

Оценка вклада фонового процесса неверной  
идентификации электрона как фотона в  
ассоциированное рождение  $Z$  бозона с фотоном  
в  $pp$  столкновениях с энергией  $\sqrt{s} = 13$  ТэВ в  
эксперименте ATLAS

Зубов Д.В.

НИЯУ МИФИ

Научный руководитель: Солдатов Е.Ю.

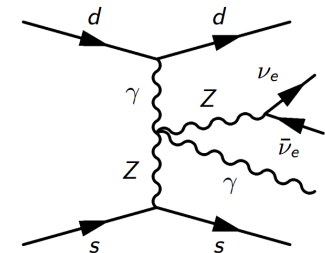
Консультант: Курова А.С.

Москва, 2020

# Введение

- ▶ Изучается процесс  $Z(\rightarrow \nu\bar{\nu})\gamma jj$ ;
- ▶ Отклонение от предсказанного СМ сечения в этом процессе - наличие «новой физики» за рамками СМ;
- ▶ Сигнатура процесса - фотон с большим поперечным импульсом и большим  $E_T^{miss}$ .
- ▶ Схожая сигнатура - процессы, в которых электрон неверно идентифицируется как фотон.

Оценка частоты неверной идентификации электрона как необходима для оценки вклада фонового процесса  $W(\rightarrow e\bar{\nu})$  в измеряемый процесс  $Z(\rightarrow \nu\bar{\nu})\gamma jj$ , и уточнение оценки данного фона, позволяет точнее измерить сечение процесса  $Z(\rightarrow \nu\bar{\nu})\gamma jj$ .



# Метод оценки частоты неверной идентификации электрона как фотона

Оценка частоты неверной идентификации вычислялась по следующим образом:

$$\nu_{e \rightarrow \gamma} = \frac{N_{e\gamma}}{N_{ee}}$$

$N_{e\gamma}, N_{ee}$  - число пар с инвариантной массой от 80 до 100 ГэВ.

Отборы событий:

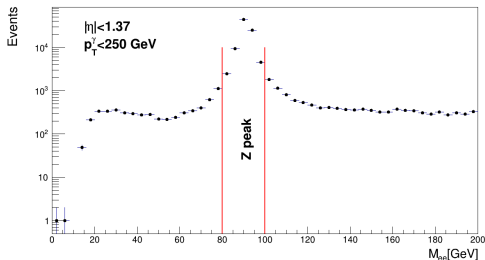
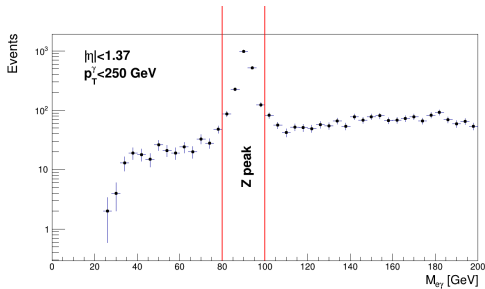
$$PT_{min}(\gamma \rightarrow e\gamma) = 150 \text{ ГэВ};$$

$$PT_{min}(e_{lead} \rightarrow ee) = 150 \text{ ГэВ};$$

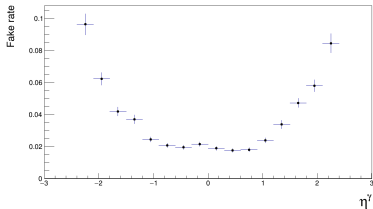
$$PT_{min}(e_{sublead}) = 25 \text{ ГэВ};$$

$$1.37 \leq |\eta| \leq 1.52, |\eta| \leq 2.37$$

Оценка частоты проводилась на данных второго сеанса работы БАКа, собранных экспериментом ATLAS.

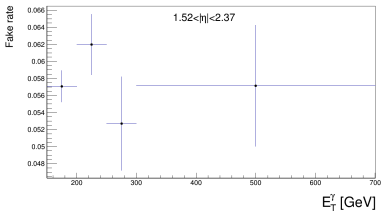
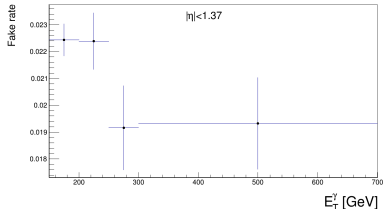


# Исследование зависимости частоты неверной идентификации от региона фазового пространства.



Частота неверной идентификации зависит от  $\eta$  и  $p_T$  фотона. Для учета этих зависимостей оценка проводилась в трех регионах:

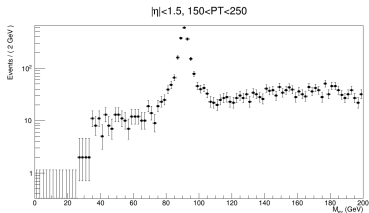
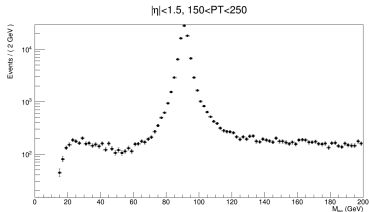
- ▶ Центральный регион ( $|\eta| < 1.37$ ) с  $p_T < 250$  ГэВ;
- ▶ Центральный регион ( $|\eta| < 1.37$ ) с  $p_T > 250$  ГэВ;
- ▶ Передний регион ( $1.52 < |\eta| < 2.37$ ).



# Учет комбинаторного фона при вычислении частоты неверной идентификации

Источником отбираемых пар  $e\bar{e}$  и  $e\gamma$ , помимо событий распада  $Z(\rightarrow e\bar{e})$ , могут быть другие фоновые процессы. В таком случае, для улучшения оценки частоты неверной идентификации необходимо вычитание этого фона:

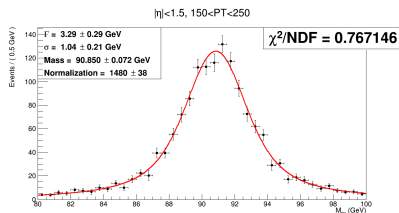
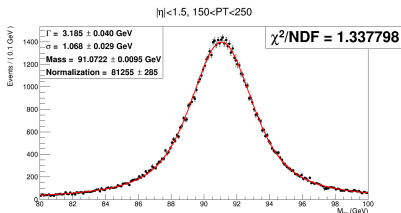
$$rate_{e\rightarrow\gamma} = \frac{N_{e\gamma} - N_{bkg}}{N_{ee} - N_{bkg}},$$



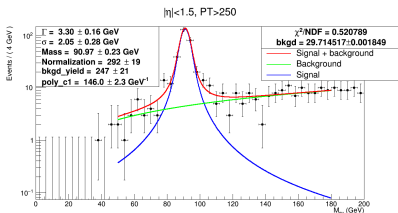
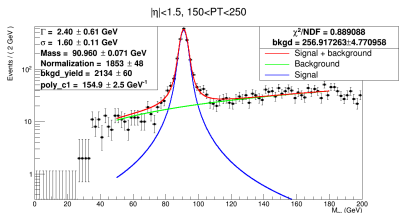
# Описание формы распределения инвариантной массы сигнальных событий в Монте-Карло

Проводилось фитирование в данных Монте-Карло симуляции процесса  $Z(\rightarrow ee)$ . В качестве фитирующей функции выбирался Воигтиан. Воигтиан представляет собой свертку распределений Гаусса и Брейта-Вигнера и учитывает естественную ширину распада  $Z$ -бозона и разрешение детектора:

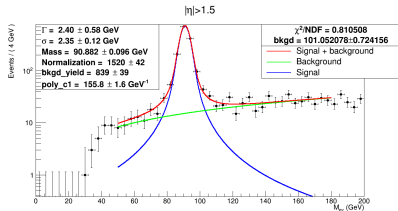
$$\text{Voigtian}(E, M, \Gamma, \sigma) = \int_{-\infty}^{+\infty} \text{Gauss}(x, M, \sigma) \text{BreitWigner}(E - x, M, \Gamma) dx$$



# Оценка комбинаторного фона в распределении инвариантной массы $e\gamma$



Фитирование производилось суммой Воигтиана и прямой. Число фона есть интеграл под прямой в интервале 80-100 ГэВ. Данное описание фона имеет хороший уровень согласия  $\chi^2$ .



# Комбинаторный фон в распределении инвариантной массы $ee$

Фон в распределении инвариантной массы  $ee$  распределен более сложным немонотонным образом. Источником отбираемых пар  $ee$ , помимо событий распада  $Z(\rightarrow ee)$ , могут быть другие фоновые процессы, например процесс Дрелла-Яна  $\gamma^*(\rightarrow ee)$ , а также интерференция  $Z\gamma^*(\rightarrow ee)$ <sup>1</sup>.

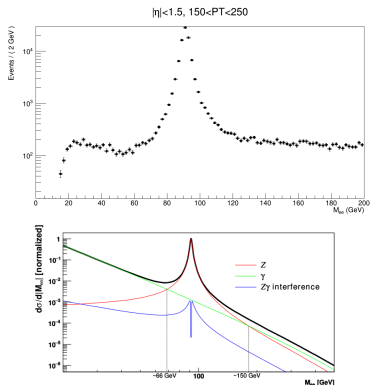
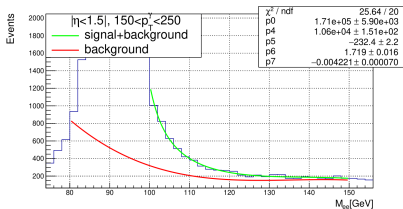
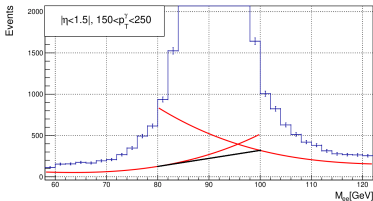
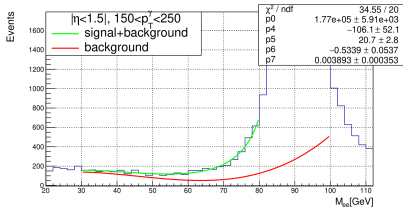


Figure 2.5: The theoretical predictions for the cross-sections of the Drell-Yan  $Z/\gamma^* \rightarrow ee$  processes, normalized to  $Z \rightarrow ee$  peak value. The cross-sections were calculated in leading order, using the CT10 PDF set.

<sup>1</sup>Sedov G. Measurement of  $Z$  boson production using  $Z(\rightarrow ee)$  decays with one of the electrons detected in the forward calorimeters of the ATLAS detector using 4.6 fb<sup>-1</sup> of data collected  $\sqrt{s} = 7$  TeV / Sedov George. - 2016. - p. 15.



# Оценка комбинаторного фона в распределении инвариантной массы $e\bar{e}$



Производилось раздельное фитирование суммой полинома третьей степени и Воигтиана в интервалах 30-80 и 100-150 ГэВ. При фитировании параметры Воигтиана  $\Gamma$ ,  $M$ ,  $\sigma$  были фиксированы. Полиномы полученные в результате фитирования экстраполировались в область 80-100 ГэВ. Число фона в интервале 80-100 ГэВ оценивается по формуле:

$$\bar{N}_{bkg} = \frac{N_{bkgmax} + N_{bkgmin}}{2}, \text{ где } \Delta N_{bkg} = \frac{N_{bkgmax} - N_{bkgmin}}{2}$$

Максимальное и минимальное значение фона вычислялось, как интеграл под «максимальной» и «минимальной» кривой.

# Систематические погрешности

- ▶ Неопределенность выбора массового окна  $Z$ -пика.
- ▶ Неопределенность оценки числа событий комбинаторного фона под  $Z$ -пиком.
- ▶ Ошибка самого метода, оцениваемая как абсолютная разность между «истинной частотой неверной идентификации» и «измеряемой частотой неверной идентификации» в  $Z(\rightarrow ee)$  МС.

# Результаты оценки частоты неверной идентификации и ее погрешностей

	$ \eta  < 1.37,$ $\rho_T < 250$ ГэВ	$ \eta  < 1.37,$ $\rho_T > 250$ ГэВ	$1.52 <  \eta  < 2.37$
$\delta_{\text{Фон.}}, \%$	1.97	1.03	3.05
$\delta_{\text{Вариация масс. окна}}, \%$	0.29	0.40	0.68
$\delta_{\text{Метод.}}, \%$	3.09	13.40	8.70
$\delta_{\text{total syst}}, \%$	3.68	13.44	9.24

**Таблица:** Статистические погрешности для каждой рассматриваемой области по  $\eta$  и  $\rho_T$

Систематика, связанная с ошибкой самого метода, является доминирующей во всех регионах.

Регион	$\nu_{e \rightarrow \gamma} \pm \Delta_{\text{stat}} \pm \Delta_{\text{syst}}, \%$
$ \eta  < 1.37, \rho_T < 250$ ГэВ	$2.04 \pm 0.05 \pm 0.08$
$ \eta  < 1.37, \rho_T > 250$ ГэВ	$1.74 \pm 0.11 \pm 0.23$
$1.52 <  \eta  < 2.37$	$5.88 \pm 0.16 \pm 0.54$

**Таблица:** Результаты оценки частоты неверной идентификации в трех регионах с учетом погрешностей

В двух из трех регионов систематическая погрешность доминирует над статистической.

# Заключение

В ходе работы:

- ▶ Освоены базовые принципы отбора событий, основанного на установке пределов на кинематические переменные для улучшения идентификации искомого процесса;
- ▶ Получена оценка частоты ложной идентификации электрона как фотона в процессе  $Z(\nu\nu)\gamma jj$  с учетом зависимости от псевдобыстроты и поперечного импульса;
- ▶ Оценена систематическая погрешность частоты неверной идентификации.

В дальнейшем результаты работы будут использованы для улучшения оценки систематических погрешностей процесса ложной идентификации электрона как фотона в процессе  $Z(\rightarrow \nu\bar{\nu})\gamma jj$ .

Дополнительные слайды.

# Неопределенность выбора массового окна $Z$ -пика.

	$ \eta  < 1.37,$ $p_T < 250$ ГэВ	$ \eta  < 1.37,$ $p_T > 250$ ГэВ	$1.52 <  \eta  < 2.37$
$N_{ee}$	82165.8	14024.2	26786.2
$N_{e\gamma}$	1482.21	246.112	1385.43
$\sigma_{ee}$	762.778	55.5789	117.002
$\sigma_{e\gamma}$	25.9779	7.12257	24.3098
$\nu_{e\rightarrow\gamma}, \%$	1.80393	1.75492	5.17219
$N_{ee} + \sigma$	83404.5	14372.9	27290.7
$N_{e\gamma} + \sigma$	1508.95	253.236	1410.65
$\nu_{e\rightarrow\gamma}, \%$	1.80918	1.76190	5.169
$\Delta(\nu_{e\rightarrow\gamma}), \%$	$5.25719 \cdot 10^{-3}$	$6.98795 \cdot 10^{-3}$	$3.19439 \cdot 10^{-3}$
$\delta_{\text{sys.}}(\nu_{e\rightarrow\gamma}), \%$	0.291431	0.398193	0.0617609
$N_{ee} - \sigma$	80745.7	13649.5	26130.1
$N_{e\gamma} - \sigma$	1453.62	238.895	1360.75
$\nu_{e\rightarrow\gamma}, \%$	1.80025	1.75021	5.20761
$\Delta(\nu_{e\rightarrow\gamma}), \%$	$3.679 \cdot 10^{-3}$	$4.70092 \cdot 10^{-3}$	$35.4159 \cdot 10^{-3}$
$\delta_{\text{sys.}}(\nu_{e\rightarrow\gamma}), \%$	0.20392	0.267872	0.684738

**Таблица:** Результаты вариации массового окна и оценки соответствующего вклада в систематическую погрешность для каждой рассматриваемой области по  $\eta$  и  $p_T$

## Неопределенность оценки числа событий комбинаторного фона под Z-пиком.

	$N$	$N_{bkg}$	$\Delta N_{bkg}$	$\delta_{syst.}(\nu_{e \rightarrow \gamma}), \%$
$ee,  \eta  < 1.37,$ $p_T < 250 \text{ ГэВ}$	85569	3820	1595	1.95
$ee,  \eta  < 1.37,$ $p_T > 250 \text{ ГэВ}$	14825	404	149	1.03
$ee, 1.52 <  \eta  < 2.37$	25166	1536	722	3.05
$e\gamma,  \eta  < 1.37,$ $p_T < 250 \text{ ГэВ}$	1927	257	5	0.30
$e\gamma,  \eta  < 1.37,$ $p_T > 250 \text{ ГэВ}$	281	29.71	0.02	0.08
$e\gamma, 1.52 <  \eta  < 2.37$	1490	101.1	0.7	0.05

**Таблица:** Результаты вычислений количества фоновых событий и соответствующего вклада в систематическую погрешность для каждой рассматриваемой области по  $\eta$  и  $p_T$

Ошибка самого метода, оцениваемая как абсолютная разность между «истинной частотой неверной идентификации» и «измеряемой частотой неверной идентификации» в  $Z(\rightarrow ee)$  МС.

	$ \eta  < 1.37,$ $p_T < 250$ ГэВ	$ \eta  < 1.37,$ $p_T > 250$ ГэВ	$1.52 <  \eta  < 2.37$
Оценка «измеряемой» частоты неверной идентификации			
$N_{ee}$	81484.1	14033.7	25558.5
$N_{e\gamma}$	1482.21	246.112	1385.43
$\nu_{e\rightarrow\gamma}, \%$	1.81902	1.75372	5.42063
Оценка «истинной» частоты неверной идентификации			
$N_{ee}$	144968	28167.5	46474.7
$N_{e\gamma}$	2557.88	560.172	2738.51
$\nu_{e\rightarrow\gamma}, \%$	1.76445	1.98872	5.89248
$\Delta(\nu_{e\rightarrow\gamma}), \%$	$54.57 \cdot 10^{-3}$	$235 \cdot 10^{-3}$	$471.85 \cdot 10^{-3}$
$\delta_{\text{system.}}(\nu_{e\rightarrow\gamma}), \%$	3.09	13.4	8.70

**Таблица:** Результаты оценки погрешности самого метода и оценки соответствующего вклада в систематическую ошибку для каждой рассматриваемой области по  $\eta$  и  $p_T$



# Результирующие статистические и систематические погрешности.

	$ \eta  < 1.37,$ $p_T < 250$ ГэВ	$ \eta  < 1.37,$ $p_T > 250$ ГэВ	$1.52 <  \eta  < 2.37$
Статистические погрешности			
$N_{ee}$	85569	14825	25166
$\delta_{N_{ee} stat}, \%$	0.34	0.82	0.63
$N_{e\gamma}$	1927	281	1490
$\delta_{N_{ee} stat}, \%$	2.28	5.97	2.59
$\delta_{total stat}, \%$	2.31	6.03	2.67
Систематические погрешности			
$\delta_{Background syst}, \%$	1.97	1.03	3.05
$\delta_{Mass window syst}, \%$	0.29	0.40	0.68
$\delta_{Method syst}, \%$	3.09	13.40	8.70
$\delta_{total syst}, \%$	3.68	13.44	9.24

**Таблица:** Статистические и систематические погрешности для каждой рассматриваемой области по  $\eta$  и  $p_T$

Оценка формы фона в распределении инвариантной массы  $e\gamma$  проводилась путем фитирования распределения суммой полинома третьей степени и Воигтиана, где Воигтиан есть свертка распределения Гасса и распределения Брейта-Вигнера:

$$F_{fit}(x) = POL3(x) + Voigtian(x) \quad (1)$$

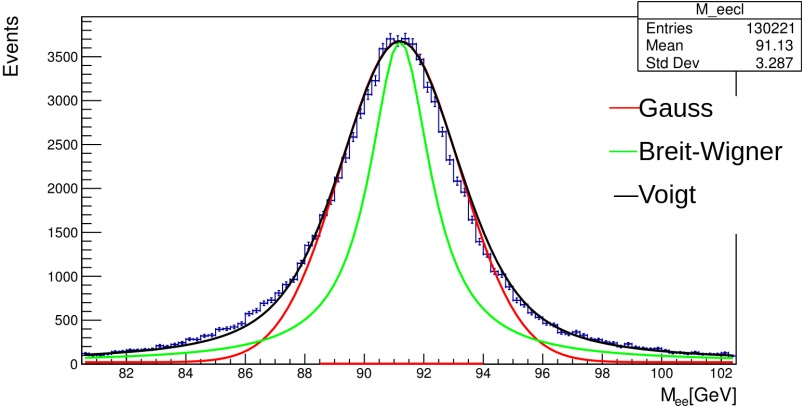
$$Gauss(M, \sigma) \times BreitWigner(M, \Gamma) = Voigt(M, \Gamma, \sigma). \quad (2)$$

Таким образом события в распределении от распада Z-бозона описывались Воигтианом, а фон полиномом третьей степени.

$$F_{fit} = p_4 + p_5 \cdot x + p_6 \cdot x^2 + p_7 \cdot x^3 + p_0 \cdot Voigt(M, \Gamma, \sigma), \quad (3)$$

Фитирование проводилось в интервалах (75-85) ГэВ и (95-105) ГэВ. При фитировании такие параметры Воигтиана как ширина распада Z-бозона  $\Gamma$ , масса Z-бозона  $M$ , среднеквадратичное отклонение  $\sigma$  фиксировались:  $M = 91.2$  ГэВ - масса,  $\Gamma = 0.084$  ГэВ [6],  $\sigma = 1.79$  ГэВ. Параметр  $p_0$  ответственный за высоты пика принимал значения в фиксированном интервале, таком чтобы при фитировании высота Воигтиана лежала в пределах 10% от высоты пика распределения. Фиксирование и ограничение принимаемых значений параметров необходимо для стабильного фитирования. Значение параметра  $\sigma$  оценивалось из ширины пика Z-бозона на полувысоте по формуле:

$$FWHM_{Voigt} \approx \frac{\Gamma}{2} + \sqrt{\frac{\Gamma^2}{4} + (2.35 \cdot \sigma)^2}. \quad (4)$$



# Параметры Воигтиана

	$ \eta  < 1.37,$ $p_T < 250$ ГэВ	$ \eta  < 1.37,$ $p_T > 250$ ГэВ	$1.52 <  \eta  < 2.4$
$M$ , ГэВ	91.07	91.09	90.89
$\Gamma$ , ГэВ	3.185	3.172	3.439
$\sigma$ , ГэВ	1.068	0.858	1.307

**Таблица:** Параметры Воигтиана полученные фитированием в Монте-Карло