

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.

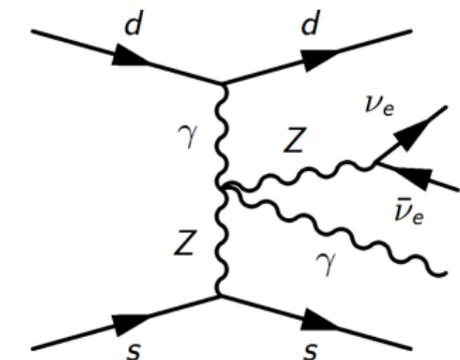
Консультант: Курова А.С.

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:

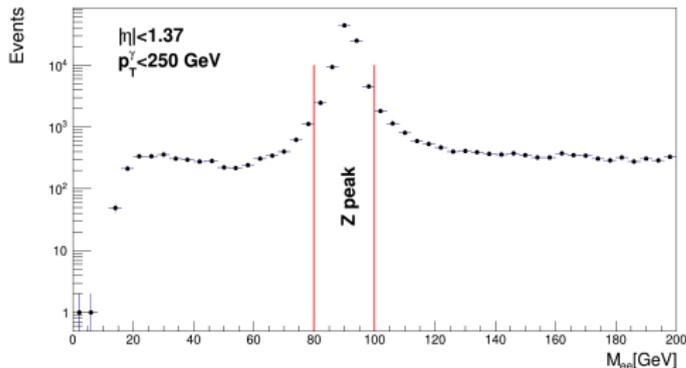
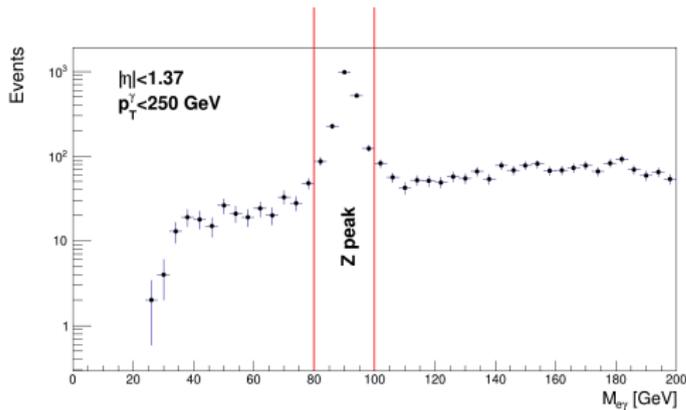
$$PT_{min}(\gamma \rightarrow e\gamma) = 150 \text{ ГэВ};$$

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

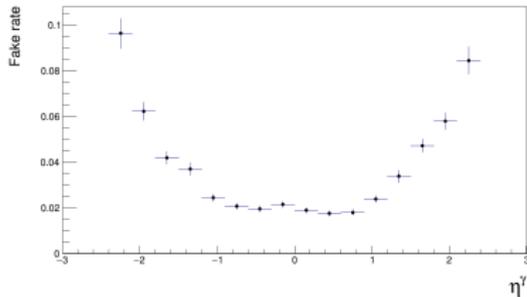
$$PT_{min}(e_{sublead}) = 25 \text{ ГэВ};$$

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

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

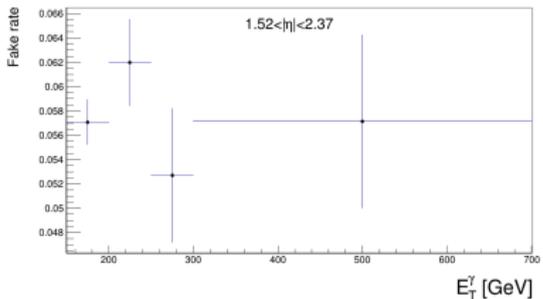
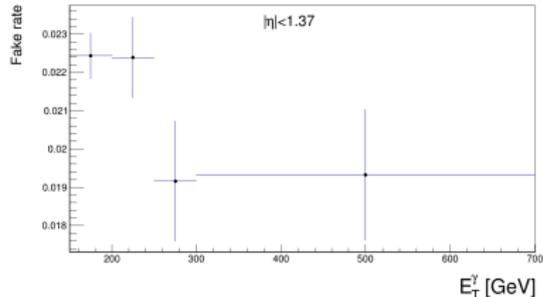


# Исследование зависимости частоты неверной идентификации от региона фазового пространства.



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

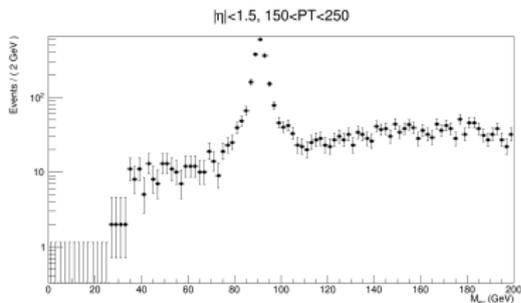
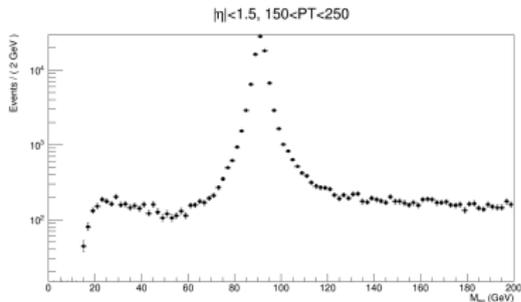
- ▶ Центральный регион ( $|\eta| < 1.37$ ) с  $p_T < 250$  ГэВ;
- ▶ Центральный регион ( $|\eta| < 1.37$ ) с  $p_T > 250$  ГэВ;
- ▶ Передний регион ( $1.52 < |\eta| < 2.37$ ).



# 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:

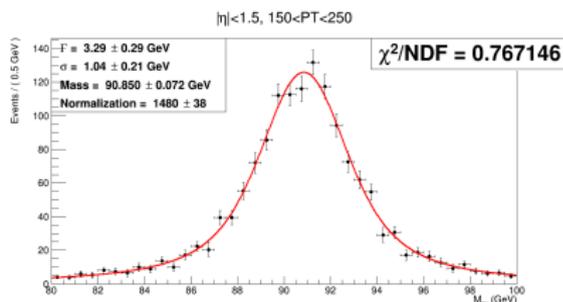
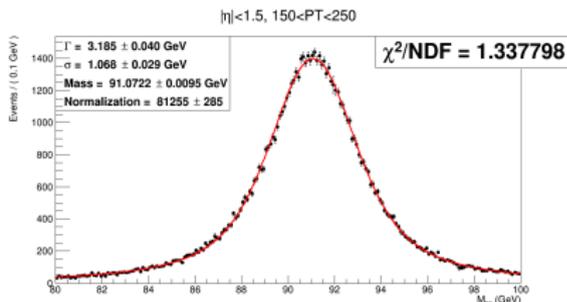
$$rate_{e\rightarrow\gamma} = \frac{N_{e\gamma} - N_{bkg}}{N_{ee} - N_{bkg}},$$



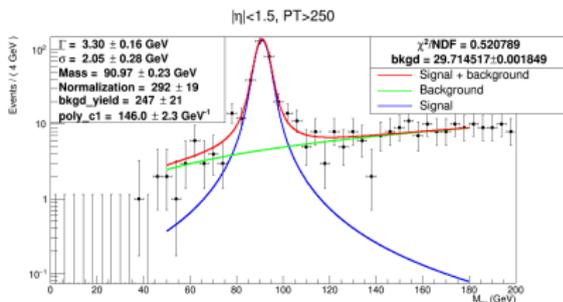
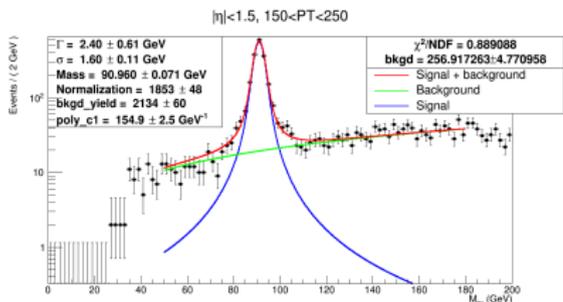
# Описание формы распределения инвариантной массы сигнальных событий в Монте-Карло

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:

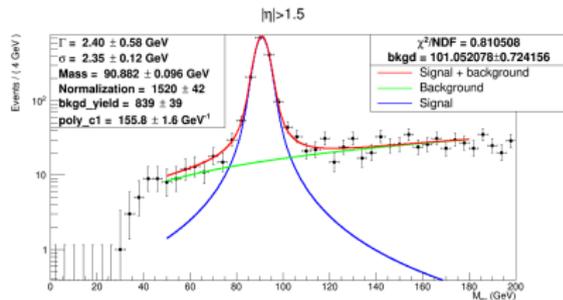
$$\text{Voigtian}(E, M, \Gamma, \sigma) = \int_{-\infty}^{+\infty} \text{Gauss}(x, M, \sigma) \text{BreitWigner}(E - x, M, \Gamma) dx$$



# 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>.

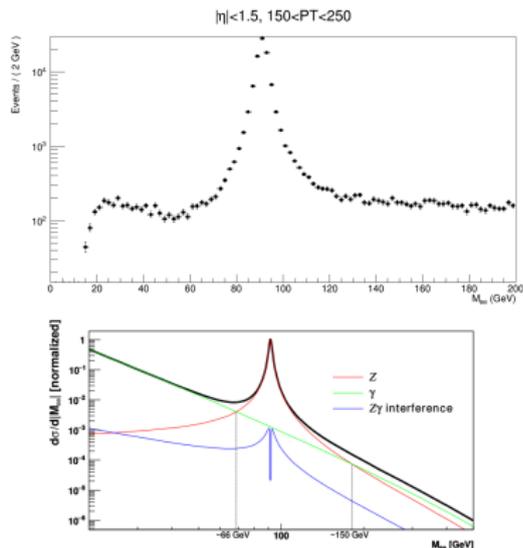
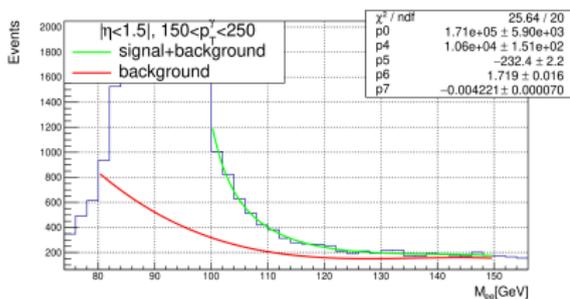
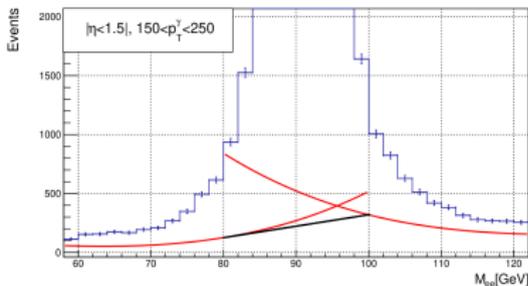
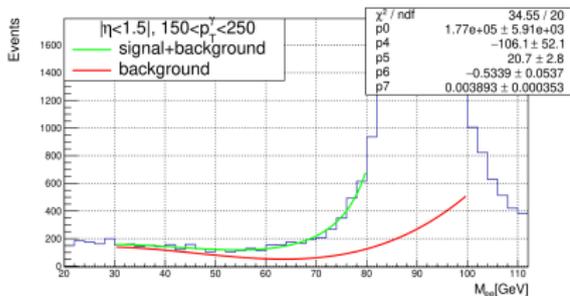


Figure 2.5: The theoretical predictions for the cross-sections of the Drell-Yan  $Z/\gamma^* \rightarrow ee$  processes, normalized to  $Z \rightarrow ee$  peak value. The cross-sections were calculated in leading order, using the CT10 PDF set.

<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,$<br>$p_T < 250$ ГэВ | $ \eta  < 1.37,$<br>$p_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  $p_T$

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, p_T < 250$ ГэВ | $2.04 \pm 0.05 \pm 0.08$   |
| $ \eta  < 1.37, p_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,$<br>$p_T < 250$ ГэВ | $ \eta  < 1.37,$<br>$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.

|  | $N$   | $N_{bkg}$ | $\Delta N_{bkg}$ | $\delta_{syst.}(\nu_{e \rightarrow \gamma}), \%$ |
|--|-------|-----------|------------------|--|
| $ee,  \eta  < 1.37,$<br>$p_T < 250 \text{ ГэВ}$      | 85569 | 3820      | 1595             | 1.95   |
| $ee,  \eta  < 1.37,$<br>$p_T > 250 \text{ ГэВ}$      | 14825 | 404       | 149              | 1.03   |
| $ee, 1.52 <  \eta  < 2.37$                           | 25166 | 1536      | 722              | 3.05   |
| $e\gamma,  \eta  < 1.37,$<br>$p_T < 250 \text{ ГэВ}$ | 1927  | 257       | 5                | 0.30   |
| $e\gamma,  \eta  < 1.37,$<br>$p_T > 250 \text{ ГэВ}$ | 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,$<br>$p_T < 250$ ГэВ | $ \eta  < 1.37,$<br>$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,$<br>$p_T < 250$ ГэВ | $ \eta  < 1.37,$<br>$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:

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

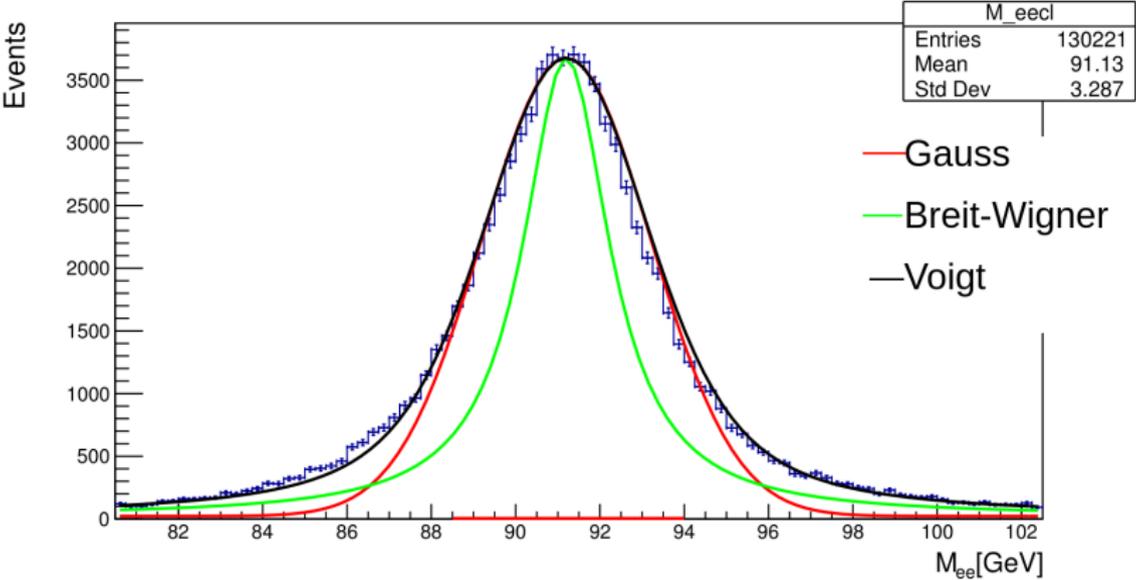
$$Gauss(M, \sigma) \times BreitWigner(M, \Gamma) = Voigt(M, \Gamma, \sigma). \quad (2)$$

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,$<br>$p_T < 250$ ГэВ | $ \eta  < 1.37,$<br>$p_T > 250$ ГэВ | $1.52 <  \eta  < 2.36,$<br>$p_T > 250$ ГэВ |
|----------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--|
| $M$ , 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