\pm$ 8	10878 $\pm$ 8	14247 $\pm$ 9
Background				
W $\gamma$ QCD	3022 $\pm$ 20	3061 $\pm$ 20	3310 $\pm$ 21	6795 $\pm$ 29
W $\gamma$ EWK	99.9 $\pm$ 0.6	101.3 $\pm$ 0.6	109.4 $\pm$ 0.6	309.8 $\pm$ 1.1
tt, top	156 $\pm$ 5	176 $\pm$ 5	201 $\pm$ 6	2800 $\pm$ 22
W( $e\nu$ )	3091 $\pm$ 453	3409 $\pm$ 521	3591 $\pm$ 487	8540 $\pm$ 663
tty	161 $\pm$ 3	163 $\pm$ 3	178 $\pm$ 3	787 $\pm$ 6
$\gamma$ +j	7642 $\pm$ 79	7757 $\pm$ 80	8123 $\pm$ 82	67517 $\pm$ 217
Zj	221 $\pm$ 16	328 $\pm$ 20	415 $\pm$ 21	2583 $\pm$ 50
Z(l)l $\gamma$	197 $\pm$ 4	200 $\pm$ 4	211 $\pm$ 4	426 $\pm$ 5
W( $\tau\nu$ )	412 $\pm$ 65	575 $\pm$ 72	640 $\pm$ 69	4615 $\pm$ 138
Total bkg.	15002 $\pm$ 465	15770 $\pm$ 533	16779 $\pm$ 499	94373 $\pm$ 714
Stat. signif.	63.6 $\pm$ 0.6	63.2 $\pm$ 0.6	65.4 $\pm$ 0.6	43.23 $\pm$ 0.14

Table 33: The results of selection optimisation at three different working points *FixedCutTight*, *FixedCutTightCaloOnly*, *FixedCutLoose*.

# Фоновые процессы

- конечные состояния  $\tau\nu\gamma$  и  $l\nu\gamma$  от КХД и электрослабого рождения  $W\gamma$ , где  $\tau$  распадается на адроны, или где электрон или мюон от распада  $\tau$  или  $W$  не регистрируются детектором;
- события  $\gamma$  + струя, в которых большой  $E_T^{\text{miss}}$  возникает из комбинации реального  $E_T^{\text{miss}}$  от нейтрино в распадах тяжелых кварков и от неверно измеренной энергии струй;
- события  $W(e\nu)$ ,  $t$ -кварк и  $t\bar{t}$ , где электрон в конечном состоянии неверно идентифицируется как фотон ( $e \rightarrow \gamma$ );
- события от рождения  $t\bar{t}\gamma$ , когда один или оба  $W$ -бозона от распада  $t$ -кварка распадаются на лептоны. Эти лептоны либо распадаются на  $\tau$ -лептоны, которые либо распадаются на адроны, либо не реконструируются;
- события  $Z(l\nu) + \gamma$  (преимущественно  $\tau$ -лептоны), где  $\tau$  распадается на адроны или когда электрон или мюон от распада  $\tau$  или  $Z$  не регистрируется.

**Потерянный поперечный импульс**  $\vec{p}_T^{\text{miss}}$

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

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

$$E_{x(y)}^{\text{miss}} = E_{x(y)}^{\text{miss}, e} + E_{x(y)}^{\text{miss}, \gamma} + E_{x(y)}^{\text{miss}, \text{jets}} + E_{x(y)}^{\text{miss}, \text{soft}} + E_{x(y)}^{\text{miss}, \mu}$$

**Софттерм реконструируется как потерянный поперечный импульс не ассоциированный ни с одной из жестких частиц.**

$E_T^{\text{cone}20}$  задает энергвыделение в калориметре внутри конуса раствором  $\Delta R = 0.2$  внутри трека кандидата в фотон

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

где  $\sigma_L$  - дисперсия измерения потерянного поперечного импульса в продольном направлении

$\rho_{LT}$  - корреляционный фактор измерения продольной и поперечной компонент потерянного поперечного импульса

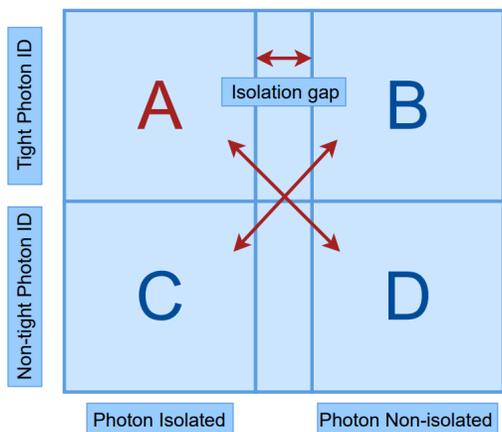
# ABCD метод оценки $jet \rightarrow \gamma$

$loose'2 : w_{s3}, F_{side}$

$loose'3 : w_{s3}, F_{side}, \Delta E$

$loose'4 : w_{s3}, F_{side}, \Delta E, E_{ratio}$

$loose'5 : w_{s3}, F_{side}, \Delta E, E_{ratio}, w_{tot}$



**A (CO):**  $E_T^{cone20} - 0.065 p_T^Y < 0$ , tight

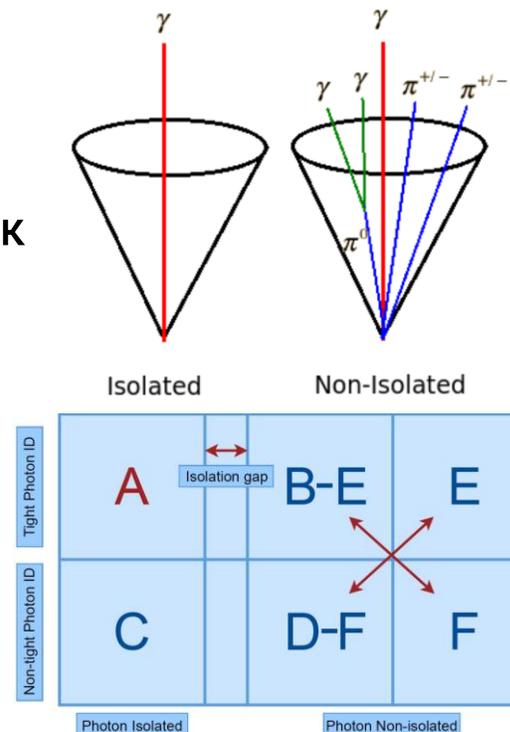
**B (KO):**  $isogap < E_T^{cone20} - 0.065 p_T^Y$ , tight

**C (KO):**  $E_T^{cone20} - 0.065 p_T^Y < 0$ , non-tight

**D (KO):**  $isogap < E_T^{cone20} - 0.065 p_T^Y$ , non-tight

- $w_{s3}$  - ширина электромагнитного ливня с использованием трех стрипов вокруг стрипа с максимальной энергией
- $F_{side}$  - доля энергии вне трех стрипов, но внутри семи
- $\Delta E$  - разница энергий стрипов, где в одном слое выделилась вторая по величине энергия, и стрипа, где выделилась наи меньшая энергия
- $E_{ratio}$  - отношение разности энергий, ассоциированных с наиболее высоким и вторым по величине выделением энергии к сумме этих энергий
- $w_{tot}$  - полная поперечная ширина ливня

$$N_A^{jet \rightarrow \gamma} = 1770 \pm 160 \pm 350$$



# ABCD метод оценки jet $\rightarrow \gamma$

- «жесткая» (tight) и изолированная (isolated) область (область А — СО): события в этой области содержат фотон, который удовлетворяет условию:  $E_T^{\text{cone}20} - 0.065 \cdot p_T^\gamma < 0$  ГэВ и удовлетворяет «жесткому» идентификационному критерию;
- «жесткая» (tight), но неизолированная (non-isolated) область (КО В): события в этой области содержат фотон, который удовлетворяет условию: изоляционный зазор, ГэВ  $< E_T^{\text{cone}20} - 0.065 \cdot p_T^\gamma$  и удовлетворяет «жесткому» идентификационному критерию;

- «мягкая» (loose) и изолированная (isolated) область (КО С): события в этой области содержат фотон, который удовлетворяет условию:  $E_T^{\text{cone}20} - 0.065 \cdot p_T^\gamma < 0$  ГэВ и удовлетворяет «мягкому» идентификационному критерию;
- «мягкая» (loose), но неизолированная (non-isolated) область (КО D): события в этой области содержат фотон, который удовлетворяет условию: изоляционный зазор, ГэВ  $< E_T^{\text{cone}20} - 0.065 \cdot p_T^\gamma$  и удовлетворяет «мягкому» идентификационному критерию.

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

$$\begin{aligned}
 c_B &= \frac{N_B^{Z(\nu\bar{\nu})\gamma}}{N_A^{Z(\nu\bar{\nu})\gamma}}; \\
 c_C &= \frac{N_C^{Z(\nu\bar{\nu})\gamma}}{N_A^{Z(\nu\bar{\nu})\gamma}}; \\
 c_D &= \frac{N_D^{Z(\nu\bar{\nu})\gamma}}{N_A^{Z(\nu\bar{\nu})\gamma}}.
 \end{aligned}$$

$$N_A^{Z(\nu\bar{\nu})\gamma} = \tilde{N}_A - R(\tilde{N}_B - c_B N_A^{Z(\nu\bar{\nu})\gamma}) \frac{\tilde{N}_C - c_C N_A^{Z(\nu\bar{\nu})\gamma}}{\tilde{N}_D - c_D N_A^{Z(\nu\bar{\nu})\gamma}}.$$

- loose'2:  $w_{s3}, F_{\text{side}}$
- loose'3:  $w_{s3}, F_{\text{side}}, \Delta E$
- loose'4:  $w_{s3}, F_{\text{side}}, \Delta E, E_{\text{ratio}}$
- loose'5:  $w_{s3}, F_{\text{side}}, \Delta E, E_{\text{ratio}}, w_{\text{tot}}$

$$\begin{aligned}
 N_A^{Z(\nu\bar{\nu})\gamma} &= \frac{b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, & a &= c_D - R c_B c_C; \\
 & & b &= \tilde{N}_D + c_D \tilde{N}_A - R(c_B \tilde{N}_C + c_C \tilde{N}_B); \\
 & & c &= \tilde{N}_D \tilde{N}_A - R \tilde{N}_C \tilde{N}_B.
 \end{aligned}$$

	loose'2	loose'3	loose'4	loose'5
$R_{\text{data}}$	$0.99 \pm 0.18$	$1.05 \pm 0.15$	$1.07 \pm 0.14$	$1.09 \pm 0.16$

	Данные	$W\gamma$	$e \rightarrow \gamma$	$tt\gamma$	$\gamma+\text{jet}$	$Z(l)\gamma$
A	$23380 \pm 150$	$3420 \pm 20$	$2608 \pm 11$	$178 \pm 3$	$8120 \pm 80$	$211 \pm 4$
B	$270 \pm 16$	$17.7 \pm 1.3$	$4.269 \pm 0.016$	$0.46 \pm 0.14$	$7 \pm 3$	$0.6 \pm 0.2$
C	$4390 \pm 70$	$108 \pm 3$	$92.8 \pm 0.3$	$6.1 \pm 0.5$	$259 \pm 13$	$7.1 \pm 0.6$
D	$500 \pm 20$	$0.6 \pm 0.2$	$0 \pm 0$	$0.07 \pm 0.05$	$0.06 \pm 0.06$	$0 \pm 0$

# ABCD метод оценки $jet \rightarrow \gamma$

- **Статистическая погрешность:**

⇒ Числа событий в 4-ех регионах в данных и не  $jet \rightarrow \gamma$  фонах проварьированы на  $\pm 1\sigma$  независимо (9%).

⇒ Статистические погрешности на параметры утечки незначительны.

Итоговая статистика: 9%.

Центральное значение	1765
loose'2	+240
loose'3	+85
loose'5	-55
Изоляционный зазор +0.3 ГэВ	-60
Изоляционный зазор -0.3 ГэВ	+33

- **Систематическая погрешность :**

⇒ Определение областей и выбор изоляционного зазора – варьирование ABCD определения областей на  $\pm 1\sigma$  в данных (14%).

⇒ Отклонение от номинального значения путем фарьирования R на  $\pm 0.10$  (14%).

⇒ погрешность на параметры «утечки» путем использования альтернативного МК генератора и различных моделей партонных ливней(0.7%).

Central value	1765
$R + \Delta R$	+241
$R - \Delta R$	-244

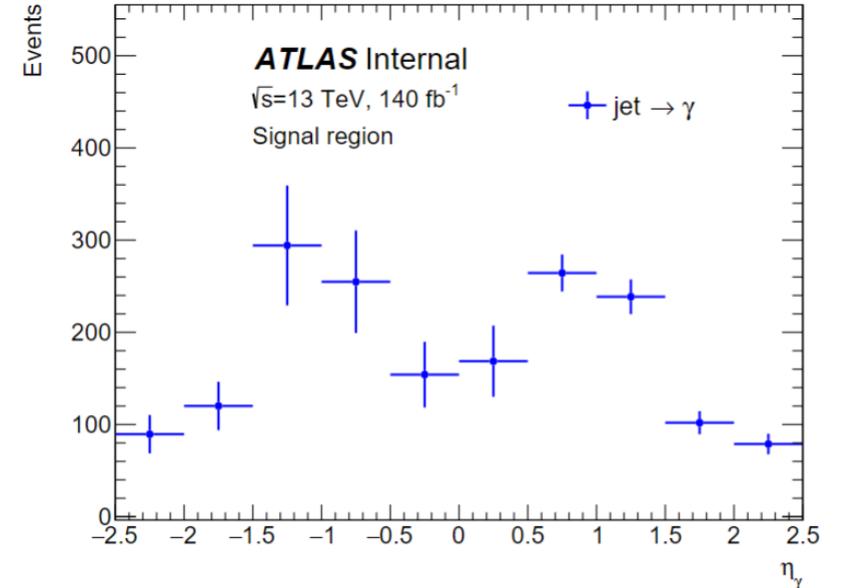
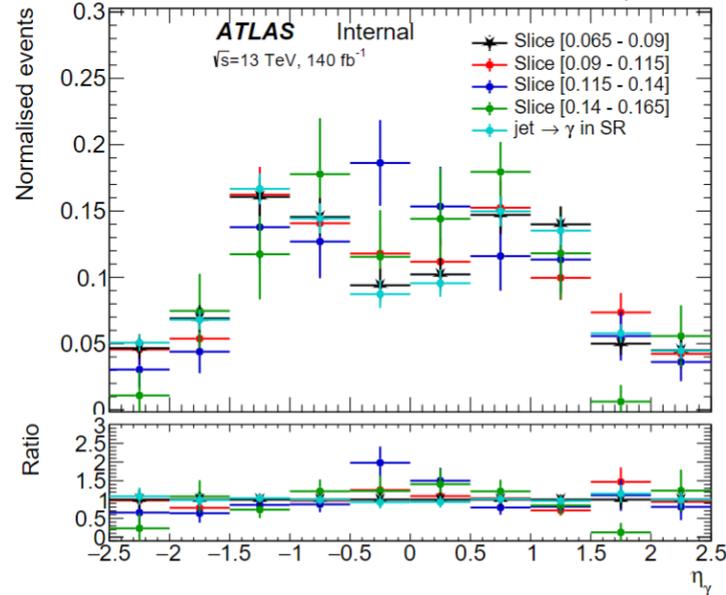
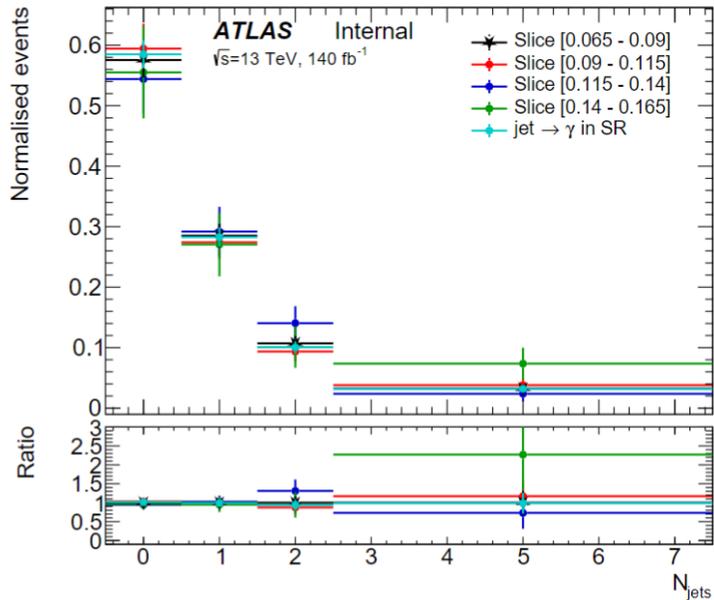
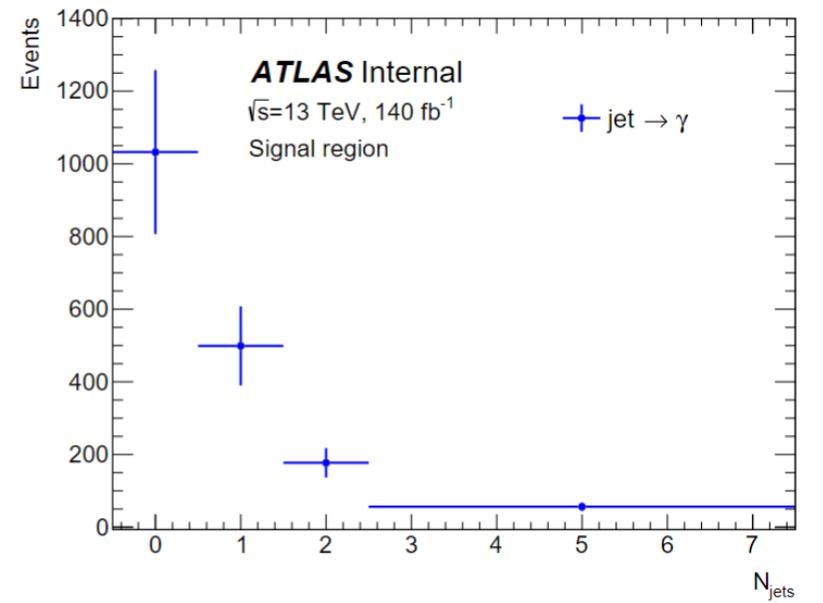
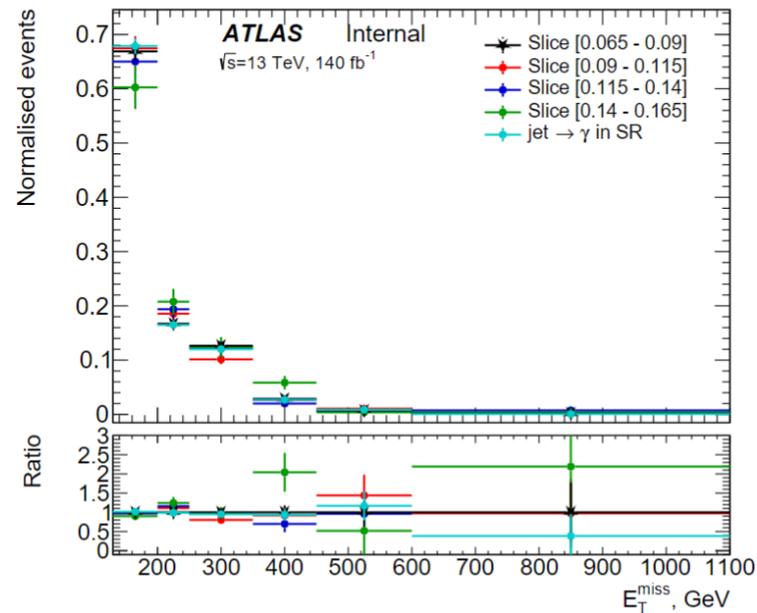
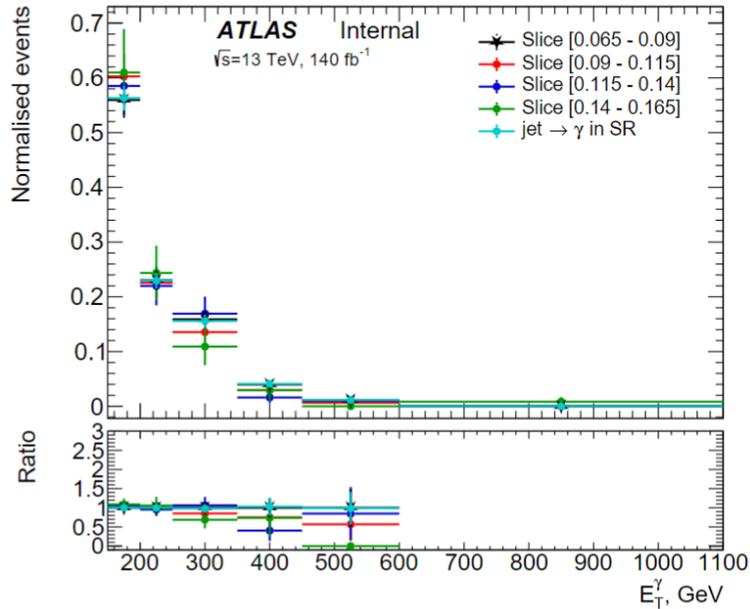
Параметры утечки	Различные МК генераторы и модели партонных ливней		
	MadGraph+Pythia8, Sherpa 2.2	MadGraph+Herwig7, MadGraph+Pythia8	$\delta$
$c_B$	$(278 \pm 4) \cdot 10^{-5}$	$(47 \pm 2) \cdot 10^{-4}$	7%
$c_C$	$(3205 \pm 14) \cdot 10^{-5}$	$(301 \pm 6) \cdot 10^{-4}$	3%
$c_D$	$(178 \pm 11) \cdot 10^{-6}$	$(39 \pm 6) \cdot 10^{-5}$	120%
$jet \rightarrow \gamma$	1765	1752	0.7%

⇒ Погрешность на эффективность реконструкции фотона  $\delta_{\text{eff}}^{\text{iso/ID}}$  (1.3%).

Итоговая систематика: 20%.

⇒ **Оценка  $jet \rightarrow \gamma$  событий :  $1770 \pm 160 \pm 350$ . Z(vv)+jets и multi-jet MC предсказывают  $2000 \pm 1300$  событий.**

# jet $\rightarrow \gamma$ : метод интервалов



# Метод максимального правдоподобия

$$\mathcal{L}(\mu, \theta) = \prod_r^{\text{regions}} \left[ \prod_i^{\text{bins} \in r} \text{Pois}(N_i^{\text{data}} | \mu \nu_i^s \eta^s(\theta_i) + \nu_i^b \eta^b(\theta_i)) \right] \cdot \prod_i^{\text{nuis. par.}} \mathcal{L}(\theta_i),$$

- $N_i^{\text{data}}$  есть количество наблюдаемых событий в данных в бине;
- $\nu_i$  есть ожидаемое количество сигнальных или фоновых событий в бине
- $\eta(\theta_i)$  есть функция отклика, отражающая влияние систематических неопределенностей и ограничений нормировки на количество событий в бине с помощью набора ПП  $\theta$ ;
- $\mathcal{L}(\theta_i)$  есть функция правдоподобия «вспомогательного измерения», отражающая природу систематических неопределенностей. С точки зрения статистической модели – это «ограничивающий» множитель, уменьшающий значение правдоподобия и не позволяющий принимать ей любые значения.

Функция  $q(\mu, \hat{\mu}, \hat{\theta})$  используется для вычисления значимости измерения и неопределенностей оценок  $\hat{\mu}$  и  $\hat{\theta}$  и определяется как:

$$q(\mu, \hat{\mu}, \hat{\theta}) = -2 \ln \lambda(\mu, \hat{\mu}, \hat{\theta}) = -2 \ln \frac{\mathcal{L}(\mu, \hat{\theta}(\mu))}{\mathcal{L}(\hat{\mu}, \hat{\theta})}$$

$\lambda(\mu, \hat{\mu}, \hat{\theta})$  есть профиль правдоподобия (profile likelihood ratio)

# Теоретические погрешности

Погрешности, связанные с вариацией структурных функций и константы сильного взаимодействия:

- В соответствии с рекомендациями PDF4LHC учитываются внутренние PDF и  $\alpha_s$  компоненты для NNPDF3.0 NLO PDF набора. Для вычисления погрешности используется ансамбль из NNPDF3.0 PDF наборов (100 параметров в сумме). Для получения погрешности числа событий применяется следующий порядок действий:

1. Получение числа событий в бине  $X_i$  для  $i = 100$  вариаций NNPDF набора.
2. Замена отрицательных значений на 0 (если  $X_i < 0$ ,  $X_i = 0$ ).
3. Расстановка всех значений в порядке возрастания:

$$X^1 \leq X^2 \leq \dots \leq X^{99} \leq X^{100}.$$

4. Выбор значений, соответствующих границам 68% доверительного интервала, и получение погрешности:

$$\delta^{\text{PDF}} X = \frac{X^{84} - X^{16}}{2}.$$

- Для получения погрешности на константу сильного взаимодействия  $\alpha_s$  использовались верхняя и нижняя вариации:  $\alpha_s = 0.1180 \pm 0.0015$ . Погрешность вычисляется по формуле:

$$\delta^{\alpha_s} X = \frac{X(\alpha_s = 0.1195) - X(\alpha_s = 0.1165)}{2}.$$

- Также учитывается погрешность от альтернативных наборов CT14 и MMHT2014

# Теоретические погрешности

Погрешности, связанные с вариацией масштабов перенормировки и факторизации:

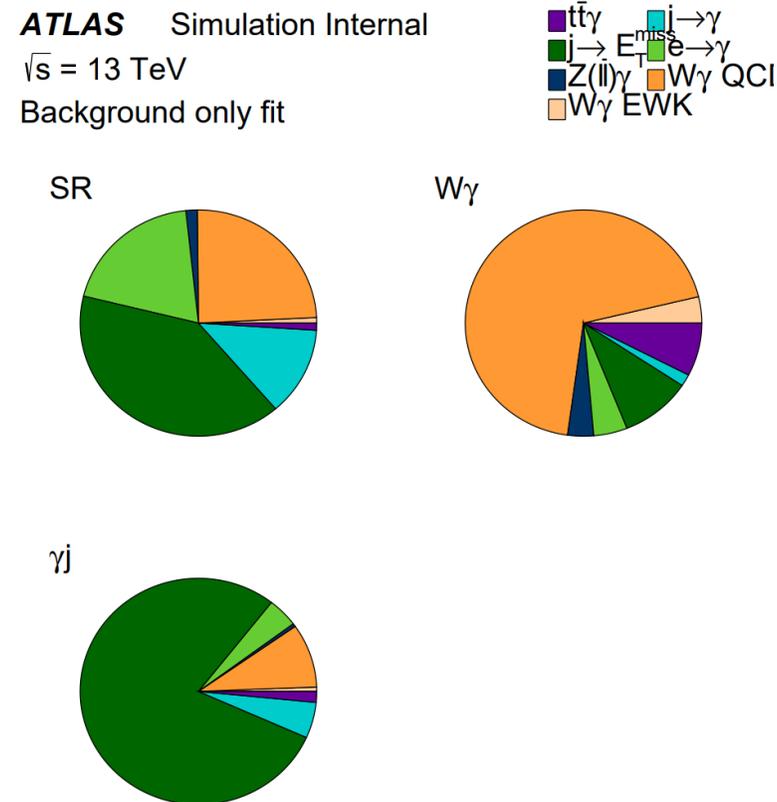
- Погрешности, связанные с вариацией масштабов перенормировки и фрагментации, оцениваются путем варьирования шкалы перенормировки  $\mu_R$  и шкалы факторизации  $\mu_F$ . Рассматриваются шесть комбинаций:

- $\mu_F = \mu_R = 0.5\mu_0$ ;
- $\mu_F = \mu_0, \mu_R = 0.5\mu_0$ ;
- $\mu_R = \mu_0, \mu_F = 0.5\mu_0$ ;
- $\mu_F = \mu_R = 2\mu_0$ ;
- $\mu_F = 2\mu_0, \mu_R = \mu_0$ ;
- $\mu_F = \mu_0, \mu_R = 2\mu_0$ .

Максимальное отклонение от номинального числа событий взято в качестве систематической погрешности.

Погрешности, связанные с моделированием партонных ливней:

$$\delta^{\text{model.}} X = |X^{\text{altern.}} - X^{\text{nominal}}|.$$



# Систематические погрешности

Значения систематических погрешностей фактора покрытия пространства детектором

Источник	Значение
PDF+ $\alpha_s$	1.86%
ММНТ2014	1.33%
СТ14	<0.1%

Значения систематических погрешностей коррекционного фактора

Источник	Значение
Оценка фонов из данных	4.02%
Эффективность триггера	1.38%
Светимость	<0.1%
Струи	5.13%
Электроны и фотоны	0.96%
Мюоны	<0.1%
Тау-лептоны	<0.1%
Энергия фотона	2.84%
$E_T^{\text{miss}}$	0.27%
Моделирование	2.42%

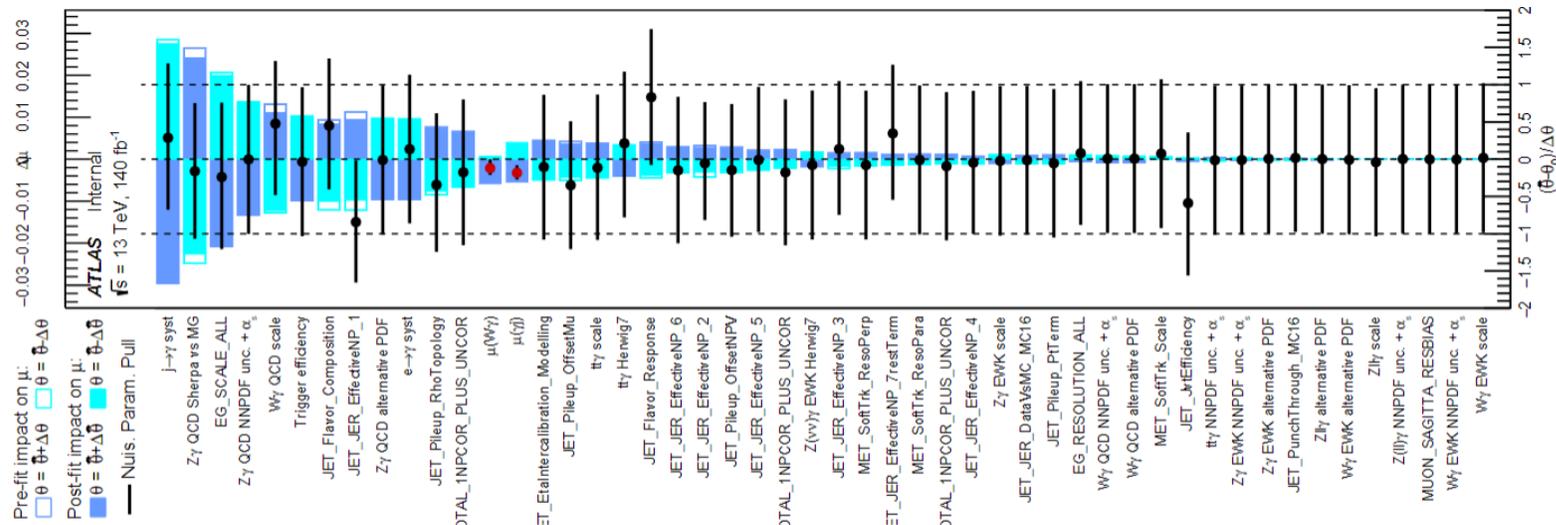
# Фитирование в КО

До фита:

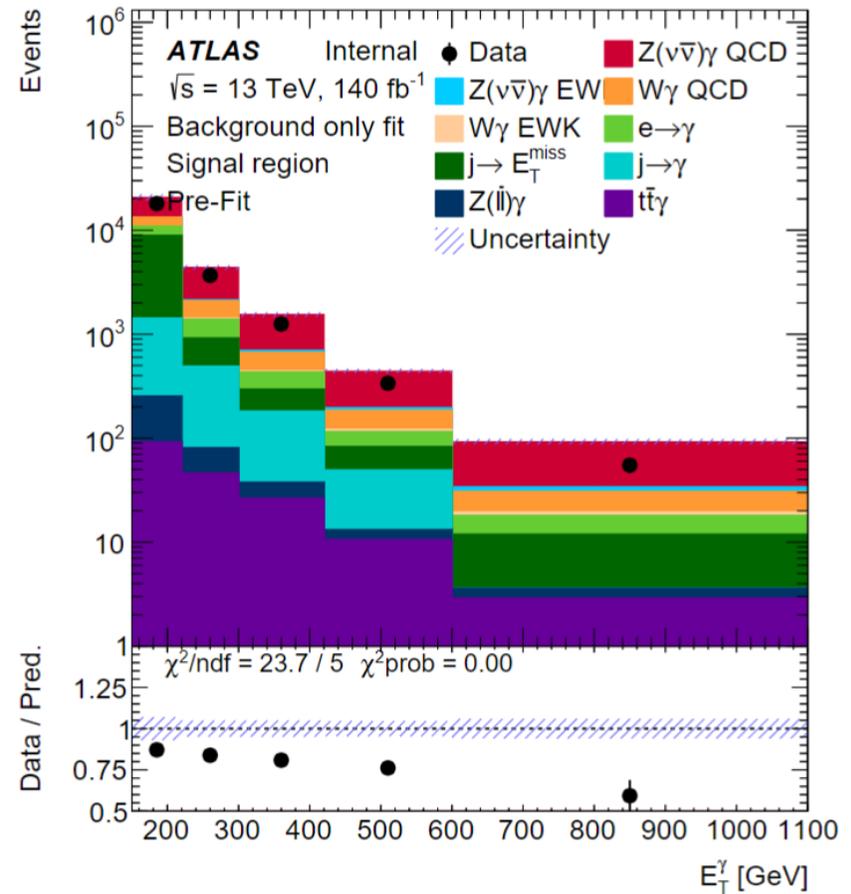
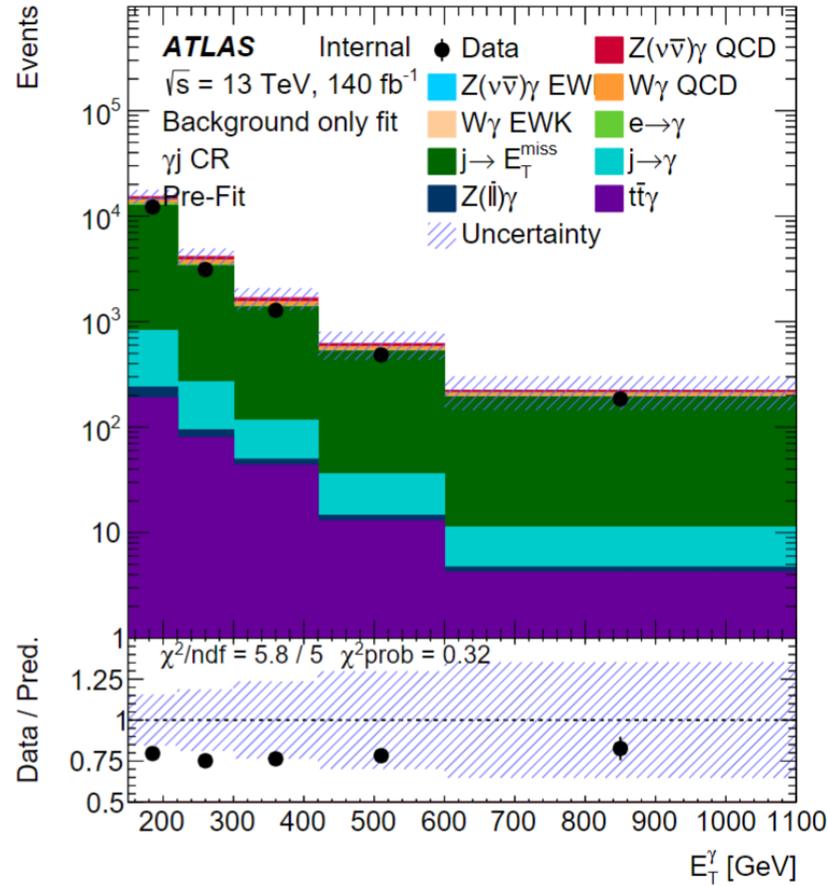
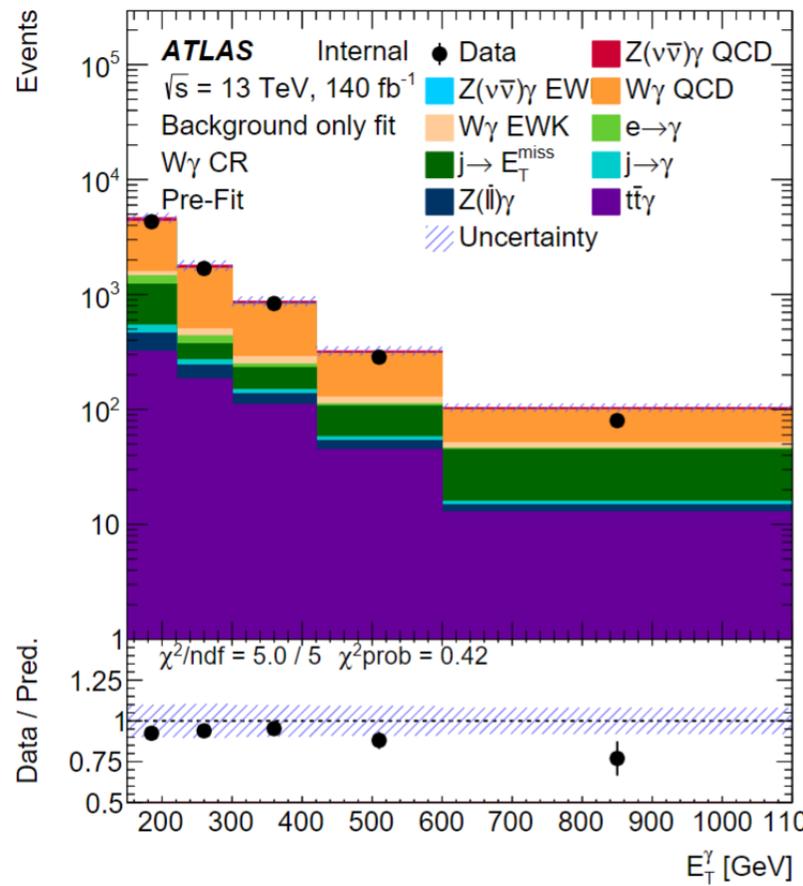
	$W\gamma$ КО	$\gamma j$ КО	CO
$Z(\nu\bar{\nu})\gamma$ QCD	$540.5 \pm 1.9$	$1596 \pm 3$	$10711 \pm 8$
$Z(\nu\bar{\nu})\gamma$ EWK	$12.39 \pm 0.09$	$85.2 \pm 0.2$	$166.3 \pm 0.3$
$W\gamma$ QCD	$4660 \pm 30$	$1431 \pm 12$	$3310 \pm 20$
$W\gamma$ EWK	$257.1 \pm 1.0$	$101.0 \pm 0.6$	$109.4 \pm 0.6$
$e \rightarrow \gamma$	$309 \pm 4$	$675 \pm 6$	$2608 \pm 11$
$j \rightarrow E_T^{\text{miss}}$	$950 \pm 30$	$16870 \pm 110$	$8120 \pm 80$
$j \rightarrow \gamma$	$118 \pm 11$	$850 \pm 80$	$1770 \pm 160$
$Z(\ell\bar{\ell})\gamma$	$241 \pm 4$	$73 \pm 2$	$211 \pm 4$
$t\bar{t}\gamma$	$671 \pm 6$	$330 \pm 4$	$178 \pm 3$
Total	$7750 \pm 40$	$22010 \pm 140$	$27180 \pm 180$
Data	7186	17277	23375

После фита:

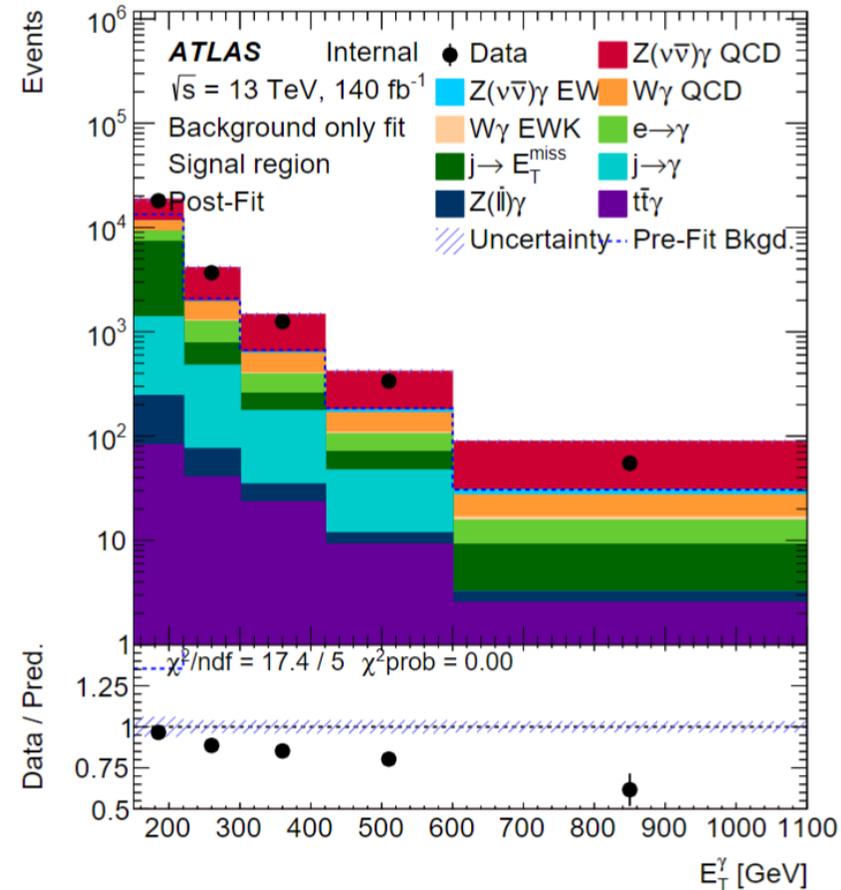
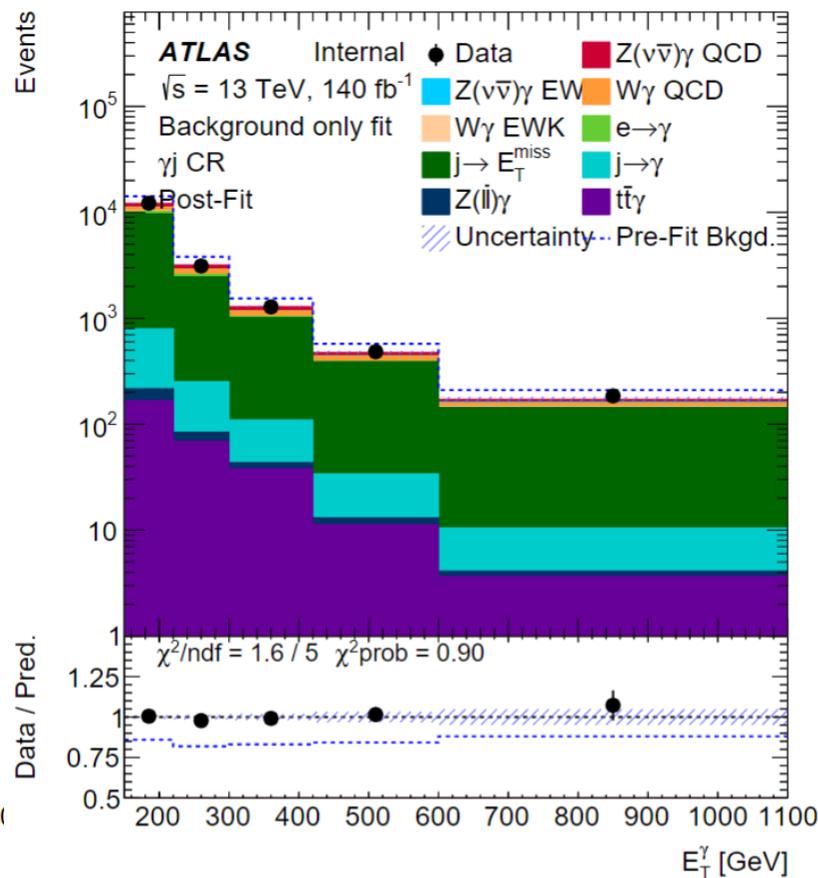
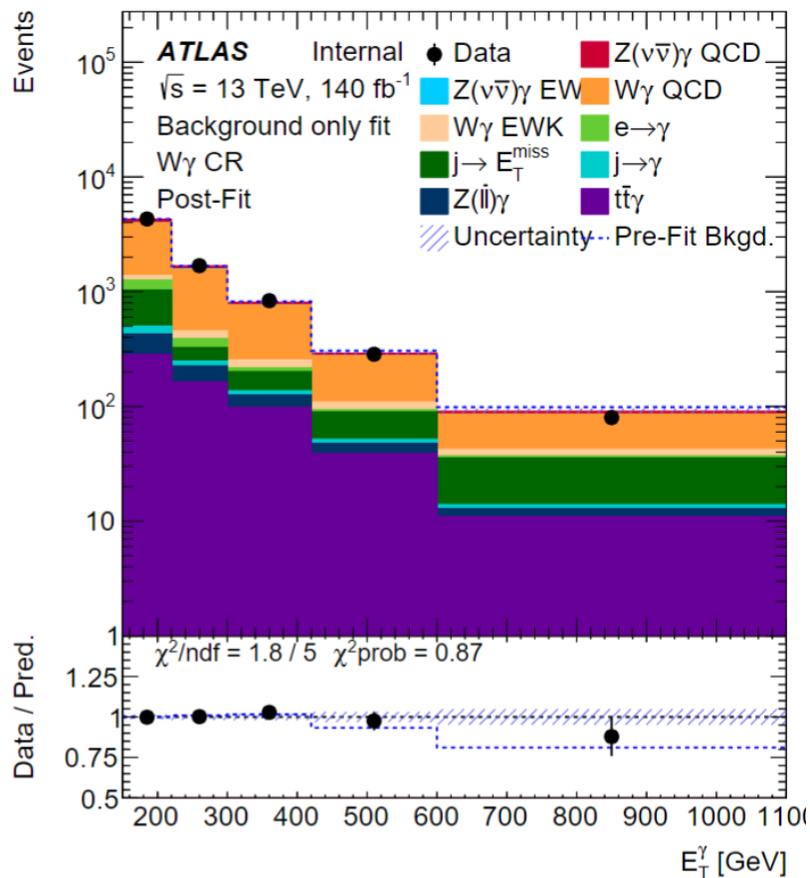
	$W\gamma$ КО	$\gamma j$ КО	CO
$Z(\nu\bar{\nu})\gamma$ QCD	$500 \pm 70$	$1400 \pm 300$	$10400 \pm 700$
$Z(\nu\bar{\nu})\gamma$ EWK	$12.4 \pm 1.3$	$84 \pm 10$	$165 \pm 18$
$W\gamma$ QCD	$4400 \pm 200$	$1400 \pm 200$	$3140 \pm 170$
$W\gamma$ EWK	$240 \pm 30$	$102 \pm 14$	$93 \pm 13$
$e \rightarrow \gamma$	$310 \pm 19$	$680 \pm 40$	$2610 \pm 160$
$j \rightarrow E_T^{\text{miss}}$	$740 \pm 110$	$12500 \pm 400$	$6300 \pm 1100$
$j \rightarrow \gamma$	$120 \pm 20$	$830 \pm 170$	$1700 \pm 300$
$Z(\ell\bar{\ell})\gamma$	$240 \pm 20$	$71 \pm 14$	$211 \pm 16$
$t\bar{t}\gamma$	$590 \pm 150$	$290 \pm 70$	$160 \pm 40$
Total	$7190 \pm 90$	$17280 \pm 150$	$24800 \pm 1300$
Data	7186	17277	23375



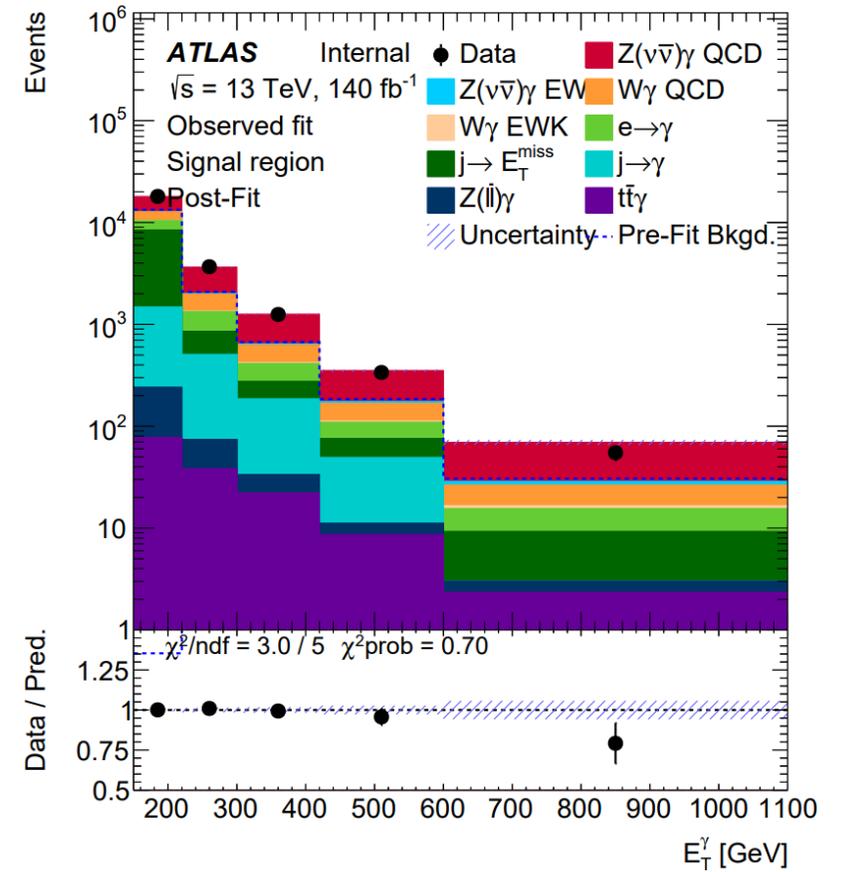
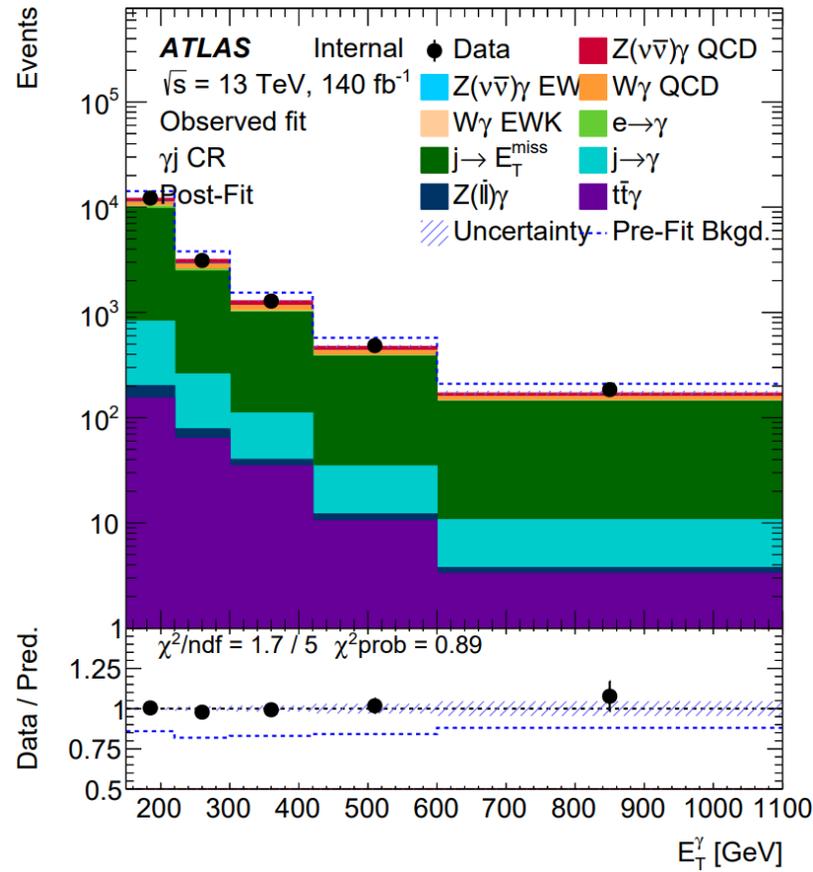
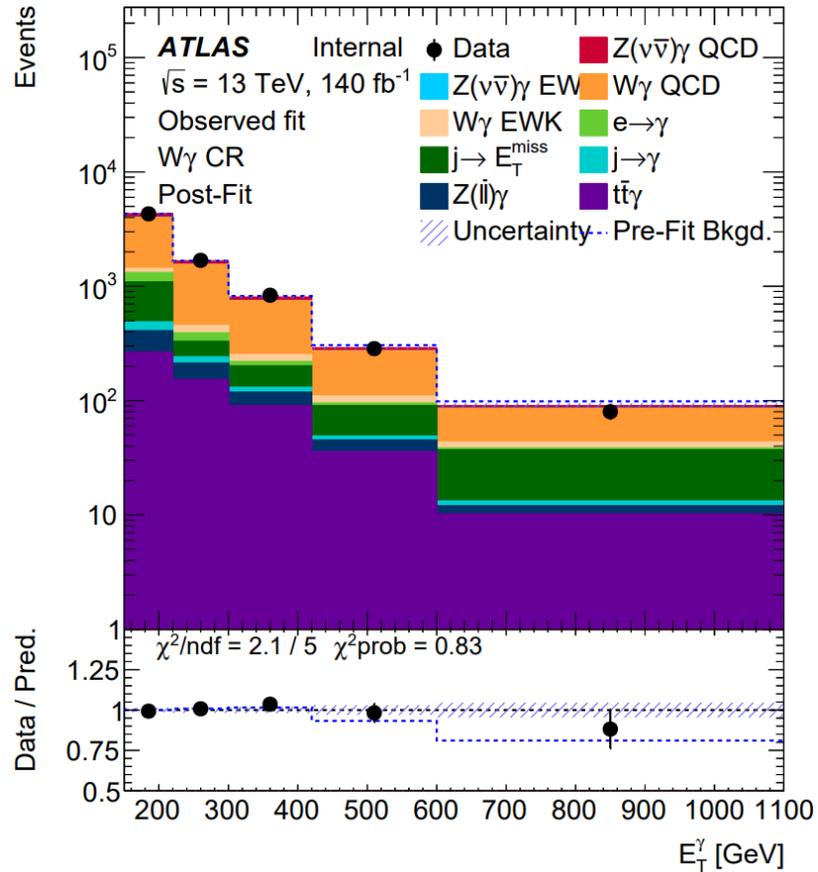
# До фитирования в КО



# После фитирования в К0

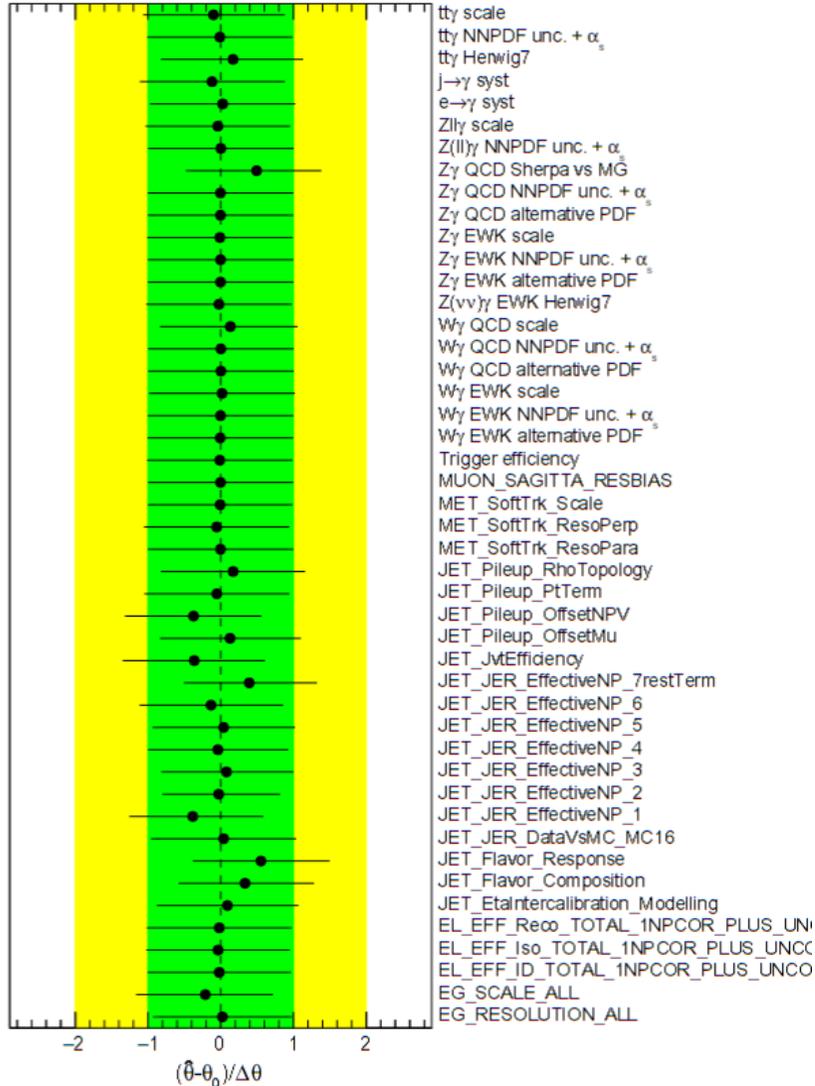


# После фитирования данными

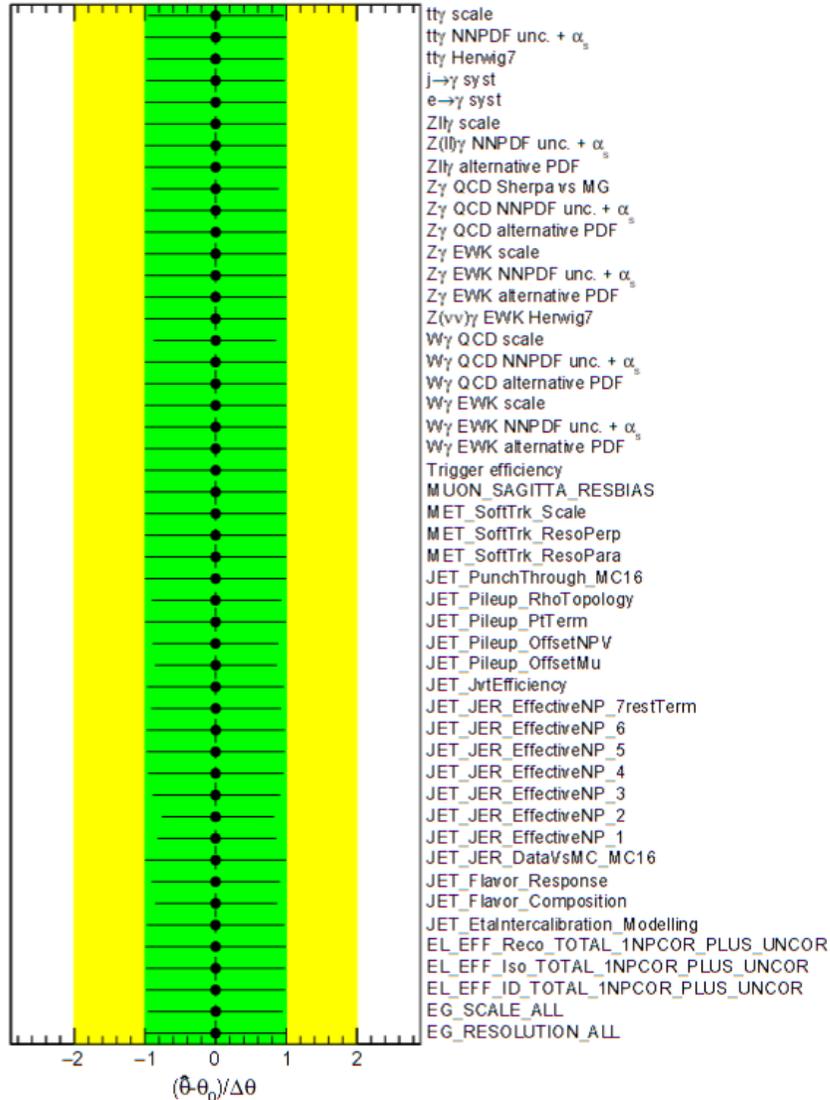


# Значения и погрешности ПП

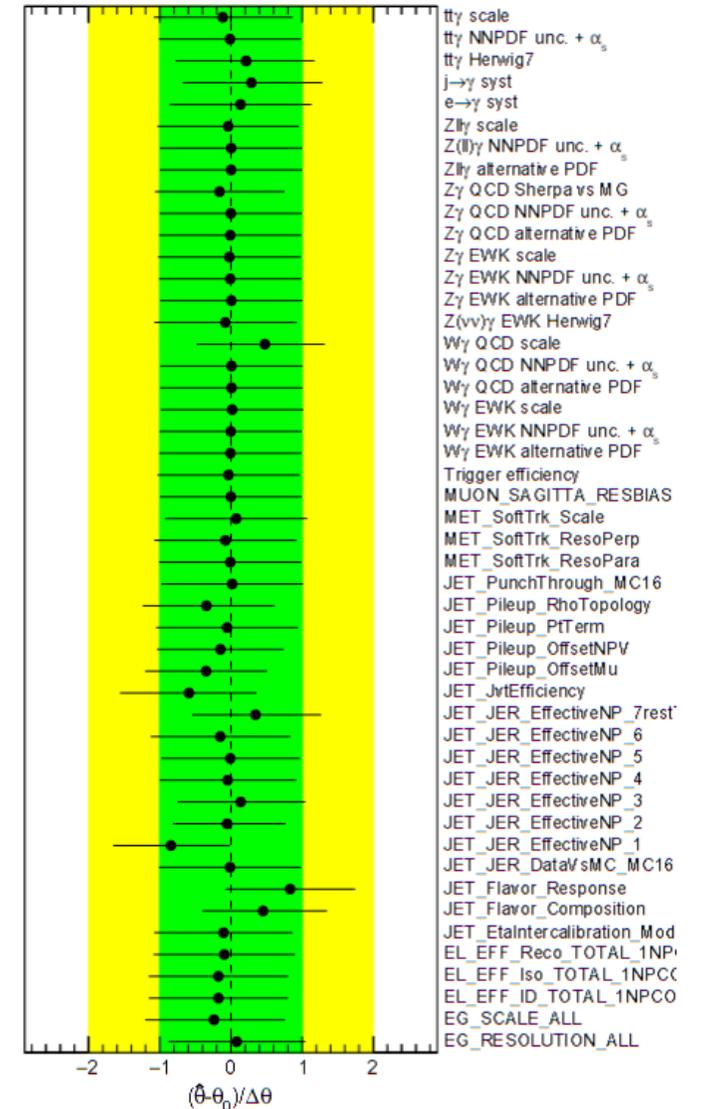
ATLAS Internal



ATLAS Internal

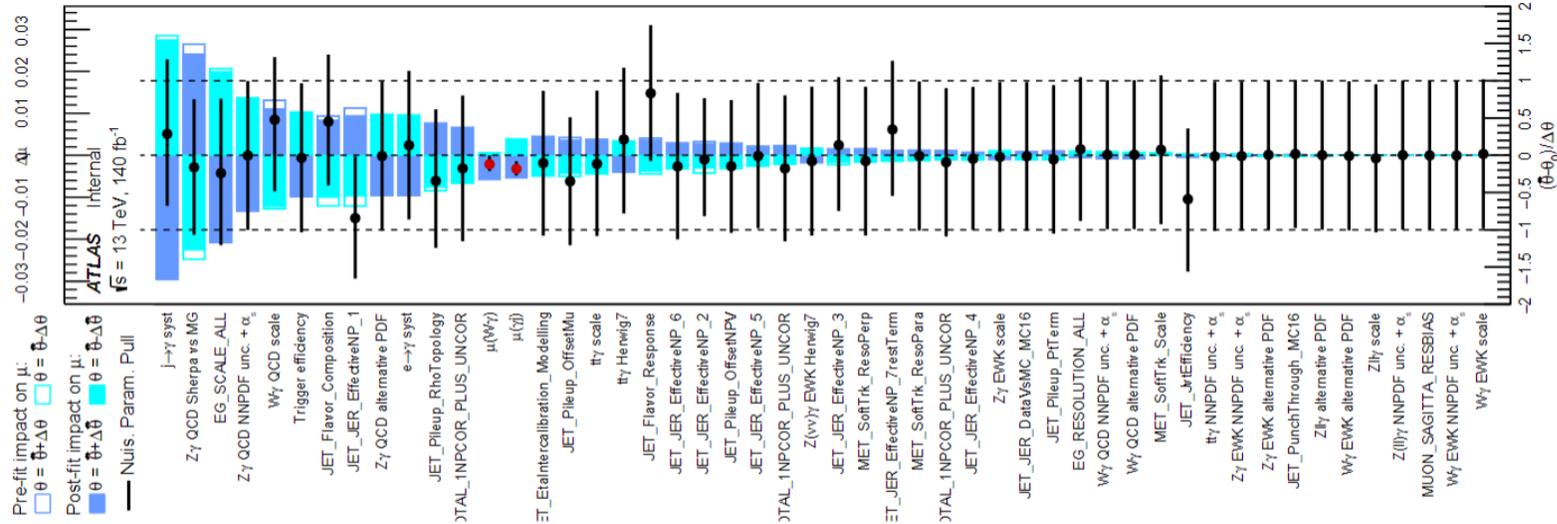
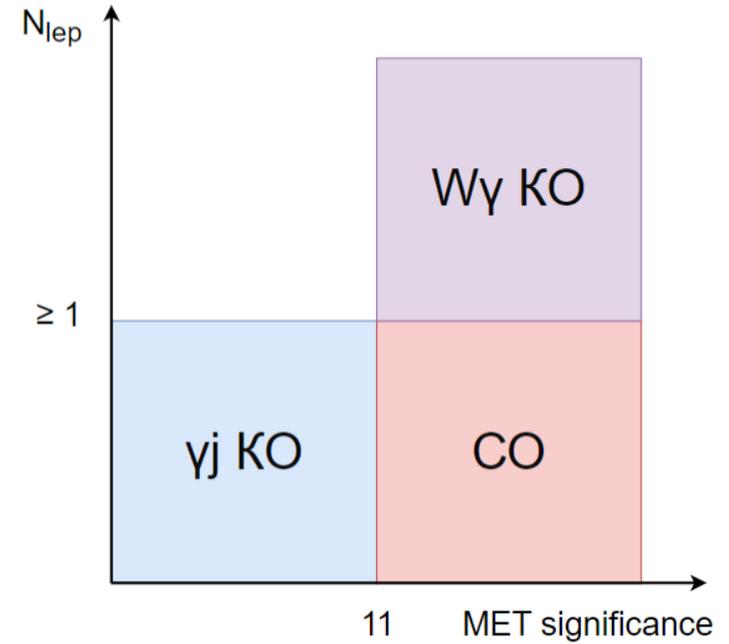


ATLAS Internal



# Фитирование данными

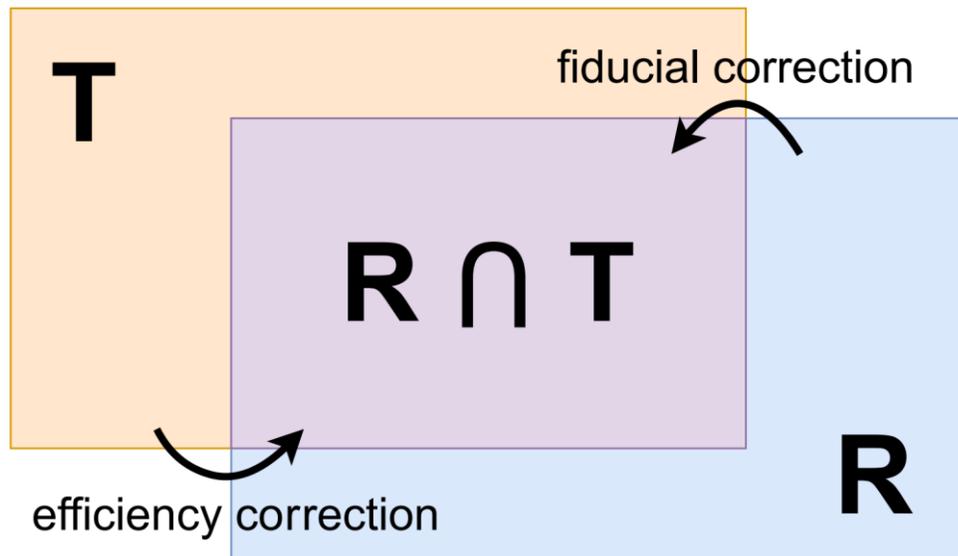
	$W\gamma$ KO	$\gamma j$ KO	CO
$Z(\nu\bar{\nu})\gamma$ QCD	$540 \pm 80$	$1500 \pm 300$	$7800 \pm 500$
$Z(\nu\bar{\nu})\gamma$ EWK	$12.2 \pm 1.3$	$82 \pm 9$	$118 \pm 15$
$W\gamma$ QCD	$4400 \pm 200$	$1300 \pm 180$	$3100 \pm 160$
$W\gamma$ EWK	$230 \pm 30$	$87 \pm 10$	$97 \pm 11$
$e \rightarrow \gamma$	$311 \pm 19$	$680 \pm 40$	$2630 \pm 160$
$j \rightarrow E_T^{\text{miss}}$	$830 \pm 70$	$12400 \pm 300$	$7400 \pm 400$
$j \rightarrow \gamma$	$120 \pm 20$	$900 \pm 170$	$1900 \pm 300$
$Z(\ell\bar{\ell})\gamma$	$240 \pm 20$	$69 \pm 14$	$213 \pm 16$
$t\bar{t}\gamma$	$550 \pm 140$	$270 \pm 70$	$150 \pm 40$
Total	$7190 \pm 90$	$17300 \pm 140$	$23360 \pm 160$
Data	7186	17277	23375



# Процедура «развёртывания»

$$R_{ij} = \frac{1}{\alpha_i} \varepsilon_j M_{ij}, \quad M_{ij} = \frac{N_{ij}^{\text{det.} \cap \text{fid.}}}{N_j^{\text{det.} \cap \text{fid.}}}$$

$$\alpha_i = \frac{N_i^{\text{det.} \cap \text{fid.}}}{N_i^{\text{det.}}}, \quad \varepsilon_j = \frac{N_j^{\text{det.} \cap \text{fid.}}}{N_j^{\text{fid.}}}, \quad \sigma_j = \frac{N_j^{\text{unfold}}}{(\int \mathcal{L} dt) \cdot \Delta x_j}$$



	Значение
$A_{Z\gamma}$	$0.9157 \pm 0.0008 \pm 0.0210$
$C_{Z\gamma}$	$0.7497 \pm 0.0007 \pm 0.0577$

Процедура «развёртывания» методом свертки заключается в следующих шагах:

- Домножение матрицы отклика  $\hat{R}$  на распределение на уровне генератора:

$$F_{ij} = R_{ij} \cdot T_j = \begin{pmatrix} \vec{r}_1 \\ \vec{r}_1 \\ \vdots \\ \vec{r}_n \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} t_1 \\ t_1 \\ \vdots \\ t_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \vec{f}_1 \\ \vec{f}_1 \\ \vdots \\ \vec{f}_n \end{pmatrix},$$

- Домножение каждой гистограммы  $\vec{f}_j$  на нормировочные коэффициенты  $\mu_j = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n)$ :

$$G_{ij} = F_{ij} \cdot \mu_j = \begin{pmatrix} \vec{f}_1 \\ \vec{f}_1 \\ \vdots \\ \vec{f}_n \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \mu_1 \\ \mu_1 \\ \vdots \\ \mu_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \vec{g}_1 \\ \vec{g}_1 \\ \vdots \\ \vec{g}_n \end{pmatrix}.$$

Далее все векторы  $\vec{g}_j$  складываются. В результате можно получить одно распределение с количеством бинов  $m$ .

- Фитирование «свернутого» распределения с помощью нормировочных коэффициентов  $\mu_j$ . В результате можно получить скорректированные нормировочные коэффициенты  $\mu'_j = (\mu'_1, \mu'_2, \dots, \mu'_n)$ .
- Домножение распределения на уровне генератора на скорректированные нормировочные коэффициенты  $\mu'_j = (\mu'_1, \mu'_2, \dots, \mu'_n)$ .

# Процедура «развёртывания»

## 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 $\Delta R(jet, \gamma) > 0.3$
Лептоны	$N_l = 0$
Нейтрино	$p_T^{\nu\bar{\nu}} > 130$ ГэВ
События	$ \Delta\phi(\vec{p}_T^{\text{miss}}, \gamma)  > 0.6$ $ \Delta\phi(\vec{p}_T^{\text{miss}}, j_1)  > 0.3$ Значимость $p_T^{\nu\bar{\nu}} > 11$

$$\mathcal{L}(\sigma, \theta, \lambda) = \prod_i P\left(N_i | \mathcal{L}_{\text{int}} \sum_j \mathcal{R}_{ij}(\vec{\theta}) \sigma_j(\vec{\theta}) + \mathcal{B}_i(\vec{\theta}, \lambda)\right) \times \prod_k G(\theta_k)$$

$$N_j = \mathcal{L}_{\text{int}} \sigma_j \text{ with } \sigma_j = \mu_j \sigma_j^{\text{MC}}$$

$$\mathcal{L}(\sigma, \theta, \lambda) = \mathcal{L}(\sigma, \theta, \lambda)_{\text{noreg.}} \times \left( -\frac{\tau^2}{2} \sum_{i=2}^{i+2 < N_{\text{bins}}} ((\mu_i - \mu_{i-1}) - (\mu_{i+1} - \mu_i))^2 \right)$$

$$\frac{\sigma_j}{\Delta x_j} = \frac{N_j^{\text{unfold}}}{(\int \mathcal{L} dt) \cdot \Delta x_j}$$

## Переменная

## Биннинг

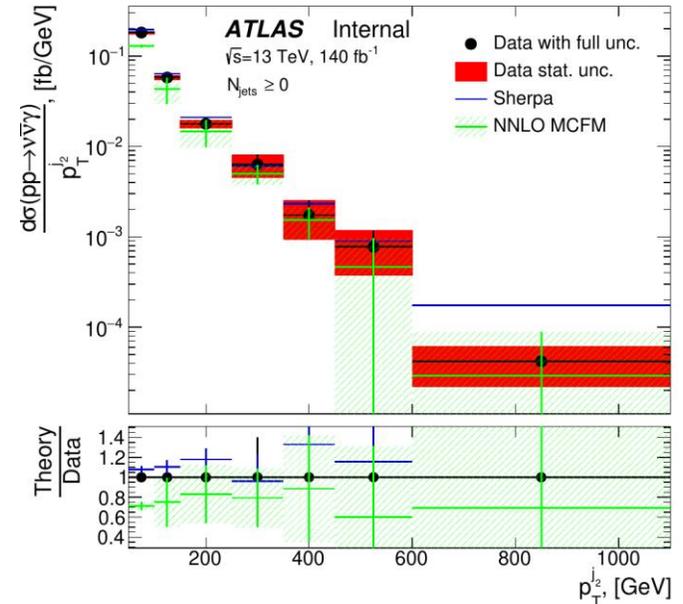
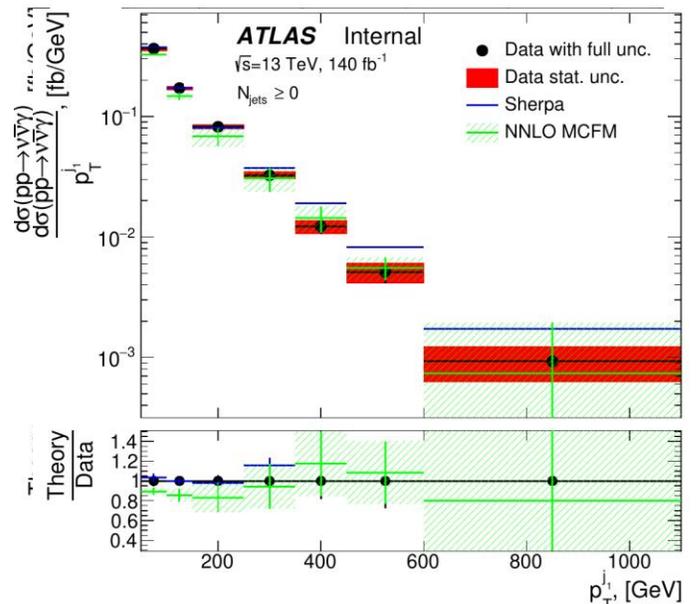
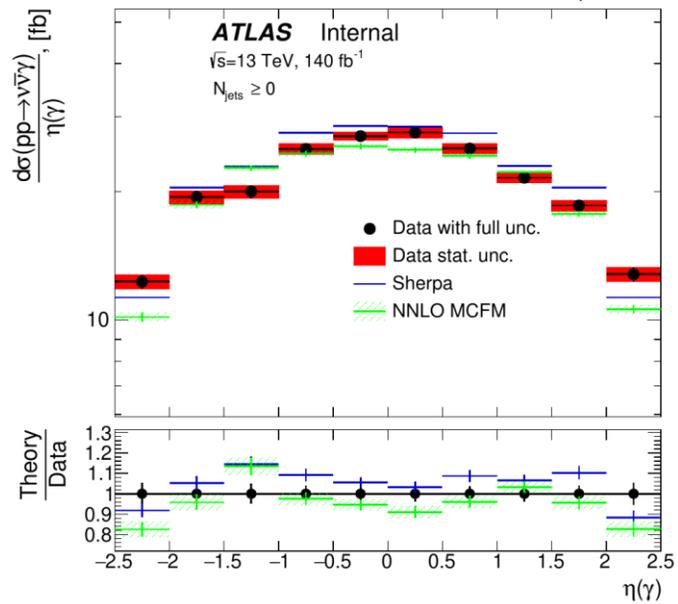
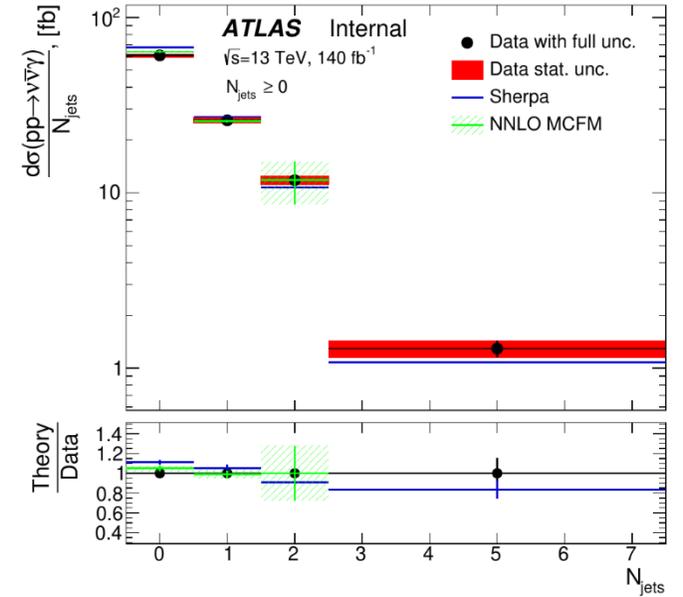
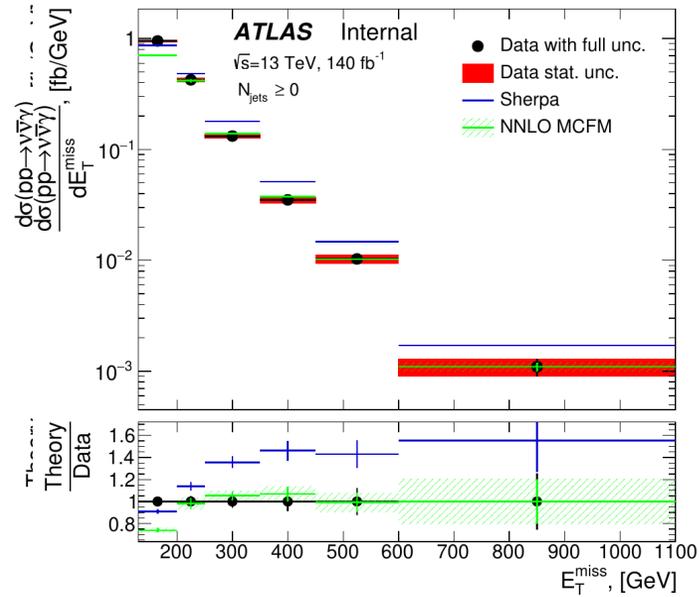
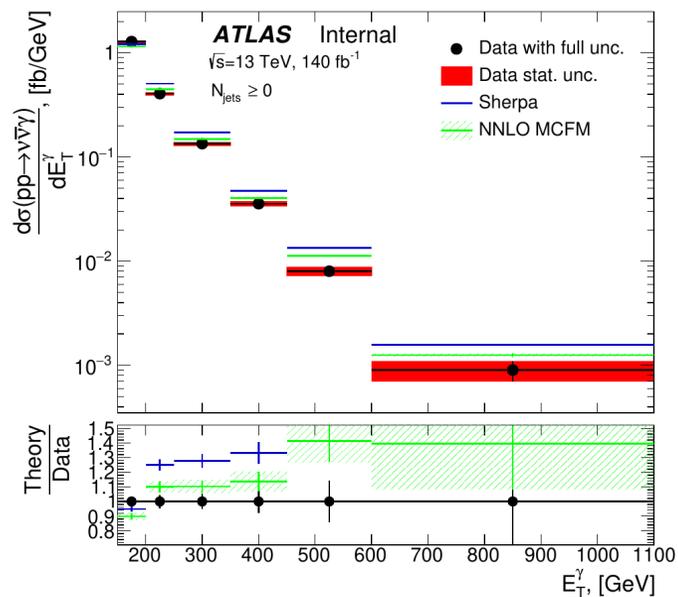
$p_T^\gamma$	[150, 200], [200, 250], [250, 350], [350, 450], [450, 600], [600, 1100]
$E_T^{\text{miss}}$	[130, 200], [200, 250], [250, 350], [350, 450], [450, 600], [600, 1100]
$N_{\text{jets}}$	[-0.5, 0.5], [0.5, 1.5], [1.5, 2.5], [2.5, 7.5]
$\eta_\gamma$	[-2.5, 2.5], 10 бинов
$p_T^{j_1}$	[50, 100, 150, 250, 350, 450, 600, 1100]
$p_T^{j_2}$	[50, 100, 150, 250, 350, 450, 600, 1100]

## Расширенная

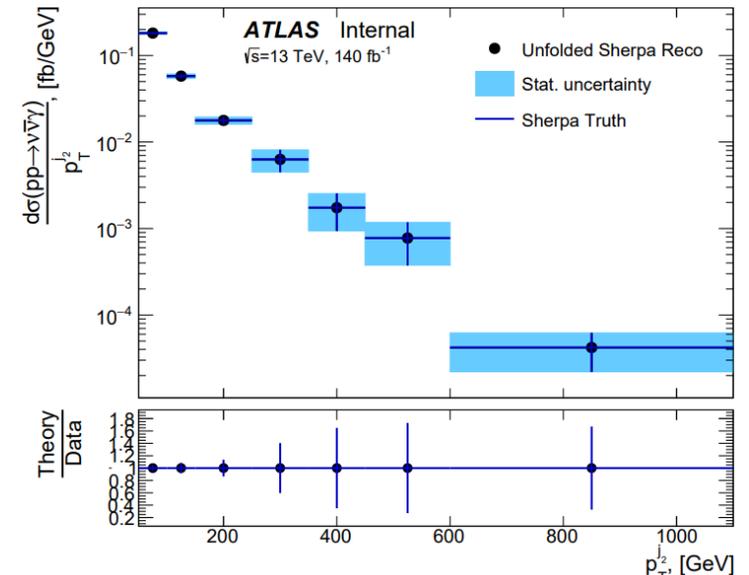
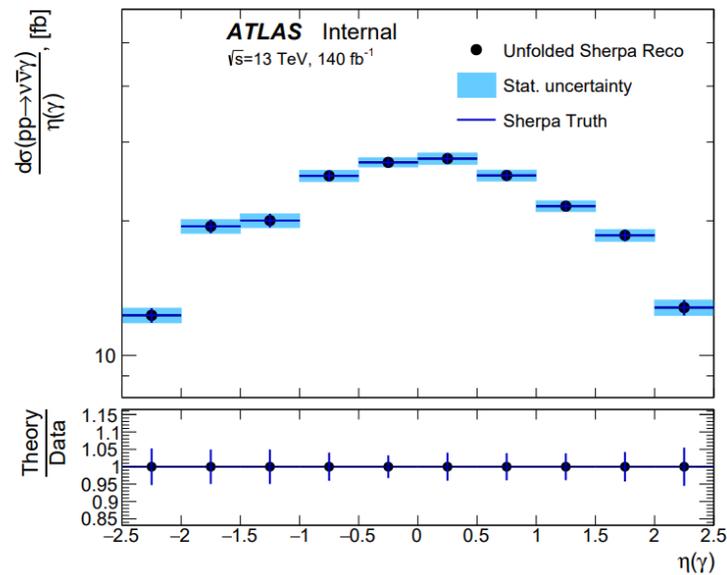
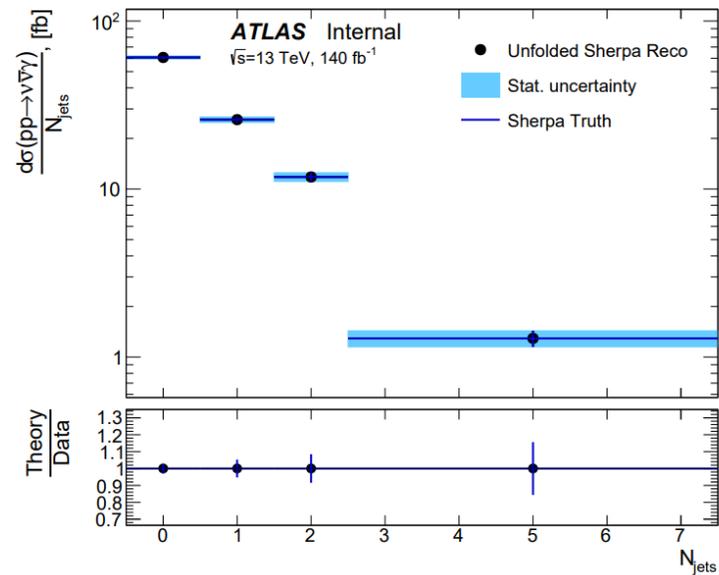
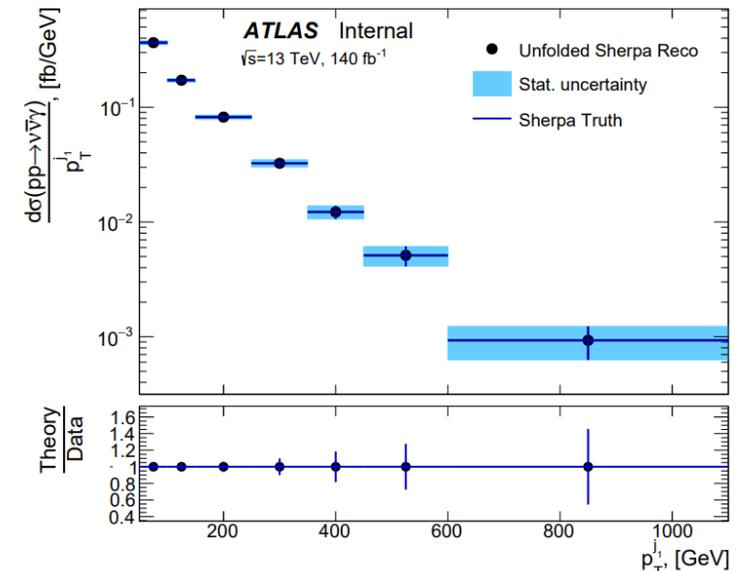
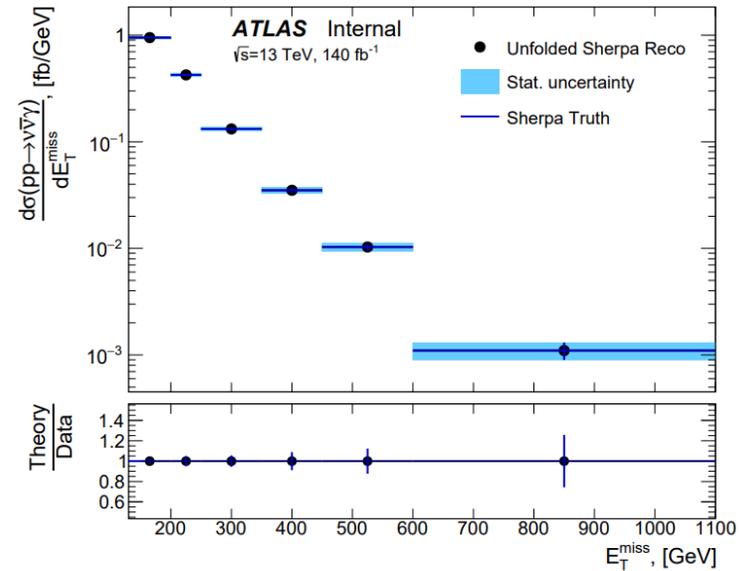
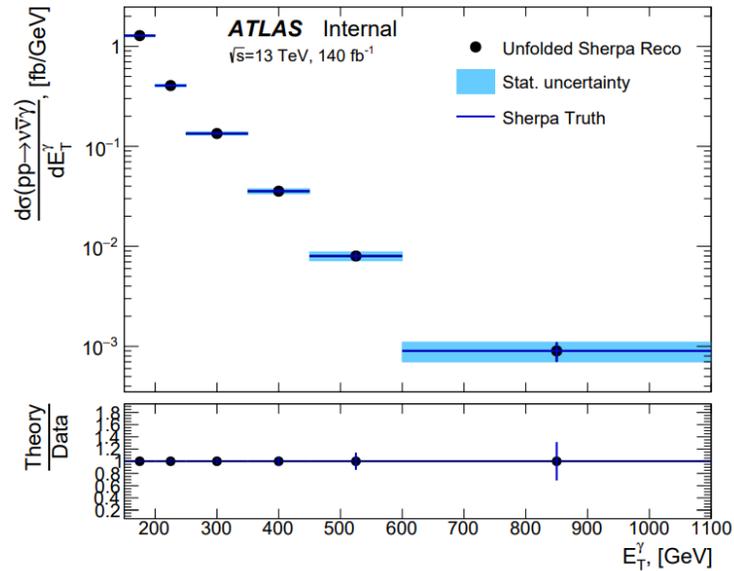
## доверительная область:

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

# Процедура «развёртывания»



# Валидационный тест А



# Валидационный тест В

