

Оценка пайлап фона в исследовании ассоциированного рождения Z-бозона с фотоном

Студент бакалавриата: Жарова В. С.

Научные руководители: Солдатов Е. Ю., к.ф.-м.н., доцент
Казакова К. К., инженер

НИЯУ МИФИ
07.05.2024



Кафедра №40 физики
элементарных
частиц



Мотивация и цели

Мотивация:

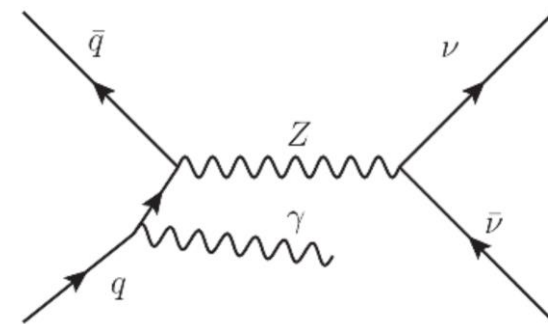
- Измерение сечений процесса с конечным состоянием $Z(\nu\nu)\gamma$ и сравнение результата с теоретическими предсказаниями в рамках Стандартной модели;
- Поиск аномальных трехбозонных вершин, чувствительных к физике вне Стандартной модели – “новой физике”.

Цель:

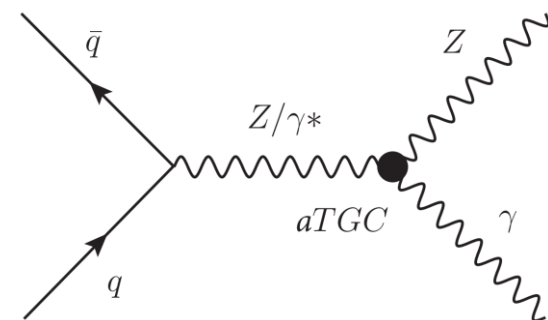
- Оценить число фоновых событий, обусловленных множественными pp взаимодействиями при пересечении пучков (т.н. пайлап фон), в процессе ассоциированного рождения $Z(\nu\nu)\gamma$.

Задачи :

- Разработать альтернативный подход для оценки пайлап событий в процессе ассоциированного рождения $Z(\nu\nu)\gamma$ – метод Монте-Карло наложений;
- Получить статистическую и систематическую погрешности для результирующего числа таких фоновых событий.



(a) SM



(b) За рамками SM

Исследуемый фон

Подходы

Метод,
основанный на
данных*

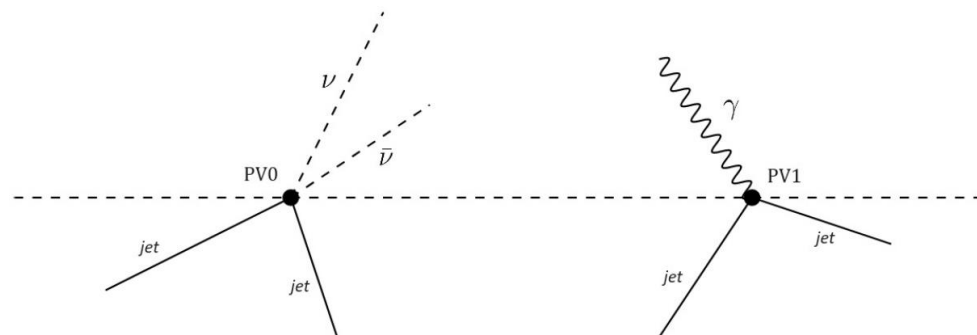
Метод
Монте-Карло
наложений

*(подробнее в back-up)

- Оценка пайлап фона основана на распределении продольного расстояния $\Delta z = z_{\gamma} - z_{\text{vtx}}$ между положением первичной вершины (z_{vtx}) и положением кандидата в фотон (z_{γ});

$$f_{\text{PU}} = \frac{N_{\text{data}}^{|\Delta z| > 50\text{mm}} - N_{\text{single pp}}^{|\Delta z| > 50\text{mm}}}{0.32 \times N_{\text{data}}}$$

Подход, основанный на данных, имеет ряд недостатков, таких как отрицательность итоговой доли пайлап событий, низкая точность полученной оценки, нестабильность доли по отношению к области, в которой она вычисляется. Ввиду этого, в рамках текущей работы рассмотрен **альтернативный подход** для оценки исследуемого фона, т.н. метод Монте-Карло наложений.



Фон, обусловленный множественными pp взаимодействиями, происходящими внутри пересечения пучков, т.н. **пайлап фон**, является источником событий, в которых Z-бозон может быть ассоциирован с фотоном из другого pp столкновения.

Область фазового пространства

- Критерии отбора событий $Z(\nu\nu)\gamma$:

Переменная	Ограничение
E_T^γ	> 150 ГэВ
E_T^{miss}	> 130 ГэВ
Число жестких фотонов	$N_\gamma = 1$
Лептонное вето	$N_\mu = 0, N_e = 0$ $N_\tau = 0$
Значимость E_T^{miss}	> 11
$ \Delta\phi(\vec{p}_T^{\text{miss}}, \gamma) $	> 0.6
$ \Delta\phi(\vec{p}_T^{\text{miss}}, j_1) $	> 0.3

Сигнал: $Z(\nu\nu)\gamma$

Фоны: γ +jets, $W(\rightarrow l\nu)\gamma$, $e \rightarrow \gamma$, $\text{jet} \rightarrow \gamma$, $Z(l\ell)\gamma$, $t\bar{t}\gamma$

Исследуемый фон: пайлап

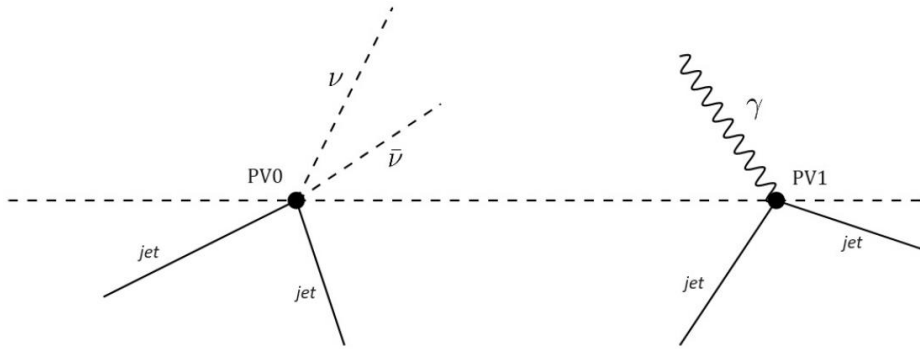


Сигнальная область (СО): события проходят отборы и содержат изолированный фотон

- Критерии изоляции фотона:

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

Метод Монте-Карло наложений (МКН)



Стратегия:

1. Используются **две независимые A и B** выборки на генераторном уровне для получения оценки числа пайлап событий (**A+B** события) в процессе дибозонного рождения (**AB** события);

2. Производится **наложение B** на A путем добавления объектов (например, фотонов, струй и т.д.) из события B процесса в событие A процесса **с целью сформировать A+B** событие;

3. Переменные, определяющие конечное **AB** состояние, вычисляются для **A+B** события и используются для **проверки на соответствие** критериям отбора событий;

4. Вес скомбинированного **A+B** события определяется согласно:


$$w_{A+B} = \frac{w_A w_B}{\langle w_A \rangle \langle w_B \rangle} \frac{L \sigma_{A+B}}{N_{\text{ОМС}}}$$

5. Число пайлап событий на уровне генератора: $N_{A+B}^{\text{gen}} = \sum w_{A+B}$

$$\sigma_{A+B} = \langle \mu \rangle \frac{\sigma_A \sigma_B}{\sigma_{\text{inel}}}$$

6. Ожидаемое число пайлап событий на уровне реконструкции **в СО**: $N_{A+B}^{\text{rec}} = N_{A+B}^{\text{gen}} C$,
где **C** - **коррекционный фактор**, учитывающий потерю сигнала при переходе от уровня генератора к уровню реконструкции.

Реализация метода МКН

- Независимые **Z-бозон и фотон**, взятые из Z+jets и γ +jets МК наборов, используются в качестве А и В компонент соответственно;
- Комбинация событий производится на уровне генератора в **доверительной области (ДО)** фазового пространства для конечного $Z(\nu\nu)\gamma$ состояния; 
- Фотон из каждого γ +jets набора накладывается на случайным образом выбранный Z-бозон из каждого Z+jets набора до тех пор, пока не станет частью **Z+ γ** события, проходящего отборы **ДО**;
- Статистика объёмных γ +jets МК наборов **уменьшается** до 100000 событий;
- Суммарное число пайлап событий на уровне генератора получается путем комбинации **каждого γ +jets** набора последовательно **с каждым Z+jets** набором.

Доверительная область:

Объект	Ограничение
Фотон	Изолированный, $E_T^\gamma > 150$ ГэВ $ \eta < 2.37$ за исключением $1.37 < \eta < 1.52$
Струя	$ \eta < 4.5$ $p_T > 50$ ГэВ $\Delta R(jet, \gamma) > 0.3$
Лептон	$N_l = 0$
Нейтрино	$p_T^{\nu\nu} > 130$ ГэВ
События	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$

Вес и сечение **Z+ γ** события:

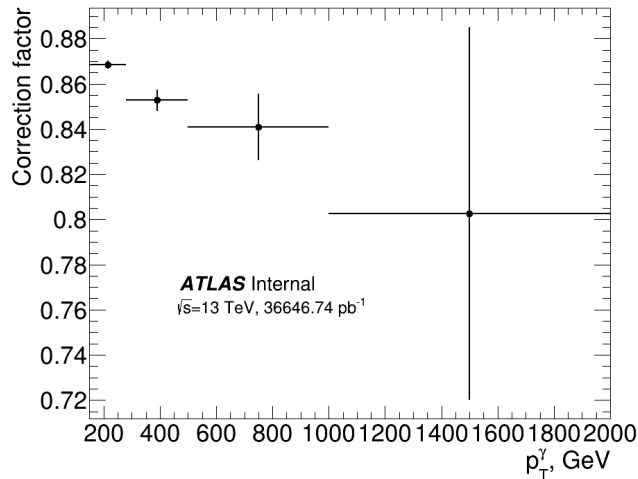
$$w_{Z+\gamma} = \frac{w_Z w_\gamma}{\langle w_Z \rangle \langle w_\gamma \rangle} \frac{L \sigma_{Z+\gamma}}{N_{\text{OMC}}}$$

$$\sigma_{Z+\gamma} = \langle \mu \rangle \frac{\sigma_Z^{\text{gen.}} \cdot \epsilon_Z \cdot \sigma_\gamma^{\text{gen.}} \cdot \epsilon_\gamma}{\sigma_{\text{inel}}}$$

Коррекционный фактор

- С-фактор параметризован по поперечному импульсу фотона, так как общее число пайлап событий на уровне генератора вычисляется путем суммирования числа пайлап событий, полученных для каждого γ +jets набора.

$$C = \frac{N_{Z\gamma}^{\text{rec}}}{N_{Z\gamma}^{\text{gen}}}$$



- Оценка коррекционных факторов на основе МК $Z(\nu\nu)\gamma$ для 4 интервалов по поперечному импульсу фотона [150; 280; 500; 1000; 2000] ГэВ:

p_T^γ , ГэВ	MC16a	MC16d	MC16e
150-280	0.8685 ± 0.0018	0.8155 ± 0.0017	0.8246 ± 0.0014
280-500	0.853 ± 0.005	0.818 ± 0.004	0.822 ± 0.004
500-1000	0.841 ± 0.015	0.803 ± 0.014	0.829 ± 0.012
1000-2000	0.80 ± 0.08	0.84 ± 0.11	0.73 ± 0.06

$$N_{Z+\gamma}^{SR} = N_{Z+\gamma}^{FR} C$$

$N_{Z+\gamma}^{FR}$ - число пайлап событий в ДО

- Результирующее число* фоновых событий, обусловленных множественными pp столкновениями, в СО составляет 2.938 ± 0.018 (стат.) событий. *(более детально в back-up)
- Значение доли пайлап событий по отношению к данным составляет $(0.01257 \pm 0.00011)\%$. Указанная погрешность - статистическая.

Источники погрешности

К компонентам статистической погрешности числа пайлап событий относятся:

- Погрешности весов w_γ и w_Z событий, участвующих в комбинации γ +jets наборов с Z+jets наборами;
- Погрешность на коррекционный фактор;
- Погрешности на эффективности ϵ_γ и ϵ_Z , которые корректируют генераторные сечения γ +jets и Z+jets процессов соответственно;

Относительное отклонение для статистической погрешности составляет 0.6%.

Источниками систематической погрешности являются:

1. Теоретическая погрешность на сечения γ +jets и Z+jets процессов, обусловленная выбором функции распределения плотности партонов (ФРП), а также масштабом перенормировки и факторизации;
2. Экспериментальная погрешность на коррекционный фактор;
3. Погрешности на интегральную светимость.

Результаты по систематическим погрешностям:

Источник систематической погрешности	Отн. отклонение
ФРП \oplus масштаб	22.5%
$C_{Z\gamma}$	3.5%
L	2.7%
Итоговая систематическая ошибка	22.9%

➔ Итоговое число пайлап событий составило $2.938 \pm 0.018(\text{стат.}) \pm 0.674(\text{сист.})$ события. Значение доли пайлап событий по отношению к данным составило $(0.013 \pm 0.003 (\text{стат.} \oplus \text{сист.}))\%$.

Заключение

Цель работы заключалась в оценке фоновых событий, обусловленных множественными pp взаимодействиями, в процессе ассоциированного рождения Z -бозона с фотоном. В рамках поставленной задачи были получены следующие результаты:

- Разработан альтернативный подход для оценки пайлап событий - метод Монте-Карло наложений;
- С помощью метода МКН получена оценка числа пайлап событий в СО. Также получены значения статистической и систематической погрешностей. Итоговое число пайлап событий составило $2.938 \pm 0.018(\text{стат.}) \pm 0.674(\text{сист.})$ события. Значение доли пайлап событий по отношению к данным составило $(0.013 \pm 0.003 (\text{стат.} \oplus \text{сист.}))\%$.
- На основе полученной оценки установлено, что вклад пайлап фона в СО незначителен. Таким образом, исследуемый фон не оказывает влияния на формы распределений, и может быть учтен в качестве дополнительной систематической погрешности при получении сечения $Z(\nu\nu)\gamma$ процесса.

Спасибо за внимание!

BACK-UP

Переменные отбора событий $Z(\nu\nu)\gamma$

- **Значимость** E_T^{miss} – это величина, отделяющая события с правдивой величиной потерянной поперечной энергии от событий с “ложной” величиной, в основном обусловленной либо неполной реконструкцией адронных струй, либо от неверного измерения их энергии, что приводит к увеличению изначально низкой величины потерянного поперечного импульса;
- \vec{p}_T^{miss} – **потерянный поперечный импульс**, определяемый как сумма поперечных импульсов частиц в конечном состоянии;
- E_T^{cone20} , p_T^{cone20} – **энерговыведение** в калориметре и **суммарный поперечный импульс** в трекаре внутри конуса раствором $\Delta R=0.2$ вокруг трека кандидата в фотон, где $\Delta R = \sqrt{\Delta\eta^2 + \Delta\phi^2}$ – **угловое расстояние** между частицами;
- **Псевдобыстрота** $\eta = -\ln\left(\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)$ – безразмерная физическая величина, показывающая отклонение движения элементарной частицы от оси пучка.

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

σ_L – дисперсия измеренного E_T^{miss} в продольном направлении;
 ρ_{LT} – корреляционный фактор измерения продольной и поперечной компонент E_T^{miss} ;

Идентификация фотонов I

- Идентификация фотонов опирается на различия распределений ЭМ ливня в калориметре от настоящих фотонов и адронных струй, которые могут породить похожий отклик детектора.

- «Loose» селекция: фотон, для которого по крайней мере один из критериев формы ЭМ ливня нарушается.

- «Tight» селекция обеспечивает эффективность идентификации фотонов на уровне 85%.

*Эффективность отбора вычисляется как отношение числа сигнальных событий после отбора к числу сигнальных событий до отбора.

$$\varepsilon = N_{\text{passed}}/N_{\text{all}}$$

Table 1: Discriminating variables used for *loose* and *tight* photon identification.

Category	Description	Name	<i>loose</i>	<i>tight</i>
Acceptance	$ \eta < 2.37$, with $1.37 \leq \eta < 1.52$ excluded	–	✓	✓
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}	✓	✓
	Ratio of E_T in the hadronic calorimeter to E_T of the EM cluster (used over the range $0.8 < \eta < 1.37$)	R_{had}	✓	✓
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	✓	✓
EM strip layer	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 in $3 \times 3 \eta \times \phi$ cells over the energy of 3×7 cells centered around the photon cluster position	R_ϕ		✓
	Lateral shower width, $\sqrt{(\sum E_i (i - i_{\text{max}})^2)/(\sum E_i)}$, 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}		

Идентификация фотонов II

Table 1: Discriminating variables used for *loose* and *tight* photon identification.

Category	Description	Name	<i>loose</i>	<i>tight</i>
	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	$w_{s \text{ tot}}$		✓
	Energy outside the core of the three central strips but within seven strips divided by energy within the three central strips	f_{side}		✓
	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		✓
	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 the first layer to the to the total energy of the EM cluster	f_1		✓

Метод, основанный на данных, с использованием нормировочных коэффициентов I

- Доля пайлап фона: $f_{PU} = \frac{N_{data}^{|\Delta z|>50mm} - N_{single\ pp}^{|\Delta z|>50mm}}{0.32 \times N_{data}}$, где $N_{single\ pp}^{|\Delta z|>50mm} = SF_1 \times SF_2 \times N_{MC}^{|\Delta z|>50mm}$
- Расширенная область: $f_{PU} = \frac{N_{data}^{|\Delta z|>15mm} - SF_1 \times SF_2 \times N_{MC}^{|\Delta z|>15mm}}{0.76 \times N_{data}}$

SF_1, SF_2 – нормировочные коэффициенты для МК сигнала в области $|\Delta z| < 10$ mm и $|\Delta z| > 15$ mm соответственно.

➤ Доля пайлап фона, полученная в областях $|\Delta z| > 15$ мм и $|\Delta z| > 50$ мм для различного числа струй:

	$N_{jets} \geq 0$	$N_{jets} > 0$	$N_{jets} > 1$	$N_{jets} = 0$
$f_{PU}^{ \Delta z >15mm}, \%$	-15 ± 3	13.0 ± 1.7	17 ± 3	-29 ± 5
$f_{PU}^{ \Delta z >50mm}, \%$	-34 ± 13	12 ± 3	12 ± 4	-56 ± 19

➔ Результаты говорят о нестабильности доли пайлап фона, вычисленной с помощью метода, основанного на данных, использующего нормировочные коэффициенты.

Метод, основанный на данных, с использованием нормировочных коэффициентов II

$N_{\text{jets}} \geq 0$

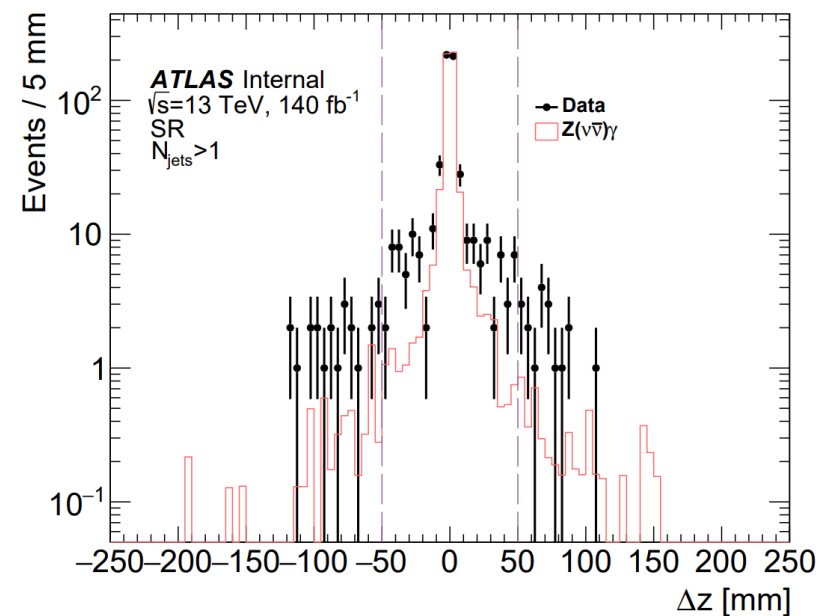
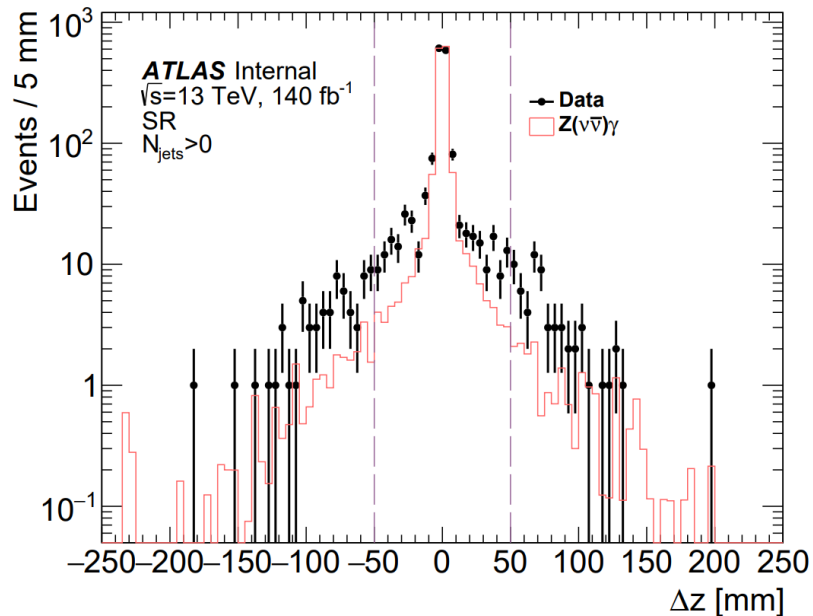
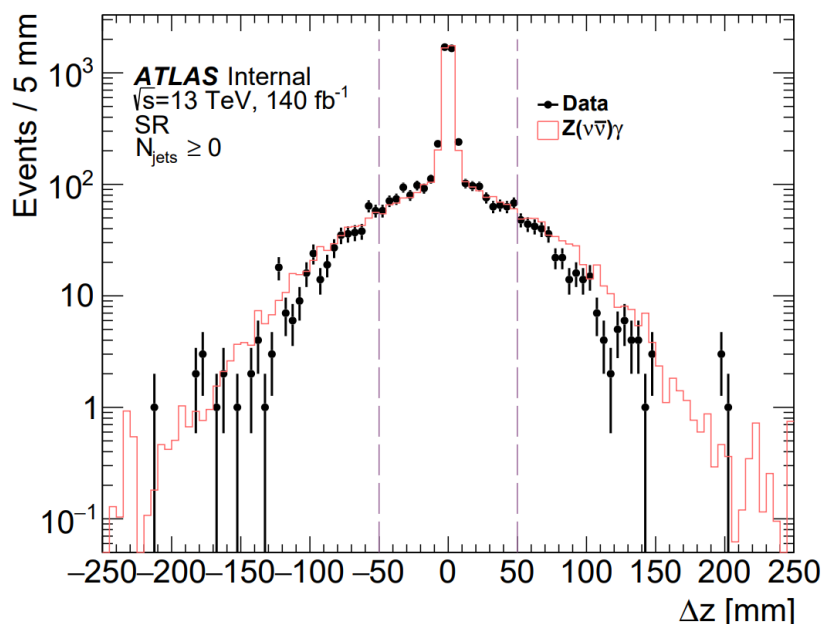
- SF1= 4.46 ± 0.08
- $|\Delta z| > 15$ mm: $f_{\text{PU}} = (-15 \pm 3)\%$
- $|\Delta z| > 50$ mm: $f_{\text{PU}} = (-34 \pm 13)\%$

$N_{\text{jets}} > 0$

- SF1= 4.24 ± 0.12
- $|\Delta z| > 15$ mm: $f_{\text{PU}} = (13.0 \pm 1.7)\%$
- $|\Delta z| > 50$ mm: $f_{\text{PU}} = (12 \pm 3)\%$

$N_{\text{jets}} > 1$

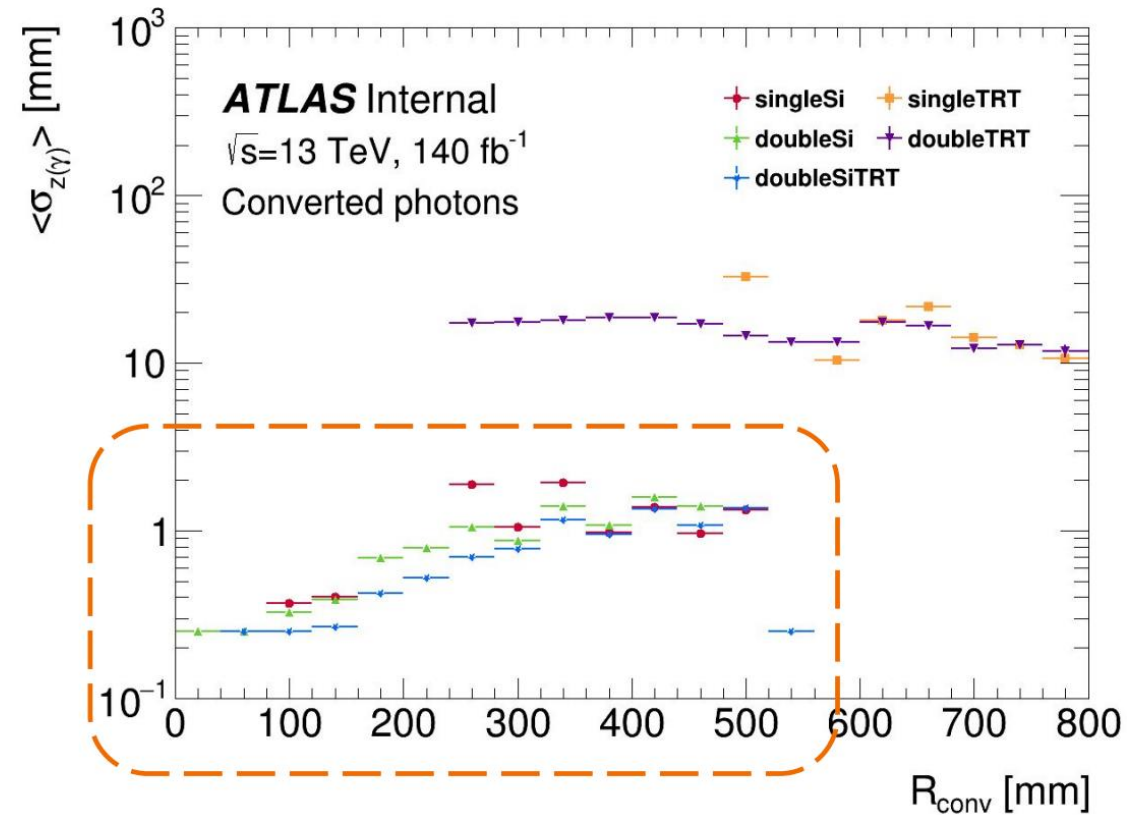
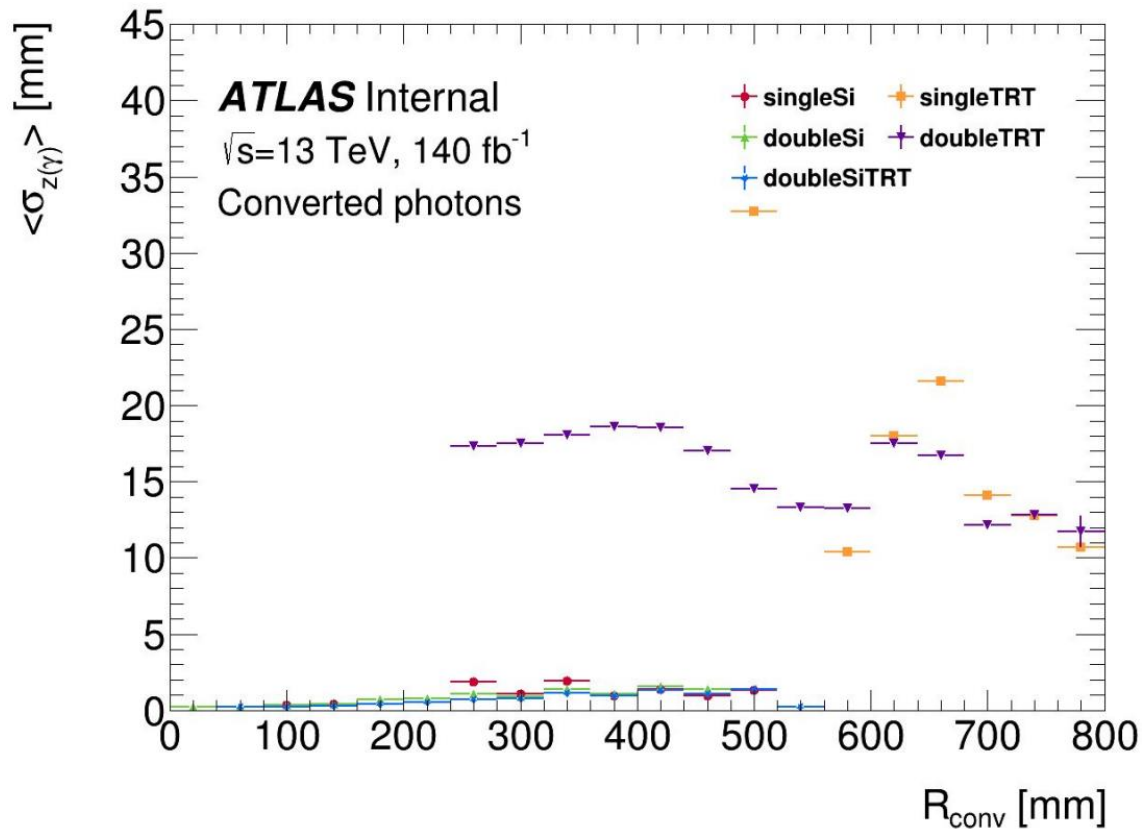
- SF1= 5.7 ± 0.3
- $|\Delta z| > 15$ mm: $f_{\text{PU}} = (17 \pm 3)\%$
- $|\Delta z| > 50$ mm: $f_{\text{PU}} = (12 \pm 4)\%$



Распределения данных по Δz для событий с конверсионными фотонами, сопоставленные с $Z(\nu\bar{\nu})\gamma$ QCD LO набором, отнормированным на SF_1

Требования к фотону в методе на данных

Для увеличения точности восстановленной z_γ используются конверсионные фотоны, ассоциированные как минимум с одним треком в кремниевом детекторе: **singleSi**, **doubleSi**, **doubleSiTRT**.



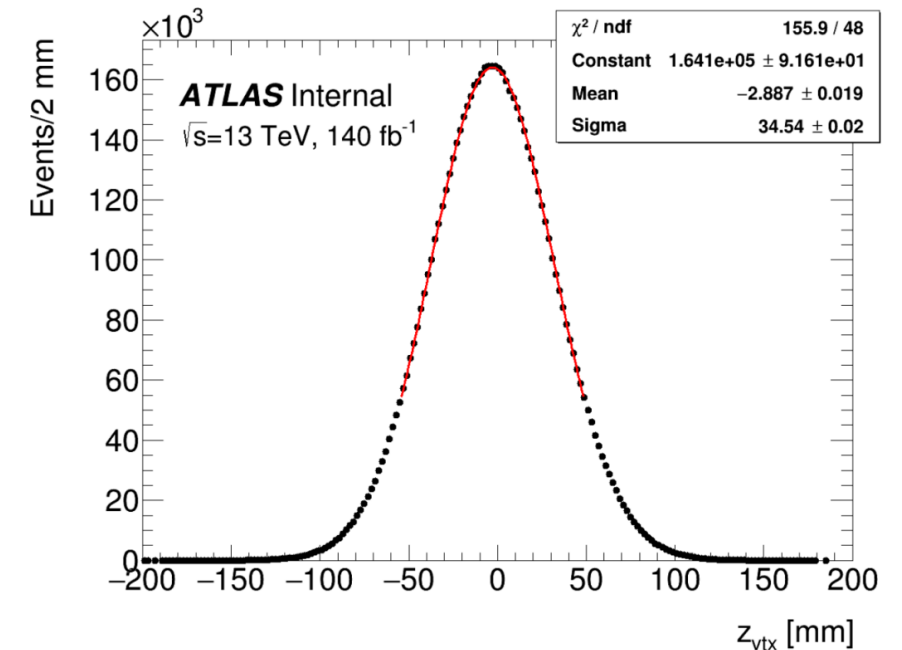
Метод, основанный на данных I

- Метод, основанный на данных, использует распределение продольного расстояния $\Delta z = z_{\text{vtx}} - z_{\gamma}$ между положением первичной вершины z_{vtx} и положением кандидата в фотон z_{γ} ;
- Форма распределения Δz получена из предположения, что распределения z_{vtx} и z_{γ} **идентичны и некоррелированы**;
- Распределения z_{vtx} и z_{γ} Гауссовы с $\sigma=35$ mm. Распределение разности $\Delta z = z_{\text{vtx}} - z_{\gamma}$ также Гауссово с $\sigma \sim 50$ mm;
- Доля пайлап фона по отношению к данным вычисляется в области $|\Delta z| > 50$ mm, где в соответствии со свойствами распределения Гаусса лежит **32%** от числа всех событий:

$$f_{\text{PU}} = \frac{N_{\text{data excl. bkg}}^{|\Delta z| > 50 \text{mm}} - N_{\text{MC}}^{|\Delta z| > 50 \text{mm}}}{N_{\text{data}} \times 0.32}$$

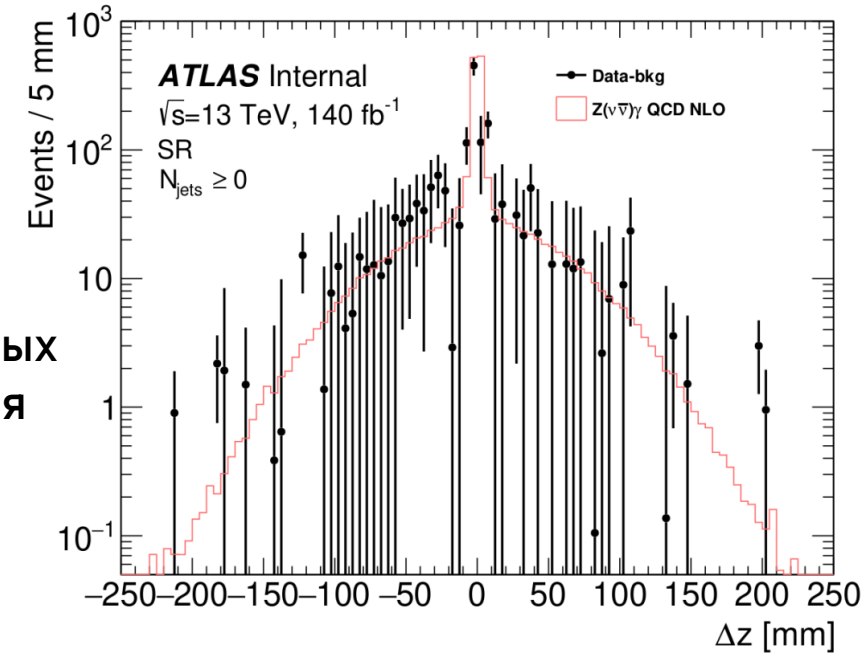
- Для области $|\Delta z| > 15$ mm с увеличенной статистикой:

$$f_{\text{PU}} = \frac{N_{\text{data excl. bkg}}^{|\Delta z| > 15 \text{mm}} - N_{\text{MC}}^{|\Delta z| > 15 \text{mm}}}{N_{\text{data}} \times 0.76}$$



Метод, основанный на данных II

- Распределение данных за вычетом числа фоновых событий, не относящихся к пайлап фону, по Δz в СО только для событий с конверсионными фотонами, сопоставленное с сигнальным $Z(\nu\bar{\nu})\gamma$ МК набором;
- Значения количества событий с конверсионными фотонами в данных и оцененных фонах в СО без ограничений на $|\Delta z|$, используемые для оценки фоновых пайлап событий:



Данные	$Z(\nu\bar{\nu})\gamma$	$W\gamma, tt\gamma$	$e \rightarrow \gamma$	$jet \rightarrow \gamma$	$\gamma+jet$	$Z(l)\gamma$
5920 ± 80	1884 ± 4	749 ± 11	1989 ± 9	890 ± 180	780 ± 80	55.1 ± 1.9

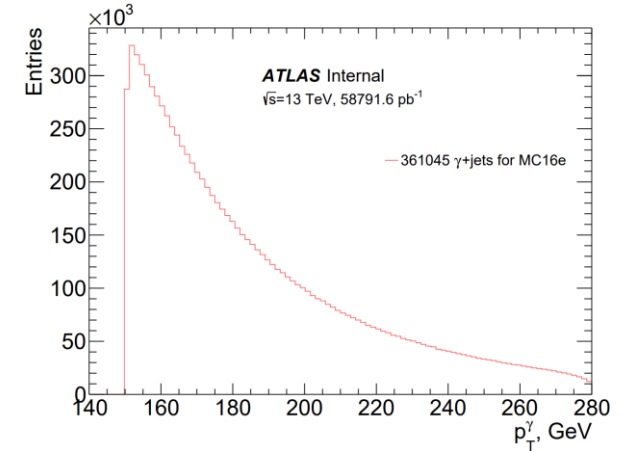
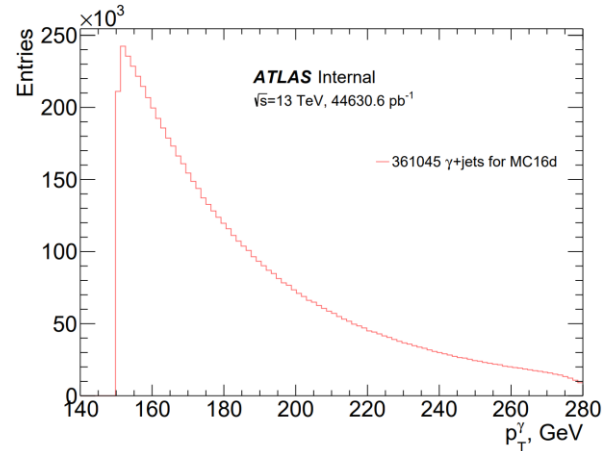
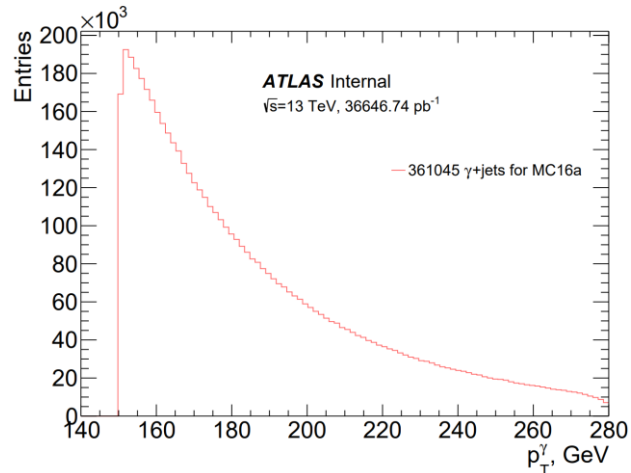
- Доля пайлап фона по отношению к данным составляет:

Область	Данные – фон	$Z(\nu\bar{\nu})\gamma$	$f_{PU}, \%$
$ \Delta z > 15$ мм	560 ± 170	633 ± 2	-2 ± 4
$ \Delta z > 50$ мм	200 ± 130	302.6 ± 1.4	-5 ± 7

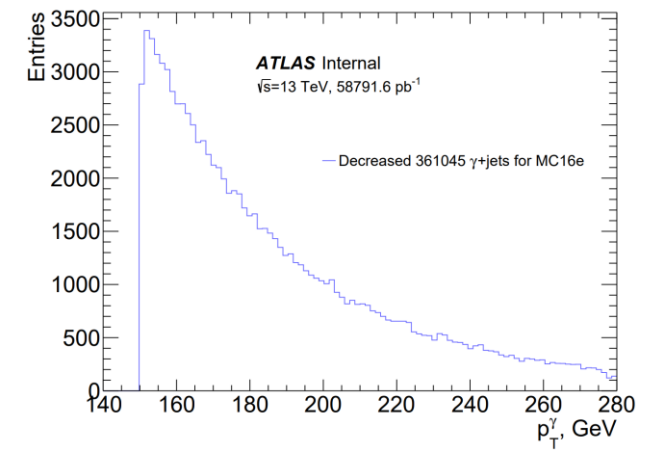
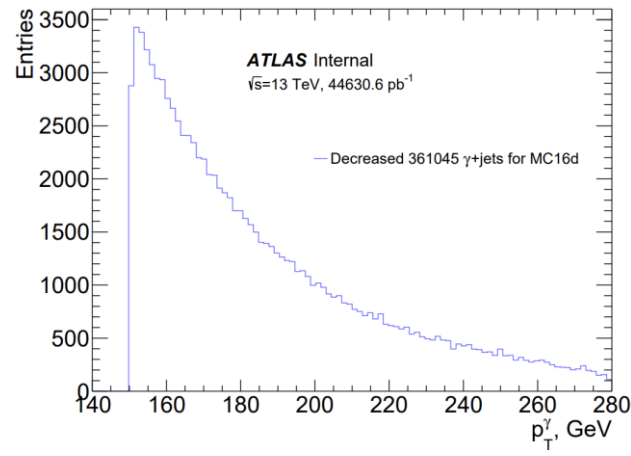
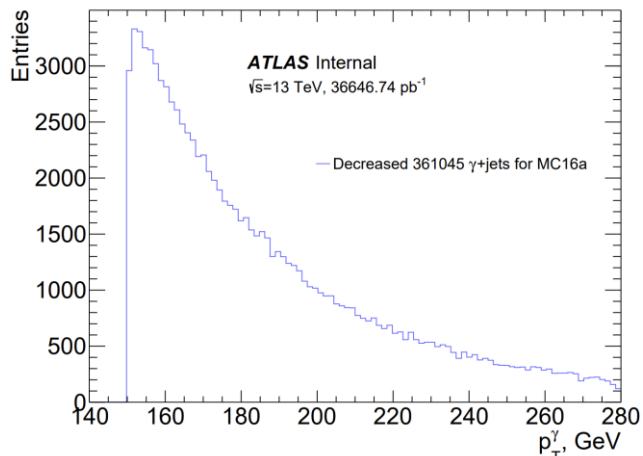
➤ Результат, полученный с помощью подхода на данных, говорит о **незначительном** вкладе исследуемого фона в число событий СО.

Однако, точность полученной оценки мотивирует рассмотреть альтернативный подход.

Репрезентативность γ +jets выборки на примере 361045 МК набора



Распределение количества событий, прошедших отборы ДО для соответствующих объектов из 361045 γ + jets набора для MC16a/d/e



Распределение 100000 событий, прошедших отборы ДО для соответствующих объектов из 361045 γ + jets набора для MC16a/d/e

Информация об используемых γ +jets и Z+jets наборах в методе МКН

- Значения генераторного поперечного сечения и значения количества событий, прошедших отборы ДО для соответствующих объектов γ +jets и Z+jets процессов, в каждой из кампании.

➤ γ +jets

γ + jets	p_T^γ , ГэВ	$\sigma_\gamma^{\text{gen}}$, нб	N_γ^{MC16a}	N_γ^{MC16d}	N_γ^{MC16e}
361045	140-280 CVetoBVeto	2.4733e-1	5730863	7164490	9722954
361046	140-280 CFilterBVeto	2.4730e-1	3531410	4412930	5989939
361047	140-280 BFilter	2.4928e-1	3488508	4388563	5906211
361048	280-500 CVetoBVeto	1.3636e-2	3473982	4338889	5899403
361049	280-500 CFilterBVeto	1.3636e-2	1311955	1688373	2224485
361050	280-500 BFilter	1.3871e-2	1564949	1983444	2557681
361051	500-1000 CVetoBVeto	9.2491e-4	739530	923512	1255073
361052	500-1000 CFilterBVeto	9.2369e-4	555049	695226	943402
361053	500-1000 BFilter	9.4472e-4	110999	138837	193315
361054	1000-2000 CVetoBVeto	1.8485e-5	480505	601956	816193
361055	1000-2000 CFilterBVeto	1.8466e-5	240505	307718	413754
361056	1000-2000 BFilter	1.8978e-5	67307	86534	115429

- Различие между кампаниями проводится по энергии БАК в системе центра масс, геометрии детектора и версии программного обеспечения. Кампании MC16a, MC16d и MC16e отвечают 2015–2016, 2017 и 2018 календарным годам соответственно.

➤ Z+jets

Z + jets	p_T^Z , ГэВ	σ_Z^{gen} , нб	N_Z^{MC16a}	N_Z^{MC16d}	N_Z^{MC16e}
364222	500-1000	3.0440e-4	136217	103989	171221
364223	> 1000	5.8558e-6	70715	70269	116466
366011	100-140 BFilter	1.0910e-1	20	25	74
366012	100-140 BFilter	4.5514e-3	76	82	233
366013	100-140 BFilter	1.2029e-3	72	92	248
366014	140-280 BFilter	5.1779e-2	3933	4913	13228
366015	140-280 BFilter	4.4678e-3	1257	1457	4303
366016	140-280 BFilter	1.3760e-3	688	801	2227
366017	280-500 BFilter	4.2467e-3	6939	6946	22675
366020	100-140 CFilterBVeto	1.0912e-1	20	22	32
366021	100-140 CFilterBVeto	4.5539e-3	100	107	152
366022	100-140 CFilterBVeto	1.2024e-3	115	113	163
366023	140-280 CFilterBVeto	5.1774e-2	2965	3696	4833
366024	140-280 CFilterBVeto	4.4680e-3	1576	1754	2682
366025	140-280 CFilterBVeto	1.3755e-3	1461	1512	2352
366026	280-500 CFilterBVeto	4.2483e-3	20247	25527	33481
366029	100-140 CVetoBVeto	1.0914e-1	10	22	26
366030	100-140 CVetoBVeto	4.5575e-3	72	80	111
366031	100-140 CVetoBVeto	1.2022e-3	101	121	161
366032	140-280 CVetoBVeto	5.1778e-2	19845	24856	33351
366033	140-280 CVetoBVeto	4.4714e-3	3857	4764	6465
366034	140-280 CVetoBVeto	1.3755e-3	3848	3858	6365
366035	280-500 CVetoBVeto	4.2499e-3	25435	31390	42087

Эффективности для сечений

- Сечения γ +jets и Z+jets процессов в определенной области фазового пространства могут быть получены путем домножения генераторных сечений на эффективности;
- Эффективности определяются как отношение числа γ +jets (Z+jets) событий, удовлетворяющих требованиям на объекты, к общему числу γ +jets (Z+jets) событий.

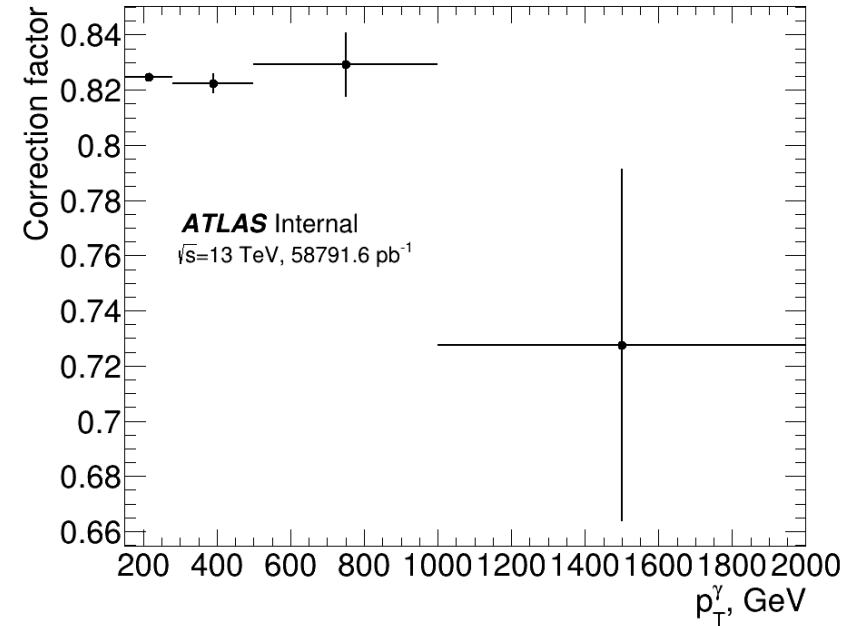
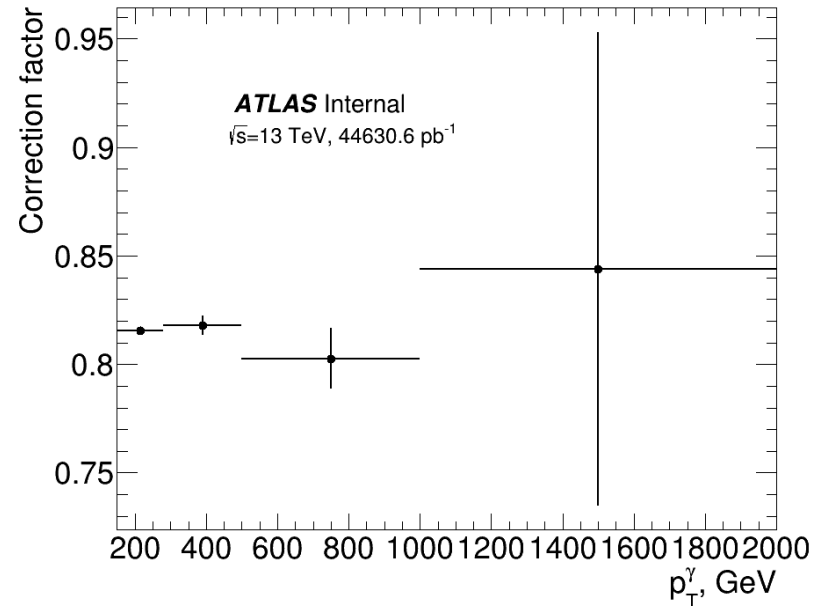
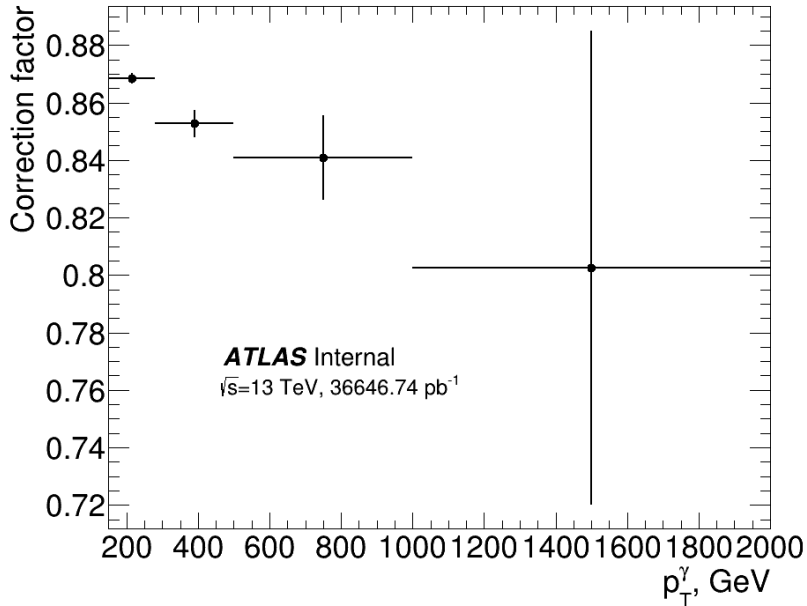
➤ γ +jets

γ + jets	p_T^γ , GeV	$\sigma_\gamma^{\text{gen}}$, nb	SF_γ^{MC16a}	SF_γ^{MC16d}	SF_γ^{MC16e}
361045	140-280 CVetoBVeto	2.4733e-1	0.7511 ± 0.0004	0.7516 ± 0.0004	0.7514 ± 0.0003
361046	140-280 CFilterBVeto	2.4730e-1	0.7552 ± 0.0005	0.7553 ± 0.0005	0.7551 ± 0.0004
361047	140-280 BFilter	2.4928e-1	0.7626 ± 0.0005	0.7630 ± 0.0005	0.7626 ± 0.0004
361048	280-500 CVetoBVeto	1.3636e-2	0.9277 ± 0.0007	0.9276 ± 0.0006	0.9277 ± 0.0005
361049	280-500 CFilterBVeto	1.3636e-2	0.9304 ± 0.0011	0.9304 ± 0.0010	0.9302 ± 0.0009
361050	280-500 BFilter	1.3871e-2	0.9274 ± 0.0010	0.9274 ± 0.0009	0.9276 ± 0.0008
361051	500-1000 CVetoBVeto	9.2491e-4	0.9450 ± 0.0016	0.9450 ± 0.0014	0.9453 ± 0.0012
361052	500-1000 CFilterBVeto	9.2369e-4	0.9463 ± 0.0018	0.9468 ± 0.0016	0.9467 ± 0.0014
361053	500-1000 BFilter	9.4472e-4	0.945 ± 0.004	0.946 ± 0.004	0.944 ± 0.003
361054	1000-2000 CVetoBVeto	1.8485e-5	0.973 ± 0.002	0.9736 ± 0.0018	0.9736 ± 0.0016
361055	1000-2000 CFilterBVeto	1.8466e-5	0.975 ± 0.003	0.974 ± 0.003	0.974 ± 0.002
361056	1000-2000 BFilter	1.8978e-5	0.974 ± 0.005	0.974 ± 0.005	0.973 ± 0.004

➤ Zj

Z + jets	p_T^Z , GeV	σ_Z^{gen} , nb	SF_Z^{MC16a}	SF_Z^{MC16d}	SF_Z^{MC16e}
364222	500-1000	3.0440e-4	0.935 ± 0.007	0.938 ± 0.009	0.937 ± 0.007
364223	> 1000	5.8558e-6	0.962 ± 0.009	0.977 ± 0.017	0.970 ± 0.008
366011	100-140 BFilter	1.0910e-1	0.022 ± 0.005	0.016 ± 0.004	0.017 ± 0.003
366012	100-140 BFilter	4.5514e-3	0.039 ± 0.005	0.038 ± 0.005	0.032 ± 0.003
366013	100-140 BFilter	1.2029e-3	0.056 ± 0.007	0.056 ± 0.007	0.052 ± 0.004
366014	140-280 BFilter	5.1779e-2	0.474 ± 0.016	0.460 ± 0.015	0.460 ± 0.009
366015	140-280 BFilter	4.4678e-3	0.313 ± 0.013	0.336 ± 0.013	0.319 ± 0.007
366016	140-280 BFilter	1.3760e-3	0.351 ± 0.017	0.353 ± 0.016	0.334 ± 0.009
366017	280-500 BFilter	4.2467e-3	0.82 ± 0.02	0.81 ± 0.02	0.814 ± 0.011
366020	100-140 CFilterBVeto	1.0912e-1	0.009 ± 0.002	0.005 ± 0.002	0.009 ± 0.002
366021	100-140 CFilterBVeto	4.5539e-3	0.022 ± 0.002	0.020 ± 0.002	0.0186 ± 0.0016
366022	100-140 CFilterBVeto	1.2024e-3	0.046 ± 0.006	0.031 ± 0.003	0.036 ± 0.003
366023	140-280 CFilterBVeto	5.1774e-2	0.53 ± 0.03	0.50 ± 0.02	0.51 ± 0.02
366024	140-280 CFilterBVeto	4.4680e-3	0.288 ± 0.012	0.290 ± 0.011	0.291 ± 0.009
366025	140-280 CFilterBVeto	1.3755e-3	0.297 ± 0.010	0.305 ± 0.011	0.294 ± 0.008
366026	280-500 CFilterBVeto	4.2483e-3	0.877 ± 0.017	0.869 ± 0.014	0.862 ± 0.014
366029	100-140 CVetoBVeto	1.0914e-1	0.0022 ± 0.0016	0.0049 ± 0.0016	0.0051 ± 0.0013
366030	100-140 CVetoBVeto	4.5575e-3	0.0105 ± 0.0014	0.0093 ± 0.0012	0.0099 ± 0.0012
366031	100-140 CVetoBVeto	1.2022e-3	0.031 ± 0.003	0.029 ± 0.003	0.028 ± 0.002
366032	140-280 CVetoBVeto	5.1778e-2	0.566 ± 0.012	0.562 ± 0.012	0.578 ± 0.011
366033	140-280 CVetoBVeto	4.4714e-3	0.309 ± 0.011	0.311 ± 0.008	0.307 ± 0.008
366034	140-280 CVetoBVeto	1.3755e-3	0.298 ± 0.007	0.294 ± 0.006	0.293 ± 0.005
366035	280-500 CVetoBVeto	4.2499e-3	0.917 ± 0.017	0.95 ± 0.03	0.915 ± 0.013

Коррекционный фактор



Коррекционный фактор, параметризованный по поперечному импульсу фотона, для MC16a/d/e

Результаты в интервалах по p_T^Y

$\gamma + \text{jets}$	MC16a	MC16d	MC16e
361045	$(20.6 \pm 0.5) \cdot 10^{-2}$	$(38.8 \pm 0.8) \cdot 10^{-2}$	$(49.6 \pm 0.8) \cdot 10^{-2}$
361046	$(20.7 \pm 0.5) \cdot 10^{-2}$	$(39.0 \pm 0.8) \cdot 10^{-2}$	$(49.9 \pm 0.9) \cdot 10^{-2}$
361047	$(21.1 \pm 0.5) \cdot 10^{-2}$	$(39.7 \pm 0.8) \cdot 10^{-2}$	$(50.8 \pm 0.9) \cdot 10^{-2}$
361048	$(14.1 \pm 0.3) \cdot 10^{-3}$	$(26.4 \pm 0.5) \cdot 10^{-3}$	$(33.8 \pm 0.5) \cdot 10^{-3}$
361049	$(14.1 \pm 0.3) \cdot 10^{-3}$	$(26.5 \pm 0.5) \cdot 10^{-3}$	$(33.9 \pm 0.5) \cdot 10^{-3}$
361050	$14.3 \pm 0.3) \cdot 10^{-3}$	$(26.9 \pm 0.5) \cdot 10^{-3}$	$(34.4 \pm 0.5) \cdot 10^{-3}$
361051	$(9.7 \pm 0.2) \cdot 10^{-4}$	$(18.2 \pm 0.3) \cdot 10^{-4}$	$(23.3 \pm 0.4) \cdot 10^{-4}$
361052	$(9.7 \pm 0.2) \cdot 10^{-4}$	$(18.3 \pm 0.3) \cdot 10^{-4}$	$(23.3 \pm 0.4) \cdot 10^{-4}$
361053	$(9.9 \pm 0.2) \cdot 10^{-4}$	$(18.7 \pm 0.4) \cdot 10^{-4}$	$(23.8 \pm 0.4) \cdot 10^{-4}$
361054	$(19.9 \pm 0.4) \cdot 10^{-6}$	$(37.6 \pm 0.7) \cdot 10^{-6}$	$(48.1 \pm 0.8) \cdot 10^{-6}$
361055	$(20.0 \pm 0.4) \cdot 10^{-6}$	$(37.6 \pm 0.7) \cdot 10^{-6}$	$(48.0 \pm 0.8) \cdot 10^{-6}$
361056	$(20.5 \pm 0.5) \cdot 10^{-6}$	$(38.6 \pm 0.8) \cdot 10^{-6}$	$(49.3 \pm 0.8) \cdot 10^{-6}$
Интеграл	0.669 ± 0.008	1.261 ± 0.014	1.611 ± 0.015

Значения суммарного числа пайлап событий на уровне генератора для каждого $\gamma + \text{jets}$ набора, полученные путем последовательной комбинации с каждым Z+jets набором.

Значения интегральной светимости L и среднего числа неупругих pp столкновений $\langle \mu \rangle$ для каждой кампании:

➤ Уровень реконструкции:

$\gamma + \text{jets}$	MC16a	MC16d	MC16e
361045	$(17.9 \pm 0.4) \cdot 10^{-2}$	$(31.6 \pm 0.7) \cdot 10^{-2}$	$(40.9 \pm 0.7) \cdot 10^{-2}$
361046	$(18.0 \pm 0.4) \cdot 10^{-2}$	$(31.8 \pm 0.7) \cdot 10^{-2}$	$(41.1 \pm 0.7) \cdot 10^{-2}$
361047	$(18.3 \pm 0.4) \cdot 10^{-2}$	$(32.4 \pm 0.7) \cdot 10^{-2}$	$(41.9 \pm 0.7) \cdot 10^{-2}$
361048	$(12.0 \pm 0.3) \cdot 10^{-3}$	$(21.6 \pm 0.4) \cdot 10^{-3}$	$(27.8 \pm 0.5) \cdot 10^{-3}$
361049	$(12.0 \pm 0.3) \cdot 10^{-3}$	$(21.7 \pm 0.4) \cdot 10^{-3}$	$(27.9 \pm 0.5) \cdot 10^{-3}$
361050	$(12.2 \pm 0.3) \cdot 10^{-3}$	$(22.0 \pm 0.4) \cdot 10^{-3}$	$(28.3 \pm 0.5) \cdot 10^{-3}$
361051	$(8.1 \pm 0.2) \cdot 10^{-4}$	$(14.6 \pm 0.4) \cdot 10^{-4}$	$(19.4 \pm 0.4) \cdot 10^{-4}$
361052	$(8.1 \pm 0.2) \cdot 10^{-4}$	$(14.7 \pm 0.4) \cdot 10^{-4}$	$(19.4 \pm 0.4) \cdot 10^{-4}$
361053	$(8.3 \pm 0.2) \cdot 10^{-4}$	$(15.0 \pm 0.4) \cdot 10^{-4}$	$(19.7 \pm 0.4) \cdot 10^{-4}$
361054	$(16.0 \pm 1.7) \cdot 10^{-6}$	$(3.2 \pm 0.4) \cdot 10^{-5}$	$(3.5 \pm 0.3) \cdot 10^{-5}$
361055	$(16.0 \pm 1.7) \cdot 10^{-6}$	$(3.2 \pm 0.4) \cdot 10^{-5}$	$(3.5 \pm 0.3) \cdot 10^{-5}$
361056	$(16.5 \pm 1.7) \cdot 10^{-6}$	$(3.3 \pm 0.4) \cdot 10^{-5}$	$(3.6 \pm 0.3) \cdot 10^{-5}$
Интеграл	0.581 ± 0.007	1.028 ± 0.011	1.329 ± 0.012



	MC16a	MC16d	MC16e
L, пб ⁻¹	36646.74	44630.6	58791.6
$\langle \mu \rangle$	25.1	37.8	36.1

➤ Поперечное сечение неупругого взаимодействия $\sigma_{\text{inel}} = 80 \text{ mb}$

- Нижняя строка соответствует итоговым значениям числа пайлап событий на уровне генератора и на уровне реконструкции в пределах MC16a/d/e кампании

Систематическая погрешность I

Вклад в теоретическую погрешность вносят:

➤ Погрешность, обусловленная выбором масштаба перенормировки и факторизации, вычисляется с помощью MadGraph путем варьирования номинального значения масштаба на фактор 0.5 и 2. Наибольшее отклонение одинаково для Z+jets и γ +jets процессов и составляет **11.2 %**.



$$\mu_F = \mu_R = 0.5\mu_0;$$

$$\mu_F = \mu_0, \mu_R = 0.5\mu_0;$$

$$\mu_R = \mu_0, \mu_F = 0.5\mu_0;$$

$$\mu_F = \mu_R = 2\mu_0;$$

$$\mu_F = 2\mu_0, \mu_R = \mu_0;$$

$$\mu_F = \mu_0, \mu_R = 2\mu_0.$$

➤ Погрешность, обусловленная выбором функции распределения плотности партонов (ФРП), вычисляется с помощью MadGraph. Отклонения составляют **1.3 %** и **1.5 %** для Z+jets и γ +jets процессов соответственно.

Вклад от компонент Z+jets и γ +jets в итоговую теоретическую погрешность одинаков по порядку, причем теоретические погрешности на сечения этих процессов зависят от одинаковых параметров.

Ввиду этого, данные ошибки рассматриваются как жестко коррелированные и суммируются аддитивно.

Результирующая теоретическая погрешность составляет **22.5 %**.

Систематическая погрешность II

Экспериментальная погрешность включает:

- Погрешности на эффективности идентификации, изоляции и реконструкции объектов, а также погрешность на эффективность триггера; погрешности, возникающие от энергетической шкалы и разрешения электронов, фотонов и адронных струй, а также от импульсной шкалы и разрешения мюонов и потерянного поперечного импульса; погрешность моделирования, обусловленная выбором МК генератора.

Итоговая систематическая погрешность на коррекционный фактор содержит только преобладающие компоненты ($> 0.1\%$) и принимается равной **3.5%** согласно предыдущему $Z(\nu\nu)\gamma$ анализу.

- Погрешности на интегральную светимость составляют 2.1%, 2.4% и 2.0% для MC16a, MC16d и MC16e кампаний соответственно. Данные значения получены с использованием детектора LUCID-2 для первичных измерений яркости.

$$\left. \begin{aligned} N_{\text{inel}} &= L \cdot \sigma_{\text{inel}} \\ N_{\text{inel}} &= \langle \mu \rangle \cdot N_{\text{bc}} \end{aligned} \right\} \langle \mu \rangle / \sigma_{\text{inel}} = L / N_{\text{bc}} \quad \Rightarrow$$

N_{bc} - общее число сталкивающихся пучков

Систематическая погрешность числа пайлап событий на интегральную светимость учитывается с фактором 2 и составляет **2.7%**.