

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.

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



Защита НИРС
29.05.2023



Мотивация и задачи

Мотивация:

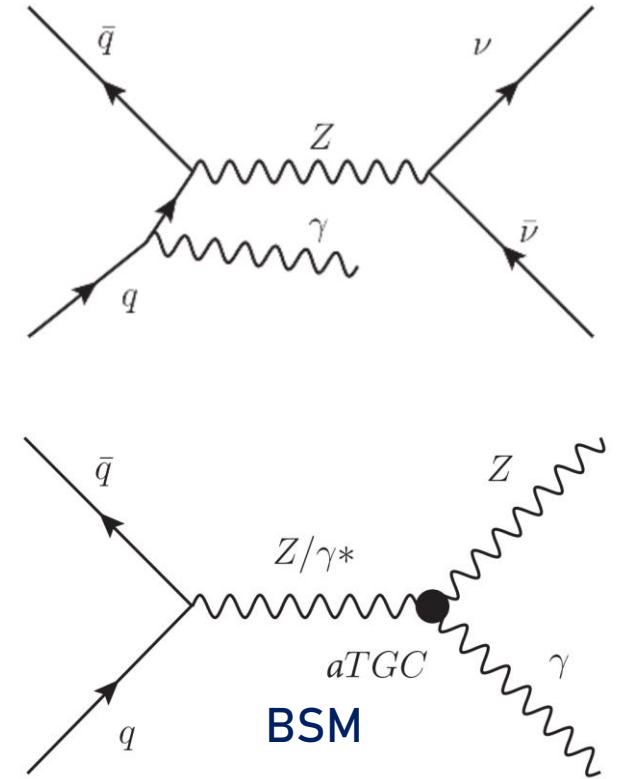
- Измерение дифференциальных сечений в рамках **Стандартной модели (СМ)** с точностью NNLO КХД поправок. Это даст возможность наблюдать отклонения от СМ в области высоких энергий;
- Поиск аномальных тройных вершин. Одним из чувствительных процессов для поиска «новой физики» является $Z(\nu\nu)\gamma$.

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 эффектов детектора;
- Получение дифференциальных сечений как функций различных переменных для дальнейшего сравнения наблюдений и предсказаний.



Фоны и определение фазового пространства

Сигнальный процесс: $Z(\nu\nu)\gamma$

Фоновые процессы: $\gamma + \text{jets}$, $W(\rightarrow l\nu)\gamma$, $e \rightarrow \gamma$, $\text{jet} \rightarrow \gamma$ (6 %), $Z(l\bar{l})\gamma$, $t\bar{t}\gamma$

Предотборы

Переменная	Ограничение
E_T^{miss}	$> 130 \text{ ГэВ}$
E_T^γ	$> 150 \text{ ГэВ}$
Число жёстких изолированных 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
p_T^{SoftTerm}	$< 16 \text{ ГэВ}$



Область с такими
предотборами и
отборами образует
сигнальную
область (CO)

Фон $\text{jet} \rightarrow \gamma$:

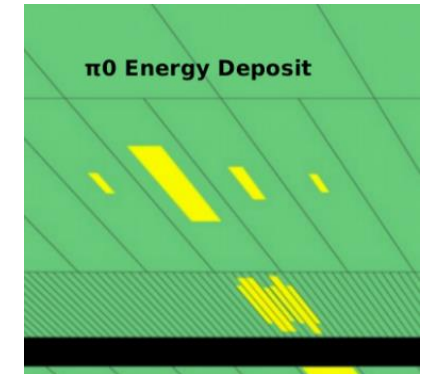
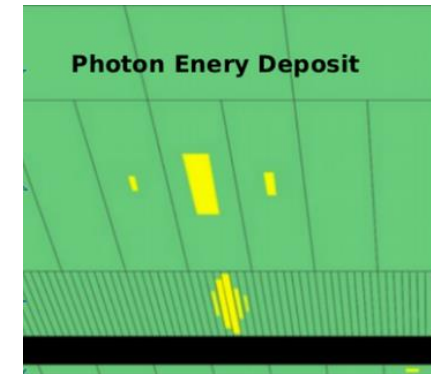
- Пара фотонов от распада нейтральных мезонов от струй дает сигнатуру ЭМ ливня схожую с сигнатурой ЭМ ливня от отдельного изолированного фотона из-за наложения откликов.

Отбор фотонов:

- Изоляционная рабочая точка FixedCutLoose:

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

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

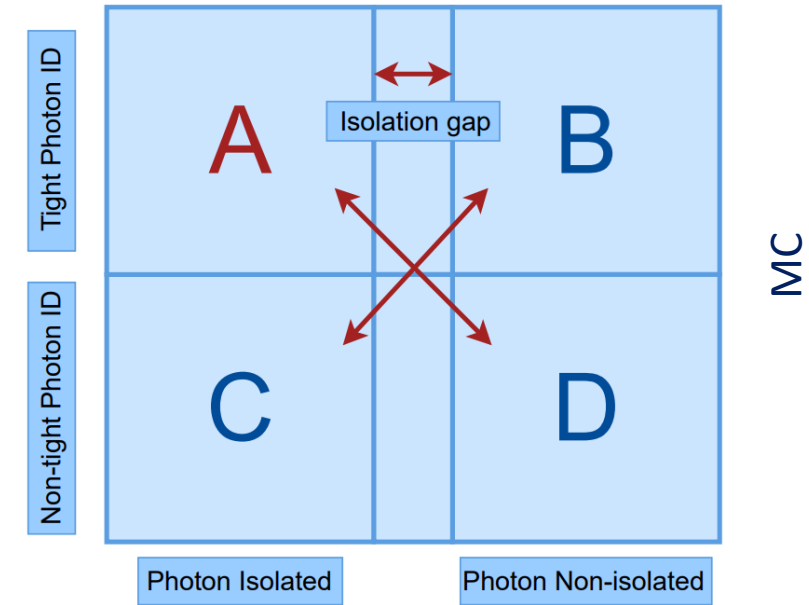


ABCD метод оценки $jet \rightarrow \gamma$ (I)

Стратегия:

- 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;
- На основе оптимизации границ $R = 1.00 \pm 0.07$
- Число событий в областях определяется как:

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



$$\begin{cases} N_A = N_A^{\text{sig}} + N_A^{\text{bkg}} + N_A^{jet \rightarrow \gamma}, \\ N_B = c_B N_A^{\text{sig}} + N_B^{\text{bkg}} + N_B^{jet \rightarrow \gamma}, \\ N_C = c_C N_A^{\text{sig}} + N_C^{\text{bkg}} + N_C^{jet \rightarrow \gamma}, \\ N_D = c_D N_A^{\text{sig}} + N_D^{\text{bkg}} + N_D^{jet \rightarrow \gamma}, \end{cases}$$

$$c_i = \frac{N_i^{\text{sig}}}{N_A^{\text{sig}}}$$

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

Параметры утечки сигнала в КО

	c_B	c_C	c_D
Значение	$(269 \pm 5) \cdot 10^{-5}$	$(3184 \pm 5) \cdot 10^{-5}$	$(178 \pm 13) \cdot 10^{-5}$

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

Оценка центрального значения фона $jet \rightarrow \gamma$ в сигнальной области составила **1331** событие.

ABCD метод оценки $jet \rightarrow \gamma$ (II)

Статистическая погрешность: числа событий в каждой контрольной области были независимо проварьированы на $\pm 1\sigma$ для данных и всех фонов. Полученные значения просуммированы в квадратурах.

Итоговая статистическая погрешность: $\delta = 11\%$.

Систематическая погрешность:

- варьирование изоляционного промежутка и использование альтернативных loose' (16%);
- погрешность от различных МК генераторов и моделей партонных ливней (10%);
- погрешность на корреляционный фактор R (7%);
- погрешности на эффективность реконструкции фотона (1.3%);

Итоговая систематическая погрешность: $\delta = 20\%$.

Центральное значение	1331^{+135}_{-133}
loose'2	+216
loose'3	+8
loose'5	-51
Изоляционный зазор +0.3 ГэВ	-26
Изоляционный зазор -0.3 ГэВ	+30

Central value	1331^{+135}_{-133}
$R + \Delta R$	+96
$R - \Delta R$	-96

Параметры утечки	δ
c_B	78%
c_C	4%
c_D	113%
$jet \rightarrow \gamma$	10%

Оценка фона $jet \rightarrow \gamma$ в сигнальной области составила 1331 ± 135 (стат.) ± 273 (сист.) событий.

Оценка формы $jet \rightarrow \gamma$ (I)

- Для оценки формы распределения фона $jet \rightarrow \gamma$ в СО используется разработанный метод слайсов;
- КО разделяется на 4 равномерных интервала (слайса): [0.065, 0.090, 0.115, 0.140, 1.165]. Фотоны в СО и КО являются «жесткими»;
- Форма в наиболее близком к СО слайсе схожа с формой в СО;

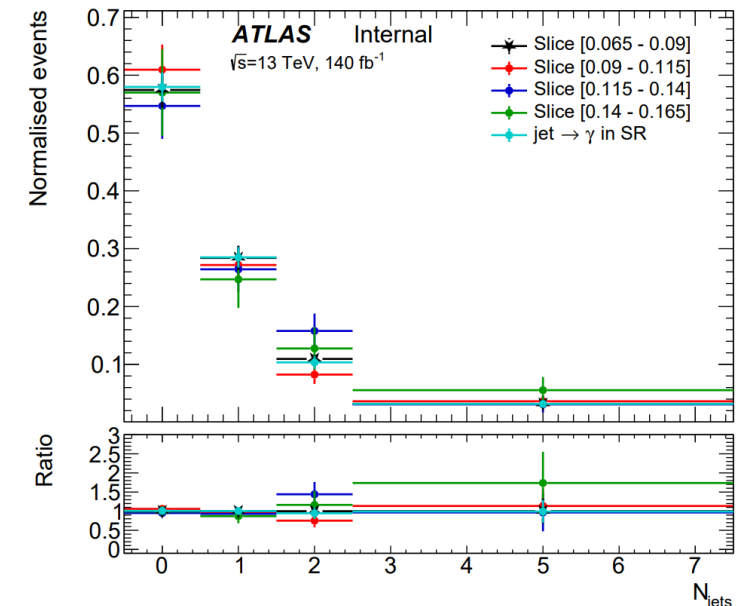
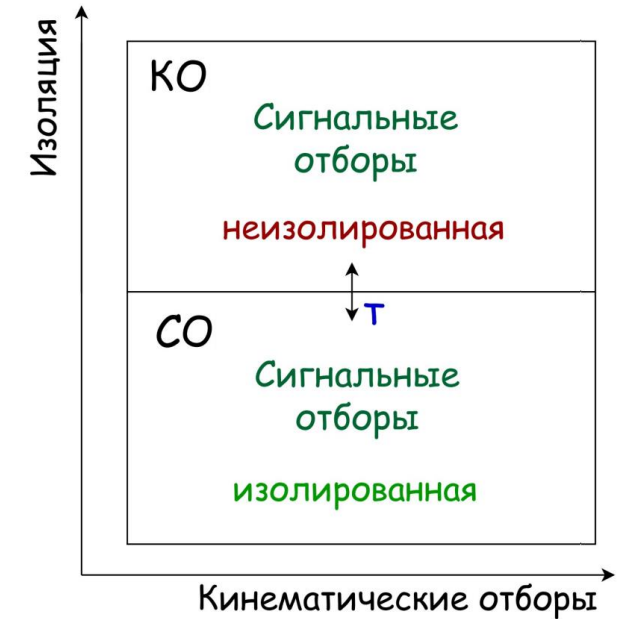
Коррекция формы в СО, учитывающая зависимость от изоляции:

$$\Delta^{CR2}[X] = \frac{1}{2} \left(\frac{H_{jet \rightarrow \gamma}^{[0.065, 0.09]}[X] - H_{jet \rightarrow \gamma}^{[0.115, 0.14]}[X]}{2} + \frac{H_{jet \rightarrow \gamma}^{[0.09, 0.115]}[X] - H_{jet \rightarrow \gamma}^{[0.14, 0.165]}[X]}{2} \right)$$

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

$$H_{jet \rightarrow \gamma}^{SR} = H_{jet \rightarrow \gamma}^{[0.065, 0.09]}[X] + \Delta^{CR2}[X]$$

- Корректирующее слагаемое принято за систематическую погрешность при оценке формы;
- На основе оценённой формы распределения по $N[jets]$ получены значения фона $jet \rightarrow \gamma$ для различного числа струй.



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

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) > 0.7$ $ \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 $\Delta R(jet, \gamma) > 0.3$
Нейтрино	$p_T^{\nu\bar{\nu}} > 130$ ГэВ

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

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

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

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

Коррекционный фактор	Значение
$A_{Z\gamma}$	0.9049 ± 0.0008
$C_{Z\gamma}$	0.7487 ± 0.0007



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.

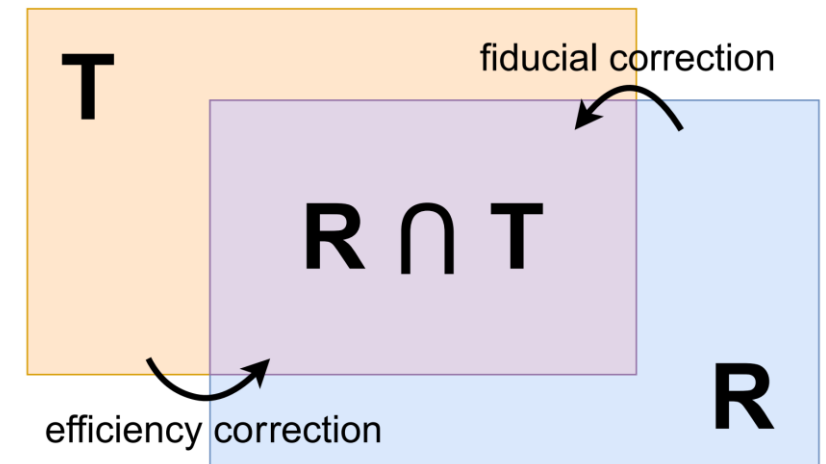
Пусть X - измеряемая величина, а y - измеренная величина. Тогда их связь: $\hat{R}X = y$

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 с помощью пакета TRExFitter. [Метод предполагает 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;

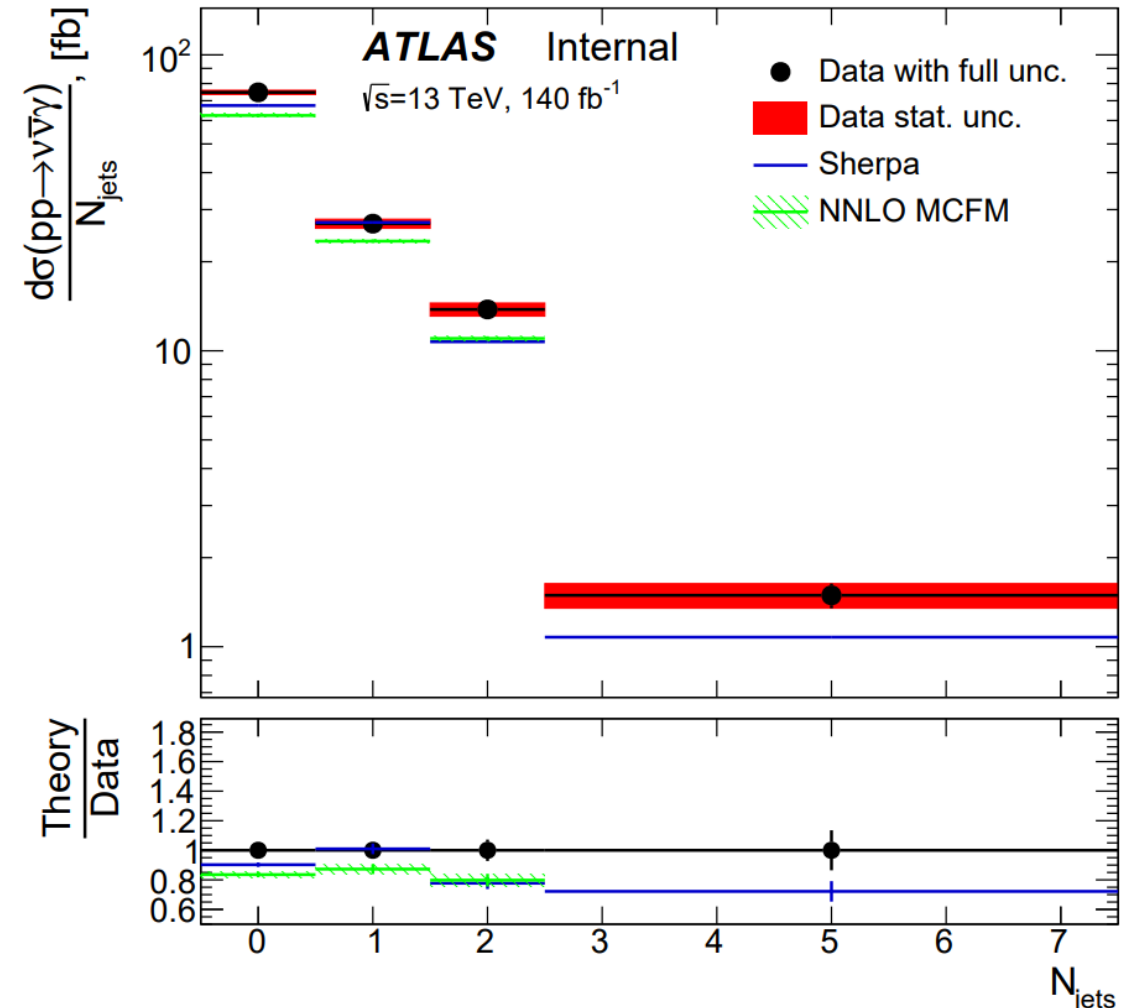
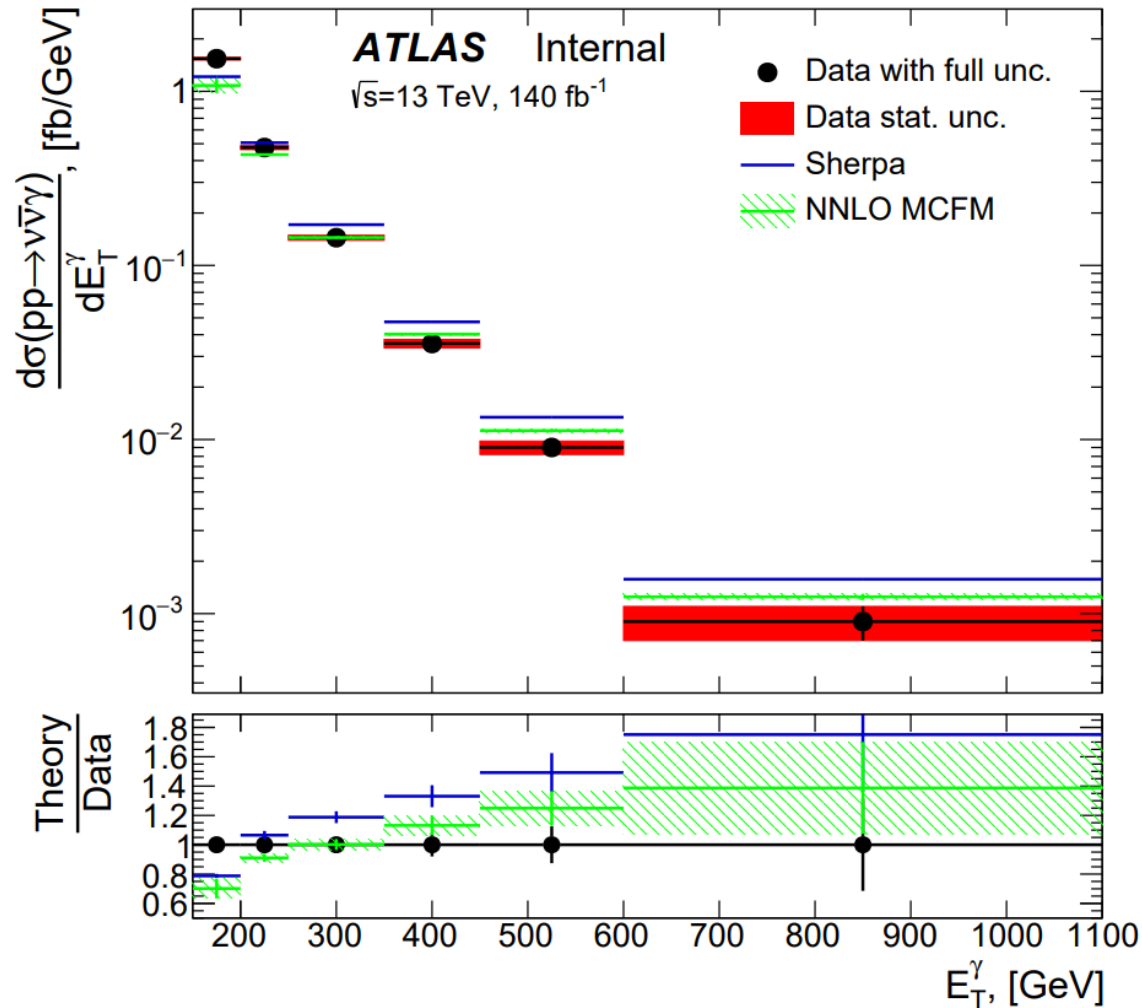


[Дифференциальное сечение в расширенной](#) области может быть вычислено как:

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

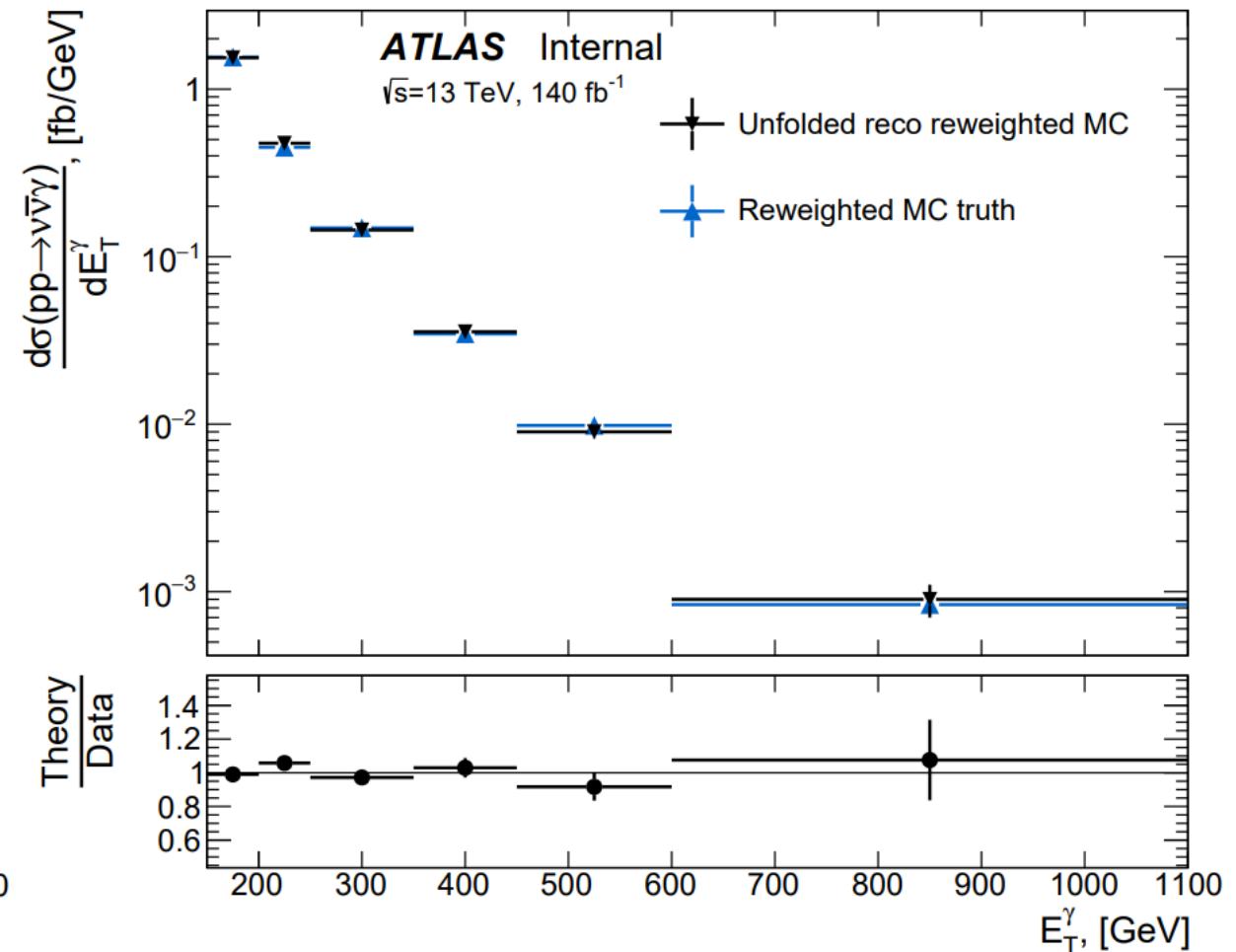
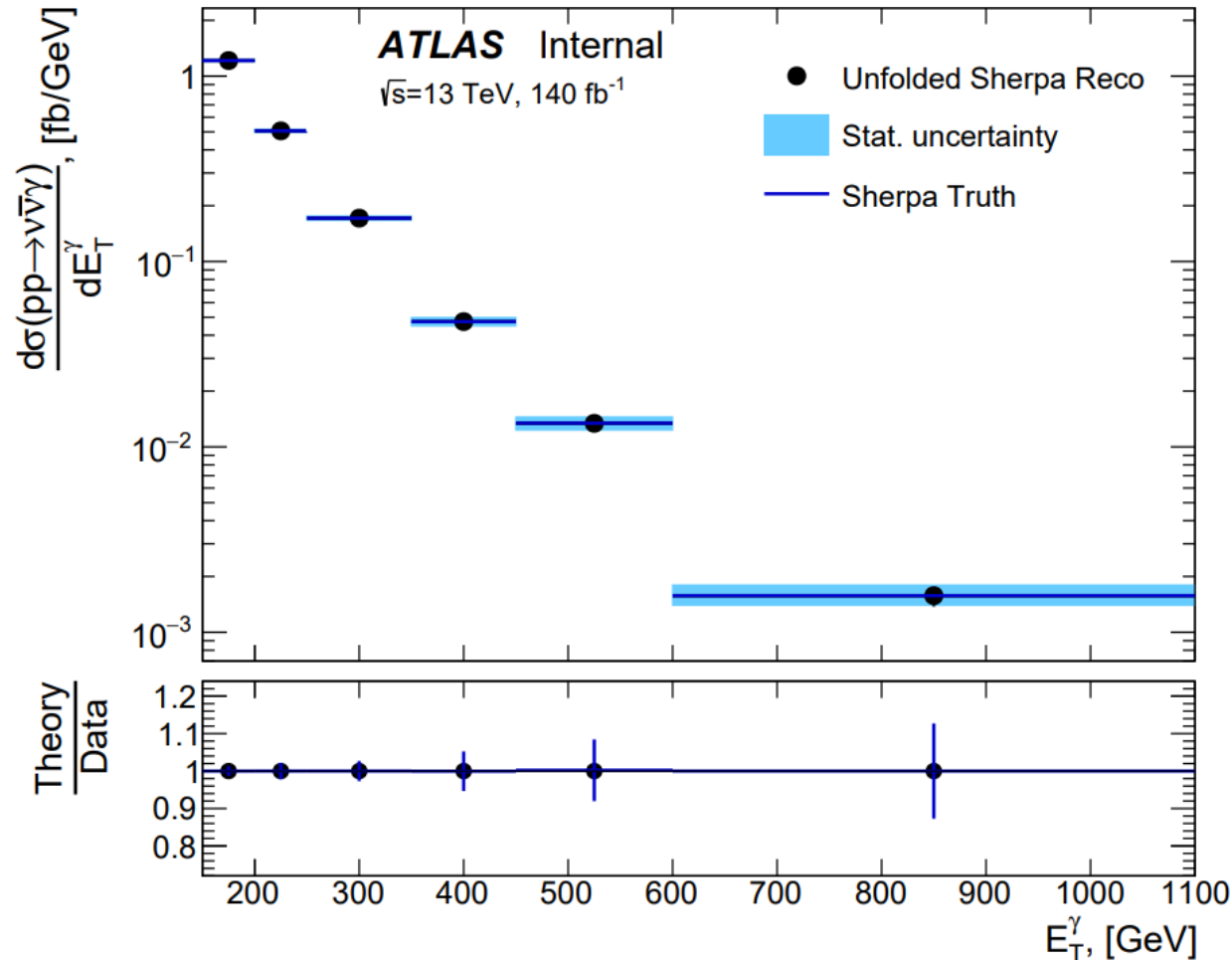
Дифференциальные сечения

- Измерения дифференциальных сечений получены в расширенной доверительной области для 8-ми переменных: E_T^γ , E_T^{miss} , N_{jets} , η_γ , $p_T^{j_{1,2}}$, $|\Delta\phi(j, j)|$, $|\Delta\phi(Z, j)|$.



Валидация процедуры «развёртывания»

- Проведена валидация процедуры «развёртывания». Результаты совпадают с ожиданиями;
- Произведена проверка стабильности метода путём перевзвешивания событий. Отклонения взяты в качестве систематической погрешности.



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:

- С помощью ABCD метода получена оценка фона $jet \rightarrow \gamma$ в CO , которая составила 1331 ± 135 (стат.) ± 273 (сист.) событий, $\delta = 23\%$.
- Разработан и применён метод оценки формы фона $jet \rightarrow \gamma$ для различных переменных.
- Произведена процедура «развёртывания» измеренного сигнала.
- Получены дифференциальные сечения как функции 8-ми различных переменных.
- Произведены проверки корректности процедуры «развёртывания».

В дальнейшем планируется оценить дополнительные систематические погрешности процедуры «развёртывания».

Спасибо за внимание!

BACK-UP

Фоновые процессы

- конечные состояния $\tau\nu\gamma$ и $l\nu\gamma$ от КХД и электрослабого рождения $W\gamma$, где τ распадается на адроны, или где электрон или мюон от распада τ или W не регистрируются детектором;
- события γ + струя, в которых большой E_T^{miss} возникает из комбинации реального E_T^{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 τ -лептоны, которые либо распадаются на адроны, либо не реконструируются;
- события $Z(l\bar{l}) + \gamma$ (преимущественно τ -лептоны), где τ распадается на адроны или когда электрон или мюон от распада τ или Z не регистрируется.

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

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

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

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

Софттерм реконструируется как $p_{x(y)}^{\text{miss, SoftTerm}}$
потерянный поперечный импульс не ассоциированный ни с одной из жестких частиц.

E_T^{cone20} задает энергосодержание 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 σ_L – дисперсия измерения потерянного поперечного импульса в продольном направлении

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

ABCD метод

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

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

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

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

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

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

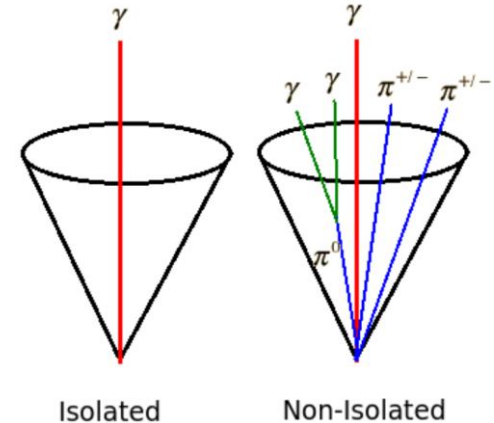
A (CO): $E_T^{cone20} - 0.065 p_T^\gamma < 0$, tight

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

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

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

- ws3 – ширина электромагнитного ливня с использованием трёх стриповых (первых слоёв ЭМ калориметра) слоёв вокруг стрипового слоя с максимальной энергией
- Fside – доля энергии вне трёх стриповых слоёв, но внутри семи слоёв
- ΔE – разница энергий стриповых слоёв, где в одном слое выделилась вторая по величине энергия, и слоя, где выделилась наименьшая энергия
- Eratio – отношение разности энергий, ассоциированных с наиболее высоким и вторым по величине выделением энергии к сумме этих энергий
- wtot – полная поперечная ширина ливня



Параметры утечки	Различные МК генераторы и модели партонных ливней		
	MadGraph+Pythia8, Sherpa 2.2	MadGraph+Herwig7, MadGraph+Pythia8	δ
c_B	$(269 \pm 5) \cdot 10^{-5}$	$(48 \pm 2) \cdot 10^{-4}$	78%
c_C	$(3184 \pm 15) \cdot 10^{-5}$	$(331 \pm 6) \cdot 10^{-4}$	4%
c_D	$(178 \pm 13) \cdot 10^{-6}$	$(38 \pm 6) \cdot 10^{-5}$	113%
$jet \rightarrow \gamma$	1331	1196	10%

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

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

	Данные	$W\gamma$	$e \rightarrow \gamma$	$tt\gamma$	$\gamma + \text{jet}$	$Z(l\ell)\gamma$
A	21649 ± 147	3386 ± 21	2511 ± 11	175 ± 3	5610 ± 60	240 ± 4
B	234 ± 15	16.4 ± 1.3	5.70 ± 0.02	0.68 ± 0.02	4 ± 2	0.6 ± 0.2
C	3986 ± 63	109 ± 3	80.9 ± 0.3	6.4 ± 0.5	173 ± 10	8.0 ± 0.7
D	464 ± 22	0.9 ± 0.3	0.4804 ± 0.0018	0.04 ± 0.04	0.05 ± 0.05	0.05 ± 0.04

$$N_A = N_A^{\text{sig}} + N_A^{\text{bkg}} + N_A^{\text{jet} \rightarrow \gamma},$$

$$N_B = c_B N_A^{\text{sig}} + N_B^{\text{bkg}} + N_B^{\text{jet} \rightarrow \gamma},$$

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

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

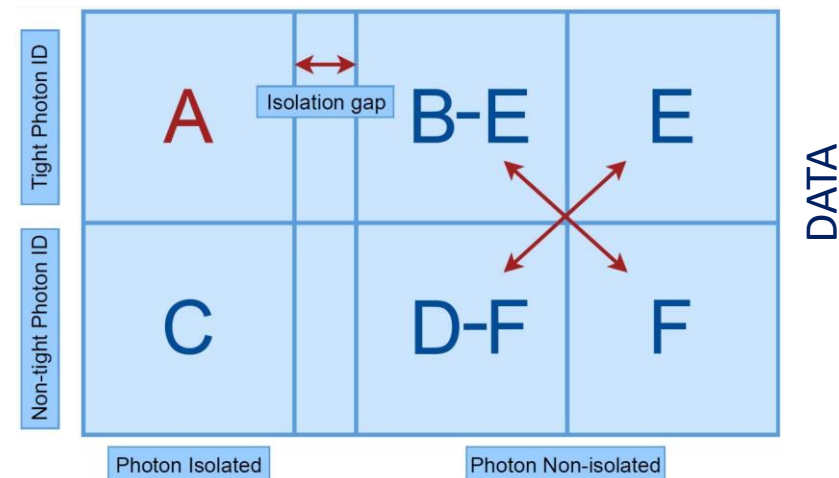
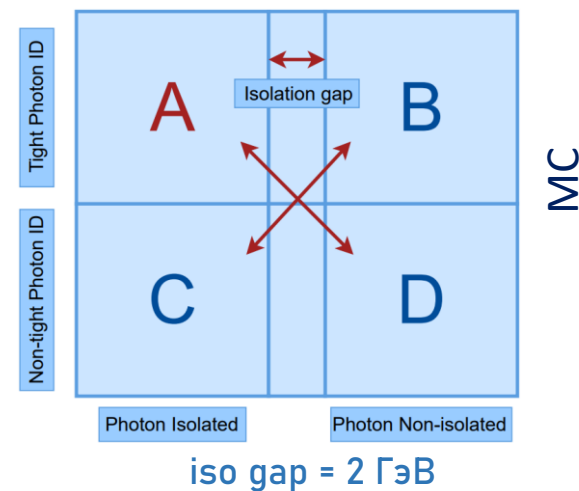
$$N_C = c_C N_A^{\text{sig}} + N_C^{\text{bkg}} + N_C^{\text{jet} \rightarrow \gamma},$$

$$N_D = c_D N_A^{\text{sig}} + N_D^{\text{bkg}} + N_D^{\text{jet} \rightarrow \gamma},$$

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

$$N_A^{\text{jet} \rightarrow \gamma} = 1331_{-133}^{+135}$$

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



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

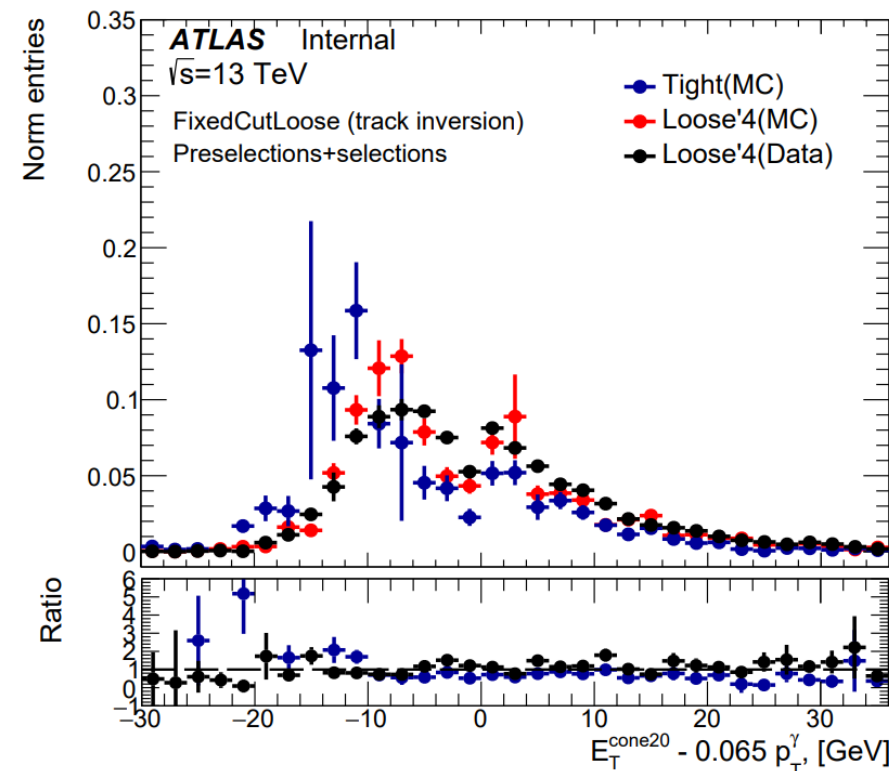
ABCD метод

Корреляционные факторы между изоляционными и идентификационными критериями фотона в ABCD областях для различных (loose')

R_{MC}	$loose'2$	$loose'3$	$loose'4$	$loose'5$
MC	0.8 ± 0.2	0.9 ± 0.2	1.0 ± 0.2	1.2 ± 0.3

Корреляционные факторы между изоляционными и идентификационными критериями фотона в B-E, E, D-F и F областях для различных (loose') в МК и данных

$M_{cut}, \Gamma\text{ЭВ}$	$loose'2$	$loose'3$	$loose'4$	$loose'5$
МК				
4.5	0.9 ± 0.2	0.93 ± 0.18	0.97 ± 0.14	1.03 ± 0.14
7.5	1.02 ± 0.17	1.05 ± 0.15	1.05 ± 0.12	1.08 ± 0.12
10.5	1.03 ± 0.15	1.02 ± 0.13	1.05 ± 0.11	1.08 ± 0.11
На основе данных				
4.5	0.95 ± 0.11	1.01 ± 0.11	1.01 ± 0.09	1.02 ± 0.09
7.5	1.07 ± 0.11	1.05 ± 0.10	1.02 ± 0.08	1.01 ± 0.08
10.5	1.02 ± 0.10	1.03 ± 0.09	0.97 ± 0.08	0.98 ± 0.07

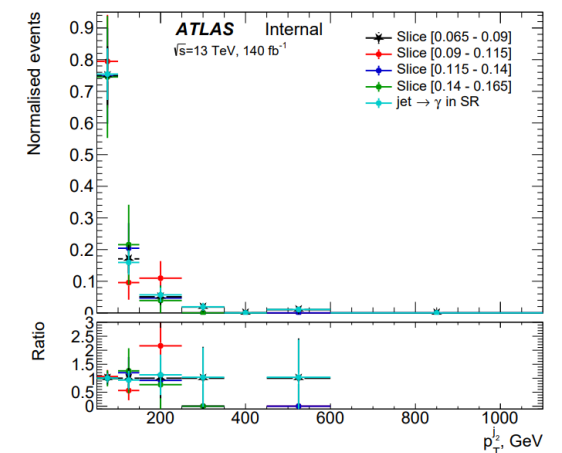
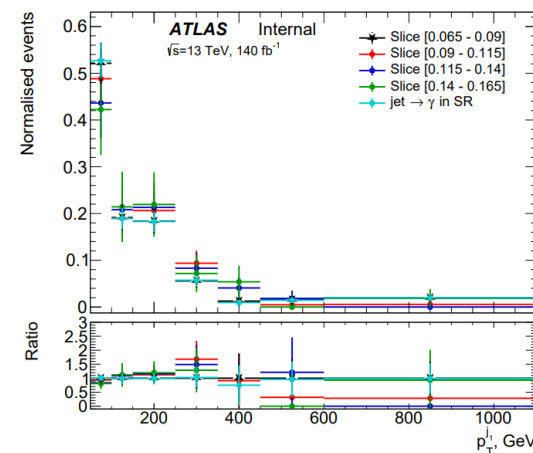
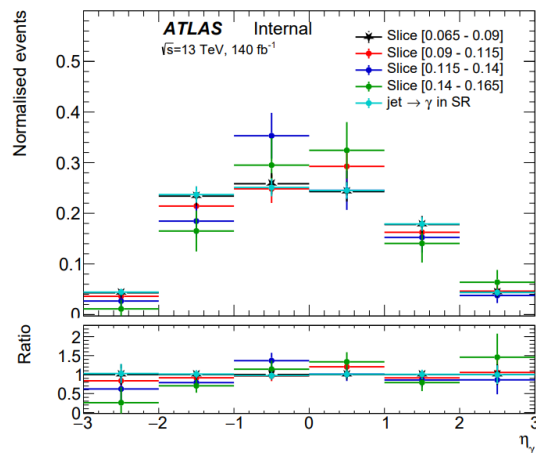
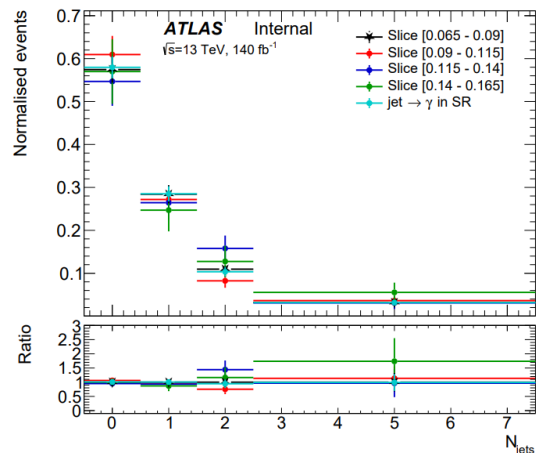


$$c_B = \frac{N_B^{\text{sig}}}{N_A^{\text{sig}}}, \quad c_C = \frac{N_C^{\text{sig}}}{N_A^{\text{sig}}}, \quad c_D = \frac{N_D^{\text{sig}}}{N_A^{\text{sig}}}.$$

$$\begin{aligned} \bullet \sigma_{\text{iso}}^{c_B} &= \delta_{\text{iso}}^{\text{eff}} \cdot (c_B + 1)/c_B, & \bullet \sigma_{\text{iso}}^{c_D} &= \delta_{\text{iso}}^{\text{eff}} \cdot (c_B + 1)/c_B, \\ \bullet \sigma_{\text{ID}}^{c_C} &= \delta_{\text{ID}}^{\text{eff}} \cdot (c_C + 1)/c_C, & \bullet \sigma_{\text{ID}}^{c_D} &= \delta_{\text{ID}}^{\text{eff}} \cdot (c_C + 1)/c_C. \end{aligned}$$

Идентификация фотона

Category	Description	Name	loose	tight	Description	Name	loose	tight
Acceptance	$ \eta < 2.37$, with $1.37 \leq \eta < 1.52$ excluded	—	✓	✓	Total lateral shower width $\sqrt{(\sum E_i(i - i_{\max})^2)/(\sum E_i)}$, where i runs over all strips in a window of $20 \times 2 \eta \times \phi$ strips, and $i_{\max}$ is the index of the highest-energy strip measured in the strip layer	$w_{s \text{ tot}}$		✓
Hadronic leakage	Ratio of E_T in the first sampling layer of the hadronic calorimeter to E_T of the EM cluster (used over the range $ \eta < 0.8$ or $ \eta > 1.52$)	R_{had_1}	✓	✓	Energy outside the core of the three central strips but within seven strips divided by energy within the three central strips	f_{side}		✓
EM middle layer	Ratio of the energy in $3 \times 7 \eta \times \phi$ cells over the energy in 7×7 cells centered around the photon cluster position	R_η	✓	✓	Difference between the energy associated with the second maximum in the strip layer and the energy reconstructed in the strip with the minimum value found between the first and second maxima	ΔE_s		✓
	Lateral shower width, $\sqrt{(\sum E_i \eta_i^2)/(\sum E_i) - ((\sum E_i \eta_i)/(\sum E_i))^2}$, where E_i is the energy and η_i is the pseudorapidity of cell i and the sum is calculated within a window of 3×5 cells	w_{η_2}	✓	✓	Ratio of the energy difference between the maximum energy deposit and the energy deposit in the secondary maximum in the cluster to the sum of these energies	E_{ratio}		✓
	Ratio of the energy in $3 \times 3 \eta \times \phi$ cells over the energy of 3×7 cells centered around the photon cluster position	R_ϕ		✓	Ratio of the energy in the first layer to the to the total energy of the EM cluster	f_1		✓
EM strip layer	Lateral shower width, $\sqrt{(\sum E_i(i - i_{\max})^2)/(\sum E_i)}$, where i runs over all strips in a window of $3 \times 2 \eta \times \phi$ strips, and $i_{\max}$ is the index of the highest-energy strip calculated from three strips around the strip with maximum energy deposit	$w_{s \ 3}$		✓				



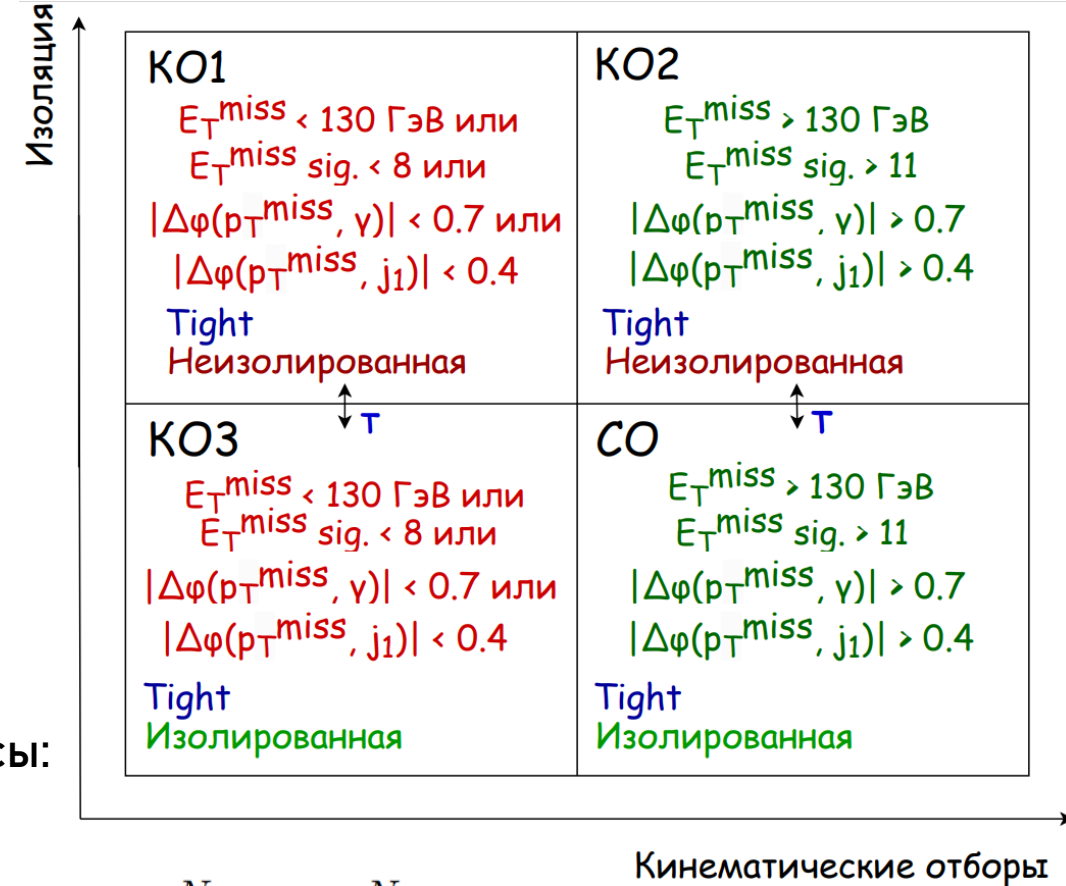
Метод слайсов для оценки формы $jet \rightarrow \gamma$

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, неизолированные K01 и K02 разделяются на более мелкие области, т.н. слайсы:

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

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



$$T = \frac{N_{CR1}}{N_{CR3}} = \frac{N_{CR2}}{N_{SR}}$$

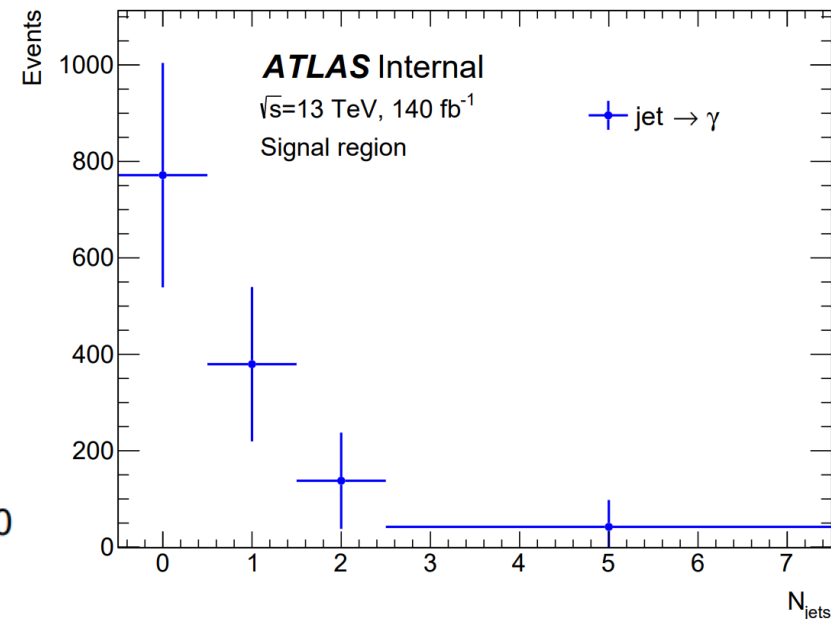
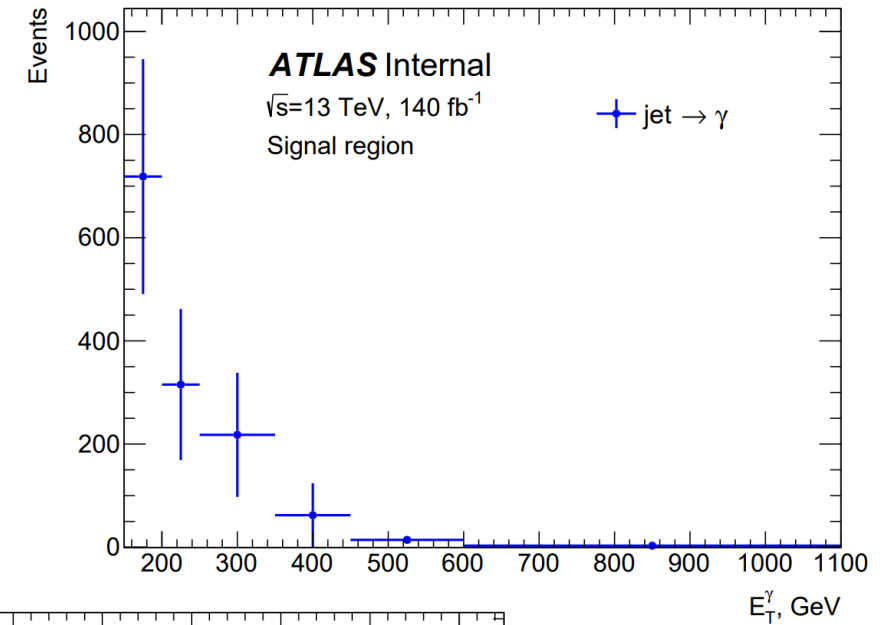
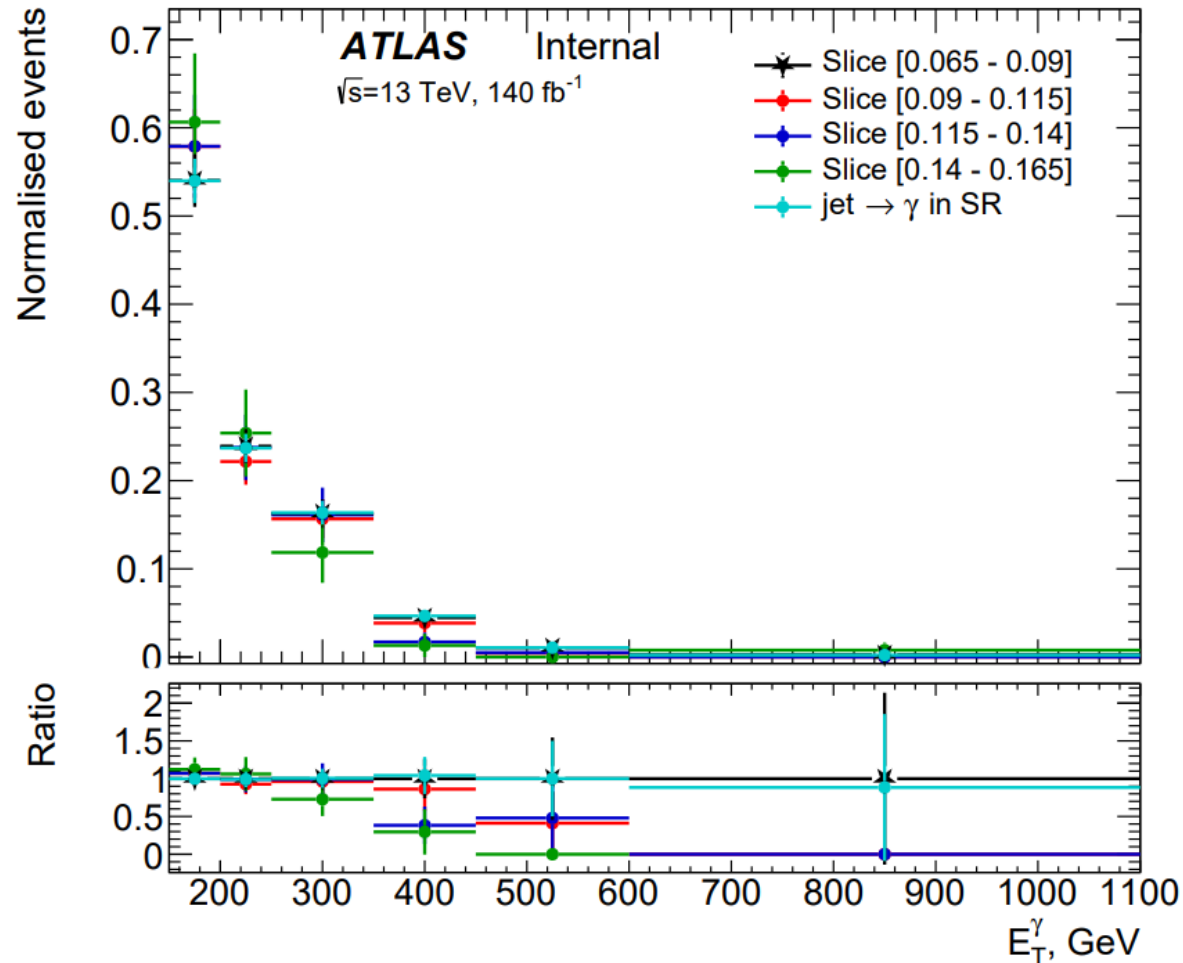
5. В итоге, оцененное количество событий $jet \rightarrow \gamma$ экстраполируется в сигнальную область:

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

Метод слайсов для оценки формы $jet \rightarrow \gamma$

$$N_{A, N_{jets} \geq 1}^{jet \rightarrow \gamma} = 560 \pm 90(\text{стат.}) \pm 180(\text{сист.})$$

$$N_{A, N_{jets} \geq 2}^{jet \rightarrow \gamma} = 180 \pm 50(\text{стат.}) \pm 100(\text{сист.}).$$



Получение дифференциальных сечений

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

$i(j)$ – бин на уровне реконструкции (генератора)

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

- 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 $\mu_j = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n)$:

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

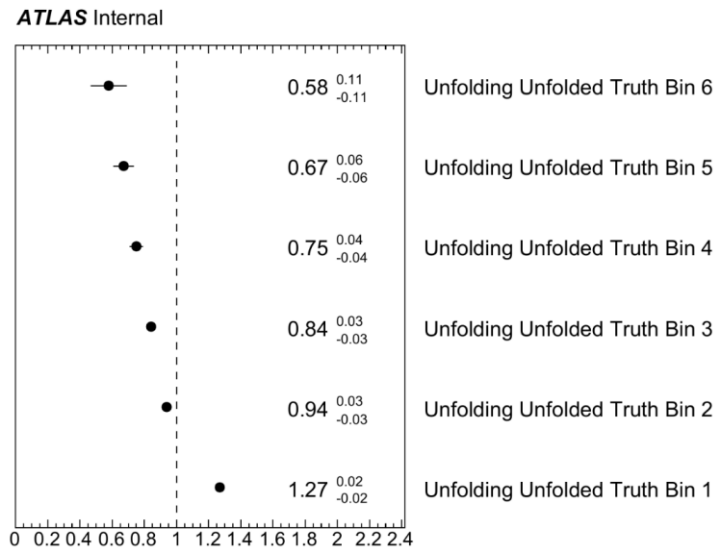
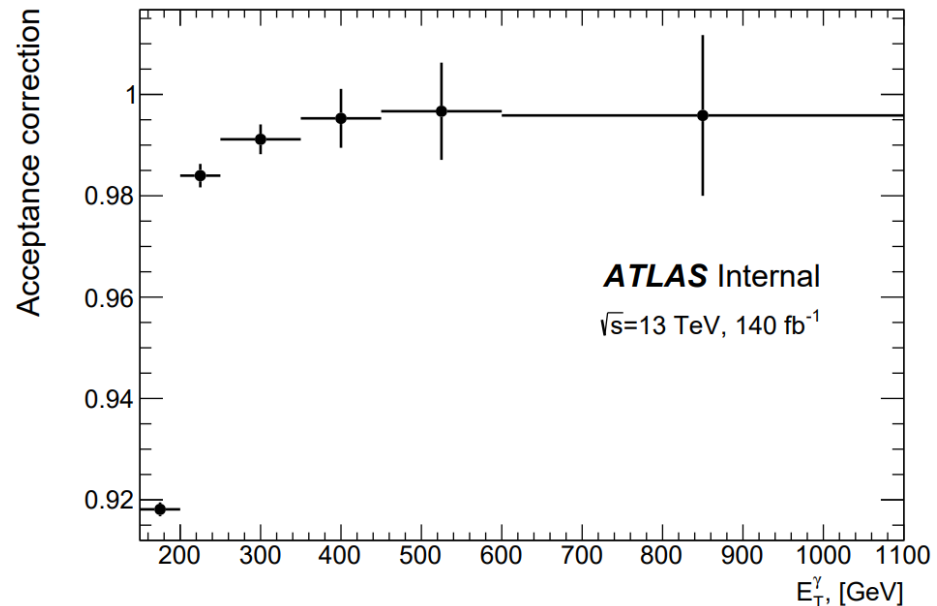
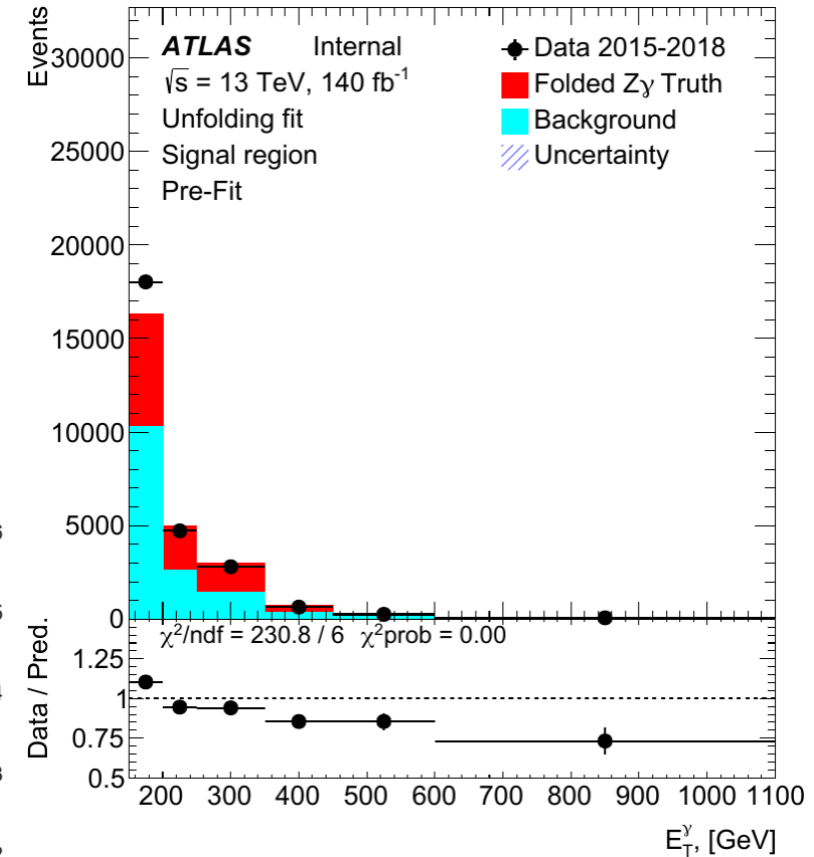
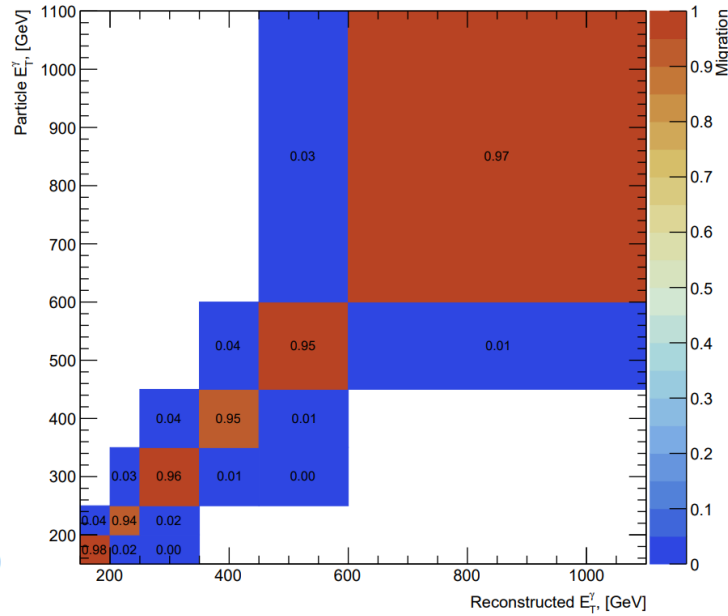
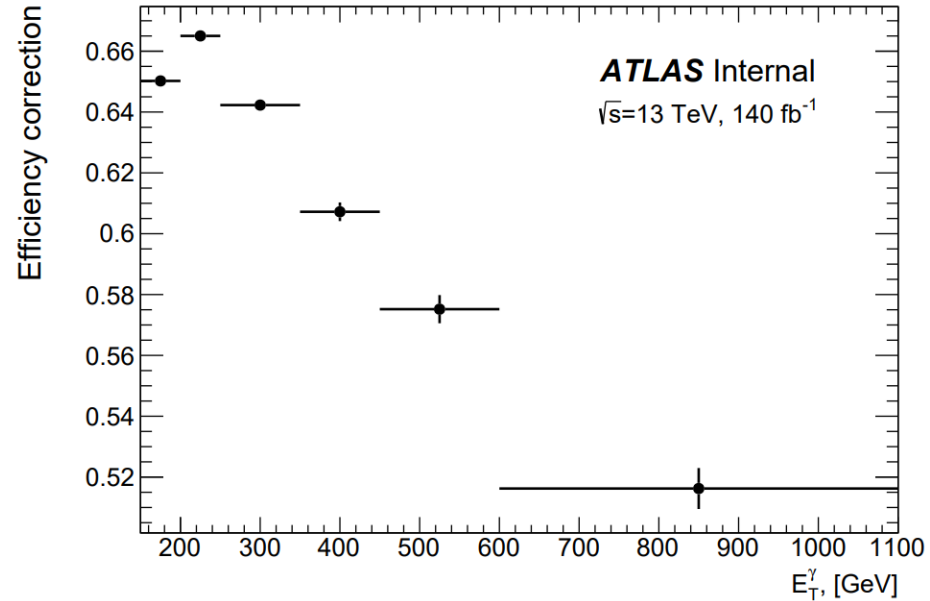
Далее все векторы $\vec{g}_j$ складываются. В результате можно получить одно распределение с количеством бинов m .

	$pp \rightarrow \nu \bar{\nu} \gamma$
Данные	26523 ± 160
$W\gamma$	4450 ± 80
$e \rightarrow \gamma$	2870 ± 30
$tt\gamma$	255 ± 5
$jet \rightarrow \gamma$	1330 ± 300
$\gamma + jet$	5330 ± 50
$Z(ll)\gamma$	287 ± 3
$N_{Z\gamma}^{\text{obs}}$	12000 ± 300

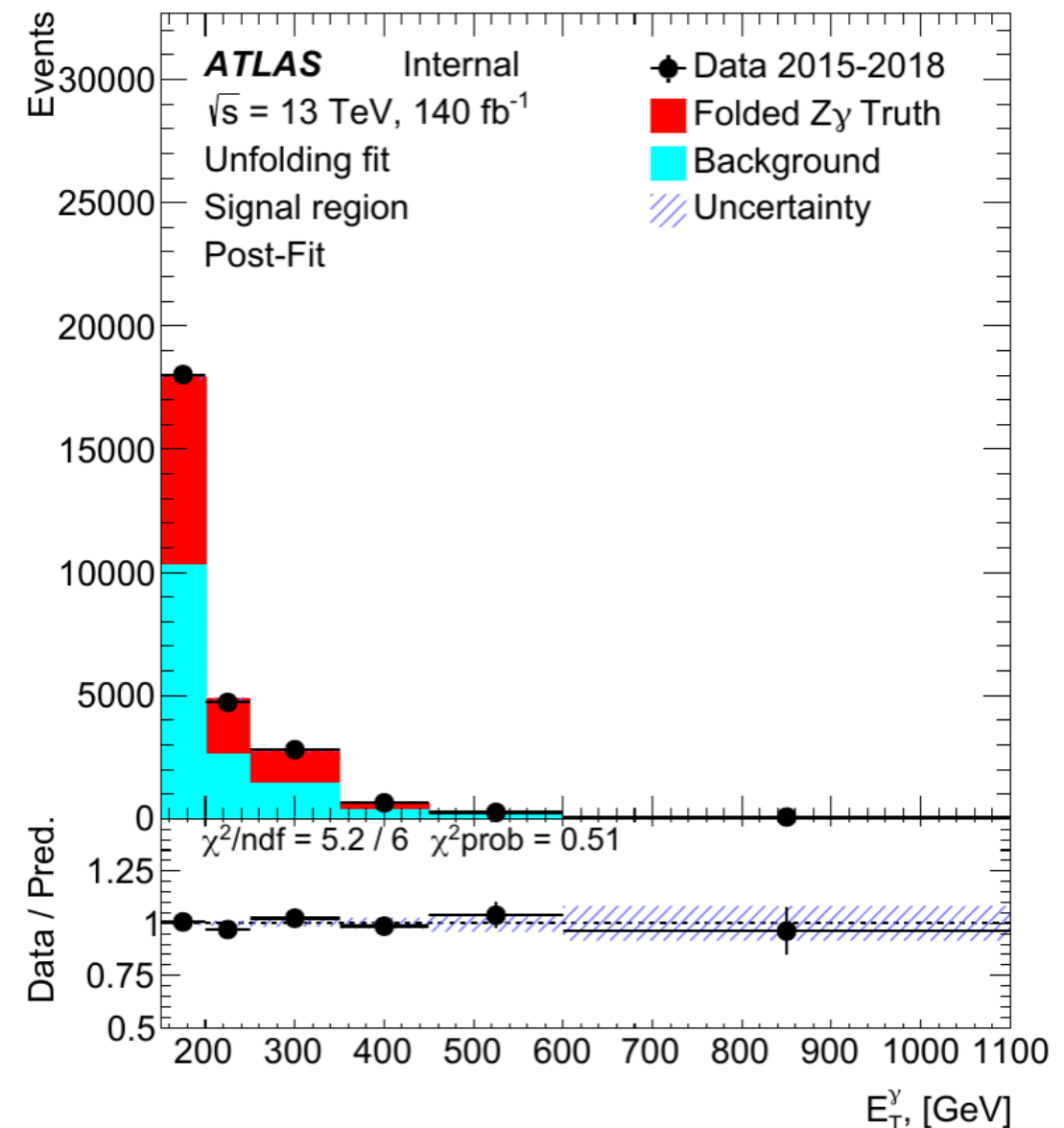
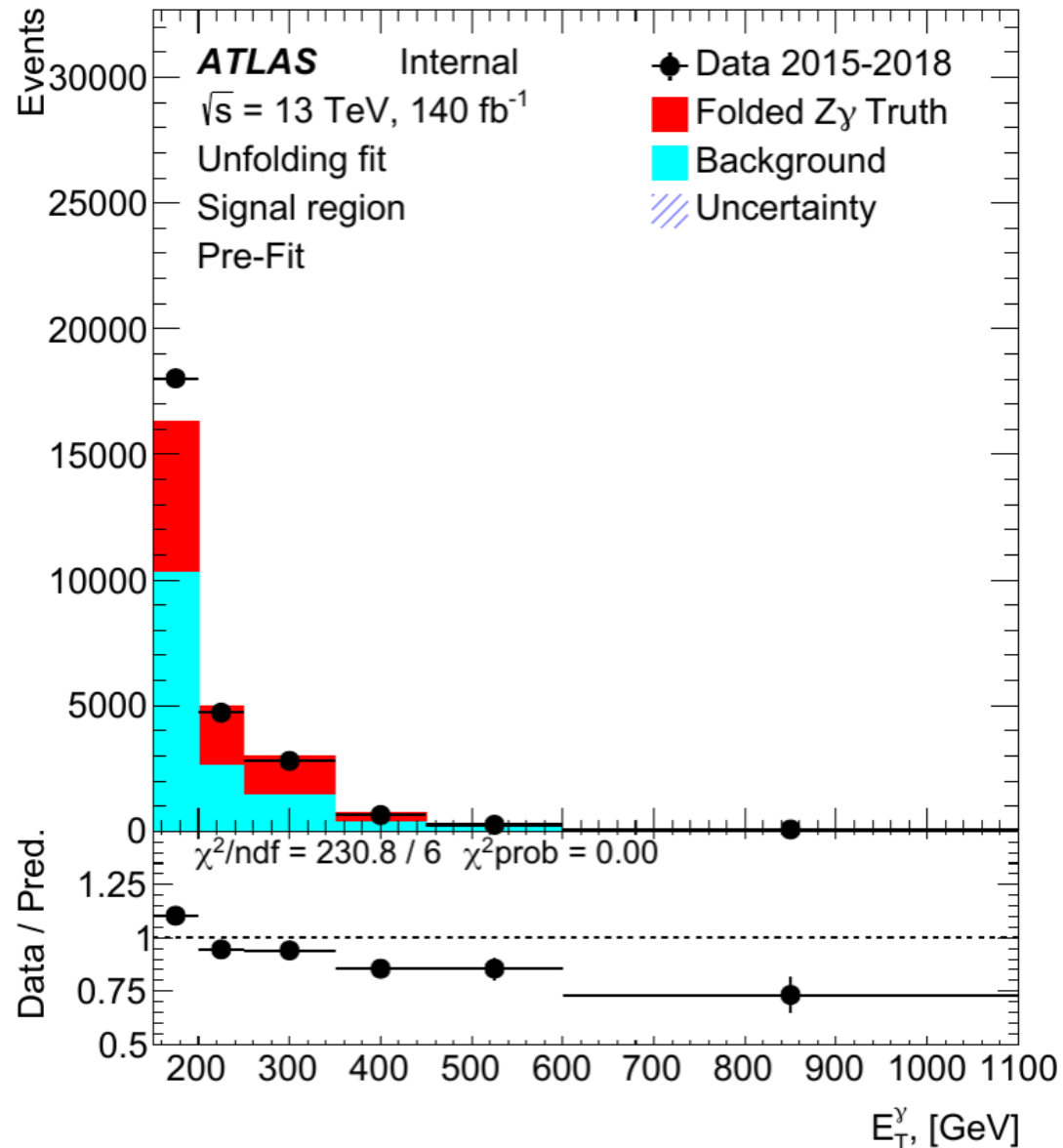
- Фитирование «свернутого» распределения с помощью нормировочных коэффициентов μ_j . В результате можно получить скорректированные нормировочные коэффициенты $\mu'_j = (\mu'_1, \mu'_2, \dots, \mu'_n)$.
- Домножение распределения на уровне генератора на скорректированные нормировочные коэффициенты $\mu'_j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

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

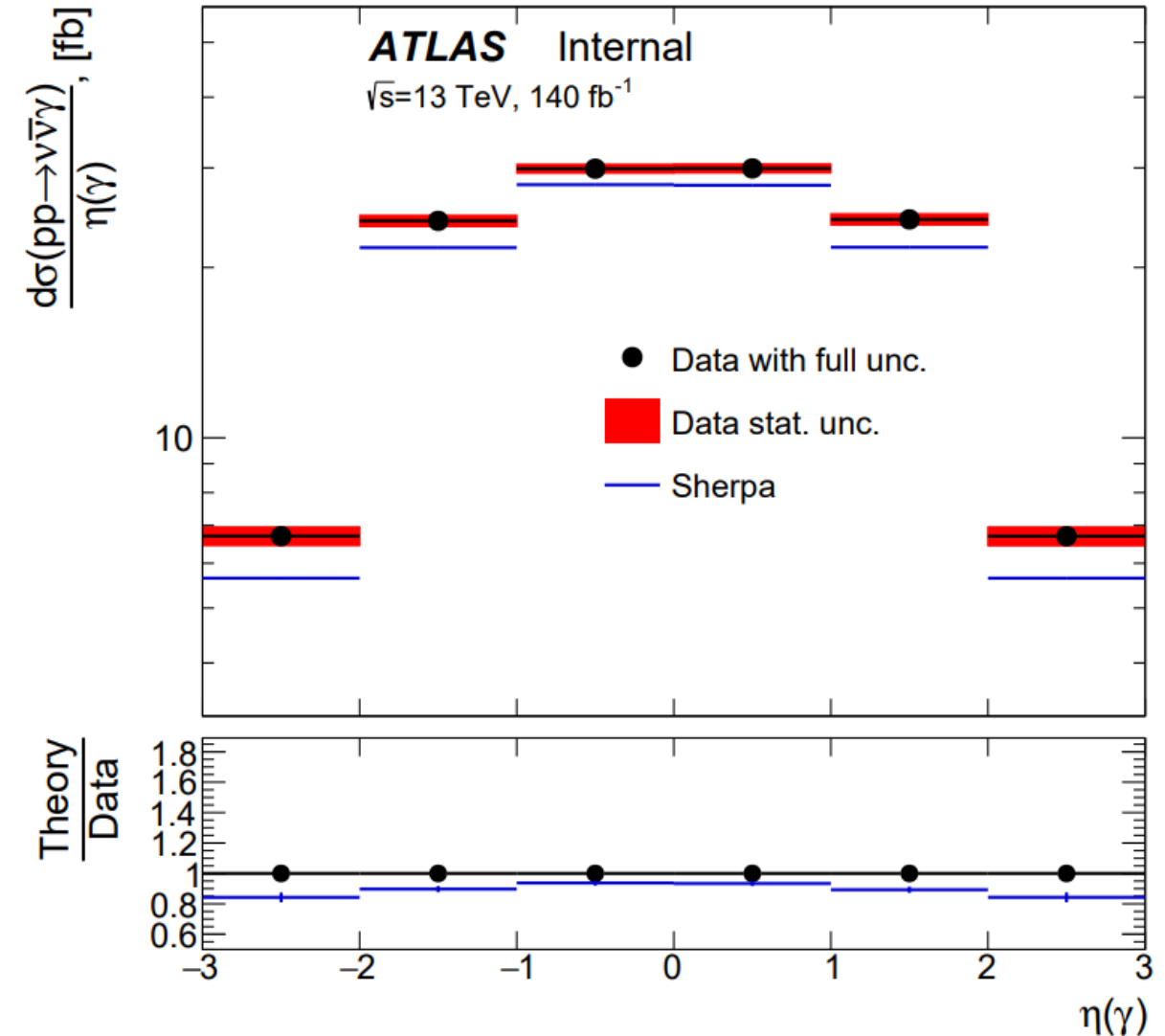
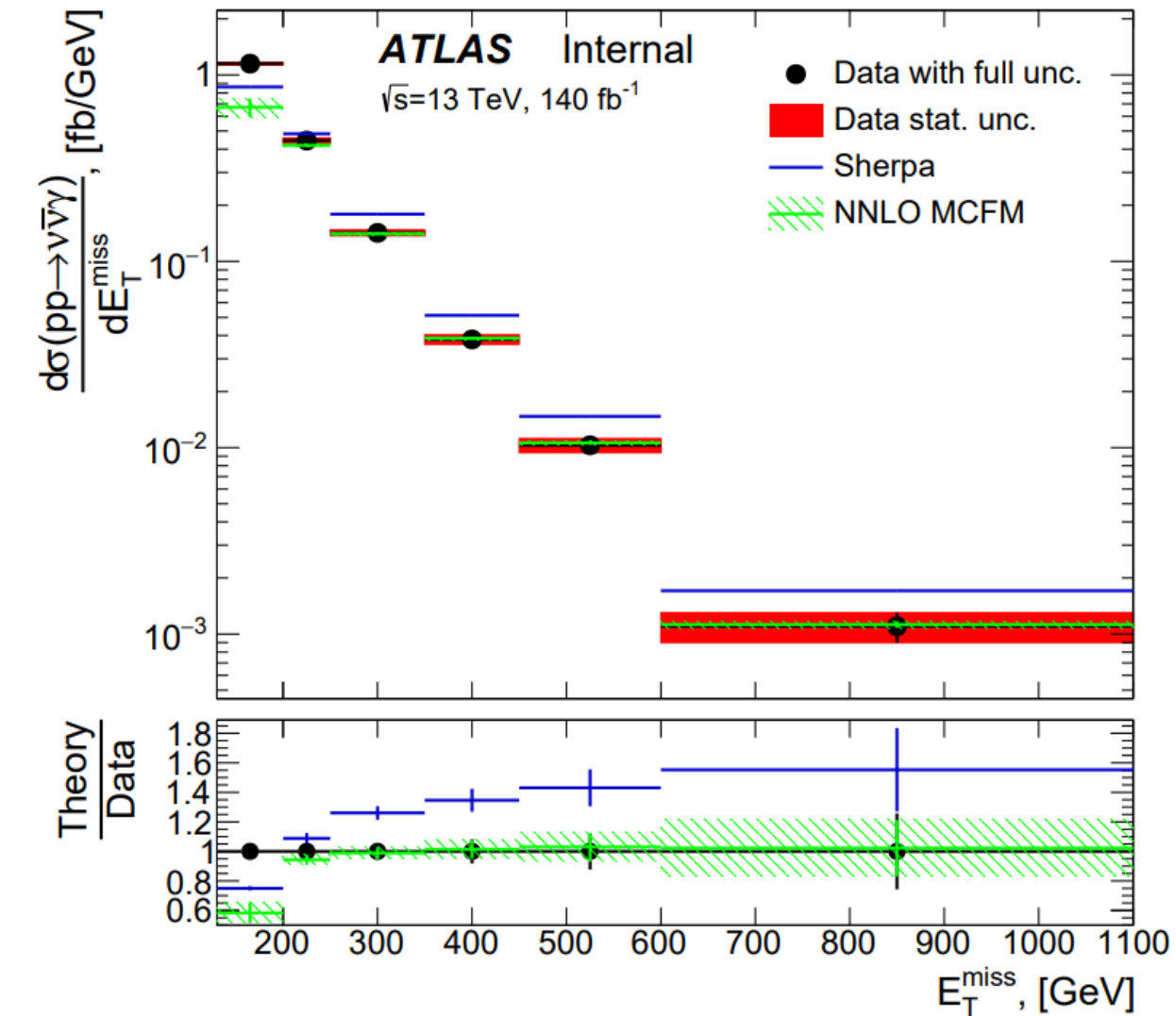
Получение дифференциальных сечений



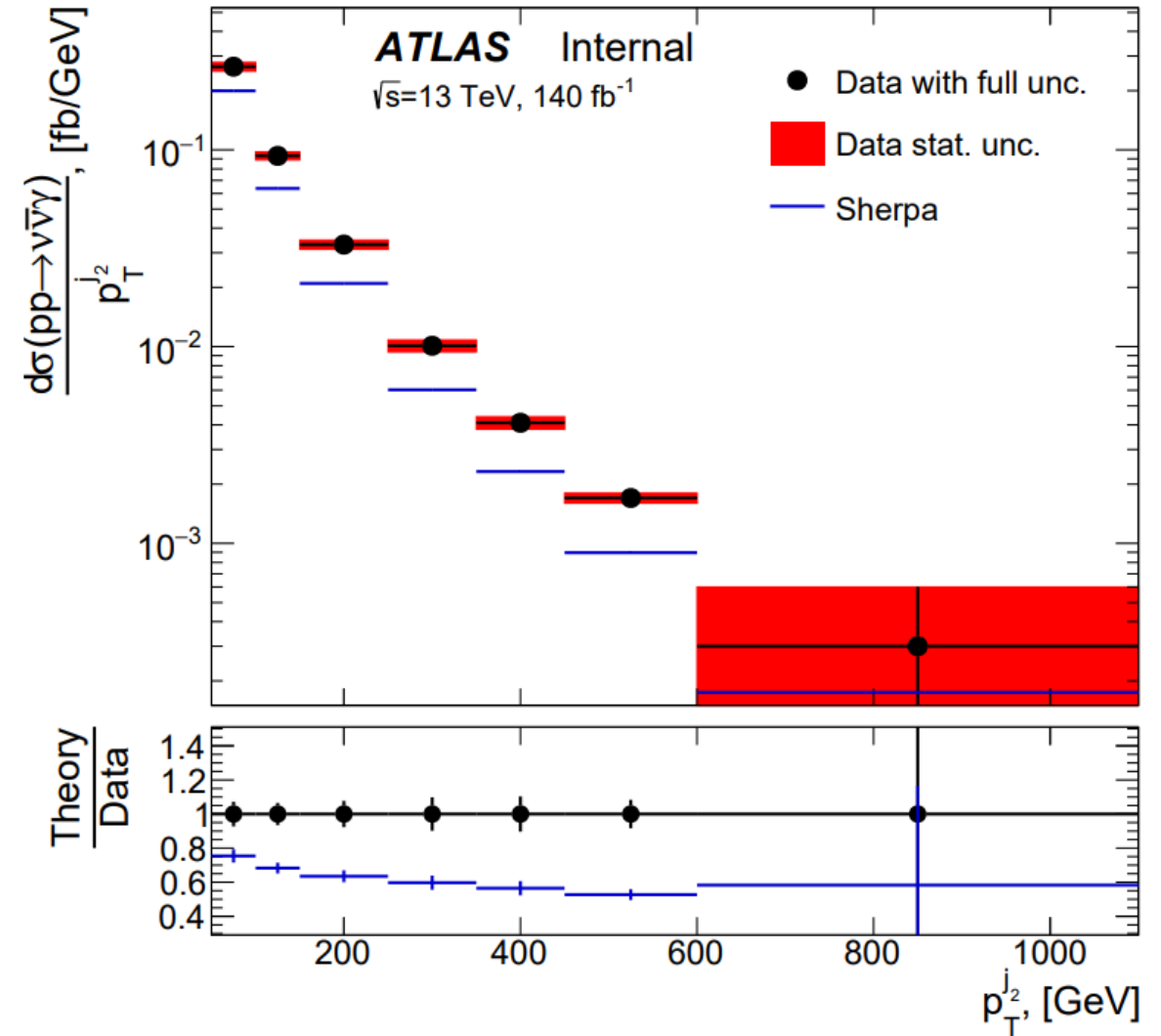
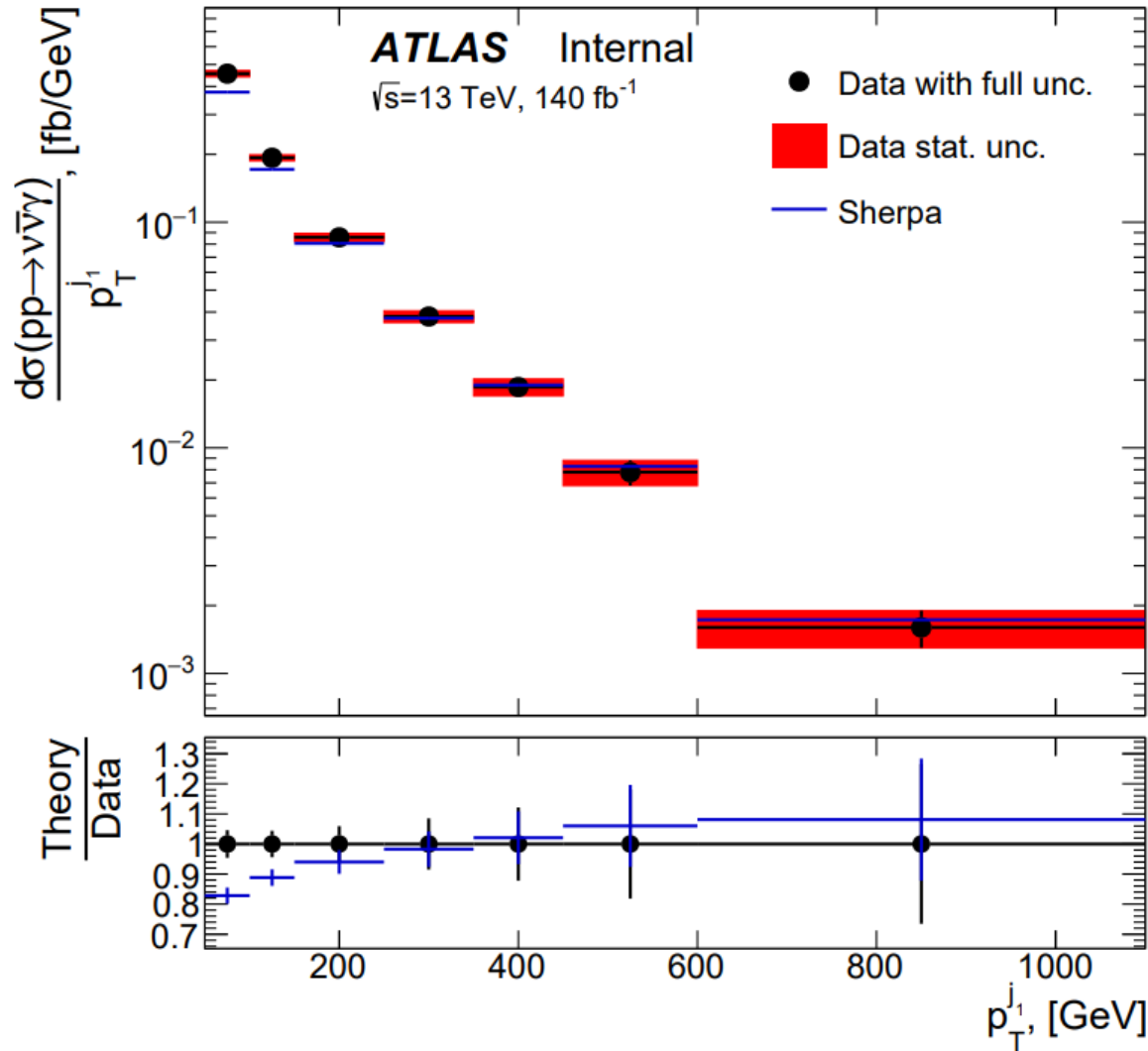
Получение дифференциальных сечений



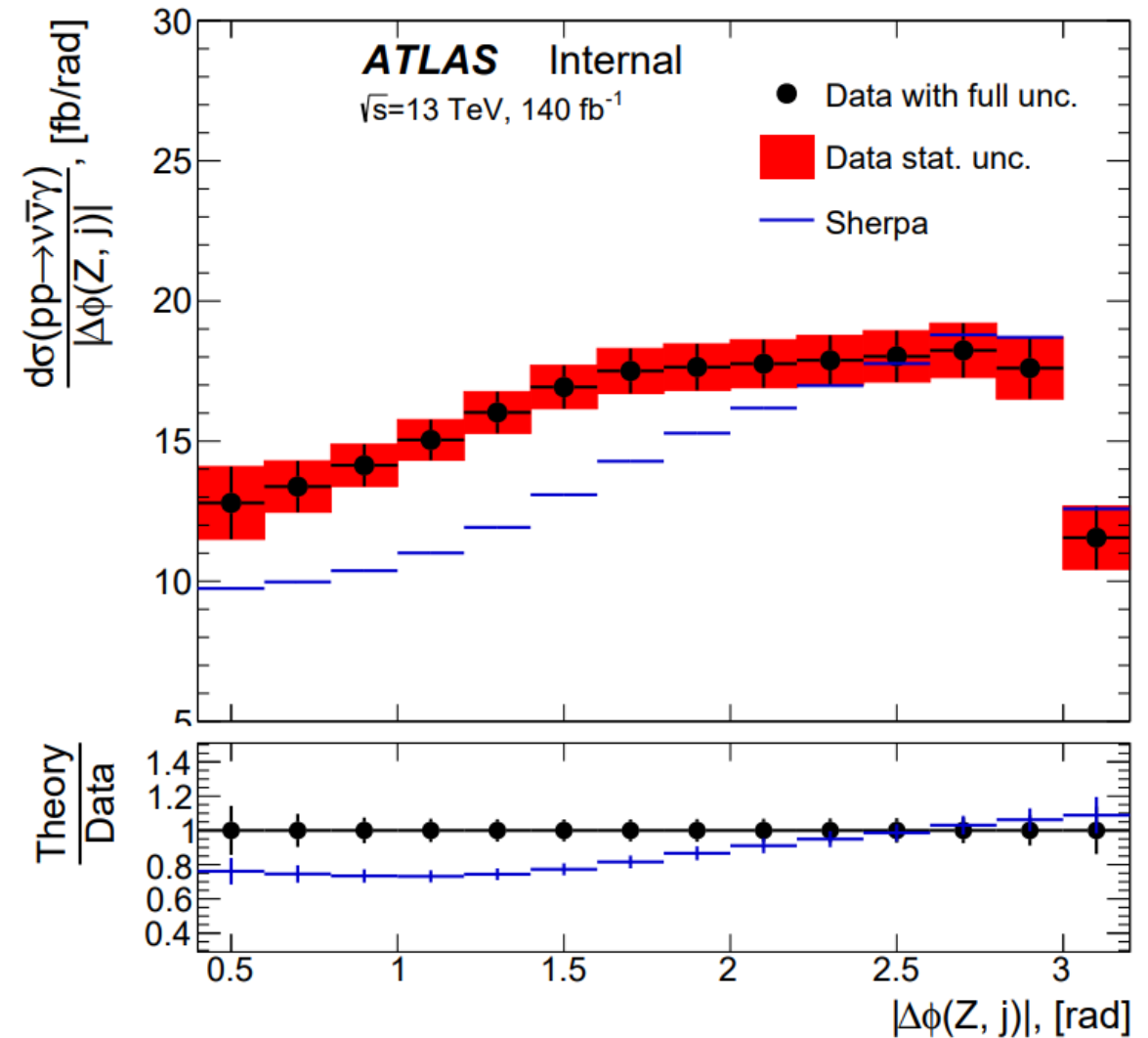
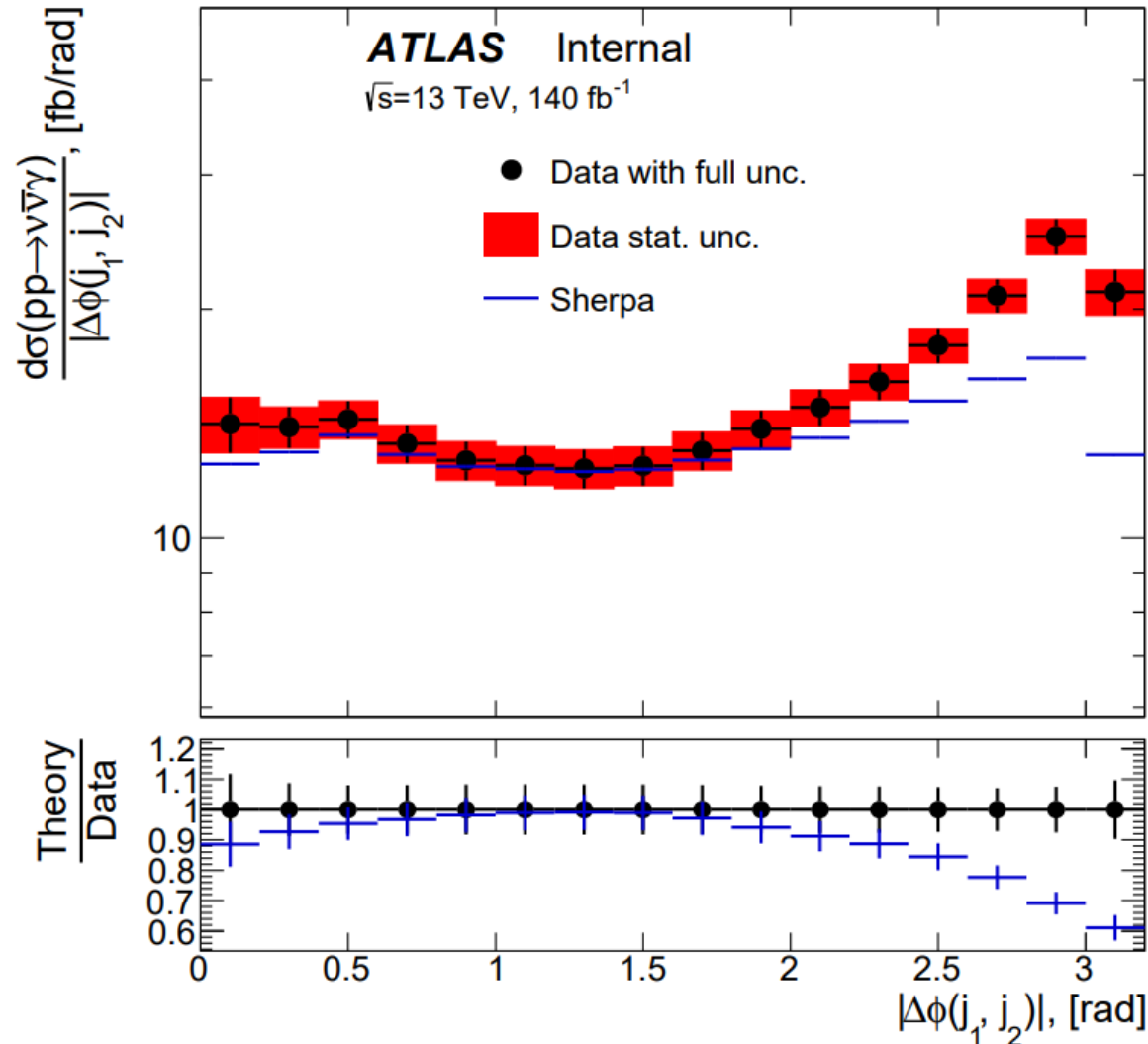
Получение дифференциальных сечений



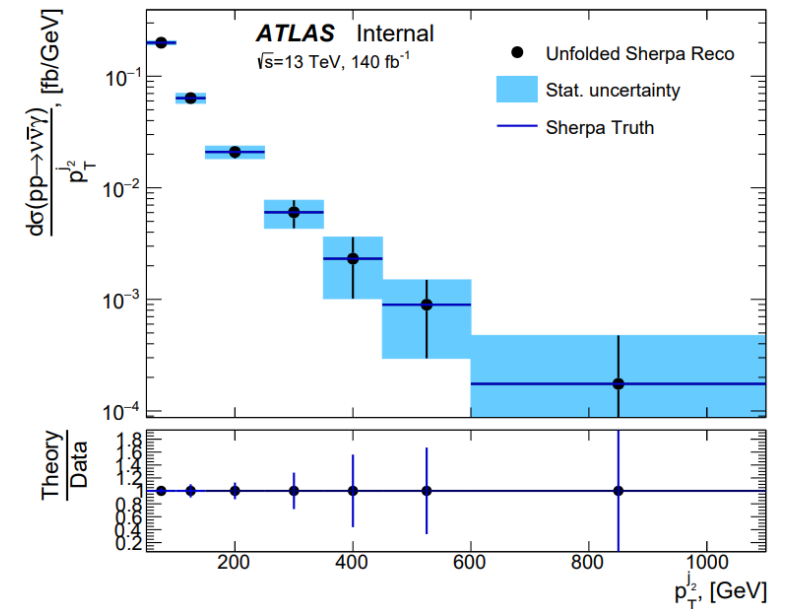
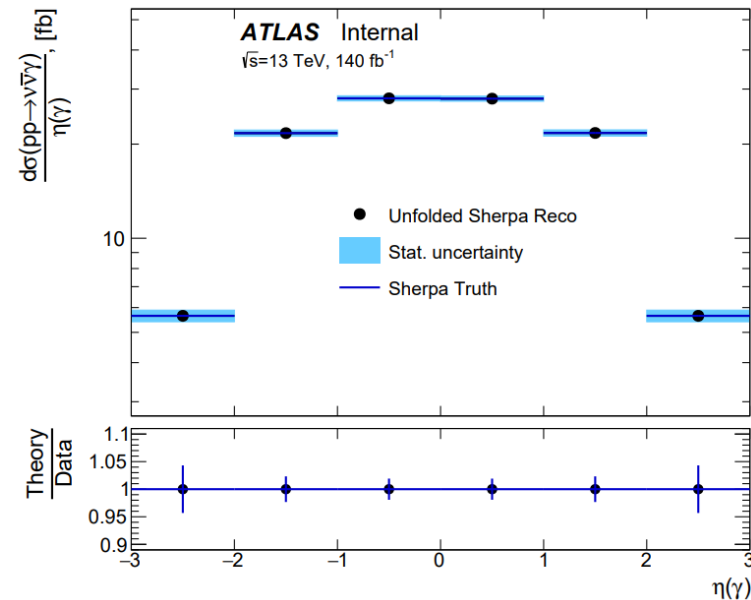
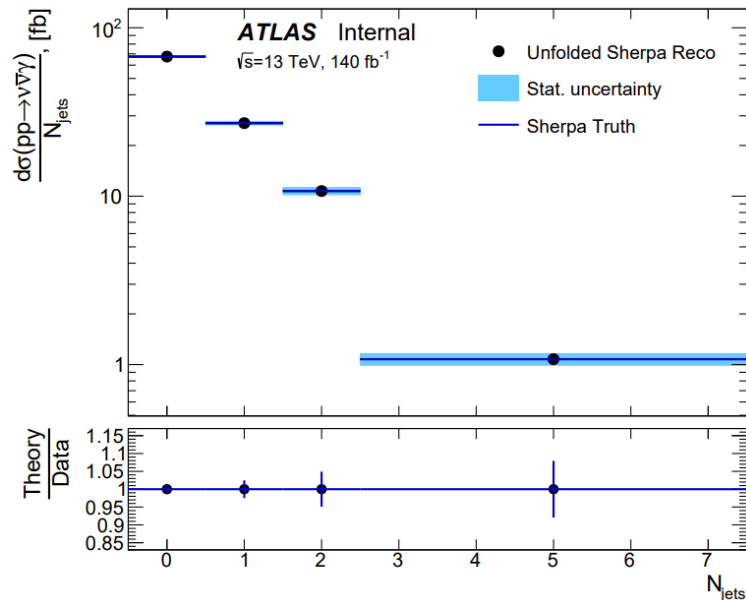
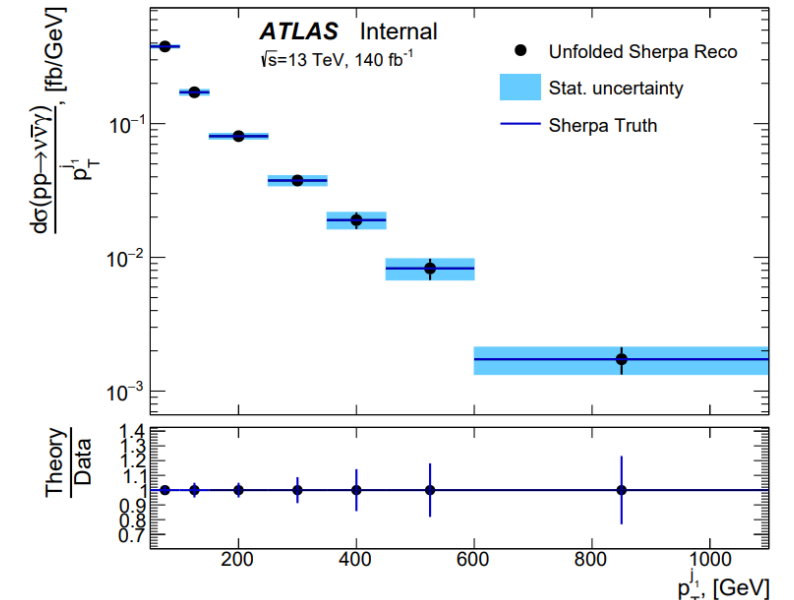
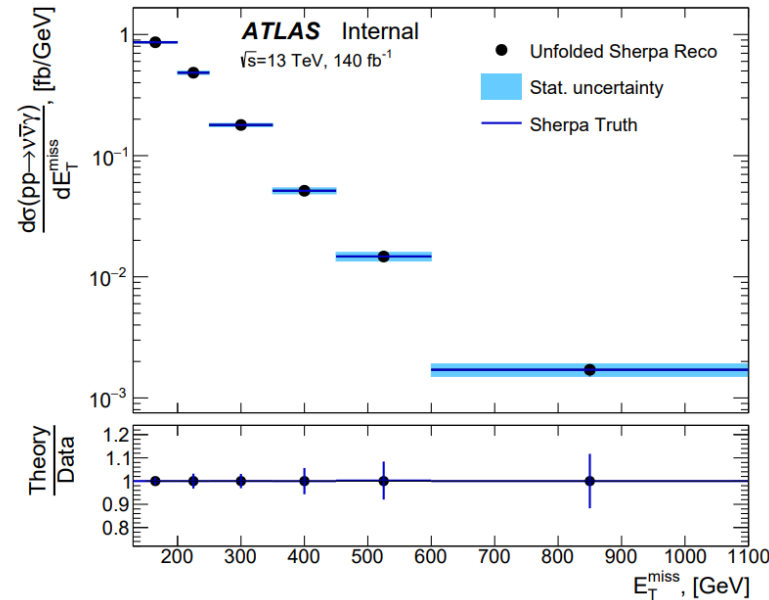
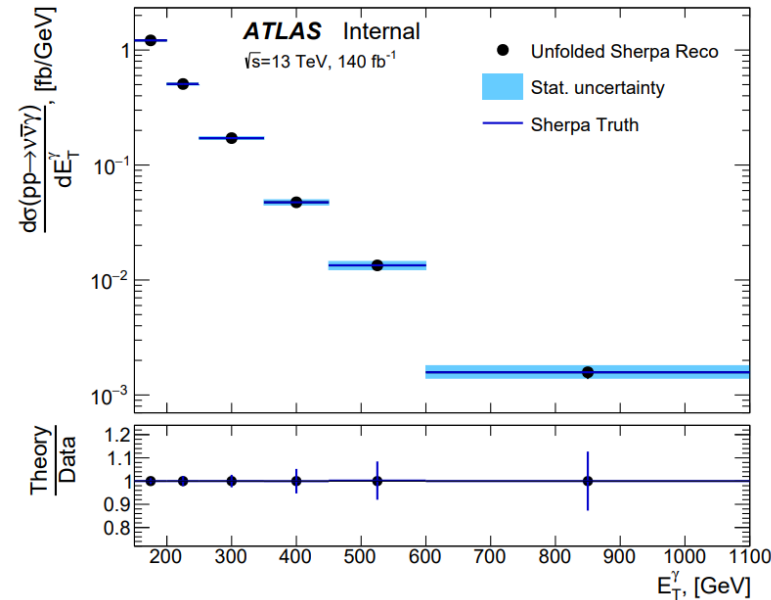
Получение дифференциальных сечений



Получение дифференциальных сечений



Валидация процедуры «развёртывания»



Валидация процедуры «развёртывания»

