

Оценка фонов в исследовании ассоциированного рождения Z-бозона с фотоном на полном наборе данных Run2 протон-протонных столкновений с энергией 13 ТэВ в эксперименте ATLAS

Студент бакалавриата: Жарова В. С.

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

Научный консультант: Казакова К. К.

НИЯУ МИФИ
27.06.2024



Кафедра №40 физики
элементарных
частиц



Мотивация и цели

Мотивация:

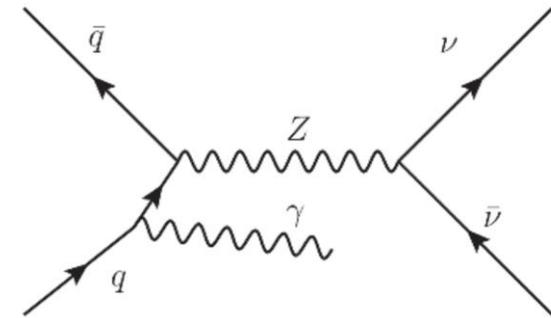
- Измерение сечений процесса с конечным состоянием $Z(\nu\nu)\gamma$ и сравнение результата с теоретическими предсказаниями в рамках Стандартной модели.
- Поиск аномальных трехбозонных вершин, чувствительных к физике вне Стандартной модели – «новой физике».

Цель:

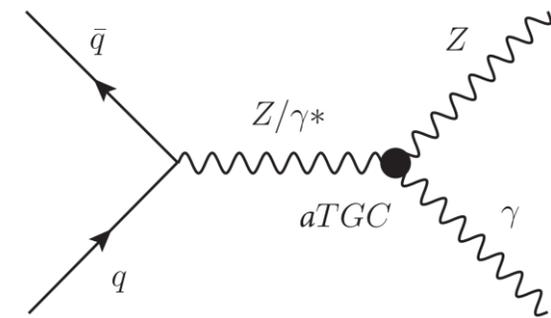
- Оценить число фоновых $\text{jet} \rightarrow \gamma$ событий, обусловленных неверной идентификацией адронной струи как фотона, а также оценить долю множественных pp -взаимодействий, обусловленных пересечением сгустков протонов, т.н. пайлап фон, для процесса $Z(\nu\nu)\gamma$ в pp -столкновениях с $\sqrt{s} = 13$ ТэВ.

Задачи:

- Разработать методы оценки количества фоновых $\text{jet} \rightarrow \gamma$ событий для $Z(\nu\nu)\gamma$ процесса.
- Разработать методы оценки количества пайлап событий для $Z(\nu\nu)\gamma$ процесса.



(a) СМ



(b) За рамками СМ

Область фазового пространства

Сигнал: $Z(\nu\nu)\gamma$

Фоны: γ +jets, $W(\rightarrow l\nu)\gamma$, $e \rightarrow \gamma$, $jet \rightarrow \gamma$, $Z(ll)\gamma$, $tt\gamma$
 $\sim 35\%$ $\sim 15\%$ $\sim 11\%$ $\sim 8\%$ $\sim 0.9\%$ $\sim 0.8\%$

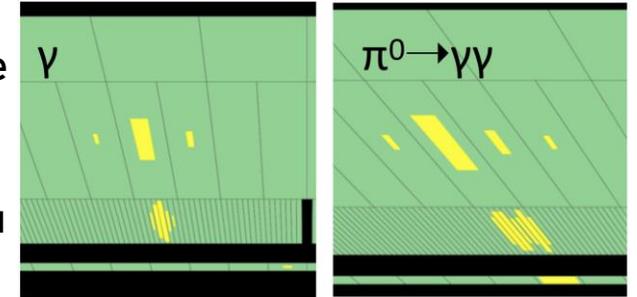
Вклад в % по отношению к данным

● **Критерии отбора событий $Z(\nu\nu)\gamma$:**

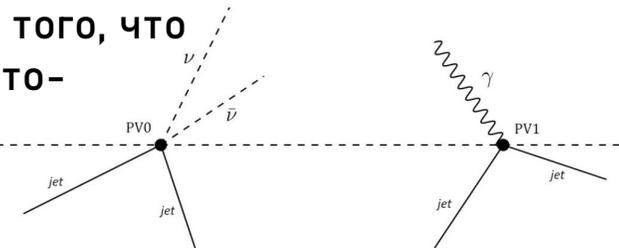
Переменная	Ограничение
E_T^γ	> 150 ГэВ
E_T^{miss}	> 130 ГэВ
Число жестких фотонов	$N_\gamma = 1$
Лептонное вето	$N_\mu = 0, N_e = 0$ $N_\tau = 0$
Значимость E_T^{miss}	> 11
$ \Delta\phi(\vec{p}_T^{miss}, \gamma) $	> 0.6
$ \Delta\phi(\vec{p}_T^{miss}, j_1) $	> 0.3
$ \Delta z $	< 250 мм

Исследуемые фоны: $jet \rightarrow \gamma$, пайлап

Адронные струи, содержащие нейтральные мезоны, которые в свою очередь распадаются в пару фотонов, могут быть ошибочно идентифицированы как изолированные фотоны.



Неопределенность в измерении продольной координаты фотона приводит к непренебрежимой вероятности того, что Z-бозон может быть ассоциирован с фотоном из другого pp-столкновения. Такие события наложения двух независимых процессов относятся к пайлап фону.



● **Критерий изоляции фотона:**

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



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

Матричный метод оценки jet → γ фона

➤ Первостепенная задача: разработать более гибкий подход для оценки jet → γ фона по сравнению с часто используемым двумерным методом боковых интервалов* (ABCD метод). *(подробнее в back-up)

1. Матричный метод основан на ослаблении определенного ограничения, который задает CO. В качестве такого ограничения используется **критерий идентификации**, позволяющий определить два типа фотонов: «**мягкий**» и «**жесткий**».

2. Количество наблюдаемых в данных «**жестких**»/«**нежестких**» событий и количество событий с **реальными**/«**ложными**» фотонами связаны с помощью эффективностей прохождения отбора на идентификационный критерий:

● **Реальная эффективность (r - real)**: вероятность того, что реальный фотон будет идентифицирован как «**жесткий**» фотон. (γ → γ)

● **Ложная эффективность (f - fake)**: вероятность того, что реальная струя будет идентифицирована как «**жесткий**» фотон. (jet → γ)

В матричной форме:
$$\begin{pmatrix} N_t \\ N_{!t} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r & f \\ 1-r & 1-f \end{pmatrix} \begin{pmatrix} N_{\text{real}}^{\text{loose}} \\ N_{\text{fake}}^{\text{loose}} \end{pmatrix}$$

3. Количество событий с **ложными** «**мягкими**» фотонами:
$$N_{\text{fake}}^{\text{loose}} = \frac{1}{(r-f)}((r-1)N_t + rN_{!t}).$$

4. Количество событий с **ложным** «**жесткими**» фотонами:
$$N_{\text{fake}} = f N_{\text{fake}}^{\text{loose}} = \frac{f}{(r-f)}((r-1)N_t + rN_{!t}).$$



«**Мягкий**» фотон удовлетворяет критериям отбора событий без каких-либо требований на критерий идентификации. «**Жесткий**» фотон дополнительно удовлетворяет всем критериям формы ЭМ ливня.

Вычисление эффективностей

1. Область фазового пространства разделяется на **четыре области** на основе критериев изоляции и идентификации фотона.
2. Контрольные области разделяются на последовательные интервалы по переменной изоляции с целью **экстраполяции** количества фоновых $jet \rightarrow \gamma$ событий в **CO**.
3. Эффективности вычисляются в каждом интервале:



Неизолированная область разделяется на **8 равномерных слайсов** в интервале $\{0.065-0.215\}$.

$$r_i = \frac{N_{CR1(i)}^{sig}}{N_{CR(i)}^{sig}}, \quad f_i = \frac{N_{CR1(i)}^{jet \rightarrow \gamma}}{N_{CR(i)}^{jet \rightarrow \gamma}}, \quad \text{где}$$

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

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

r вычисляется с помощью **МК наборов** для сигнального процесса;
f вычисляется непосредственно **из данных**.

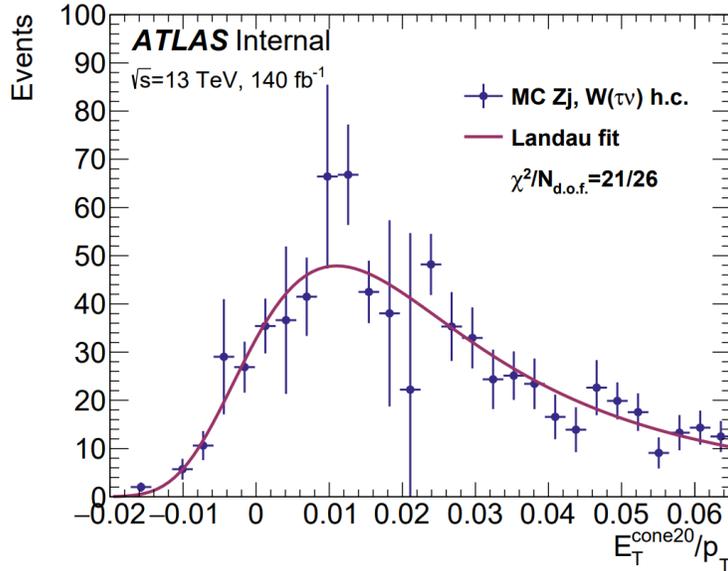
4. Оценка количества фоновых $jet \rightarrow \gamma$ событий в i -ом интервале неизолированной области:

$$N_{(i)}^{jet \rightarrow \gamma} = \frac{f_i}{r_i - f_i} \left((r_i - 1) N_{CR1(i)}^{data} + r_i N_{CR2(i)}^{data} \right).$$

5. Зависимость оценок количества $jet \rightarrow \gamma$ событий в каждом интервале по калориметрической изоляции экстраполируется в **CO**.

Экстраполяция в СО

- Точка экстраполяции определена на основе $\text{jet} \rightarrow \gamma$ МК в СО: $X = 0.013 \pm 0.010$.



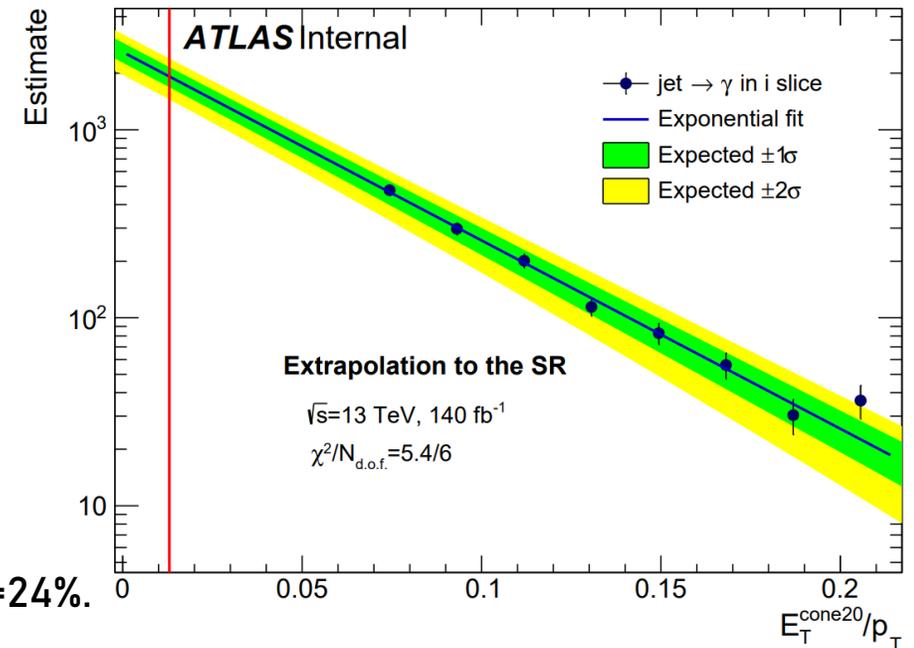
Источники систематических погрешностей:

- 1) Выбор количества интервалов: 390 событий.
- 2) Выбор МК генератора и модели партонного ливня для сигнального процесса: 100 событий.

Оценка количества $\text{jet} \rightarrow \gamma$ событий в СО, полученная с помощью матричного метода, составила $1900 \pm 200(\text{стат.}) \pm 400(\text{сист.})$ событий, $\delta=24\%$.

Двумерный метод боковых интервалов (ABCD метод) предсказывает $1770 \pm 160(\text{стат.}) \pm 350(\text{сист.})$ событий, $\delta=22\%$.

- Выбор функции экстраполяции диктуется критерием согласия Пирсона.
- В результате в точке X значение количества $\text{jet} \rightarrow \gamma$ событий составило $1900 \pm 200(\text{стат.})$. Статистическая погрешность вычисляется как погрешность экспоненциальной функции, на значение которой влияют ошибки параметров экстраполирующей функции.



Экстраполяция в СО экспоненциальной функцией

Метод интервалов оценки jet → γ фона

1. Область фазового пространства разделяется на **четыре ортогональные области** на основе критерия изоляции фотона и кинематических отборов.

2. **Связь** между количеством фоновых jet → γ событий в областях K01 и K03, K02 и C0 выражается **через параметр T**.

$$T = \frac{N_{CR3}^{jet \rightarrow \gamma}}{N_{CR1}^{jet \rightarrow \gamma}} = \frac{N_{SR}^{jet \rightarrow \gamma}}{N_{CR2}^{jet \rightarrow \gamma}}$$

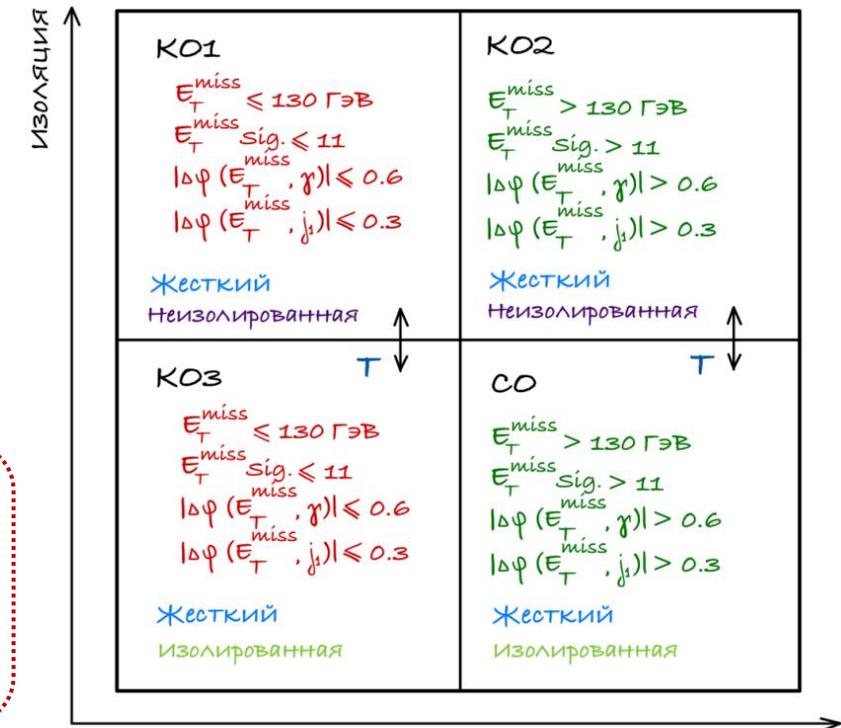
3. Количество jet → γ событий из K01 **нормируется** в K03.

4. Во избежание зависимости от изоляции неизолрированные K01 и K02 **разделяются на последовательные интервалы** переменной изоляции.

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

$$N_{CR3(i)}^{data} = N_{CR3(i)}^{sig} + N_{CR3(i)}^{bkg} + N_{CR3(i)}^{jet \rightarrow \gamma}$$

$$N_{CR3(i)}^{jet \rightarrow \gamma} = T_{(i)} \cdot N_{CR1(i)}^{jet \rightarrow \gamma}$$



5. Значение параметра $T_{(i)}$ применяется к количеству событий jet → γ в i-ом интервале K02:

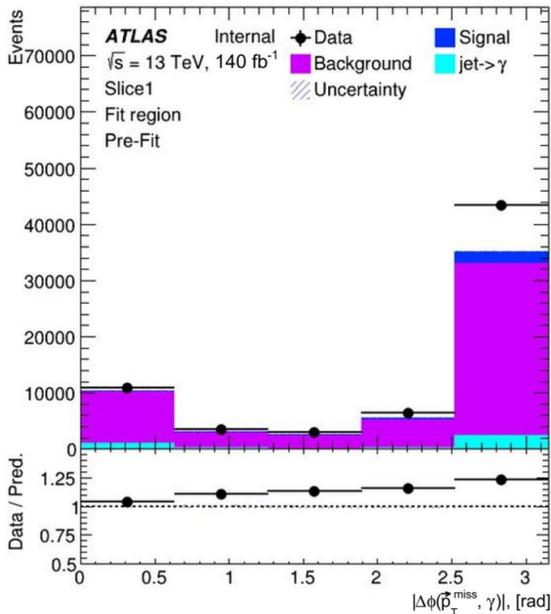
$$N_{SR(i)}^{jet \rightarrow \gamma} = T_{(i)} \cdot (N_{CR2(i)}^{data} - N_{CR2(i)}^{sig} - N_{CR2(i)}^{bkg})$$

6. На основе значений $N_{SR(i)}^{jet \rightarrow \gamma}$ строится зависимость количества событий jet → γ от калориметрической изоляции с целью **экстраполяции в C0**.

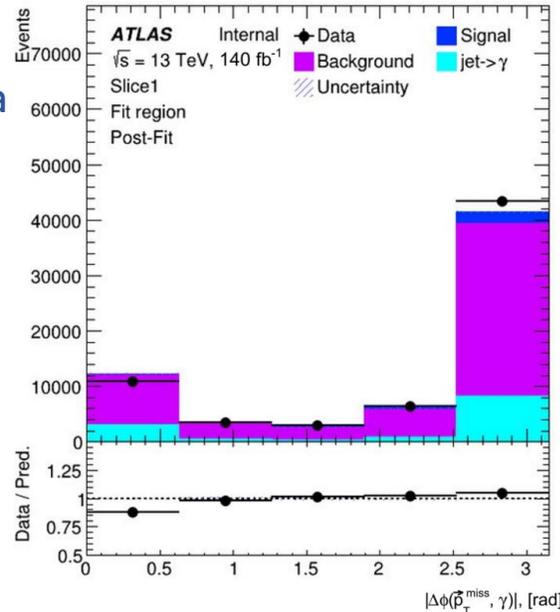
Неизолированные области разделяются на **5 интервалов** по калориметрической изоляции E_T^{cone20}/p_T : {0.065, 0.080, 0.095, 0.115, 0.140, 0.165}.

Процесс нормировки

- Оценки значений параметров $T_{(i)}$ вычисляются путем нормировки в КОЗ количества $\text{jet} \rightarrow \gamma$ событий из i -го интервала КО1.
- Нормировка производится для каждого интервала по переменным E_T^{miss} , значимость E_T^{miss} , $|\Delta\phi(\vec{p}_T^{\text{miss}}, \gamma)|$ и $|\Delta\phi(\vec{p}_T^{\text{miss}}, j_1)|$.



Нормировка



Оценки* значений параметров $T_{(i)}$:

Интервал	T_1, E_T^{miss}	$T_2, \text{значимость } E_T^{\text{miss}}$	$T_3, \Delta\phi(\vec{p}_T^{\text{miss}}, j_1) $	$T_4, \Delta\phi(\vec{p}_T^{\text{miss}}, \gamma) $
1	3.42 ± 0.08	3.41 ± 0.08	3.45 ± 0.08	3.33 ± 0.07
2	4.11 ± 0.09	3.97 ± 0.09	3.99 ± 0.09	3.81 ± 0.08
3	4.27 ± 0.09	4.04 ± 0.09	4.08 ± 0.09	3.87 ± 0.08
4	5.26 ± 0.12	4.99 ± 0.11	4.97 ± 0.11	4.60 ± 0.10
5	2.01 ± 0.04	1.79 ± 0.04	1.72 ± 0.04	1.51 ± 0.04

Оценки количества $\text{jet} \rightarrow \gamma$ событий для каждого интервала и для каждой переменной:



Интервал	$N_{SR(i)}^{\text{jet} \rightarrow \gamma}$			
	E_T^{miss}	Значимость E_T^{miss}	$ \Delta\phi(\vec{p}_T^{\text{miss}}, j_1) $	$ \Delta\phi(\vec{p}_T^{\text{miss}}, \gamma) $
1	1520 ± 80	1520 ± 80	1530 ± 80	1480 ± 80
2	1310 ± 80	1270 ± 80	1280 ± 80	1220 ± 80
3	1130 ± 80	1070 ± 70	1080 ± 70	1020 ± 70
4	1090 ± 80	1030 ± 80	1030 ± 80	950 ± 70
5	730 ± 50	650 ± 40	620 ± 40	550 ± 40

*Значение параметра $T_{(i)}$ является оценкой метода максимального правдоподобия, обеспечивающей минимум функции правдоподобия:

$$\mathcal{L}(N_{CR3(i)}^{\text{data}} | T_{(i)}) = \prod_{i=1}^{N_{\text{bins}}} \text{Pois}(N_{CR3(i)}^{\text{data}} | N_{CR3(i)}^{\text{sig}} + N_{CR3(i)}^{\text{bkg}} + T_{(i)} \cdot N_{CR1(i)}^{\text{jet} \rightarrow \gamma}).$$

Результат оценки jet \rightarrow γ событий

- Точка экстраполяции определена на основе jet \rightarrow γ МК в СО: $X = 0.013 \pm 0.010$.

Для каждой переменной была построена зависимость количества jet \rightarrow γ

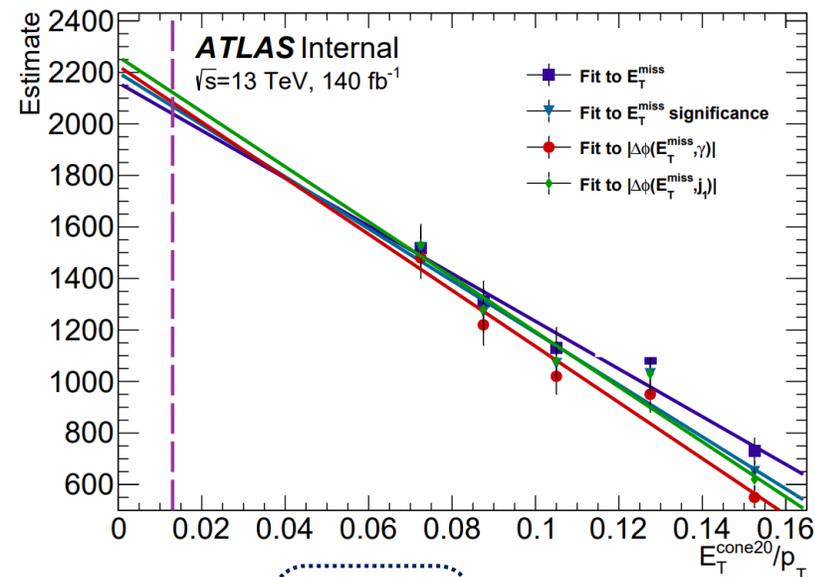
- событий по калориметрической изоляции и произведена линейная аппроксимация по методу наименьших квадратов (МНК).

Значения количества jet \rightarrow γ событий в точке X:

Переменная	Количество $N_{SR}^{\text{jet} \rightarrow \gamma}$ событий в $X = 0.013$
E_T^{miss}	2040 ± 130
Значимость E_T^{miss}	2070 ± 120
$ \Delta\phi(\vec{p}_T^{\text{miss}}, \gamma) $	2080 ± 120
$ \Delta\phi(\vec{p}_T^{\text{miss}}, j_1) $	2120 ± 120



Итоговая оценка составила **2080 \pm 60(стат.)** событий.



Источники систематических погрешностей:

- 1) Выбор точки экстраполяции: 103 события.
- 2) Выбор МК генератора и модели партонного ливня для сигнального процесса: 81 событие.
- 3) Выбор различных переменных в точке экстраполяции: 80 событий.

$$\bar{N} = \frac{\sum \frac{N_k}{\sigma_k^2}}{\sum \frac{1}{\sigma_k^2}}$$

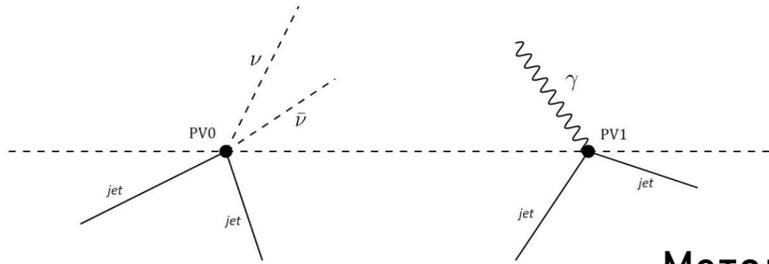
$$\frac{1}{\sigma_{\bar{N}}^2} = \sum \frac{1}{\sigma_k^2}$$



Оценка количества jet \rightarrow γ событий в СО, полученная с помощью метода интервалов, составила **2080 \pm 60(стат.) \pm 150(сист.)** событий, $\delta=8\%$. Точность оценки метода интервалов выше в ~ 2.4 раза по сравнению с точностью оценки ABCD метода.

- Рассмотренные подходы на данных позволяют оценить количество jet \rightarrow γ событий с меньшими значениями погрешности по сравнению со значением, которое предсказывает МК: **2000 \pm 1300(стат.)** событий.

Метод Монте-Карло наложений (МКН)



Пример фонового **пайлап** события, обусловленного множественными рр-взаимодействиями, где PV0 и PV1 – первичные вершины для двух независимых процессов рождения $Z(\nu\nu)+\text{jets}$ и $\gamma+\text{jets}$ соответственно, **наложение** которых реконструируется в детекторе как сигнал $Z(\nu\nu)\gamma$.

➤ Метод на данных* для оценки пайлап фона неприемлем в исследовании $Z(\nu\nu)\gamma$.
Задача: разработать универсальный подход для оценки такого фона.

**(подробнее в back-up)*

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:
$$w_{A+B} = \frac{w_A w_B}{\langle w_A \rangle \langle w_B \rangle} \frac{L \sigma_{A+B}}{N_{\text{OMC}}}$$
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($\nu\nu$) γ 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.
- Коррекционный фактор (C) вычисляется на основе МК сигнала.
- Результирующее число фоновых событий, обусловленных множественными pp-столкновениями, в СО составляет **2.938 ± 0.018 (стат.)** событий.
- Значение доли пайлап событий по отношению к данным составляет **$(0.01257 \pm 0.00011)\%$** , $\delta=0.9\%$. Указанная погрешность - статистическая.

Доверительная область:

Объект	Ограничение
Фотон	Изолированный жесткий, $E_T^\gamma > 150$ ГэВ $ \eta < 2.37$ за исключением $1.37 < \eta < 1.52$
Струя	$ \eta < 4.5$ $p_T > 50$ ГэВ $\Delta R(\text{jet}, \gamma) > 0.3$
Лептон	$N_l = 0$
Нейтрино	$p_T^{\nu\nu} > 130$ ГэВ
События	Значимость $E_T^{\nu\nu} > 11$ $ \Delta\phi(\vec{p}_T^{\nu\nu}, \gamma) > 0.6$ $ \Delta\phi(\vec{p}_T^{\nu\nu}, j_1) > 0.3$

Вес и сечение Z+ γ события:

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

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

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

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

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

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 фона $jet \rightarrow \gamma$, обусловленного неверной идентификацией адронной струи как фотона, а также в оценке пайлап фона в процессе ассоциированного рождения Z-бозона с фотоном. В рамках поставленной задачи были получены следующие результаты:

- адаптирован и доработан более гибкий метод оценки фоновых $jet \rightarrow \gamma$ событий, а именно матричный метод. Получена оценка количества таких событий в СО, значение которой составило $1900 \pm 200(\text{стат.}) \pm 400(\text{сист.})$ событий, $\delta = 24\%$;
- адаптирован метод повышающий точность оценки количества $jet \rightarrow \gamma$ событий, а именно метод интервалов. Получена оценка количества таких событий в СО, значение которой составило $2080 \pm 60(\text{стат.}) \pm 150(\text{сист.})$ событий, $\delta = 8\%$;
- ввиду выявленных недостатков наиболее часто используемого метода оценки пайлап фона на данных, адаптирован универсальный метод оценки числа пайлап событий-метод Монте-Карло наложений. Итоговое число пайлап событий в СО составило $2.938 \pm 0.018(\text{стат.}) \pm 0.674(\text{сист.})$ события, $\delta = 23\%$. Значение доли пайлап событий по отношению к данным составило $(0.013 \pm 0.003 (\text{стат.} \oplus \text{сист.}))\%$.

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;

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

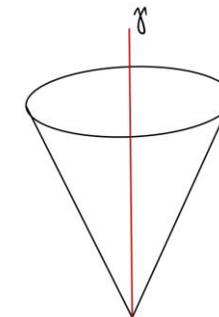
σ_L – дисперсия измеренного E_T^{miss} в продольном направлении;

- \vec{p}_T^{miss} – **потерянный поперечный импульс**, определяемый как сумма поперечных импульсов частиц в конечном состоянии;

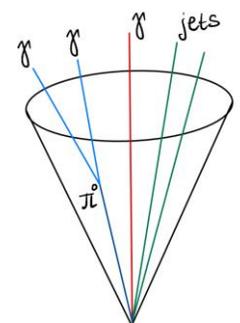
ρ_{LT} – корреляционный фактор измерения продольной и поперечной компонент E_T^{miss} ;

- 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.



изолированный



неизолированный

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		✓

ABCD метод I

Предположения:

- заданные КО не коррелируют между собой $\Rightarrow \frac{N_A^{jet \rightarrow \gamma}}{N_B} = \frac{N_C}{N_D}$
- сигнальный регион A преимущественно состоит из сигнальных событий,
- в то время как три контрольных региона B, C и D состоят из фоновых событий.

Выбор наиболее оптимальной изоляции:

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

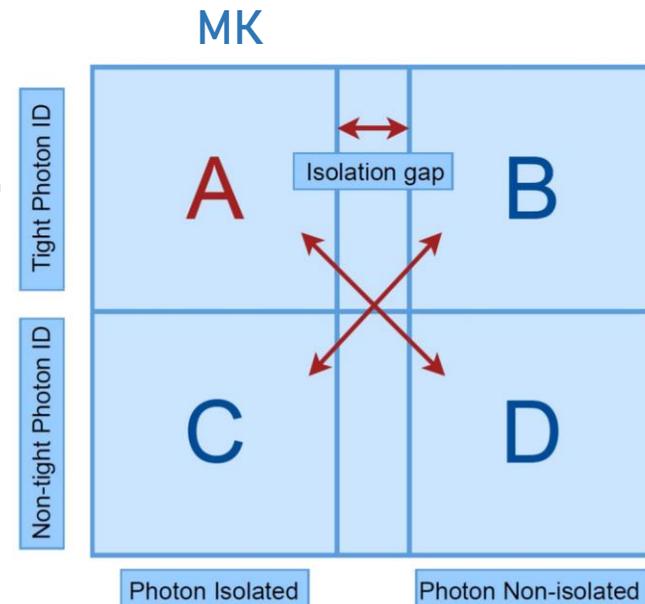
Выбор M_{cut} точки разделения областей B и D:

$M_{cut}, \Gamma \text{ЭВ}$	<i>loose'2</i>	<i>loose'3</i>	<i>loose'4</i>	<i>loose'5</i>
МК				
4.5	1.18 ± 0.19	1.15 ± 0.16	1.08 ± 0.13	1.11 ± 0.13
7.5	1.12 ± 0.14	1.16 ± 0.13	1.10 ± 0.11	1.11 ± 0.11
10.5	1.15 ± 0.14	1.16 ± 0.13	1.11 ± 0.11	1.12 ± 0.11
На основе данных				
4.5	0.99 ± 0.11	1.05 ± 0.11	1.07 ± 0.09	1.09 ± 0.09
7.5	1.13 ± 0.11	1.09 ± 0.09	1.06 ± 0.08	1.05 ± 0.08
10.5	1.00 ± 0.10	0.99 ± 0.09	0.96 ± 0.07	0.96 ± 0.07

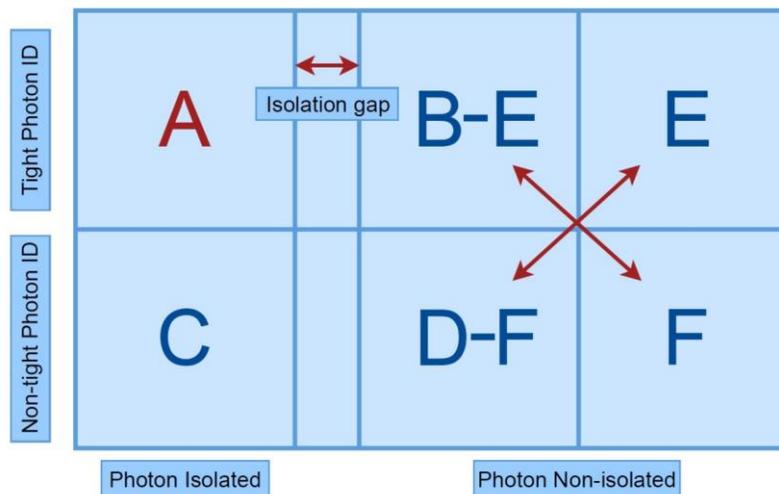
*'loose' - несколько типов "Loose" фотонов

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

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



Data



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

ABCD метод II

- Число событий в областях определяется как:

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

«Утечки» сигнальных событий в КО

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

	c_B	c_C	c_D
Значение	$(278 \pm 4) \cdot 10^{-5}$	$(3205 \pm 14) \cdot 10^{-5}$	$(178 \pm 11) \cdot 10^{-6}$

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

Числа событий в СО и КО данных и фоновых процессов, за исключением фона $\text{jet} \rightarrow \gamma$:

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

Решение уравнения имеет вид:

$$N_A^{\text{sig}} = \frac{b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \text{ где } \begin{cases} a = c_D - R c_B c_C; \\ b = \tilde{N}_D + c_D \tilde{N}_A - R(c_B \tilde{N}_C + c_C \tilde{N}_B); \\ c = \tilde{N}_D \tilde{N}_A - R \tilde{N}_C \tilde{N}_B. \end{cases}$$

Источники систематических погрешностей:

- Систематическая погрешность включает погрешности на определение областей, на R и на параметры утечки сигнала. ($\delta=20\%$)

$$N_A^{\text{jet} \rightarrow \gamma} = 1770 \pm 60(\text{стат.}) \pm 350(\text{сист.})$$

Оценка $\text{jet} \rightarrow \gamma$ фона с помощью матричного метода

- Результаты в КО:

Интервал	Данные (КО)	Данные (КО2)	Фон (кроме $\text{jet} \rightarrow \gamma$)	Сигнал	$\text{jet} \rightarrow \gamma$
1	3730 ± 60	3230 ± 60	7.0 ± 1.0	15.7 ± 0.3	3710 ± 60
2	3380 ± 60	3060 ± 60	10 ± 3	13.8 ± 0.3	3360 ± 60
3	2900 ± 50	2680 ± 50	7.0 ± 0.8	11.9 ± 0.3	2880 ± 50
4	2360 ± 50	2240 ± 50	4.4 ± 0.8	10.6 ± 0.3	2350 ± 50
5	1880 ± 40	1790 ± 40	3.8 ± 1.3	9.5 ± 0.2	1870 ± 40
6	1440 ± 40	1370 ± 40	4.5 ± 0.7	8.7 ± 0.2	1420 ± 40
7	1030 ± 30	1000 ± 30	3.0 ± 0.5	7.1 ± 0.2	1020 ± 30
8	760 ± 30	720 ± 30	4.2 ± 0.8	6.32 ± 0.19	750 ± 30

- Результаты в КО1:

Интервал	Данные	Фон (кроме $\text{jet} \rightarrow \gamma$)	Сигнал	$\text{jet} \rightarrow \gamma$
1	490 ± 20	4.3 ± 0.9	12.7 ± 0.3	480 ± 20
2	317 ± 18	8 ± 3	11.0 ± 0.3	298 ± 18
3	216 ± 15	5.6 ± 0.7	9.2 ± 0.2	201 ± 15
4	125 ± 11	2.8 ± 0.8	8.0 ± 0.2	114 ± 11
5	90 ± 10	2.2 ± 1.2	7.0 ± 0.2	80 ± 10
6	65 ± 8	2.7 ± 0.5	6.18 ± 0.19	56 ± 8
7	37 ± 6	1.6 ± 0.4	5.01 ± 0.19	30 ± 6
8	43 ± 7	2.3 ± 0.5	4.46 ± 0.16	36 ± 7

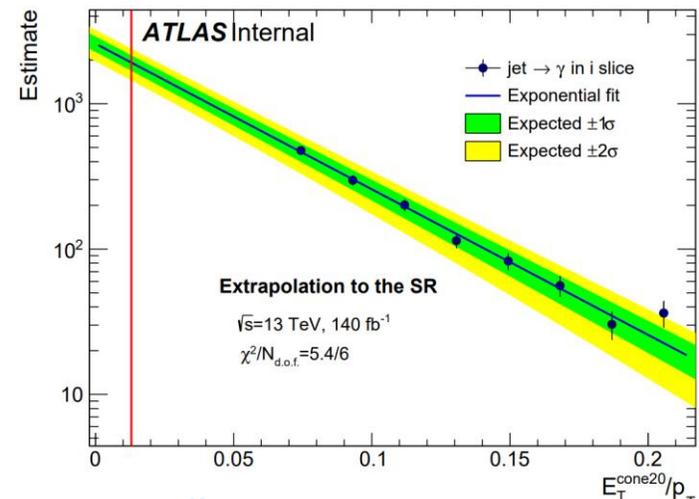
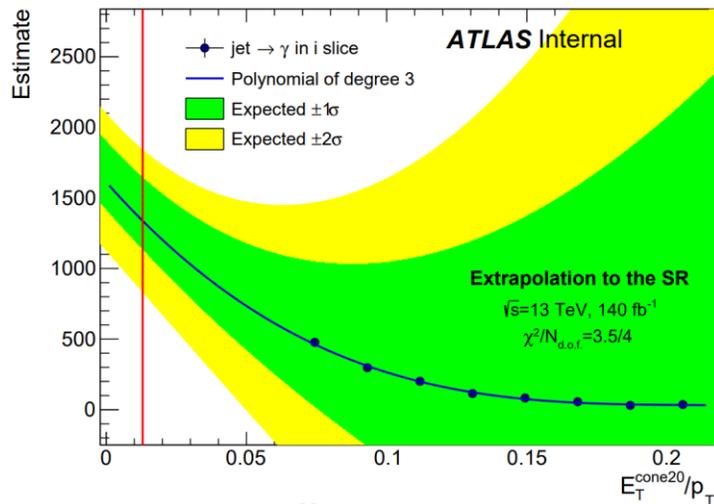
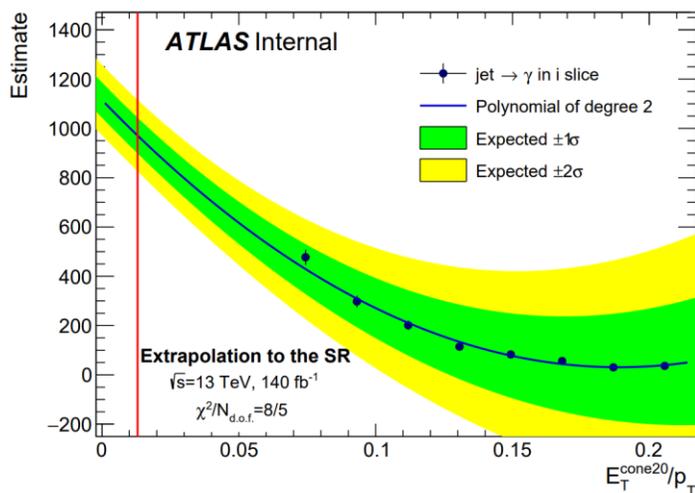
- Эффективности r и f , а также оценки количества $\text{jet} \rightarrow \gamma$ событий для каждого интервала



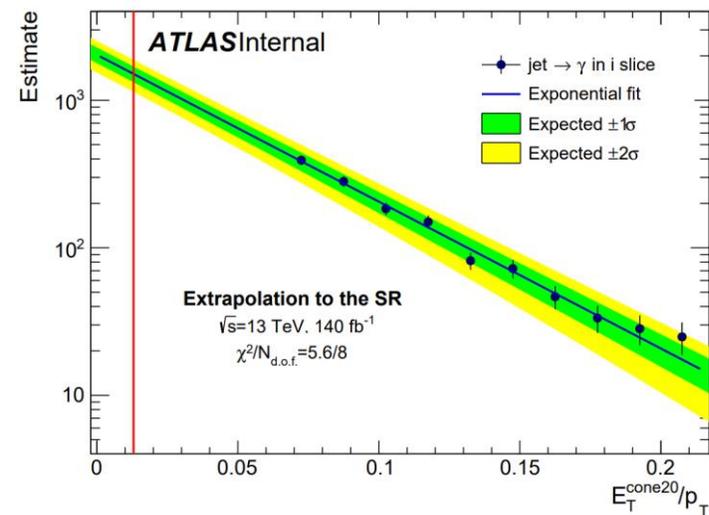
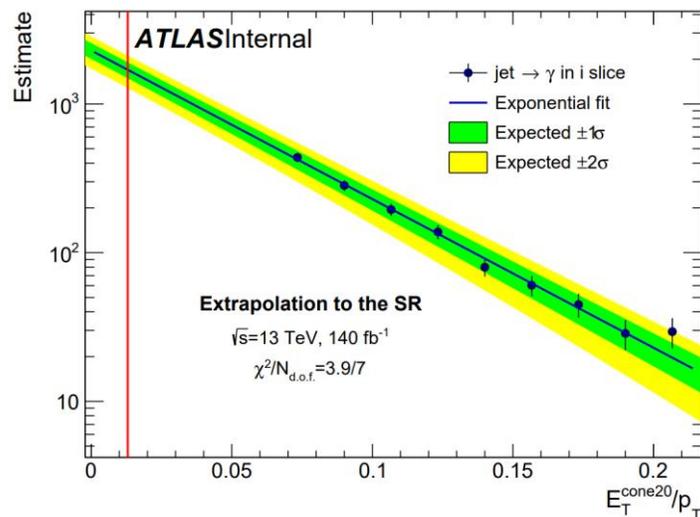
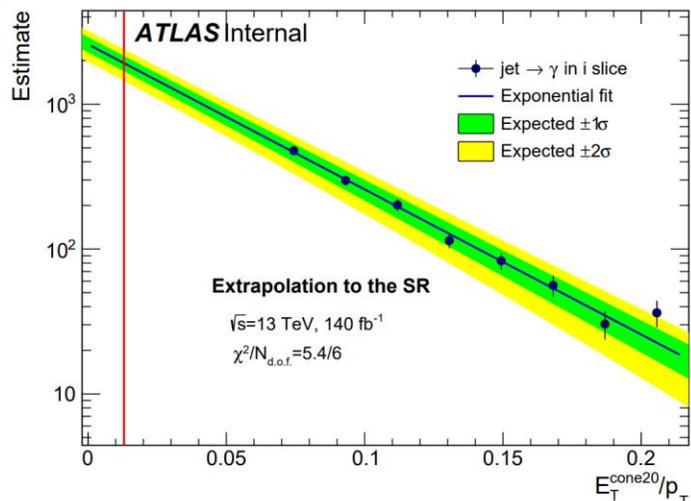
Интервал	r_i	f_i	$N_{(i)}^{\text{jet} \rightarrow \gamma}$
1	0.81 ± 0.03	0.129 ± 0.006	480 ± 30
2	0.79 ± 0.03	0.089 ± 0.006	300 ± 20
3	0.77 ± 0.03	0.070 ± 0.005	201 ± 17
4	0.75 ± 0.03	0.049 ± 0.005	114 ± 12
5	0.74 ± 0.03	0.044 ± 0.005	83 ± 11
6	0.71 ± 0.03	0.039 ± 0.006	56 ± 9
7	0.70 ± 0.04	0.030 ± 0.006	30 ± 7
8	0.71 ± 0.03	0.048 ± 0.009	36 ± 7

Оптимизация матричного метода

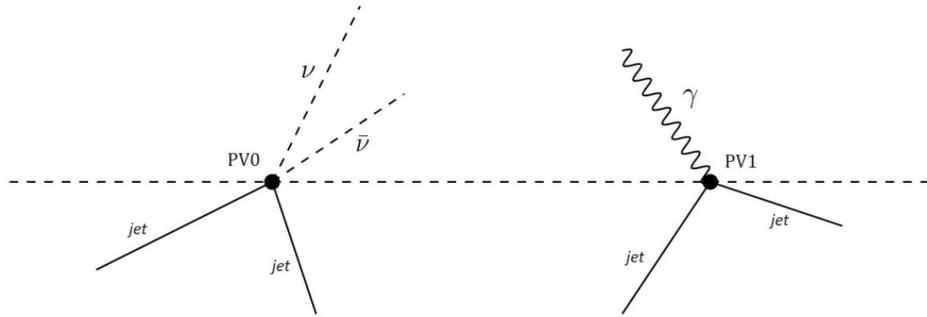
Экстраполяция в СО количества $\text{jet} \rightarrow \gamma$ событий различными функциями:



Экстраполяция в СО количества $\text{jet} \rightarrow \gamma$ событий экспоненциальной функцией для 8, 9 и 10 интервалов:

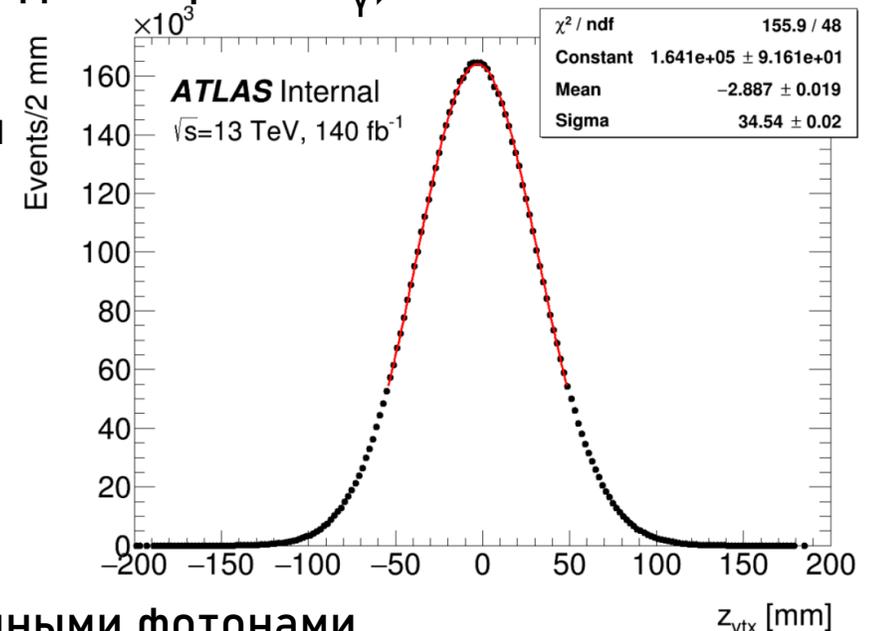


Методы на данных для оценки пайлап фона I



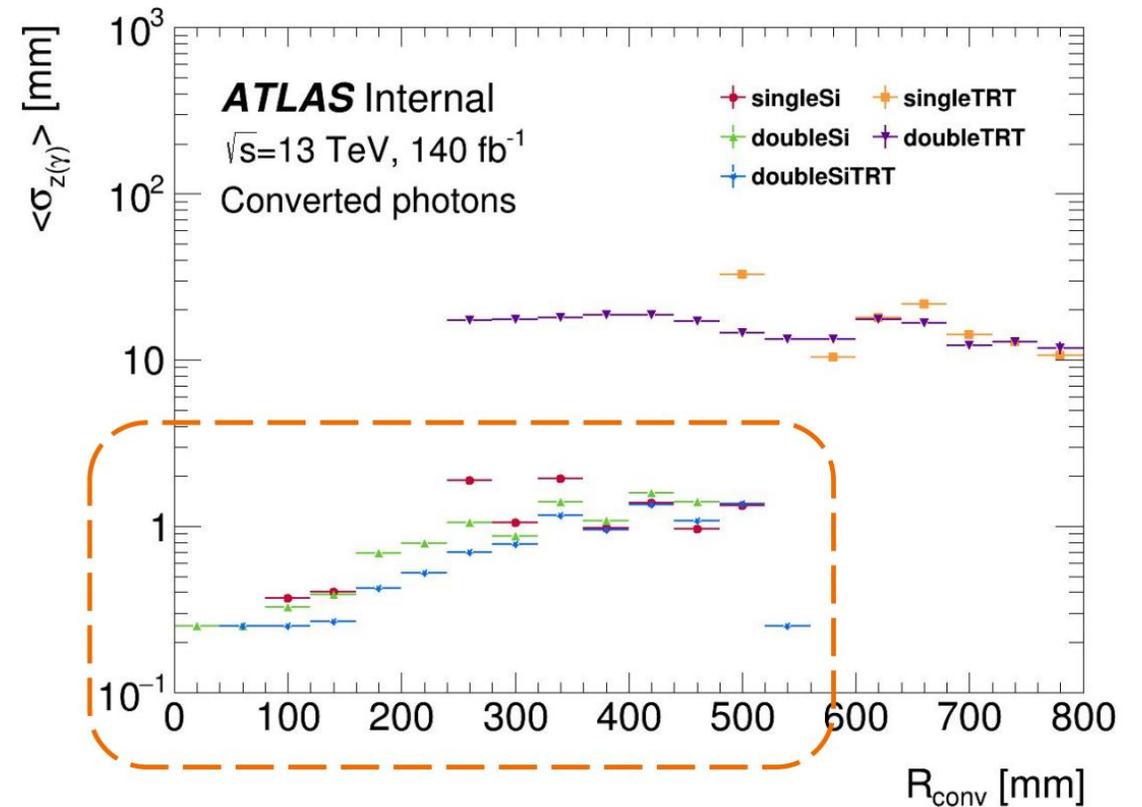
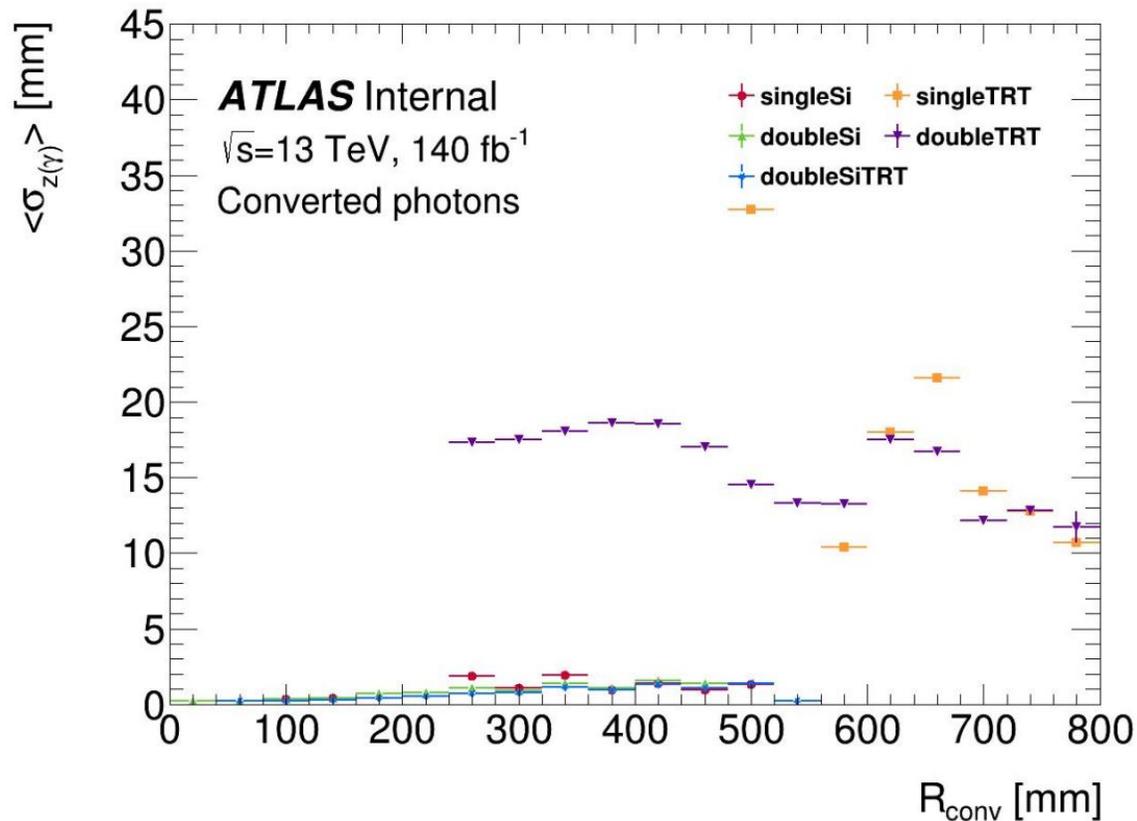
Пример фонового **пайлап** события, обусловленного множественными pp-взаимодействиями, где PV0 и PV1 – первичные вершины для двух независимых процессов рождения $Z(\nu\nu)+jets$ и $\gamma+jets$ соответственно, **наложение** которых реконструируется в детекторе как сигнал $Z(\nu\nu)\gamma$.

- Метод, основанный на данных, использует распределение продольного расстояния $\Delta z = z_{vtx} - z_{\gamma}$ между положением первичной вершины z_{vtx} и положением кандидата в фотон z_{γ} ;
- Для увеличения точности восстановленной z_{γ} используются конверсионные фотоны, ассоциированные как минимум с одним треком в кремниевом детекторе.
- Форма распределения Δz получена из предположения, что распределения z_{vtx} и z_{γ} **идентичны и некоррелированы**;
- Распределения z_{vtx} и z_{γ} Гауссовы с $\sigma=35$ мм. Распределение разности $\Delta z = z_{vtx} - z_{\gamma}$ также Гауссово с $\sigma \sim 50$ мм.
- Оценка пайлап фона осуществляется в хвостах распределения ($|\Delta z| > 50$ мм), где лежит **32%** от числа всех событий с конверсионными фотонами.



Требования к фотону в методах на данных для оценки пайлап фона

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



Методы на данных для оценки пайлап фона II

1. Метод на данных с использованием нормировочных коэффициентов

- Доля пайлап фона: $f_{PU} = \frac{N_{data}^{|\Delta z|>50 \text{ mm}} - N_{single \text{ pp}}^{|\Delta z|>50 \text{ mm}}}{0.32 \times N_{data}}$, где $N_{single \text{ pp}}^{|\Delta z|>50 \text{ mm}} = SF_1 \times SF_2 \times N_{MC}^{|\Delta z|>50 \text{ mm}}$.
- Расширенная область: $f_{PU} = \frac{N_{data}^{|\Delta z|>15 \text{ mm}} - SF_1 \times SF_2 \times N_{MC}^{|\Delta z|>15 \text{ mm}}}{0.76 \times N_{data}}$.
- SF_1, SF_2 – нормировочные коэффициенты для МК сигнала в области $|\Delta z| < 10$ мм и $|\Delta z| > 15$ мм соответственно.

Результаты:

	$N_{jets} \geq 0$	$N_{jets} > 0$	$N_{jets} > 1$	$N_{jets} = 0$
SF_1	3.75 ± 0.06	3.48 ± 0.10	4.4 ± 0.2	3.92 ± 0.08
$f_{PU}^{ \Delta z >15 \text{ mm}}, \%$	-10 ± 3	17 ± 1.7	19 ± 3	-25 ± 5
$f_{PU}^{ \Delta z >50 \text{ mm}}, \%$	-27 ± 12	16 ± 3	16 ± 4	-49 ± 18

Указанные погрешности-статистические

Недостатки:

1. Отрицательность доли пайлап событий.
2. Низкая статистическая точность полученной оценки.
3. Нестабильность оценки по отношению к области Δz и к отбору по числу струй.

2. Альтернативный метод на данных

- Доля пайлап фона по отношению к данным с конверсионными фотонами:

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

Результаты:

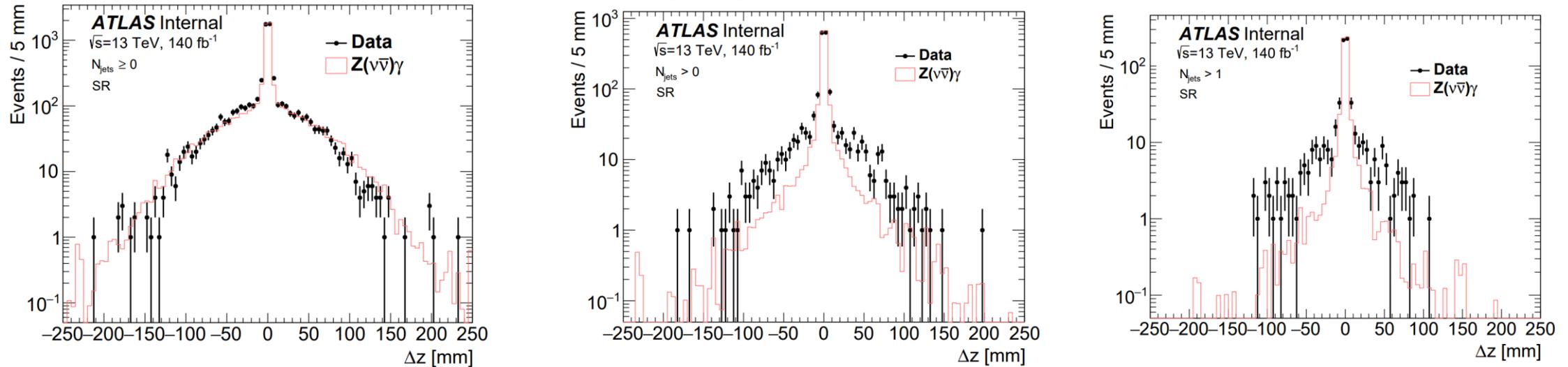
Область	Данные – фон	$Z(\nu\bar{\nu})\gamma$	$f_{PU}, \%$
$ \Delta z > 15$ мм	520 ± 70	650 ± 7	-2.7 ± 1.5
$ \Delta z > 50$ мм	180 ± 50	307 ± 5	-6 ± 2

Относительное отклонение для **статистической погрешности** составляет **56%**.

Для получения результирующей оценки числа пайлап событий в СО необходимо реализовать метод, неограниченный рассмотрением событий только с конверсионными фотонами.

Методы на данных для оценки пайлап фона III

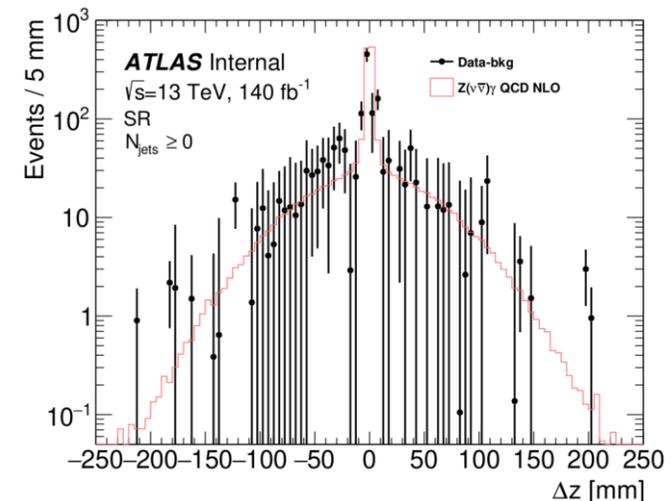
1. Метод на данных с использованием нормировочных коэффициентов



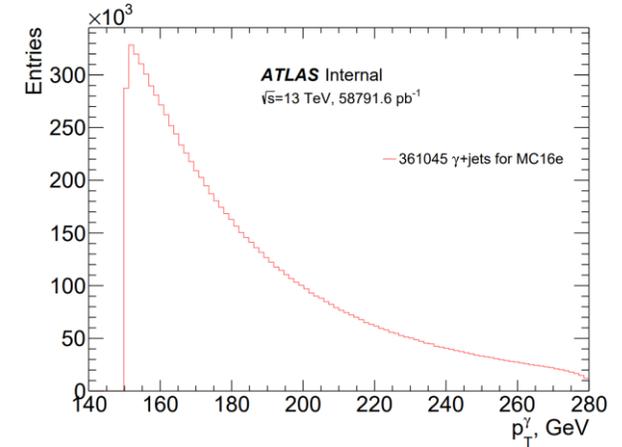
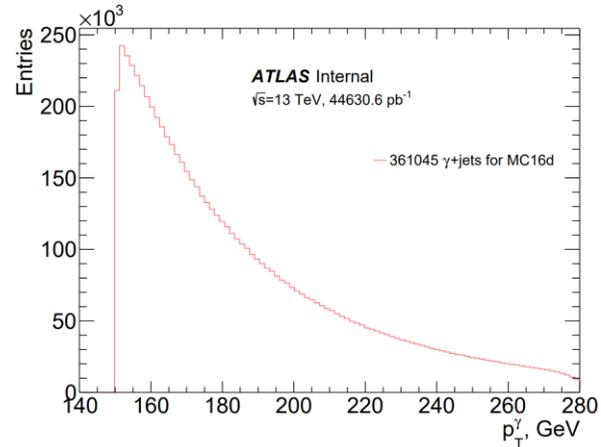
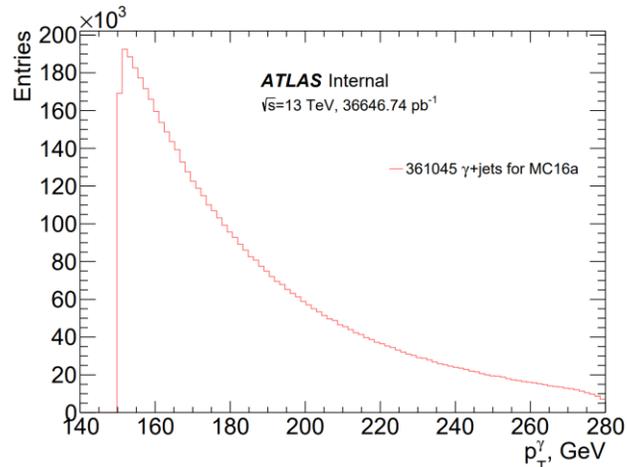
Распределения данных и МК сигнала, отнормированного на SF_1 , по переменной Δz для событий с конверсионными фотонами.

2. Альтернативный метод на данных

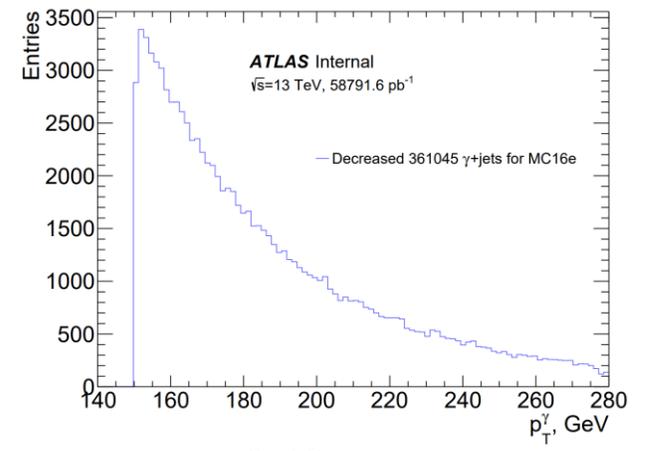
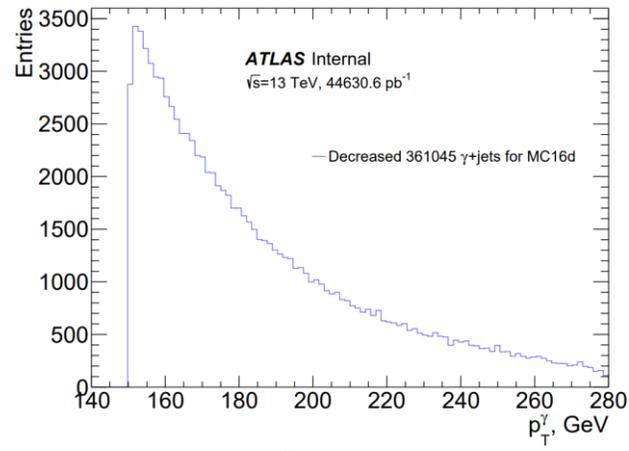
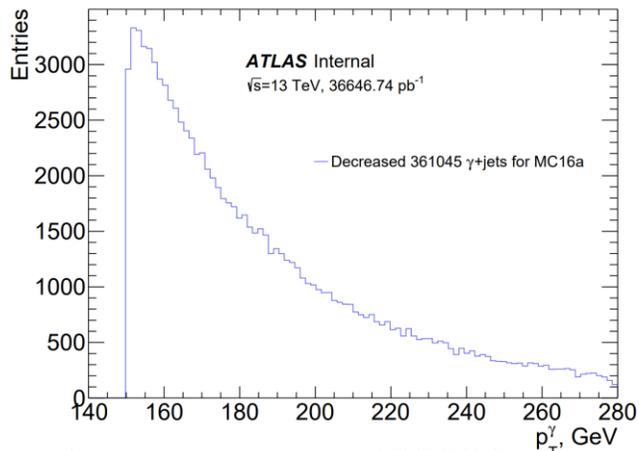
Распределение данных за вычетом числа фоновых событий, не относящихся к пайлап фону, по Δz в СО только для событий с конверсионными фотонами, сопоставленное с сигнальным $Z(\nu\nu)\gamma$ МК набором.



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 Монте-Карло наложений

- 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 γ +jets и Z+jets процессов в методе Монте-Карло наложений

- 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 , ГэВ	$\sigma_\gamma^{\text{gen}}$, нб	$\epsilon_\gamma^{\text{MC16a}}$	$\epsilon_\gamma^{\text{MC16d}}$	$\epsilon_\gamma^{\text{MC16e}}$
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

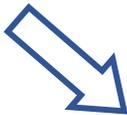
Z + jets	p_T^Z , ГэВ	σ_Z^{gen} , нб	$\epsilon_Z^{\text{MC16a}}$	$\epsilon_Z^{\text{MC16d}}$	$\epsilon_Z^{\text{MC16e}}$
364222	500-1000	3.0440e-4	0.935 ± 0.007	0.938 ± 0.009	0.937 ± 0.007
364223	> 1000	5.8558e-6	0.962 ± 0.009	0.977 ± 0.017	0.970 ± 0.008
366011	100-140 BFilter	1.0910e-1	0.022 ± 0.005	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

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

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

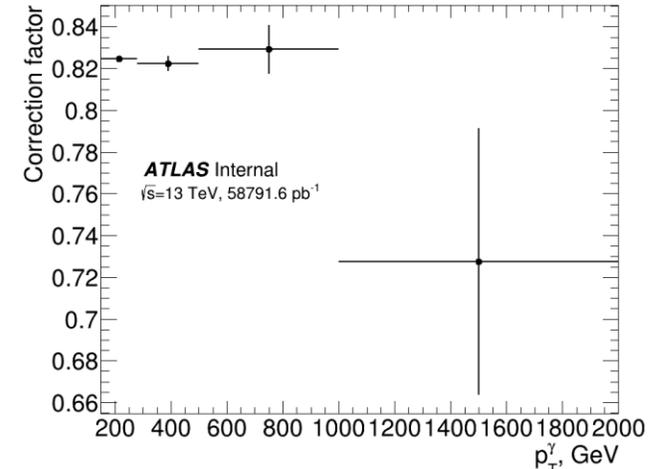
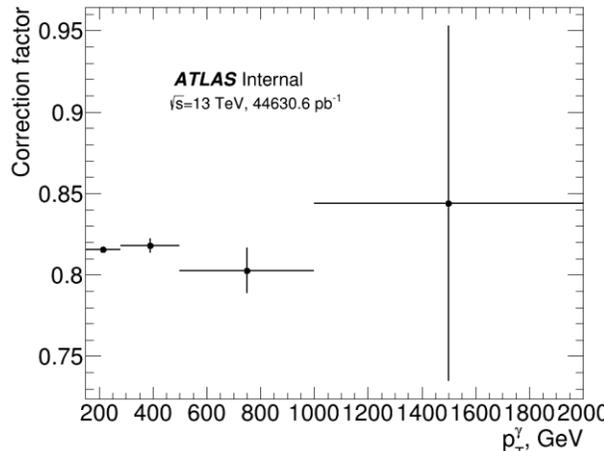
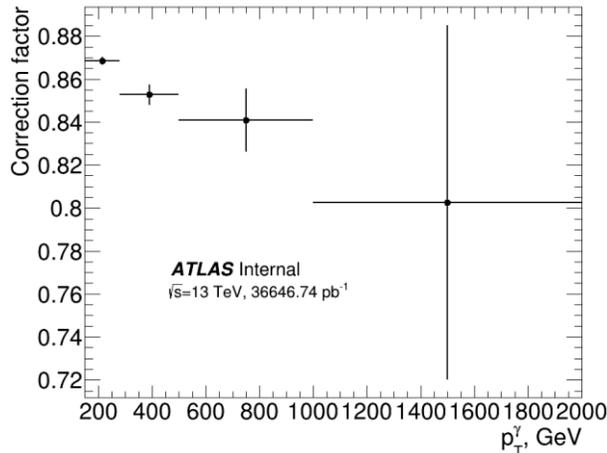
Коррекционный фактор, параметризованный по поперечному импульсу фотона, для MC16a/d/e



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



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 в методе Монте-Карло наложений 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 в методе Монте-Карло наложений 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 потеряннного 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%**.