

# Поиск тяжёлых диэлектронных резонансов в эксперименте ATLAS

В.Малеев

# План доклада

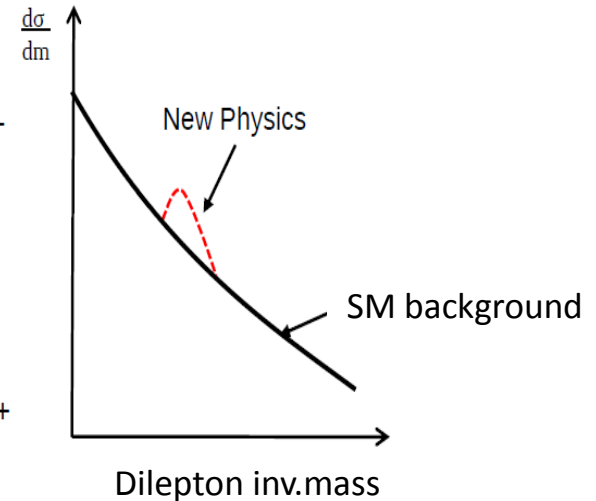
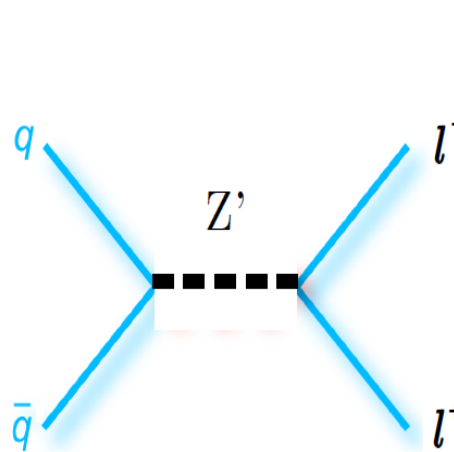
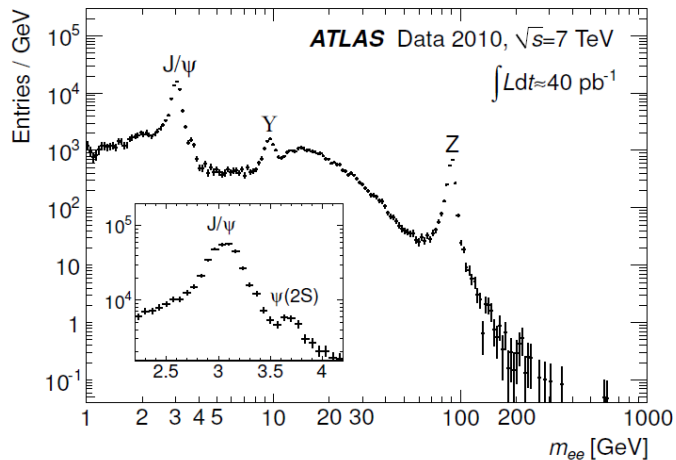
- Мотивация
- Детектор ATLAS
- Реконструкция и идентификация электронов
- Отбор событий
- Фоны
- Сравнение данных и Монте Карло
- Систематические неопределённости
- Пределы

# Что мы ищем

- Наблюдаемая величина – масса лептонной пары

$$m_{ll} = \sqrt{2p_{T1}p_{T2}(\cosh(\eta_1 - \eta_2) - \cos(\varphi_1 - \varphi_2))}$$

- Объект поиска – превышение зарегистрированных событий над предсказанием



# Мотивация

- Новый тяжёлый электрически нейтральный калибровочный бозон ( $Z'$ ) предсказывается многими моделями, расширяющими Стандартную Модель<sup>1,2</sup>:
  - Теории Великого Объединения основанные на  $SO(10)$  или  $E_6$  группах, содержащих добавочные  $U'(1)$  группы в дополнение к калибровочным группам  $SM$
  - Суперсимметричные модели, в частности NMSSM (next-to-minimal supersymmetric standard model), которая предлагает возможность ослабить требования к самосогласованности  $SM$ <sup>3</sup>
  - Т.н. Little Higgs модель, в которой дополнительный калибровочный бозон вводится для ограничения квадратичной расходимости при перенормировке массы Хиггса<sup>4,5</sup>

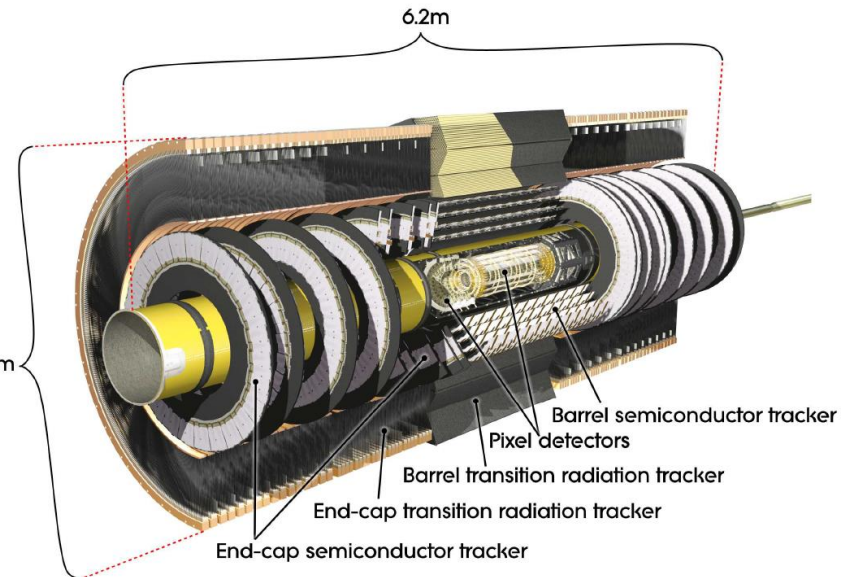
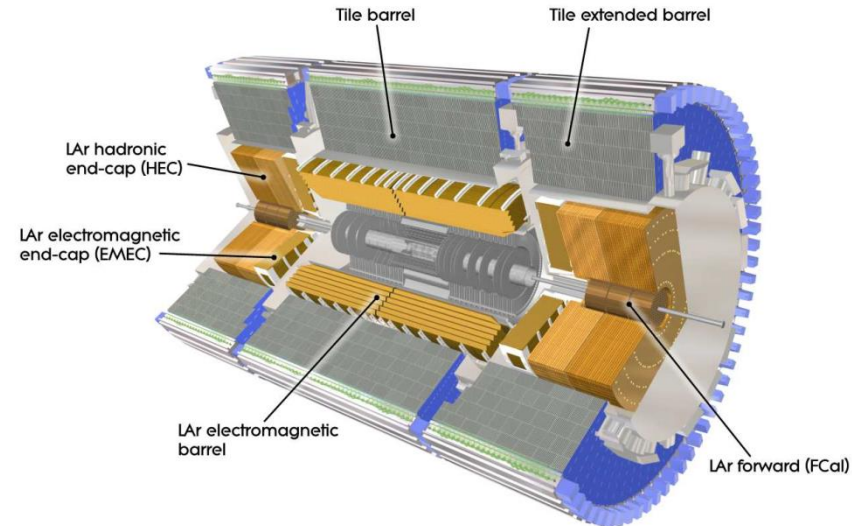
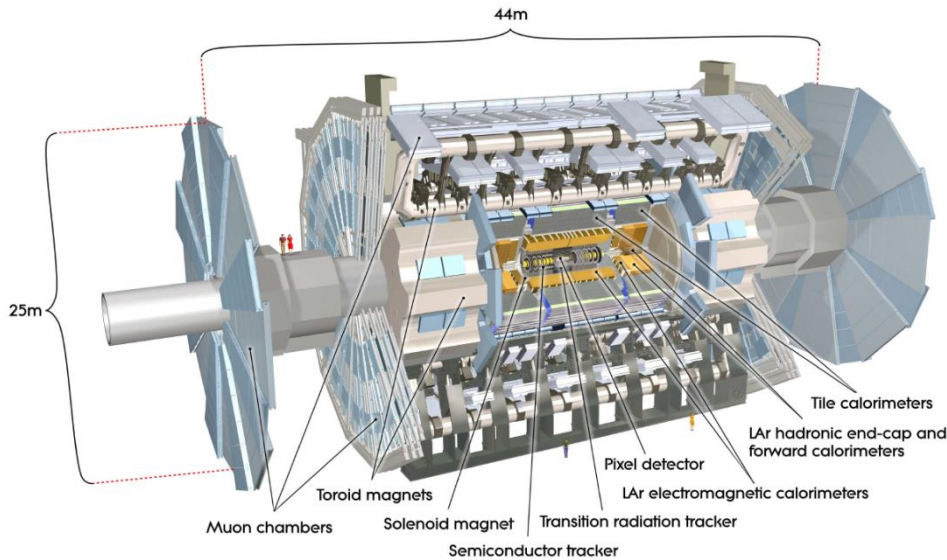
1. A. Leike, Phys. Rept. 317, 143 (1999) [hep-ph/9805494].
2. P. Langacker, Rev. Mod. Phys. 81, 1199 (2009) [arXiv:0801.1345 [hep-ph]].
3. L. J. Hall, D. Pinner and J. T. Ruderman, JHEP 1204, 131 (2012) [arXiv:1112.2703 [hep-ph]].
4. M. Schmaltz and D. Tucker-Smith, Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 55, 229 (2005) [hep-ph/0502182];
5. M. Perelstein, Prog. Part. Nucl. Phys. 58, 247 (2007) [hep-ph/0512128].

# Мотивация

- Ещё одна модель, предлагающая решение проблемы иерархии введением электрослабого дублета  $(Z^*, W^*)$
- Другой набор моделей, пытающихся решить проблему иерархии и предсказывающих новые частицы в тэвной области, - модели с дополнительными размерностями:
  - «Универсальное дополнительное пространство» (universal extra dimension – UED) с числом доп.измерений  $k=1$  и масштабом  $R \sim 1/\text{ТэВ}$  (Калуца-Кляйна резонанс)
  - Рэндалл-Сандрум (Randall-Sundrum – RS) модель (одно доп.измерение с нелинейной метрикой скривизной  $k$ , безразмерный параметр модели  $k/M_{\text{Pl}}$  варьируется от 0.01 до 0.1)

6. M.V.Chizhov, G. Dvali, Origin and Phenomenology of Weak-Doublet Spin-1 Bosons, Phys.Lett.B703:593-598,2011 [[arXiv:0908.0924](https://arxiv.org/abs/0908.0924)] [[hep-ph](#)]
7. T. Appelquist, H. -C. Cheng and B. A. Dobrescu, Phys. Rev. D 64, 035002 (2001) [[hep-ph/0012100](#)].
8. L. Randall and R. Sundrum, Phys. Rev. Lett. 83, 3370 (1999) [[hep-ph/9905221](#)].

# ATLAS детектор



Калориметр:  $\sigma_{p_T}/E = 10\%/\sqrt{E [GeV]} \oplus 0.7\%$

Мюонный спектрометр:  $\sigma_{p_T}/p_T \geq 2\% @ 100 GeV$  (with ID) <sup>2.1m</sup>

Трекер:  $\sigma_{p_T}/p_T = 0.034\% p_T [GeV] \oplus 1.5\%$

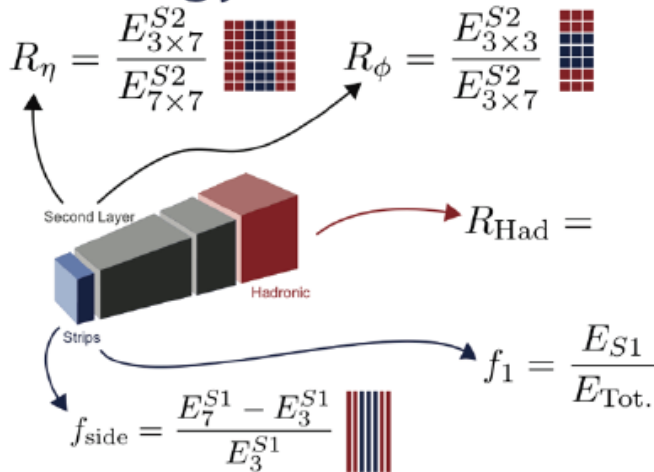
$\sigma(d_0) = 10 \mu m \oplus 140 \mu m / p_T [GeV]$

# Реконструкция электронов

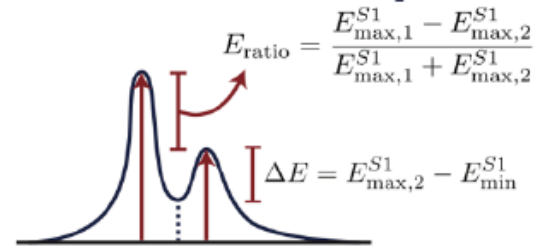
- Есть три алгоритма реконструкции электронов: стандартный, «мягкие» электроны и форвардные
- Стандартный алгоритм используется для реконструкции быстрых электронов
  - с помощью алгоритма скользящего окна находится электромагнитный кластер с  $E_T > 2.5$  ГэВ
  - к нему матчируется трек
  - если треков больше чем 1, выбирается трек с хитами в полупроводниковых детекторах и наименьшим  $\Delta R$
  - построенный объект проверяется на принадлежность конверсионному электрону

# Идентификация электронов (калориметр)

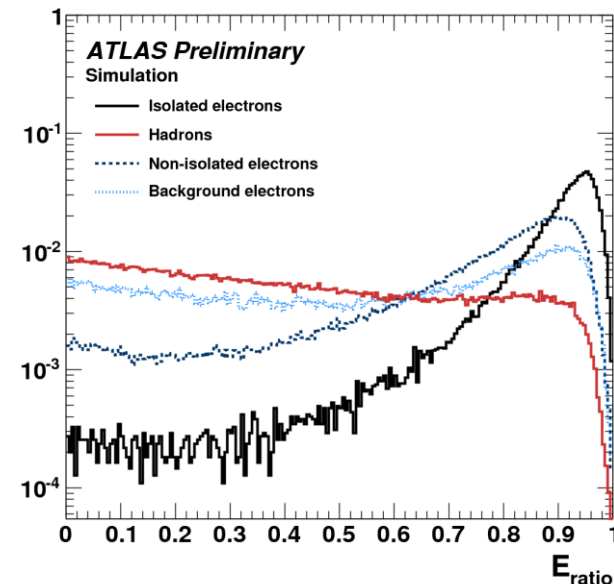
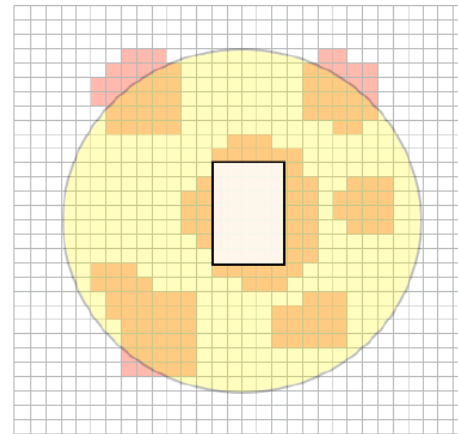
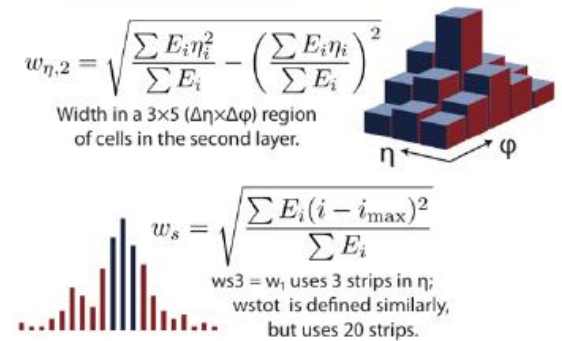
## Energy Ratios



## Shower Shapes



## Widths

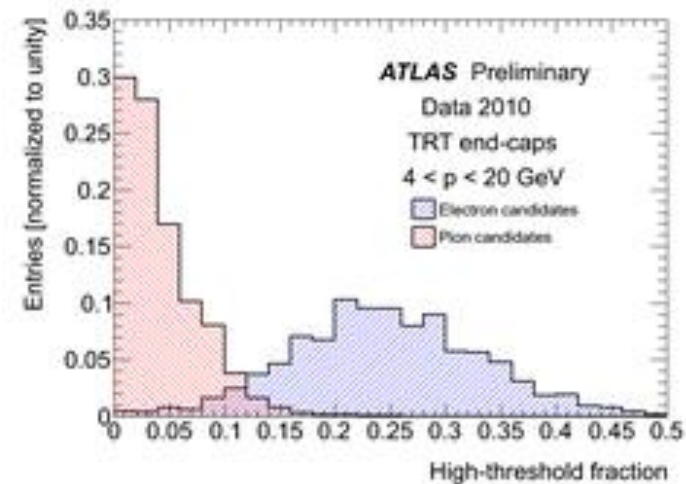
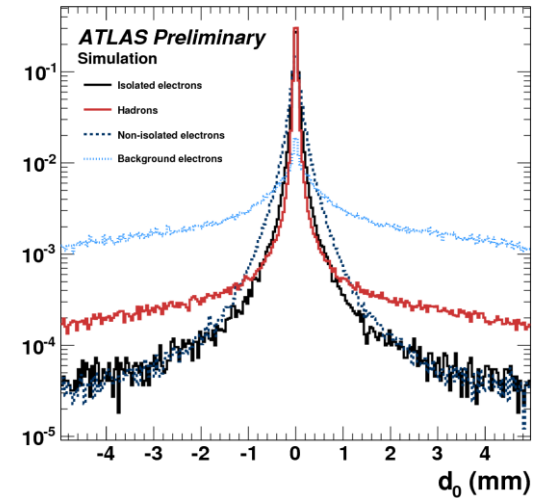


- Из калориметрических величин в идентификации используются
  - Энерговывделение в разных слоях калориметра
  - Форма ливня в первом слое калориметра
  - Изоляция электромагнитного кластера



# Идентификация электронов

- Трековая информация используемая для идентификации электронов
  - импакт параметр (расстояние от трека до вершины взаимодействия)
  - сопряжение трека с кластером по  $\eta$  и  $\phi$
  - число хитов по низкому и высокому порогам в TRT детекторе
  - наличие хита в первом слое пиксельного детектора
- В зависимости от требуемой эффективности и режекции используется разный набор дискриминируемых переменных с разными порогами
- В нашем анализе мы используем т.н. Medium++

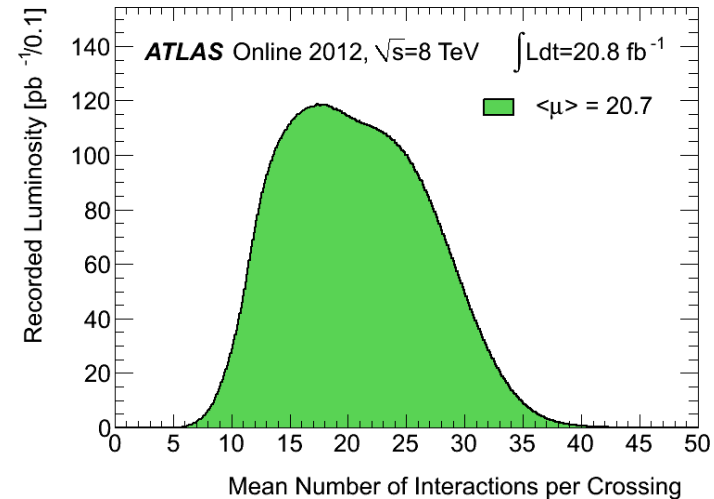
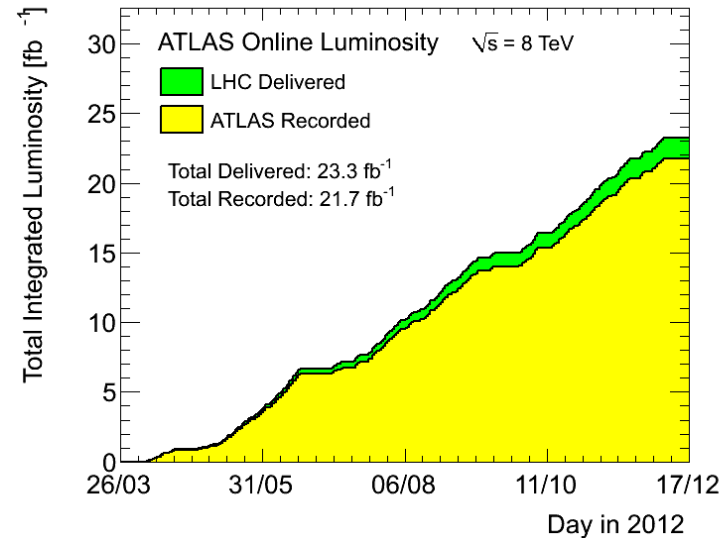


# ОТБОР СОБЫТИЙ

- GRL: data12\_8TeV.periodAllYear\_DetStatus-v61-pro14-02\_DQDefects-00-01-00\_PHYS\_StandardGRL\_All\_Good (20,3 фбн-1)
- Триггер: EF\_g35\_loose\_g25\_loose
- Число электронов в событии  $> 1$
- Хотя бы одна вершина с  $\geq 3$  треками
- Событие полное и не было сбоя в колориметрах
- По крайней мере 2 электрона, удовлетворяющих условиям
  - Электрон реконструирован стандартным алгоритмом
  - $|\eta| < 2.47$ , исключая  $1.37 < |\eta| < 1.52$
  - Один электрон с  $p_T > 40$  ГэВ, и хотя бы один с  $p_T > 30$  ГэВ
  - Электрон «качественный» - электромагнитный кластер удовлетворяет условиям (Object quality) и трек имеет минимальный набор хитов в трековом детекторе
  - Трек имеет хит в первом слое пиксельного детектора (B-layer)
  - Электрон удовлетворяет требованиям Medium++
- Если таких электронов больше чем 2, используем два электрона с наибольшим  $p_T$
- Лидирующий (с большим  $p_T$ ) электрон удовлетворяет условию на изоляцию  $Etcone20_{pt\_corrected} < 0.007E_T + 5$  ГэВ
- Сублидирующий (с меньшим  $p_T$ ) электрон удовлетворяет условию на изоляцию  $Etcone20_{pt\_corrected} < 0.022E_T + 6$  ГэВ

# Данные и Монте Карло

- Данные: все данные накопленные в 2012 году (egamma stream) и прошедшие контроль качества – 20.3 фбн<sup>-1</sup>
- Монте Карло:
  - Сигнал:
    - Z' – Powheg+Pythia
    - Z\* - CompHep + Pythia
  - Неустранимый фон:
    - Z/γ → ee - Powheg+Pythia
    - t $\bar{t}$  → ee – McAtNlo
    - WW, WZ, ZZ – Herwig
- КХД фон (dijets, W+jets) – оценка из данных



# Оценка фона из данных

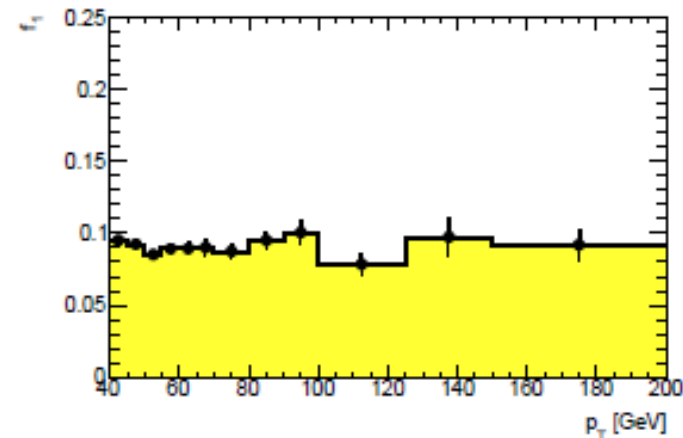
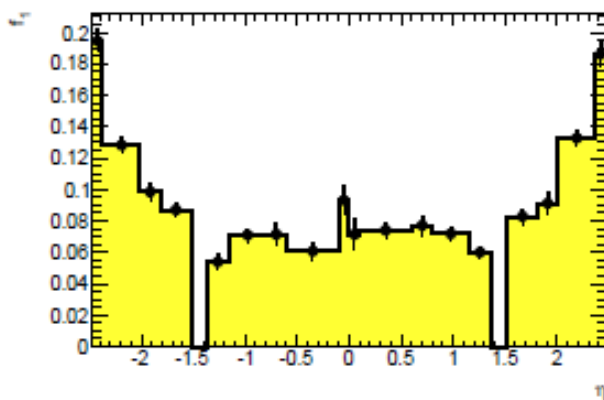
- Использовался т.н. матричный метод – наблюдаемые величины связываются с истинными матричным уравнением

$$\begin{pmatrix} N_{TT} \\ N_{TL} \\ N_{LT} \\ N_{LL} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_1 r_2 & r_1 f_2 & f_1 r_2 & f_1 f_2 \\ r_1(1-r_2) & r_1(1-f_2) & f_1(1-r_2) & f_1(1-f_2) \\ (1-r_1)r_2 & (1-r_1)f_2 & (1-f_1)r_2 & (1-f_1)f_2 \\ (1-r_1)(1-r_2) & (1-r_1)(1-f_2) & (1-f_1)(1-r_2) & (1-f_1)(1-f_2) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} N_{RR} \\ N_{RF} \\ N_{FR} \\ N_{FF} \end{pmatrix}$$

- Первая строка этого уравнения даёт вклад фона в отобранные события

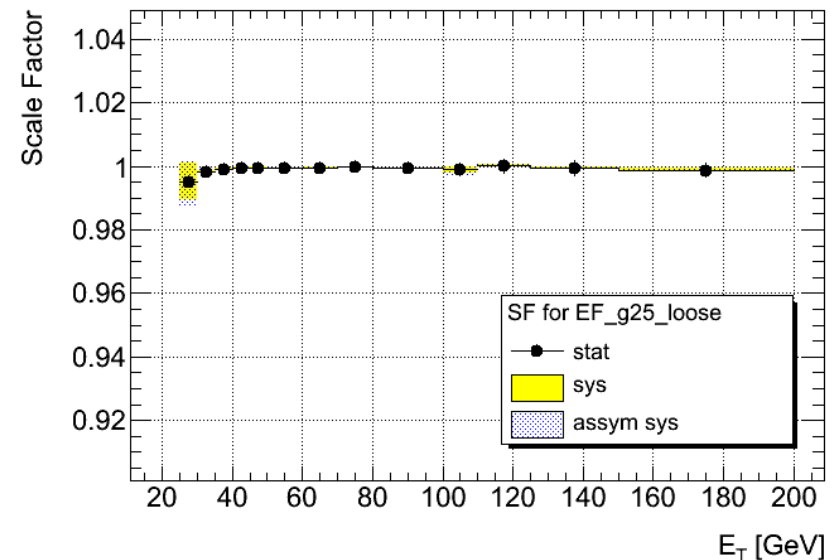
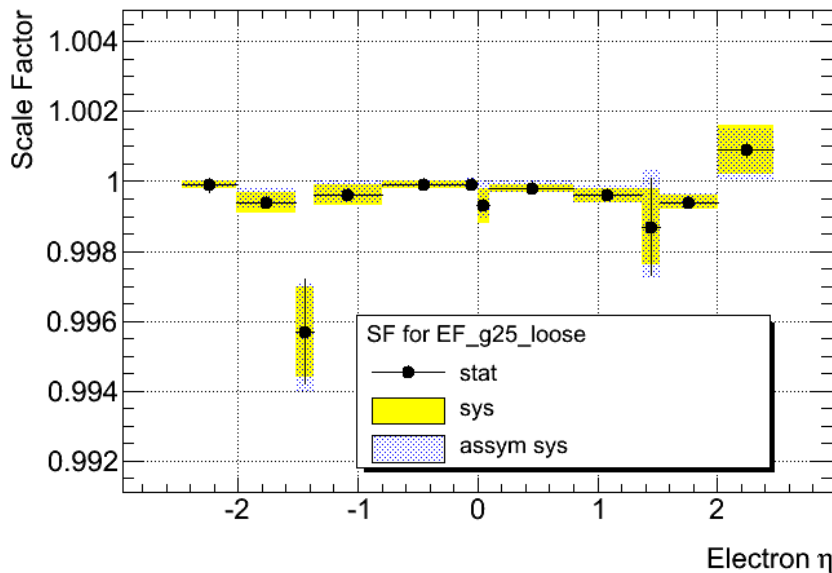
$$N_{di-jet \& W+Jets} = N_{TT}^{fake} = r_1 f_2 N_{RF} + f_1 r_2 N_{FR} + f_1 f_2 N_{FF}$$

- Вразбив истинные величины через наблюдаемые и определив эффективности, можно определить фон



# Коррекции Монте Карло

- Перевзвешивание pile-up
- Смеринг
- Различие эффективностей в данных и Монте Карло (Scale Factor) – триггер, реконструкция, идентификация, изоляция
- Поправки высшего порядка к сечениям (к-фактор)

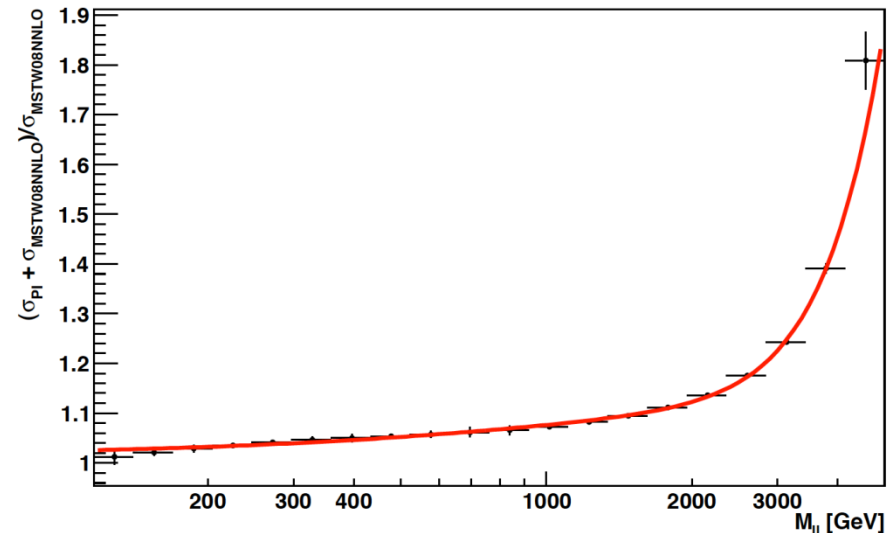
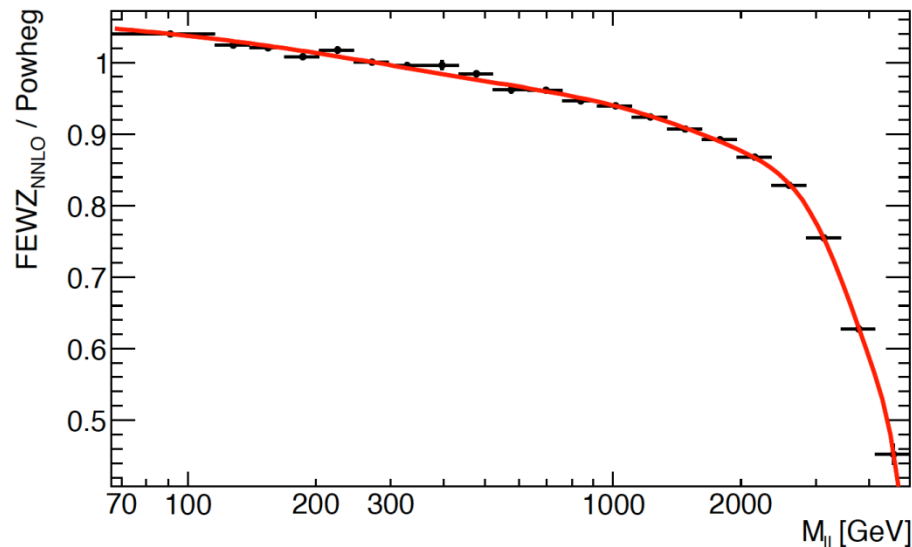


# Коррекции Монте Карло: к-фактор

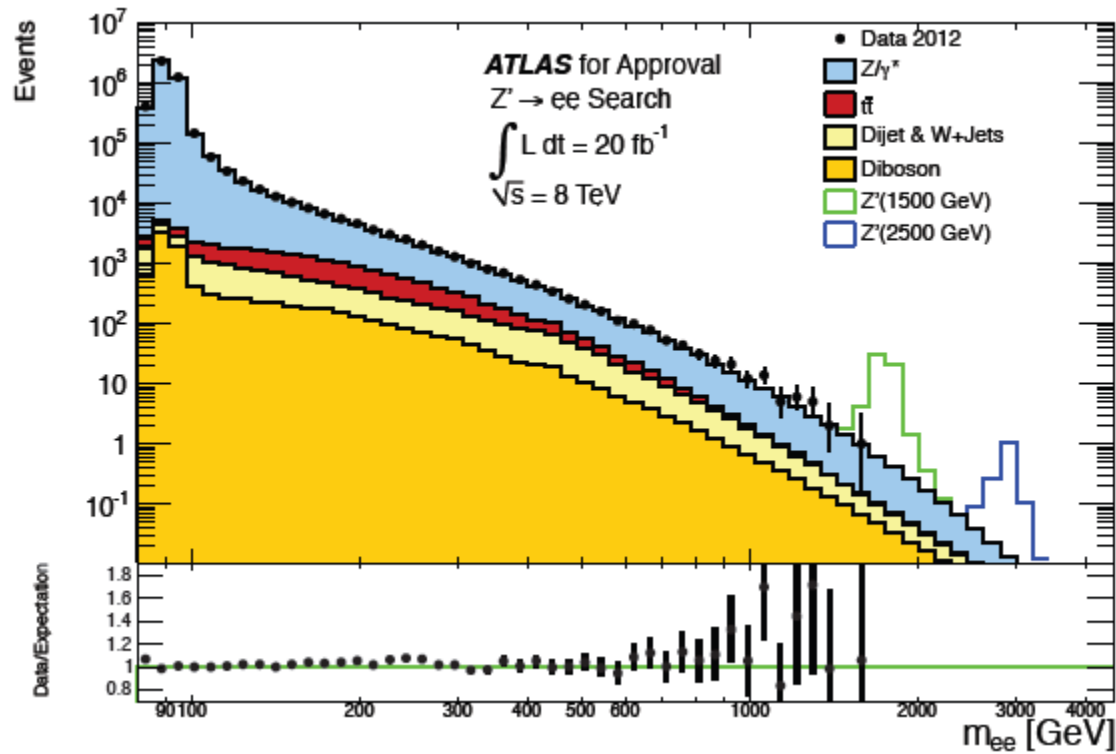
- Во внимание принимаются NNLO QCD поправки, HO EW поправки, с бегущей  $\alpha_s$ , а так же фотон индуцированные процессы (рождение дилептонной пары фотоном)

$$\sigma_{HO} = k_{(HO\ QCD\ EW)} k_{PI} \sigma_{MC}$$

- С помощью FEWZ вычисляется сечение для массового бина с включением всех поправок и при соответствующей  $\alpha_s$
- К-фактор - отношение вычисленного сечения к сечению Монте Карло образца



# Сравнение данных и Монте Карло



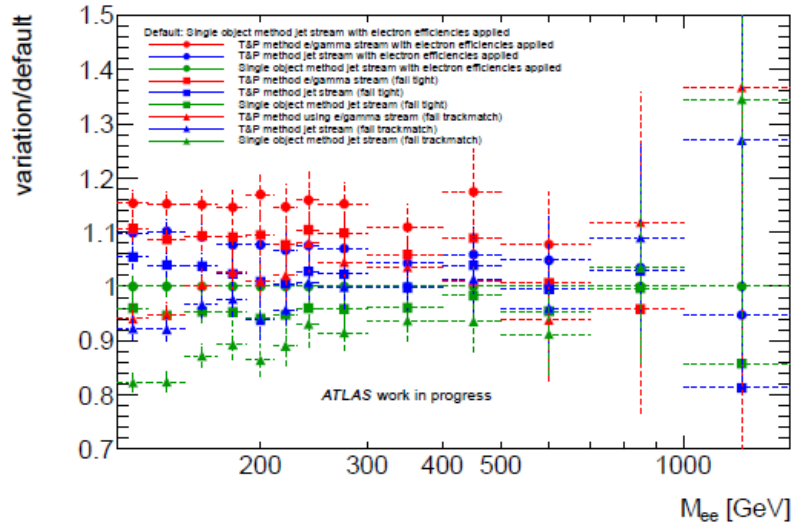
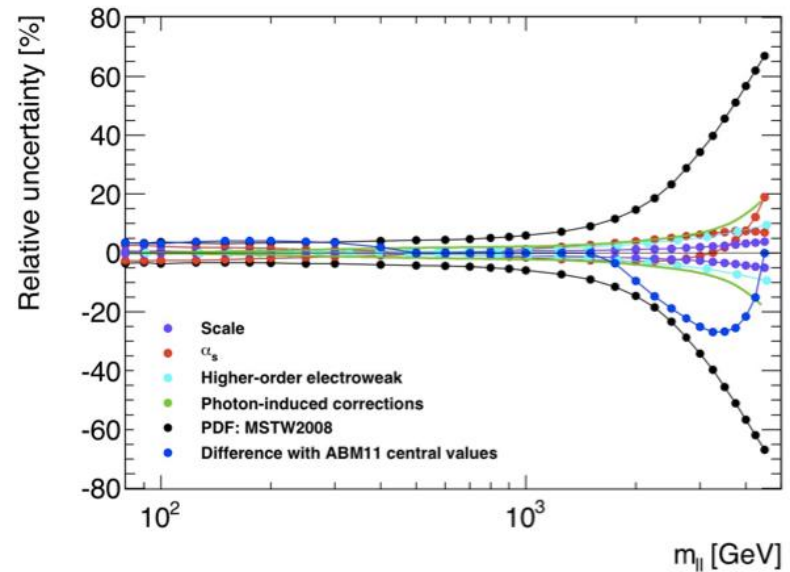
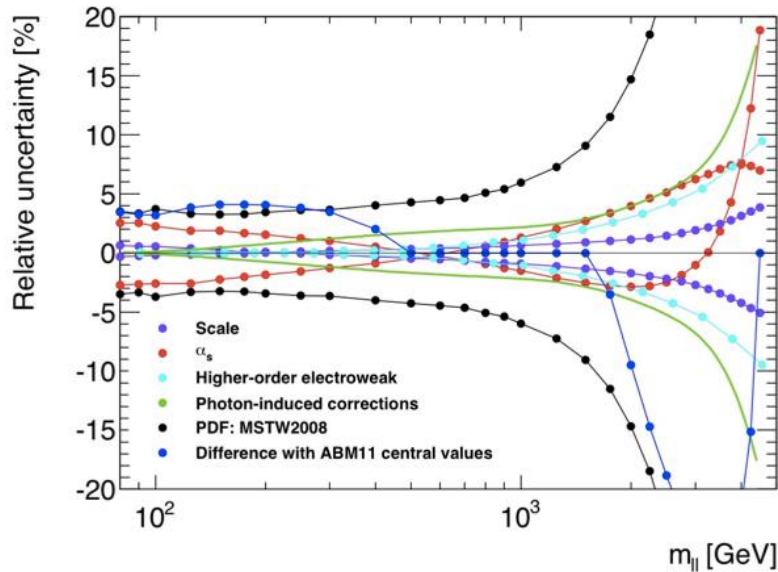
| $m_{ee}$ [GeV] | 110 - 200         | 200 - 400        | 400 - 800      | 800 - 1200    | 1200 - 3000       | 3000 - 4500       |
|----------------|-------------------|------------------|----------------|---------------|-------------------|-------------------|
| $Z/\gamma^*$   | $119000 \pm 8000$ | $13700 \pm 900$  | $1290 \pm 90$  | $68 \pm 6$    | $9.8 \pm 1.1$     | $0.008 \pm 0.004$ |
| $t\bar{t}$     | $7000 \pm 800$    | $2400 \pm 400$   | $160 \pm 60$   | $2.5 \pm 0.6$ | $0.117 \pm 0.034$ | $< 0.001$         |
| Diboson        | $1830 \pm 210$    | $660 \pm 160$    | $93 \pm 33$    | $4.8 \pm 0.8$ | $0.79 \pm 0.26$   | $0.005 \pm 0.004$ |
| Dijet, W + jet | $3900 \pm 800$    | $1260 \pm 310$   | $230 \pm 110$  | $8.6 \pm 2.4$ | $0.9 \pm 0.6$     | $0.004 \pm 0.006$ |
| Total          | $131000 \pm 8000$ | $18000 \pm 1100$ | $1780 \pm 160$ | $84 \pm 6$    | $11.6 \pm 1.3$    | $0.017 \pm 0.009$ |
| Data           | 133131            | 18570            | 1827           | 98            | 10                | 0                 |

# Систематические неопределённости

- Экспериментальные неопределённости
  - Реконструкция и идентификация электронов (2% @ 2TeV)
  - Разрешение электромагнитного калориметра (1.0 % - 1.8%)
  - Энергетическая калибровка калориметра (0.5% - 1.5%)
  - Неопределённость оценки фона из данных (9% @ 2 TeV 27% @ 3 TeV)
- Теоретические неопределённости
  - NNLO QCD
  - HO EW поправки
  - вариации  $\alpha_s$  вокруг номинального значения для MSTWnnlo  $\alpha_s(M_Z)=0.11707$
  - выбор PDF (использование MSTWnnlo или AB11)
  - вариации коэффициентов ренормализации и факторизации для учёта HO QCD поправок в дополнение к NNLO QCD
  - вклад от дибозонов и  $t\bar{t}$



# Систематические неопределённости



|                                  | 2 ТэВ | 3 ТэВ |
|----------------------------------|-------|-------|
| PDF variation                    | 15%   | 34%   |
| PDF choice                       | 17%   | 42%   |
| Scale                            | 2%    | 3%    |
| $\alpha_s$                       | 4%    | 6%    |
| Photon-induced corrections       | 4%    | 7%    |
| Electroweak corrections          | 3%    | 5%    |
| W + jet and multi-jet background | 9%    | 27%   |
| Diboson and ttbar extrapolation  | 5%    | 17%   |
| Total                            | 26%   | 64%   |

# Вычисление предела

- Вероятность обнаружить  $n$  событий при предсказании  $\mu$

$$\mathcal{L}(n|\mu) = \frac{\mu^n e^{-\mu}}{n!}, \mu = \sum_j N_j = N_{sig} + N_{bkg}, n = N_{data}$$

- Число предсказанных событий может варьироваться из-за неопределённостей

$$\mu = \sum_j N_j \prod_i (1 + G(\theta_{ij}, \delta_{ij}))$$

- Функция правдоподобия вычисляется для каждого бина массового спектра

$$\mathcal{L}(n|N_{ij}, \theta_{ij}) = \prod_k \frac{\mu_k^{n_k} e^{-\mu_k}}{n_k!}$$

- Затем производится интегрирование по всем параметрам за исключением  $N_{sig}$

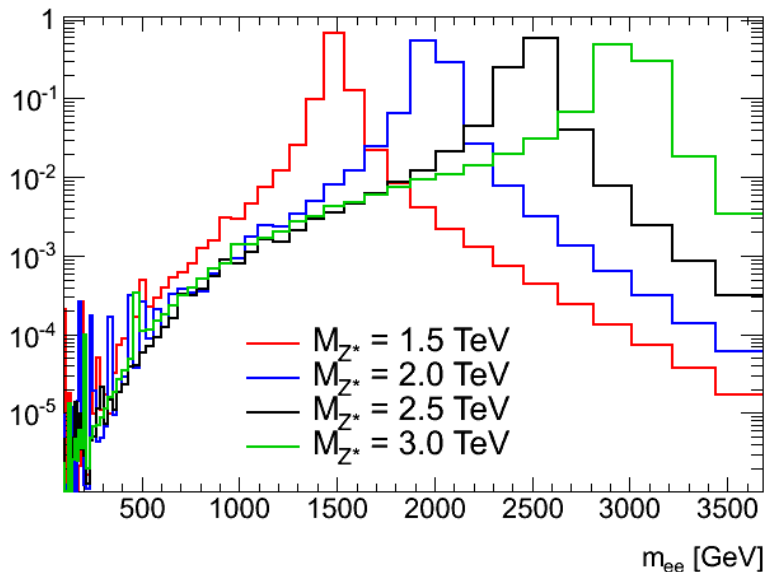
$$\mathcal{L}'(n|N_{sig}) = \int \mathcal{L}(n|N_{sig}, N_{bkg}, \theta_0, \theta_1, \theta_2, \dots) d\theta_0, d\theta_1, d\theta_2, \dots$$

- Переход от числа событий к сечению осуществляется по формуле

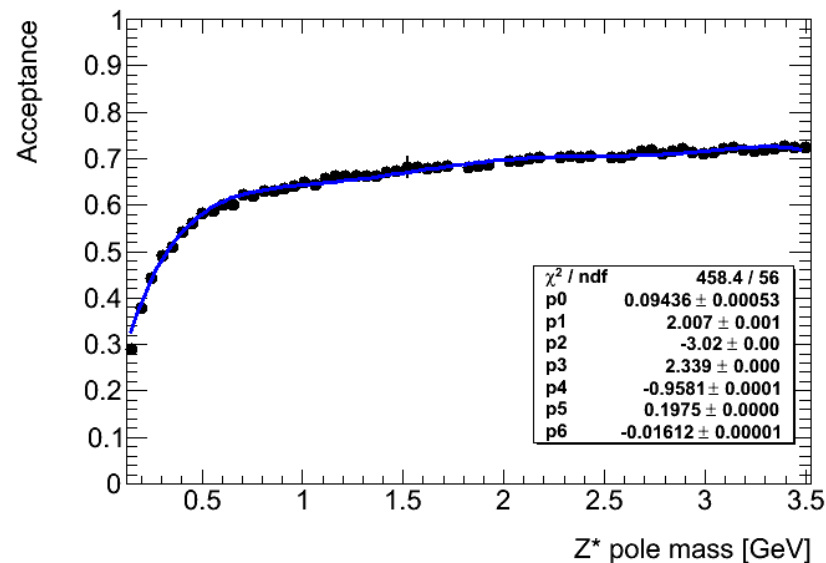
$$\sigma_{sig} B = \frac{N_{sig}}{A_{sig}} \frac{N_Z}{A_Z} \sigma_Z B$$

- Все эти вычисления производятся с помощью пакета Bayesian Analysis Toolkit [A. Caldwell, D. Kollar, and K. Kröninger, *BAT - The Bayesian Analysis Toolkit*, Comput. Phys. Commun. 180 (2009) 2197. ]

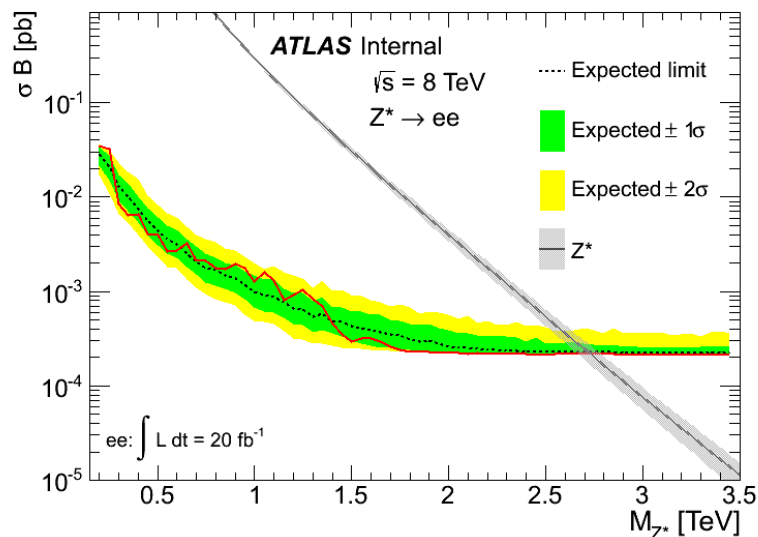
# Вычисление предела



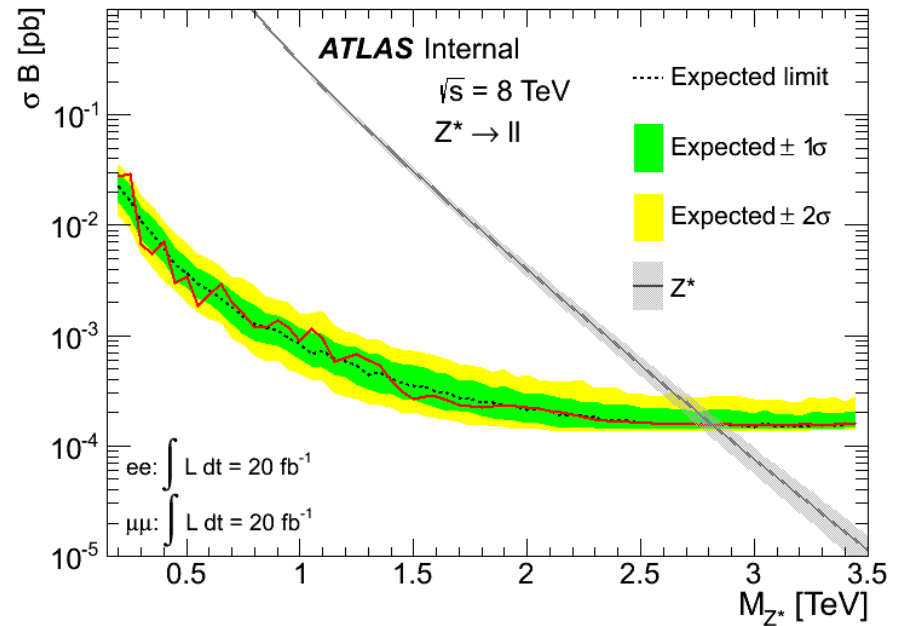
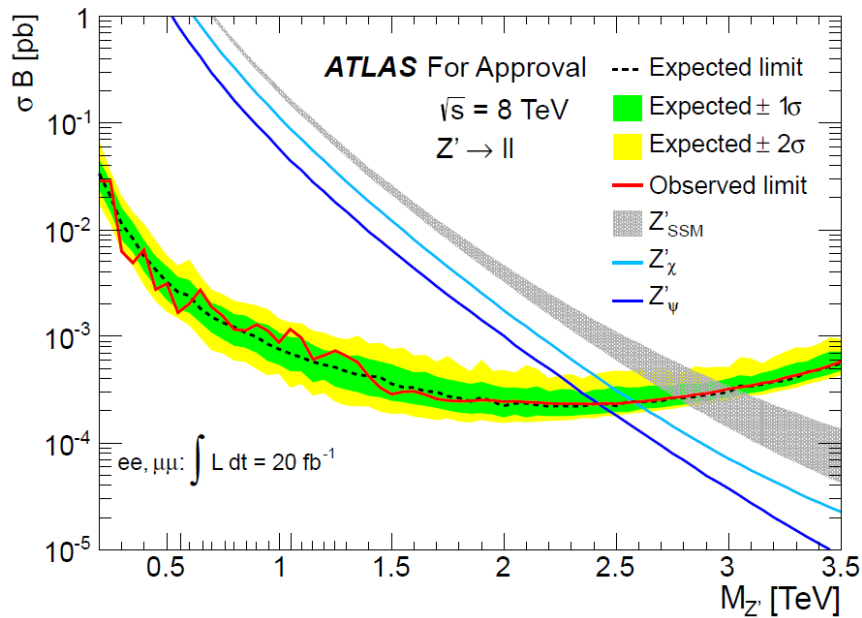
Сигнальный темплайт для нескольких масс



$A\epsilon$  в зависимости от массы  $Z^*$



# Результат



|                            | expectd  | observed |
|----------------------------|----------|----------|
| $Z' \rightarrow \ell\ell$  | 2.86 TeV | 2.86 TeV |
| $Z^* \rightarrow \ell\ell$ | 2.82 TeV | 2.82 TeV |

- Оптимизация идентификации электронов в эксперименте ATLAS
- Оптимизация отбора на изоляцию
- Анализ данных
- Оценка КХД фона
- Вычисление Scale Factors
- Анализ сигнальных образцов
- Вычисление пределов для  $Z^*$