



Поиск тяжелых заряженных векторных бозонов в канале распада на электрон и нейтрино в эксперименте ATLAS

В. Соловьев

Семинар ОФВЭ
28 апреля 2015 года

Введение

- Участие в анализе по поиску тяжелых векторных бозонов с 2010 года

- Диссертационная работа основана на данных, накопленных в эксперименте ATLAS за 2012 год: $\sqrt{s} = 8$ ТэВ, $L = 20.3$ фбн⁻¹

- Диссертация состоит из 7 глав и Введения:
 - Введение
 - Глава 1. Теоретические модели
 - Глава 2. Экспериментальная установка
 - Глава 3. Реконструкция событий
 - Глава 4. Моделирование сигнала и фона
 - Глава 5. Анализ данных
 - Глава 6. Систематические ошибки
 - Глава 7. Ограничения на существование тяжелых векторных бозонов

- Доклад построен в соответствии с главами диссертации

Мотивация

- ❑ Эксперименты на Большом адронном коллайдере (БАК) предоставляют уникальную возможность для поисков отклонений от Стандартной модели
- ❑ Стандартная модель (СМ) хорошо описывает экспериментальные данные
- ❑ Однако существует ряд наблюдаемых данных, которые не описываются в рамках СМ:
 - проблема иерархии масс
 - осцилляции нейтрино
 - барионная асимметрия Вселенной
 - природа темной материи
 - ...
- ❑ Эти проблемы мотивируют поиски физики за пределами СМ

Модель W'

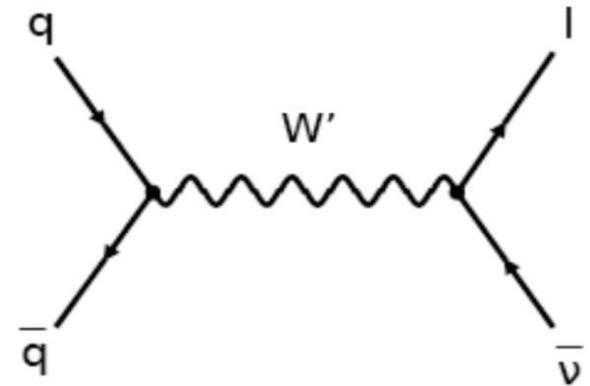
□ Многие модели (например ТВО, основанные на группах $SO(10)$, E_6 и т.д.) предсказывают существование тяжелых калибровочных бозонов

□ Такие бозоны принято обозначать Z' и W'

□ Рассматриваемая модель:

Sequential Standard Model W' (SSM W')

- Спин 1, заряд ± 1
- Связан с фермионами также как и W СМ
- $\Gamma(W' \rightarrow l\nu) = \frac{m_{W'}}{m_W} \Gamma(W \rightarrow l\nu)$
- $B(W' \rightarrow WZ) = 0$



□ В диссертационной работе рассматривается канал распада W' на электрон и нейтрино

Модель W^*

□ Киральные возбужденные бозоны W^* :

[M. Chizhov, G. Dvali, *Phys.Lett. B703 (2011) 593-598*]

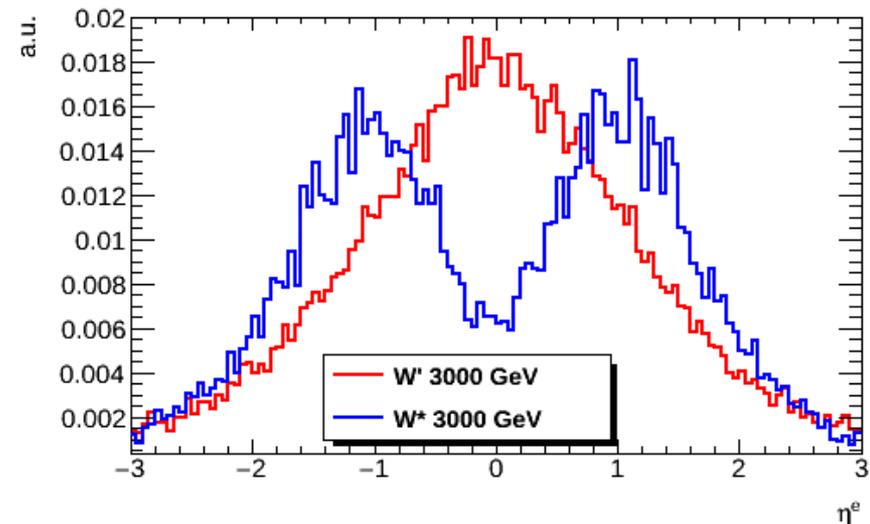
- Спин 1, заряд ± 1
- Связан с фермионами не через векторный, а через тензорный ток, который смешивает левые и правые фермионы

$$\mathcal{L}_{W'} \sim \frac{g}{\sqrt{2}} (\bar{\psi}_L \gamma^\mu \psi_L W'_\mu + \bar{\psi}_L \gamma^\mu \psi_L W'_\mu) \quad \mathcal{L}_{W^*} \sim \frac{g}{M} (\bar{\psi}_R \sigma^{\mu\nu} \psi_L W_\mu^{*-} + \bar{\psi}_L \sigma^{\mu\nu} \psi_R W_\mu^{*+})$$

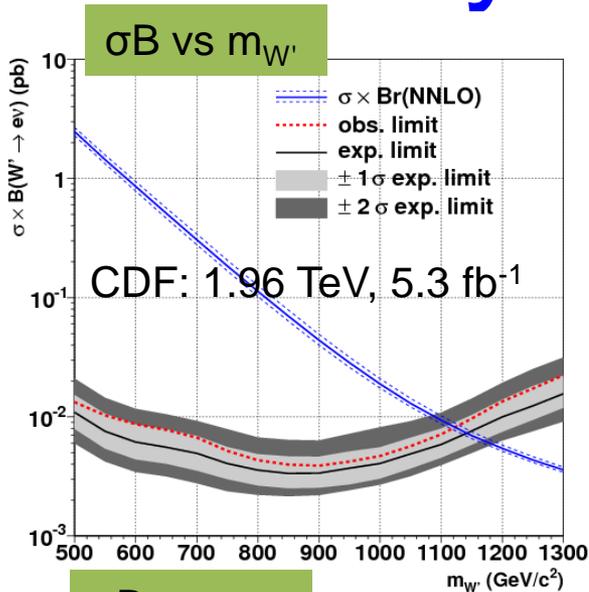
□ Разница во взаимодействии приводит к разнице в угловых распределениях между W' и W^*

□ В диссертационной работе рассматривается канал распада W^* на электрон и нейтрино

□ Результаты диссертации объединены результатами поиска W' и W^* в канале распада на мюон и нейтрино



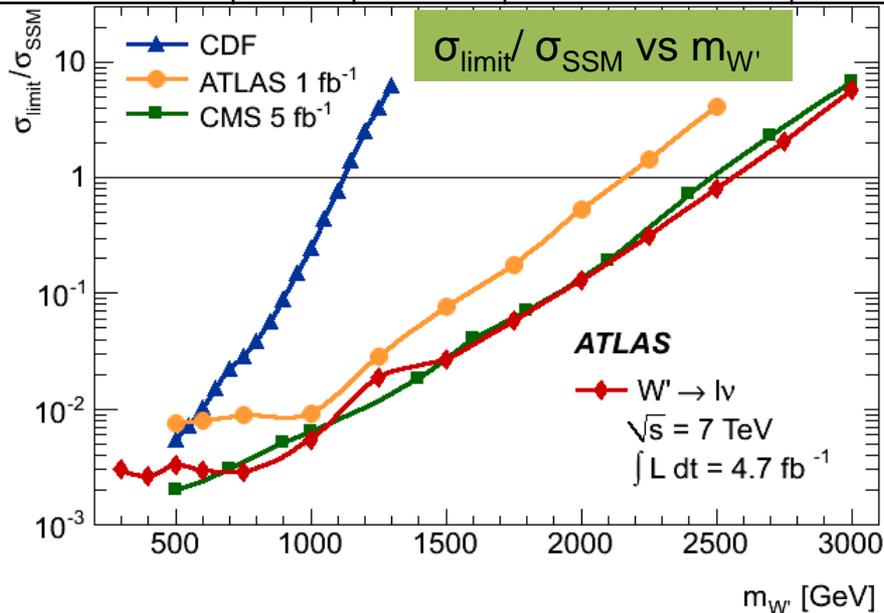
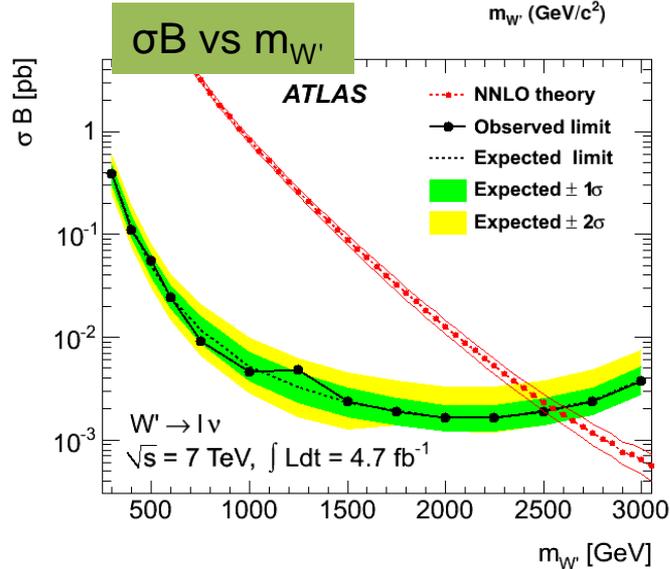
Результаты поисков W'



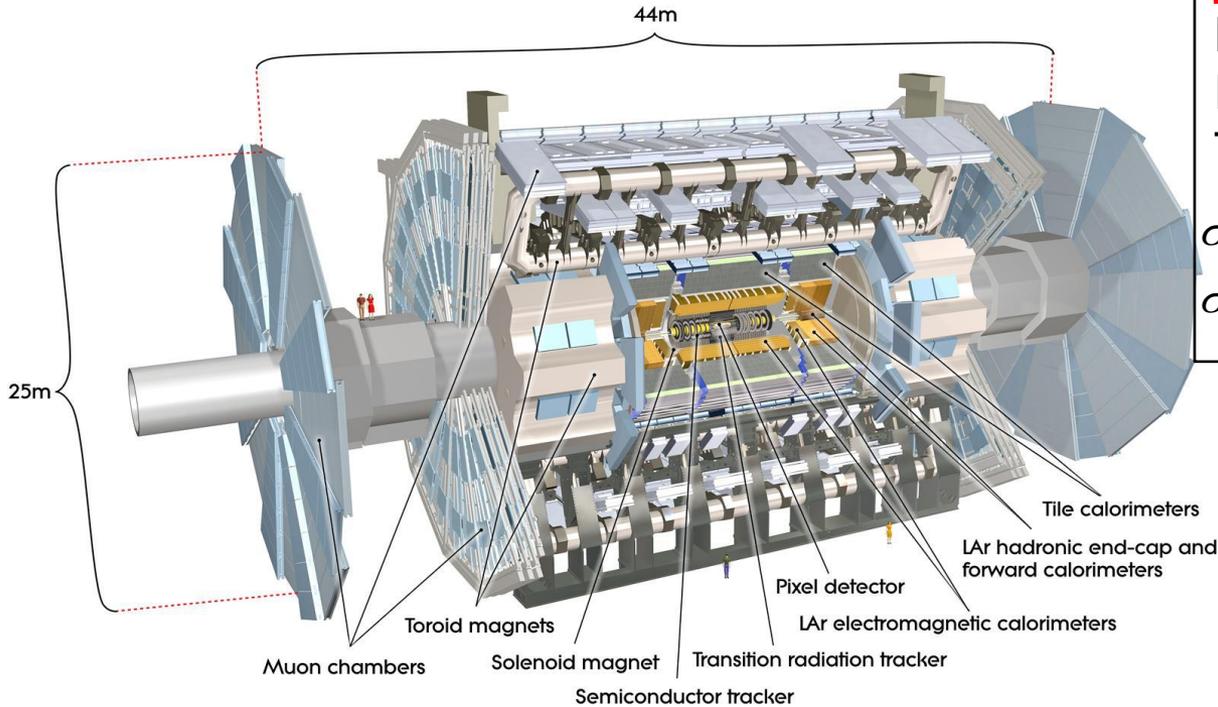
- ❑ Поиски W' бозонов проводились в экспериментах CDF, D0, CMS, ATLAS
- ❑ Существование W' не было обнаружено. Были установлены пределы на сечения рождения и массы W' бозонов

❑ Исключены массы W' ниже:

Эксперимент	D0	CDF	CMS (7 ТэВ)	ATLAS (7 ТэВ)
Масса W' , ТэВ	1.0	1.12	2.5	2.55



Детектор ATLAS



Внутренний детектор

Помещен в поле 2 Тл

Pixel & SCT: $|\eta| < 2.5$

TRT: $|\eta| < 2.0$

$$\sigma(p_T) / p_T = 0.034\% p_T [GeV] \oplus 1.5\%$$

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

Калориметр

$|\eta| < 4.9$

LAr EM: $|\eta| < 3.2$

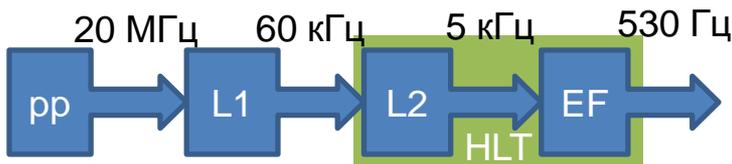
Tile: $|\eta| < 1.7$

HEC: $1.5 < |\eta| < 3.2$

Fcal: $3.1 < |\eta| < 4.9$

$$\sigma(E) / E \sim 10\% / \sqrt{E} \oplus 0.7\%$$

Триггер – три уровня:



Мюонный спектрометр $|\eta| < 2.7$

MDT: $|\eta| < 2.7$ RPC: $|\eta| < 1.05$

CSC: $2.0 < |\eta| < 2.7$ TGC: $1.05 < |\eta| < 2.4$

$$\sigma(p_T) / p_T = 4\% (10 GeV) \div 10\% (1 TeV)$$

Реконструкция событий

□ Осуществляется поиск состояний с электроном и недостающей поперечной энергией

□ Наблюдаемая величина – это поперечная масса такого состояния:

$$m_T = \sqrt{2p_T^e E_T^{miss} (1 - \cos \varphi_{ev})}$$

□ Ищется значимое превышение данных над предсказаниями СМ, путем сравнения числа событий выше определенного порога по m_T (“counting experiment”)

□ Если превышение не было обнаружено, то ставятся пределы на сечение рождения бозонов

□ Для правильной реконструкции поперечной массы необходимо правильно реконструировать электрон и недостающую поперечную энергию

Реконструкция и идентификация электронов

❑ **Реконструкция:** построение электронных кандидатов (кластер + трек)

❑ **Идентификация:** подавление фона от КХД струй, конверсии и т.д.:

- ряд отборов, основанных на информации о форме электромагнитных ливней в калориметре и качестве треков
- критерии отборов зависят от η и E_T
- существует 3 набора критериев



❑ **Изоляция:** калориметрическая и трековая

- равна сумме E_T энерговыделения (p_T треков) в конусе $\Delta R = \sqrt{\Delta\eta^2 + \Delta\phi^2}$ вокруг электрона в калориметре (внутреннем детекторе) за исключением E_T кластера (p_T трека) электрона
- применяется во многих анализах для дополнительного подавления фона

Реконструкция E_T^{miss}

□ Определяется из нарушения баланса импульсов в плоскости, перпендикулярной пучку (XY)

□ Состоит из двух компонент:

$$E_{x(y)}^{miss} = E_{x(y)}^{miss,calo} + E_{x(y)}^{miss,\mu}$$

□ Калориметрическая компонента состоит из:

$$E_{x(y)}^{miss,calo} = E_{x(y)}^{miss,e} + E_{x(y)}^{miss,\gamma} + E_{x(y)}^{miss,\tau} + E_{x(y)}^{miss,jets} + (E_{x(y)}^{miss,calo,\mu}) + E_{x(y)}^{miss,SoftTerm}$$

$E_{x(y)}^{miss,calo,\mu}$ - учитывается только для мюонов, расположенных в конусе $\Delta R < 0.3$ около реконструированной струи

□ Поперечная недостающая энергия и угол определяются как:

$$E_T^{miss} = \sqrt{(E_x^{miss})^2 + (E_y^{miss})^2}, \varphi^{miss} = \arctan(E_x^{miss}, E_y^{miss})$$

Сигнал и фон

Сигнальные образцы:

□ W' & W^* для ряда масс в диапазоне 300 – 4000 ГэВ

Сечение \ Масса [ГэВ]	500	1000	1500	2000	2500	3000
W' , σ_B [пбн]	21.4	1.16	0.146	0.0244	0.00509	0.00144
W^* , σ_B [пбн]	16.2	0.882	0.108	0.0171	0.00290	0.00049

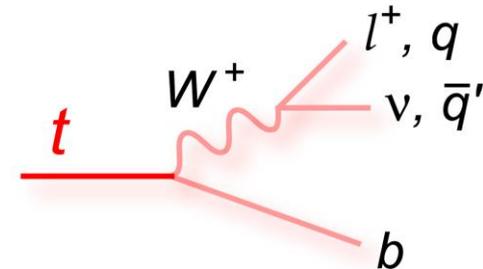
Фон:

□ $W \rightarrow l\nu$ – доминирующий и подавляемый

□ Дибозоны (WW , WZ , ZZ), $t\bar{t}$, t кварк – имеют реальную E_T^{miss}

□ $Z \rightarrow ll$ – E_T^{miss} возникает из-за того, что один из лептонов не реконструирован

□ Струи КХД – оценивается из данных



Сечения с учетом NNLO поправок

Процесс	σ_B [пбн]
$W \rightarrow l\nu$	12190
$Z \rightarrow ll$	1120
$t\bar{t} \rightarrow lX$	137.3

Отбор событий

- ❑ Рассматриваются только «хорошие» данные. Интегральная светимость для таких данных составляет 20.3 фбн^{-1}
- ❑ Триггер: `g120_loose` – фотонный с порогом по E_T 120 ГэВ и `loose` идентификацией
- ❑ Требования, накладываемые на электрон в событии:
 - Реконструирован стандартным алгоритмом
 - Вызвал срабатывание триггера
 - $p_T > 125 \text{ ГэВ}$
 - $|\eta| < 2.47$, исключая $1.37 < |\eta| < 1.52$
 - `Medium` критерий идентификации
 - Изолирован: $\sum E_T^{\Delta R=0.2} < 0.007 p_T + 5 \text{ ГэВ}$
- ❑ События, в которых присутствуют дополнительные изолированные `Medium` электроны с $p_T > 20 \text{ ГэВ}$, не рассматриваются
- ❑ Требования, накладываемые на E_T^{miss} в событии:
 - $E_T^{\text{miss}} > 125 \text{ ГэВ}$

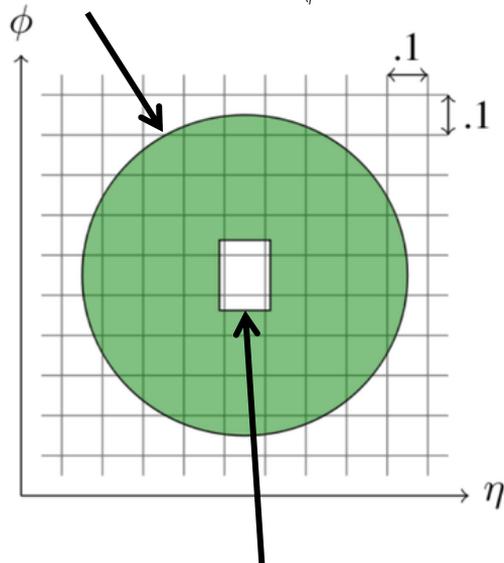
Выбор триггера

- ❑ В электронном триггере используется информация о кластерах в электромагнитном калориметре и треках во внутреннем детекторе:
 - Строятся электронные кандидаты (кластер+трек)
 - На уровнях L2 и EF применяются критерии идентификации **loose**, **medium** и **tight**
- ❑ Для оценки КХД фона триггер должен иметь критерий идентификации **loose**, т.е. быть слабее критерия идентификации **medium**, применяемого в анализе
- ❑ Среди существующих электронных триггеров не было подходящих кандидатов
- ❑ Однако, фотонный триггер отличается от электронного только тем, что в нем не используется трековая информация
- ❑ Было решено использовать фотонный триггер с порогом E_T **120 ГэВ** и **loose** идентификацией

Электронная изоляция

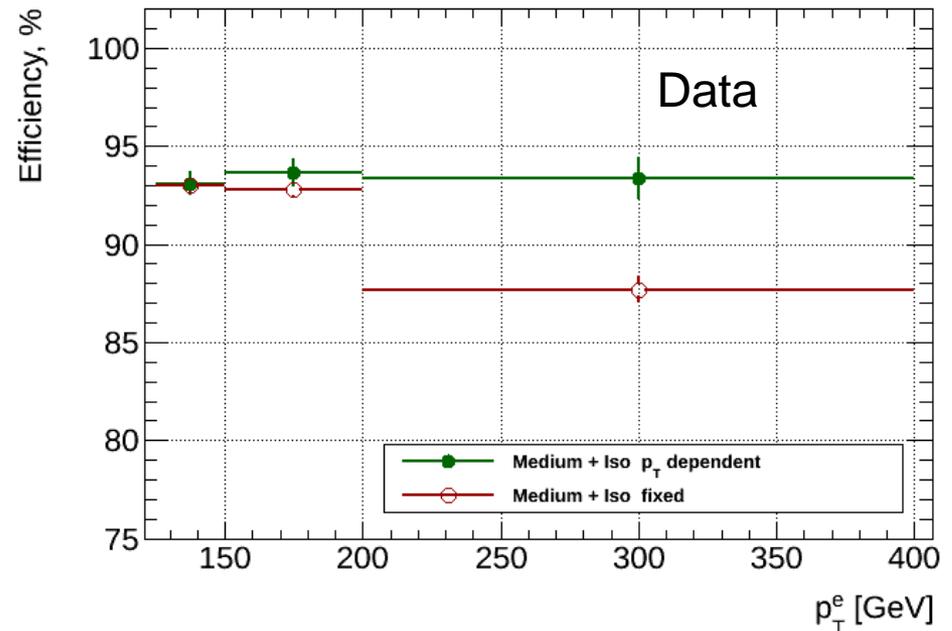
- С возрастанием энергии электронов размеры кластеров возрастают
 → Увеличивается утечка энергии за пределы центральной области
 → Изоляция ухудшается

Конус $\Delta R = \sqrt{\Delta\eta^2 + \Delta\phi^2}$



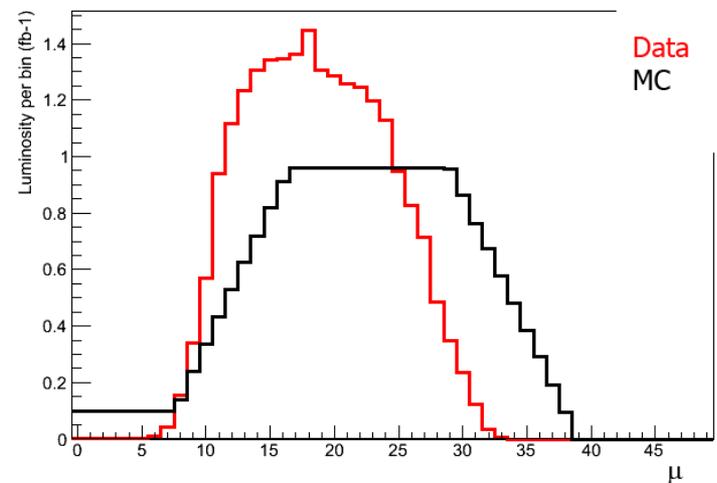
Центральная область (5×7)
 $\eta \times \phi = 0.125 \times 0.175$

fixed: $\Sigma E_T^{\Delta R=0.4} < 9 \text{ ГэВ}$
 p_T dependent: $\Sigma E_T^{\Delta R=0.2} < 0.007 p_T + 5 \text{ ГэВ}$



Поправки к Монте-Карло

- ❑ Монте-Карло (МК) образцы должны как можно лучше описывать данные
- ❑ Однако на этапе генерации МК трудно полностью предсказать, как будут вести себя данные
- ❑ Поэтому необходимо поправлять параметры, заложенные в МК, для того, чтобы приблизить их к параметрам в данных
- ❑ Все поправки приводят к систематическим ошибкам
- ❑ Pileup: перевзвешивание МК, используя распределение по числу взаимодействий μ
- ❑ Шкала энергии $E_{\text{data}} = (1+\alpha)E_{\text{MC}}$
- ❑ Размытие (smearing) по энергии для уточнения разрешения, заложенного в МК
- ❑ Поправки к эффективности реконструкции и идентификации электронов (scale factors)
- ❑ Поправки более высоких порядков к сечениям процессов (к-факторы)



Поправки к эффективности

□ Эффективности реконструкции и идентификации в данных и МК определяются методом Tag&Probe

□ В метода Tag&Probe необходимо получить набор данных, который бы содержал объекты, с большой вероятностью являющиеся электронами. Для этого:

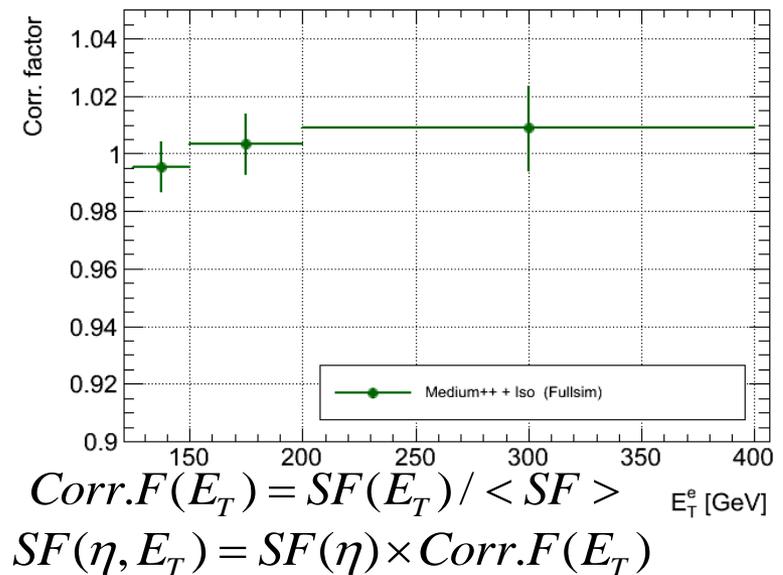
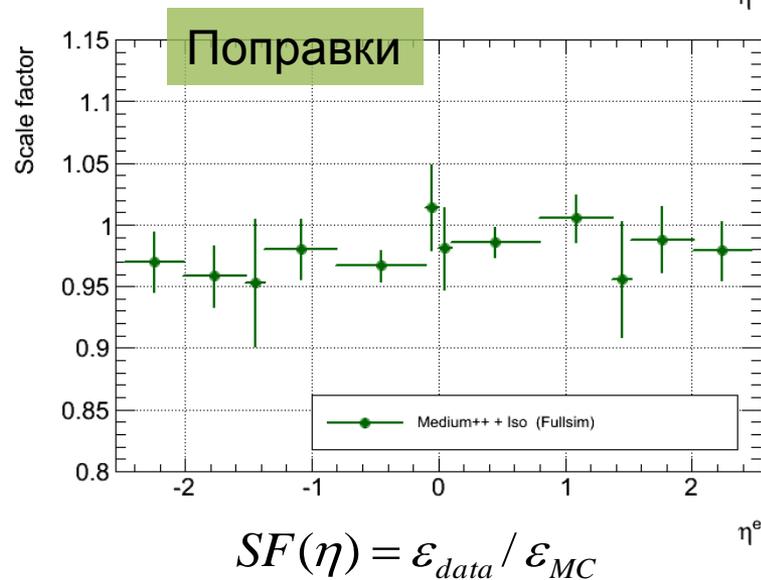
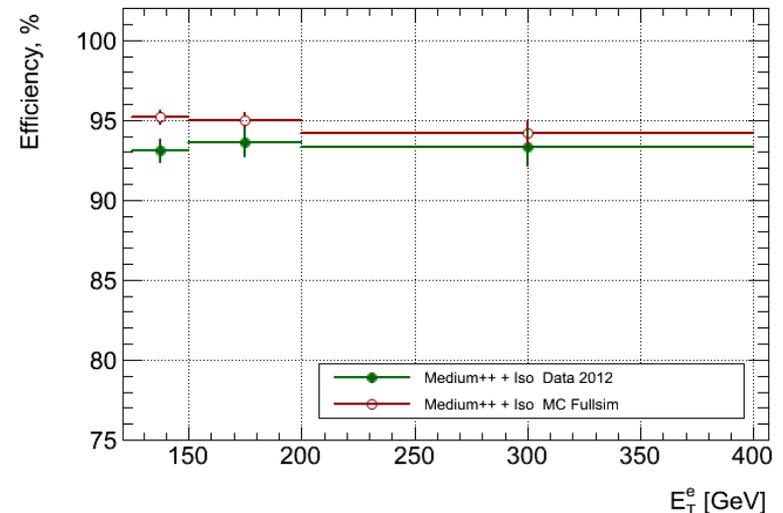
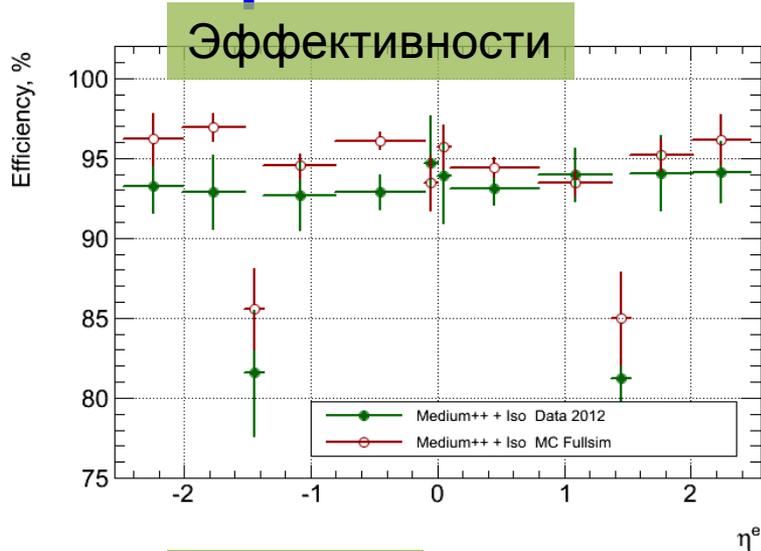
- Рассматривается процесс $Z \rightarrow ee$
- Отбираются пары e^+e^- в массовом окне около Z пика; вычитается фон
- Один из $e^{+(\cdot)}$ (**tag**) должен пройти критерий идентификации **tight**
- К другому (**probe**) не применяются критерии идентификации

□ Эффективность: $\epsilon = \frac{N_{probes}^{passedcut}}{N_{probes}}$

□ Систематические вариации:

- Границы массового окна
- Отбор *tag*
- Templates для вычитания фона

Поправки к эффективности



Поправки к сечениям

❑ Моделирование происходит либо в LO, либо в NLO. Необходимо поправить сечение до более высоких порядков

❑ Для W и W' образцов применяются k -факторы, зависящие от массы

❑ КХД поправки:

$$W: \quad k = \sigma B_{NNLO} / \sigma B_{NLO} \qquad W': \quad k = \sigma B_{NNLO} / \sigma B_{LO}$$

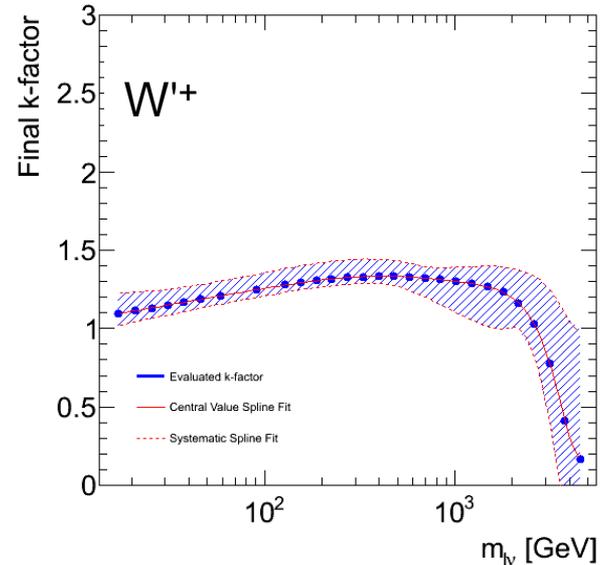
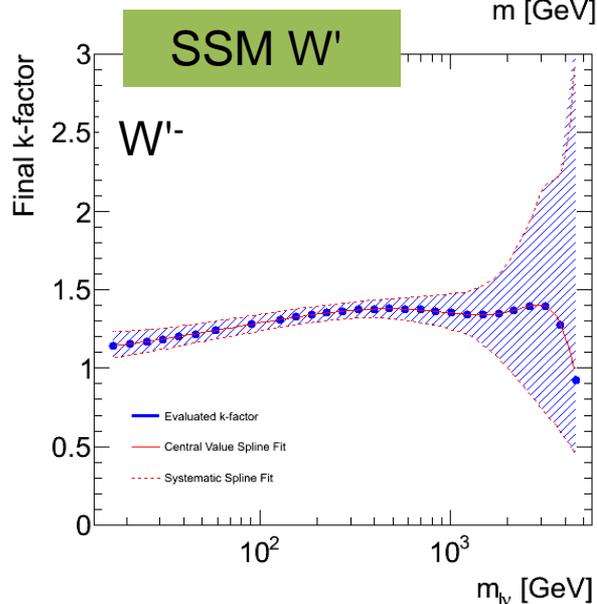
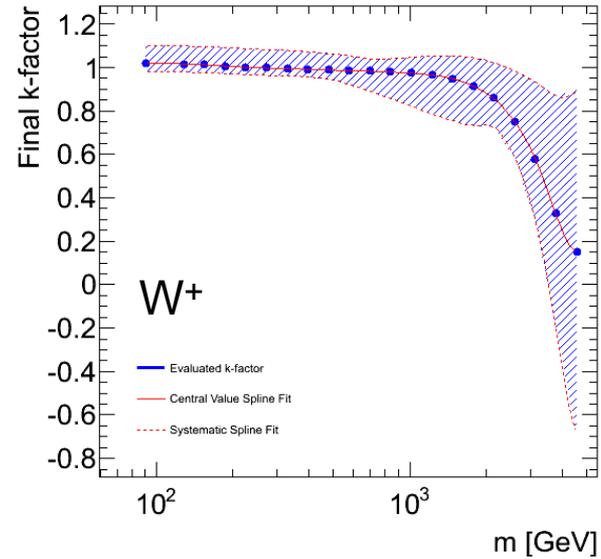
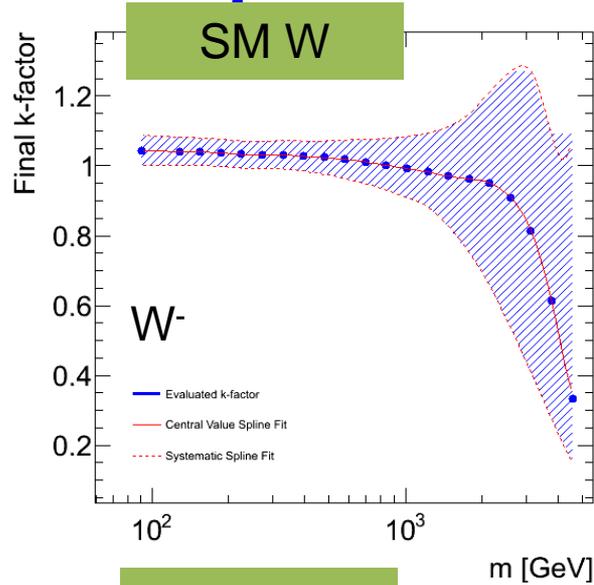
- Используется генератор WZPROD для вычисления числителя и знаменателя
- Наборы pdf: CT10 NLO (W), MSTW2008 LO (SSM W'), MSTW2008 NNLO (числ.)
- Систематика: PDF + α_s , шкала нормализации и факторизации, выбор наборов pdf

❑ Электрослабые поправки:

- Применяются для W образцов (Powheg + Pythia8), в которых уже есть FSR
- Не применяется для W' из-за сильной модельной зависимости
- Используется MCSANC для вычисления поправок: ISR, ISR/FSR интерференция, однопетлевые логарифмические поправки
- Систематика: 2 разных подхода к вычислению поправок

❑ При вычислении сечений в NNLO закладывается неопределенность в измерении энергии пучка 0.66%

Поправки к сечениям



Оценка КХД фона

- ❑ В анализе использовался т.н. матричный метод, в котором оценивается число “fake” электронов, прошедших W' отбор
- ❑ Для этого ослабляется идентификационный критерий в W' отборе
- ❑ То есть определяется 2 отбора данных:
 - “tight” – стандартный W' отбор
 - “loose” – в W' отборе medium + isolation заменяется на loose

- ❑ Эффективности tight отбора для “real” и “fake” электронов:

$$\mathcal{E}_{R(F)} = \frac{N_{tight}^{real(fake)}}{N_{loose}^{real(fake)}}$$

- ❑ Наблюдаемые величины (слева) можно связать с истинными (справа):

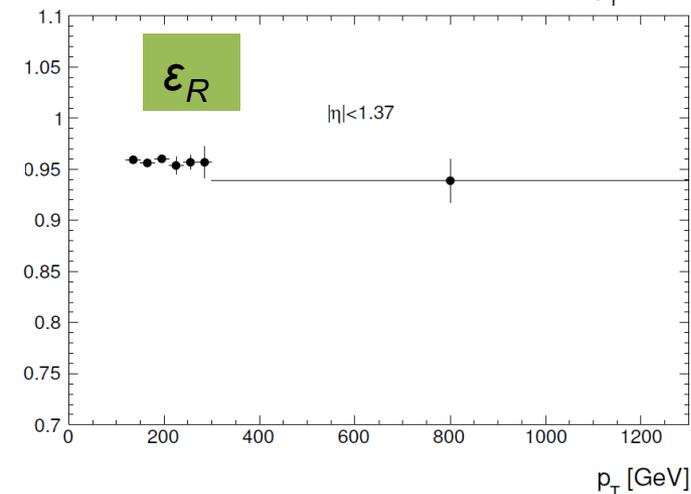
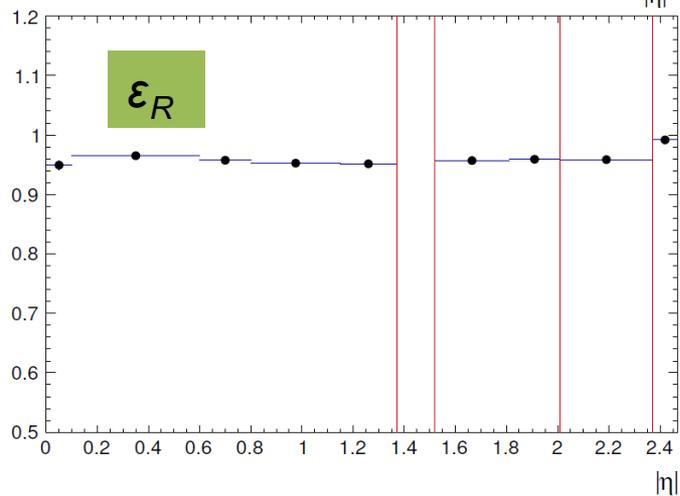
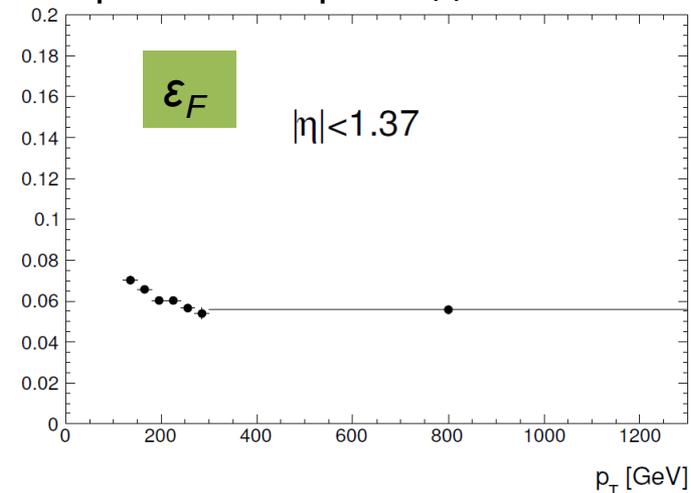
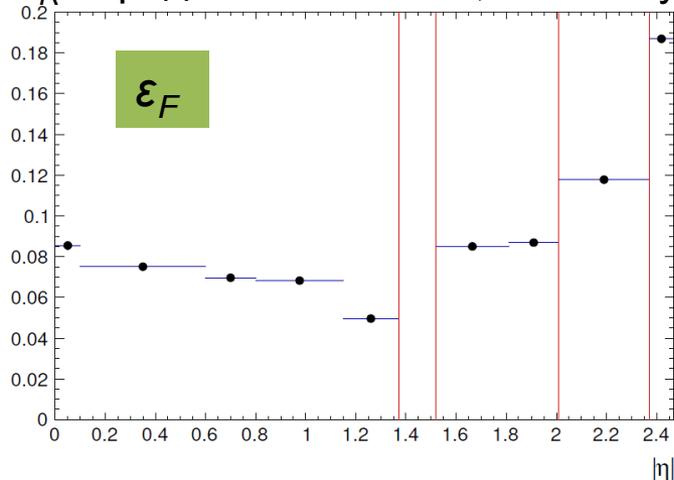
$$\begin{pmatrix} N_T \\ N_L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathcal{E}_R & \mathcal{E}_F \\ 1 - \mathcal{E}_R & 1 - \mathcal{E}_F \end{pmatrix} \begin{pmatrix} N_R \\ N_F \end{pmatrix} \quad \begin{array}{l} R - \text{real}; F - \text{fake} \\ T - \text{tight}; L - \text{loose (но не tight)} \end{array}$$

- ❑ Число фоновых событий КХД: $N_{QCD} = \mathcal{E}_F N_F = \frac{\mathcal{E}_F \mathcal{E}_R}{\mathcal{E}_R - \mathcal{E}_F} N_L + \frac{\mathcal{E}_F (\mathcal{E}_R - 1)}{\mathcal{E}_R - \mathcal{E}_F} N_T$

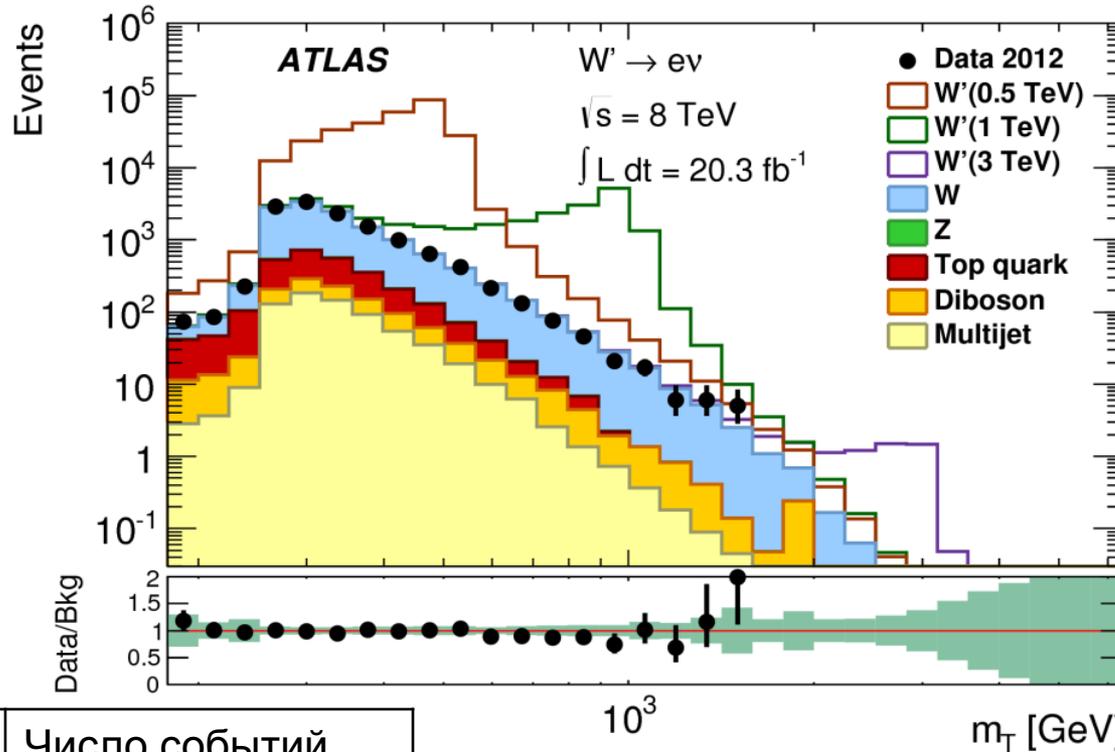
- ❑ Таким образом, необходимо определить эффективности \mathcal{E}_R и \mathcal{E}_F

Оценка КХД фона

- ϵ_F определяется из данных; для этого отбирается образец, «обогащенный» fake электронами
- ϵ_R определяется из МК; используются электроны от W распада



Распределение m_T



Фон	Число событий
$W \rightarrow e\nu, \nu\nu$	2.65 ± 0.10
$Z \rightarrow ee, \tau\tau$	0.00163 ± 0.00022
Diboson	0.27 ± 0.23
Top quark	0.0056 ± 0.0009
Multi-jet	0.066 ± 0.020
Сумма	2.99 ± 0.25

Вклады различных фонов в число событий с $m_T > 1500 \text{ ГэВ}$ (область для поиска $m = 2 \text{ ТэВ } W'$)

В данных наблюдается 3 события с $m_T > 1500 \text{ ГэВ}$

Вычисление пределов

□ Для постановки верхних пределов на σB рождения W/W^* применялся байесовский подход

□ Теорема Байеса в общем случае определяет условную вероятность:

$$P(A | B) = \frac{P(B | A)P(A)}{P(B)}$$

□ В нашем случае теорема Байеса запишется как:

$$P_{post}(\sigma B | N_{obs}) = N L_B(N_{obs} | \sigma B) P_{prior}(\sigma B)$$

N – нормировочный коэффициент ($\int_0^{\infty} P_{post}(x) dx = 1$); $P_{prior}(\sigma B) = const(\sigma B)$ – плоский prior;

$L_B(N_{obs} | \sigma B)$ – интегрированная функция максимального правдоподобия; N_{obs} – число наблюдаемых событий в данных; σB – сечение, умноженное на бренчинг

□ Предел для σB для 95% доверительной вероятности определяется из выражения:

$$CL_{Bayes} = \int_0^{\sigma B} P_{post}(x | N_{obs}) dx \quad \text{при условии} \quad CL_{Bayes} = 0.95$$

Вычисление пределов

□ Используя распределение Пуассона, функция максимального правдоподобия наблюдать N_{obs} событий:

$$L(N_{obs} | \sigma B) = \frac{N_{exp}^{N_{obs}} e^{-N_{exp}}}{N_{obs}!}$$

□ Где N_{exp} – число ожидаемых событий выше некоторого порога m_{Tmin} :

$$N_{exp} = \varepsilon_{sig} L_{int} \sigma B + N_{bkg}$$

L_{int} – интегральная светимость

N_{bkg} – число фоновых событий

ε_{sig} – эффективность отбора сигнала

□ Неопределенности учитываются путем умножения $L(N_{obs} | \sigma B)$ на плотности вероятностей “nuisance” параметров $g_i(\theta_i)$, где θ_i – nuisance параметр

□ Интегрированная функция правдоподобия по nuisance параметрам:

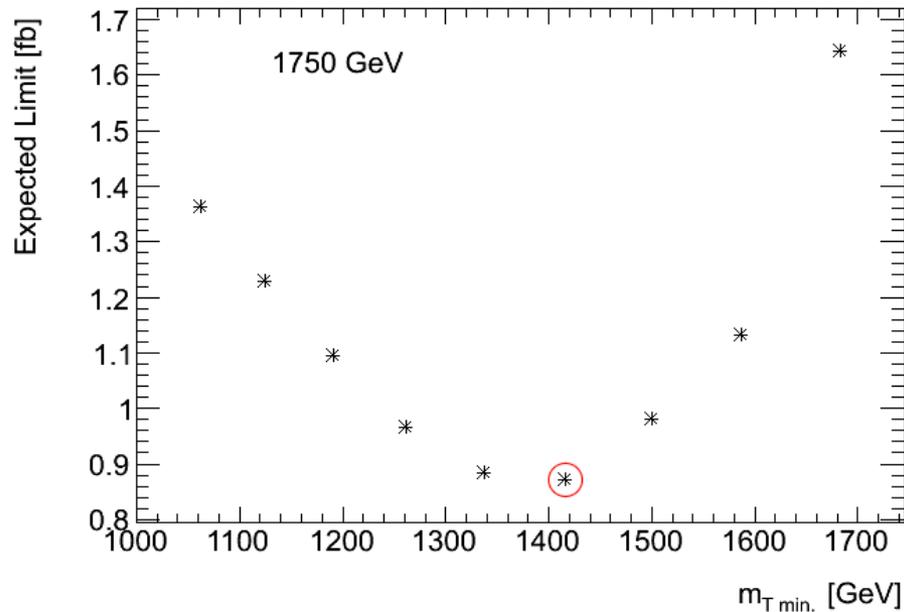
$$L_B(N_{obs} | \sigma B) = \int L(N_{obs} | \sigma B) \prod g_i(\theta_i) d\theta_i$$

□ Для $g_i(\theta_i)$ используются логнормальные распределения, а в качестве nuisance параметров выбираются L_{int} , ε_{sig} и N_{bkg}

Вычисление пределов

□ Таким образом, для набора масс W'/W^* в диапазоне 300 – 4000 ГэВ определялись эффективности отбора сигнала (ϵ_{sig}), число отобранных событий в данных (N_{obs}) и число фоновых событий (N_{bkg}) выше порогов $m_{T\text{min}}$

□ Пороги $m_{T\text{min}}$ оптимизировались для каждой массы W'/W^* так, чтобы ожидаемый предел на σB был минимален:



Систематика

□ Относительные неопределенности для эффективности отбора W' бозонов (ϵ_{sig}) с массой 2000 ГэВ и для числа отобранных фоновых событий (N_{bkg}) с $m_T > 1500$ ГэВ

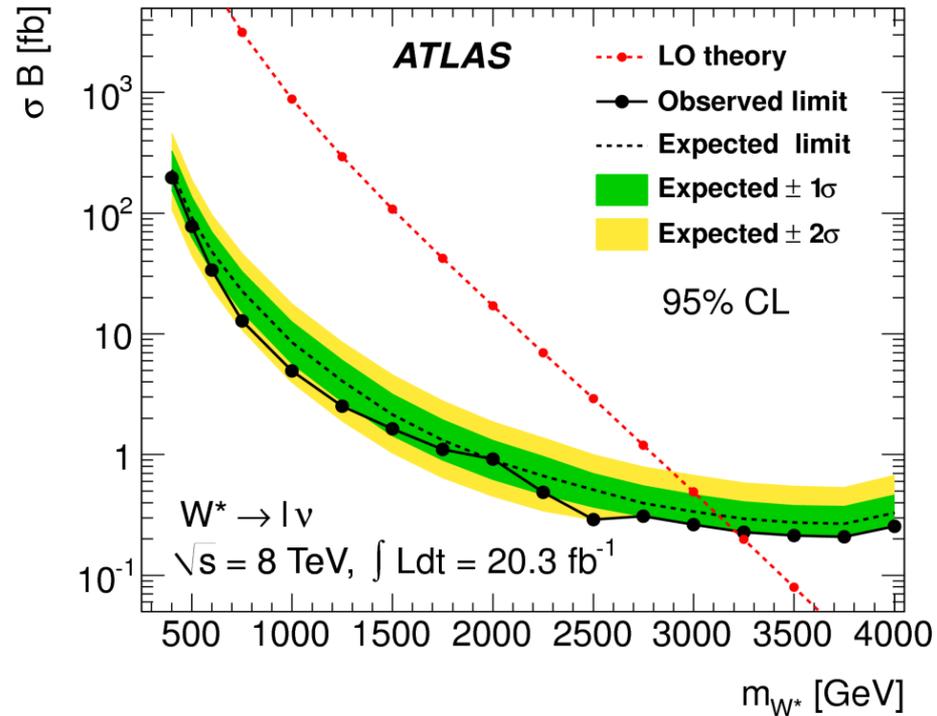
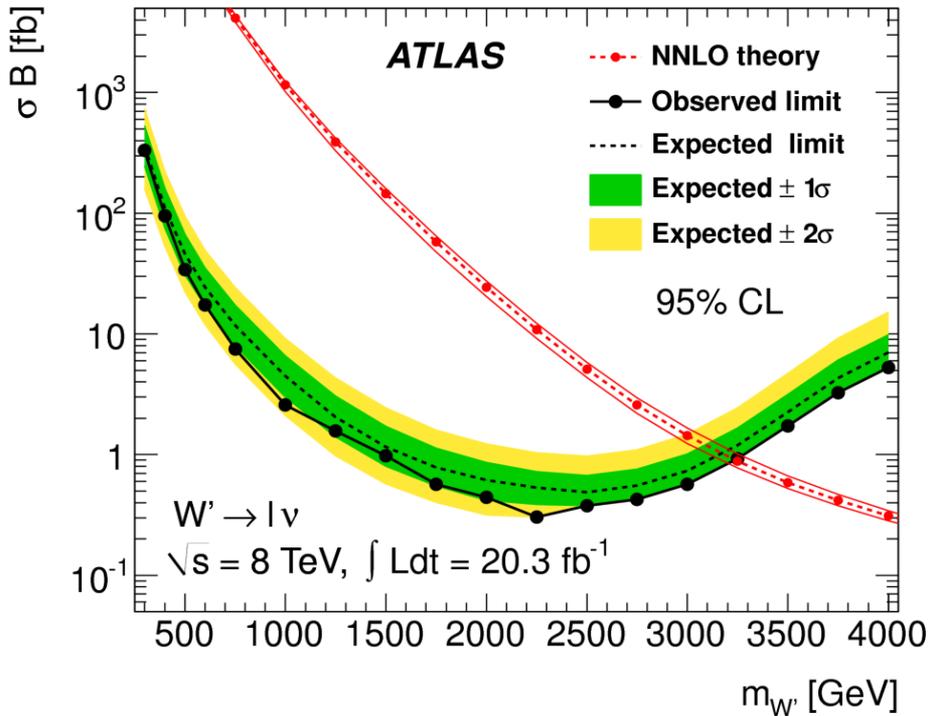
Источник неопределенности	$\Delta\epsilon_{sig}/\epsilon_{sig}$ [%]	$\Delta N_{bkg}/N_{bkg}$ [%]
Эффективность реконструкции, идентификации, триггера	2.5	2.7
Энергетическое разрешение	0.2	1.9
Шкала энергии	1.2	3.5
Шкала и разрешение E_T^{miss}	0.1	1.2
Энергия пучка	0.5	2.8
Оценка КХД фона	-	2.2
Статистика Монте-Карло	0.9	8.5
Поправки к сечениям	2.9	18
Итоговая неопределенность	4.2	21

□ Относительная неопределенности для интегральной светимости ($\Delta L_{int}/L_{int}$) = 2.8%

Пределы W' и W^*

- ❑ Установлены пределы на сечение рождения W' и W^* для 95% доверительной вероятности
- ❑ Пределы, установленные для электронного и мюонного каналов, были объединены, в предположении, что вероятность распада одинакова для обоих каналов
- ❑ При объединении учитывалась корреляция параметров L_{int} , ε_{sig} и N_{bkg} между двумя каналами
- ❑ L_{int} – 100% корреляция, ε_{sig} и N_{bkg} – частичная корреляция, связанная с неопределенностью оценки сечений
- ❑ Без учета корреляции наблюдаемые пределы улучшились бы на 25 – 30% для малых масс, на несколько процентов для среднего диапазона масс и на ~10% для больших масс

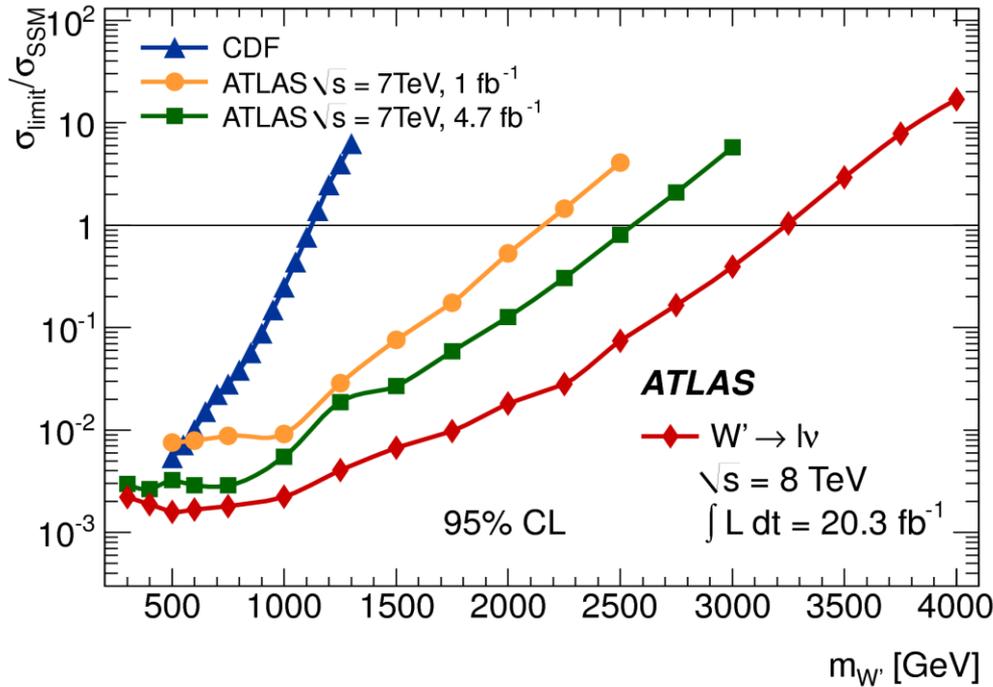
Пределы W' и W^*



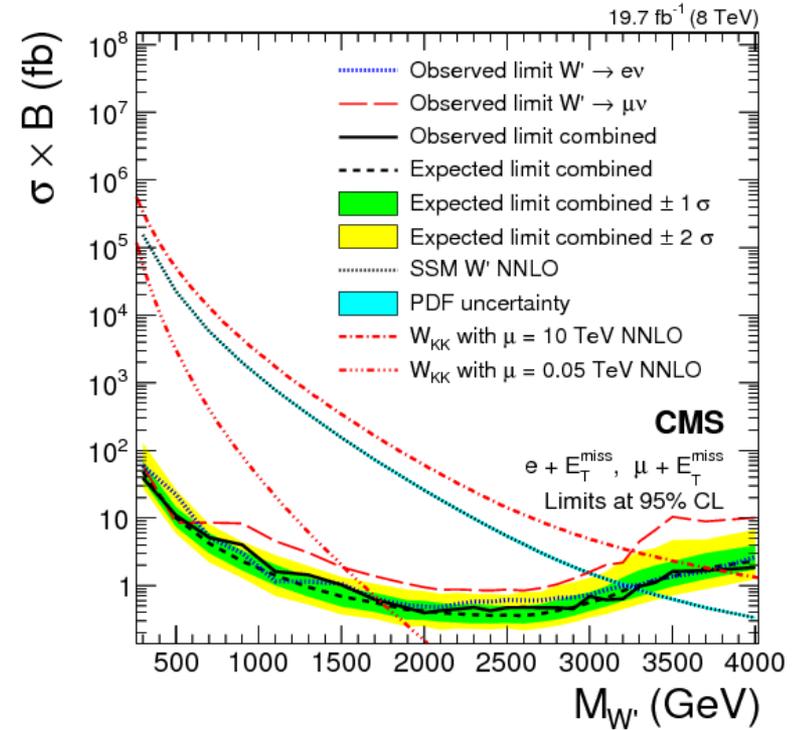
Нижние пределы по массе

Модель	Ожидаемый [ТэВ]	Наблюдаемый [ТэВ]
$W' \rightarrow l\nu$	3.17	3.24
$W^* \rightarrow l\nu$	3.12	3.21

Сравнение пределов



ATLAS: $m_{W'} < 3.24\text{ ГэВ}$



CMS: $m_{W'} < 3.28\text{ ГэВ}$

Заключение

- ❑ Проведен и завершен анализ данных 2012 года, накопленных в эксперименте ATLAS при $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$ (20.3 фбн⁻¹)
- ❑ Не было найдено новых частиц в событиях с одним лептоном и недостающим поперечным импульсом
- ❑ Были установлены пределы на сечения рождения W' и W^* бозонов
- ❑ Результаты работы опубликованы в Journal of High Energy Physics:
ATLAS Collaboration, Search for new particles in events with one lepton and missing transverse momentum in pp collisions at $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$ with the ATLAS detector, JHEP 09 (2014) 037

Публикации

Поиск W/W^* бозонов:

1. ATLAS Collaboration, *Search for new particles in events with one lepton and missing transverse momentum in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector*, JHEP 09 (2014) 037
2. ATLAS Collaboration, *ATLAS search for a heavy gauge boson decaying to a charged lepton and a neutrino in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV*, Eur. Phys. J. C 72 (2012) 2241
3. ATLAS Collaboration, *Search for a heavy gauge boson decaying to a charged lepton and a neutrino in 1 fb^{-1} of pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV using the ATLAS detector*, Phys. Lett. B 705 (2011) 28

Конференции:

1. “*Searches for Exotics with the ATLAS Detector*”, Hadron Structure and QCD, June 30 – July 4, 2014, Gatchina, Russia (доклад)
2. “*Searches for the physics beyond Standard Model with the ATLAS detector*”, New Trends In High-Energy Physics, September 23 - 29, 2013, Alushta, Crimea, Ukraine (доклад)
3. “*Evolution and Performance of Electron and Photon Triggers in ATLAS in the year 2011*”, IEEE 18th Real Time Conference 2012, Berkeley, USA (постер)

Личный вклад

- ❑ Координирование работы Lepton+ E_T^{miss} группы эксперимента ATLAS в 2013-2014 годах:
 - проведение еженедельных совещаний
 - подготовка статьи (редактирование, обсуждение с EdBoard и ATLAS)

- ❑ Проведение анализа в канале $e+E_T^{\text{miss}}$
 - оптимизация отборов
 - анализ данных, сигнальных и фоновых образцов Монте-Карло

- ❑ Определение поправок на эффективности электронной идентификации и триггера (scale factors)

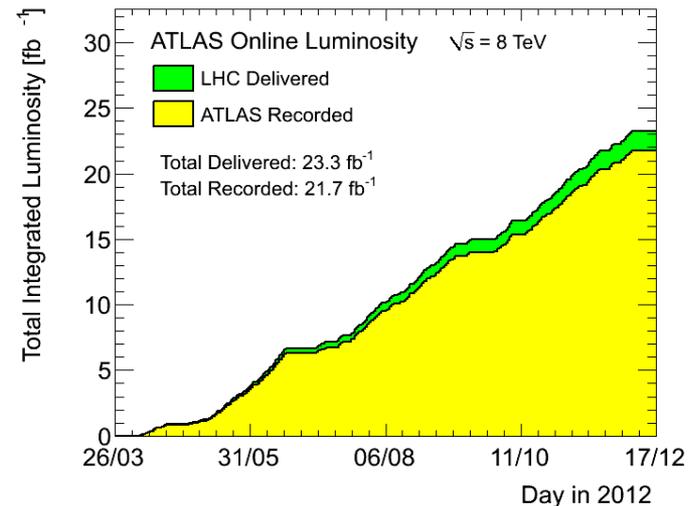
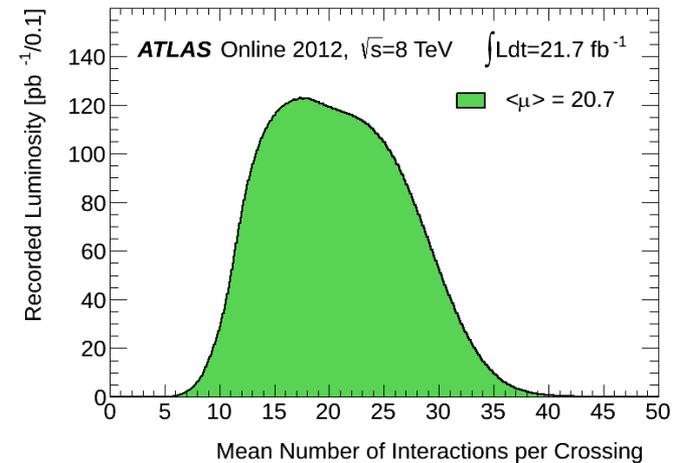
- ❑ Участие в вычислении пределов

- ❑ Оптимизация порогов $m_{T\text{min}}$ для электронного канала

Дополнительные слайды

БАК и ATLAS в 2012 году

- ❑ Надежная работа БАК и детектора ATLAS в 2012 году
- ❑ Столкновения протонов при $\sqrt{s} = 8$ ТэВ
- ❑ 50 нс расстояние между банчами
- ❑ ~ 20 взаимодействий на одно пересечение пучков
- ❑ Пиковая светимость $7.73 \times 10^{33} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$
- ❑ Накоплено больше 20 фбн^{-1}



Реконструкция электронов

□ Происходит в двух режимах:

- *online* – триггерная система (до отбора события)
- *offline* – программное обеспечение (после отбора события)

□ Online (триггер):

- L1 (калориметр), L2+EF (калориметр и внутренний детектор)
- L1 – определяются RoI (Regions of Interest) размерами $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0.4 \times 0.4$
- L2 и EF – строятся кластеры в пределах RoI, которые сшиваются с треками
- Фотонный триггер отличается только тем, что в нем не используется информация о треках

□ Offline:

- Все пространство калориметра поделено на ячейки $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0.025 \times 0.025$
- Методом скользящего окна производится поиск начальных кластеров с $E_T > 2.5$ ГэВ, размерами 3×7
- Если начальному кластеру сопоставлен трек с $p_T > 0.4$ ГэВ, то электронный кандидат построен
- Если треков больше одного, то рассматриваются все пары трек-кластер
- Электронные кластеры затем заново перестраиваются с другими размерами: 3×7 (баррельная часть) и 5×5 (торцевая часть)
- 4-импульс электрона определяется, используя как информацию о кластере (E_T), так и о треке (η, ϕ)

Идентификация электронов

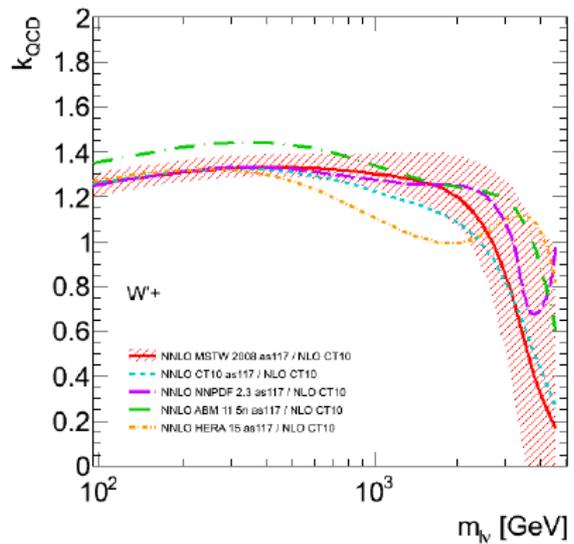
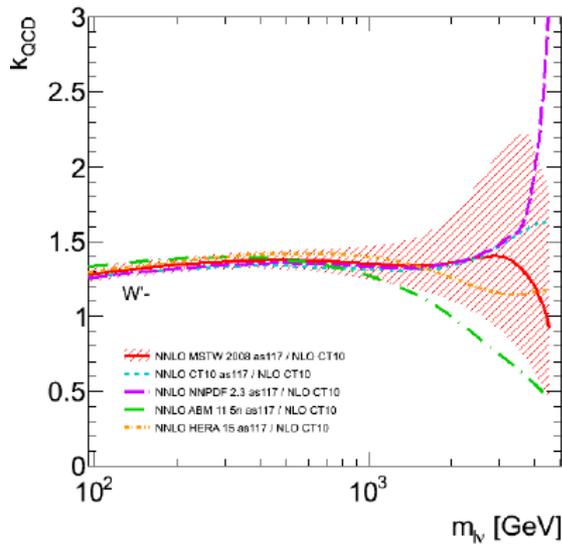
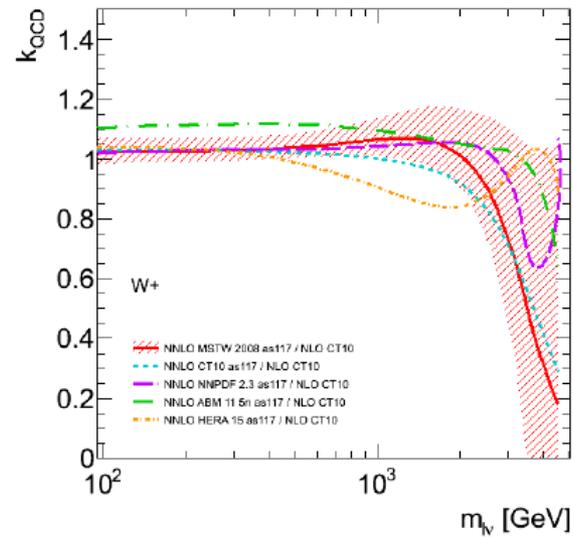
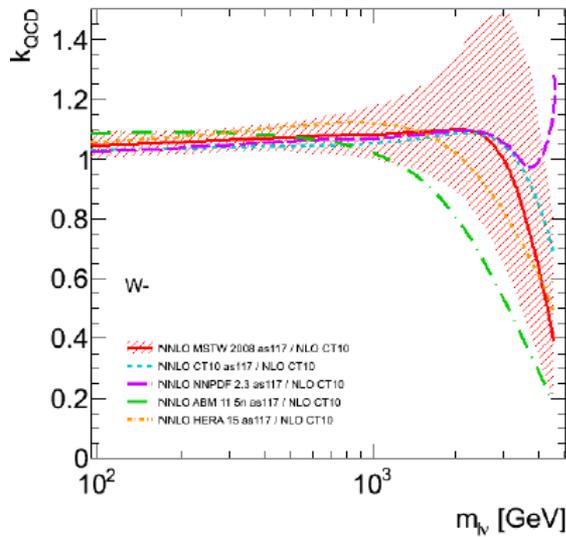
- ❑ Применяется для подавления фона: КХД струи, конверсия, полуплептонные распады адронов и т.п.
- ❑ Происходит также в двух режимах: *online* и *offline*
- ❑ Online (триггер):
 - Применяется только на уровнях L2 и EF
 - Аналогична идентификации *offline*
 - Фотонный триггер отличается только тем, что в нем не используется информация о треках
- ❑ Offline:
 - Применяется ряд отборов, основанных на информации о форме электромагнитных ливней в калориметре и качестве треков
 - Критерии отборов зависят от η и E_T
 - Существует 3 набора критериев
- ❑ Изоляция: калориметрическая и трековая
 - равна сумме E_T (p_T треков) в конусе $\Delta R = \sqrt{\Delta\eta^2 + \Delta\phi^2}$ вокруг электрона в калориметре (внутреннем детекторе) за исключением E_T кластера (p_T трека) электрона
 - применяется во многих анализах для дополнительного подавления фона



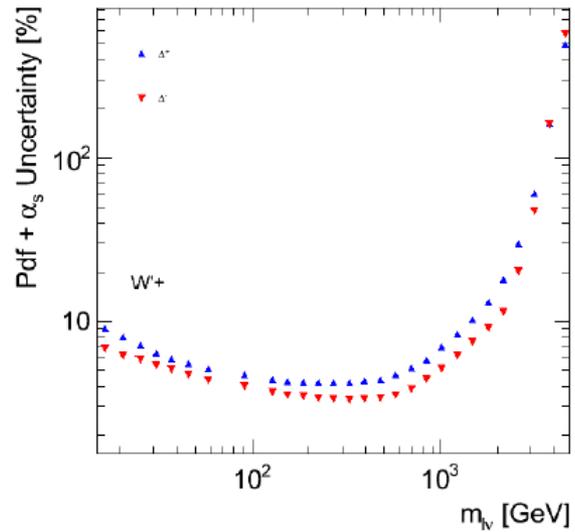
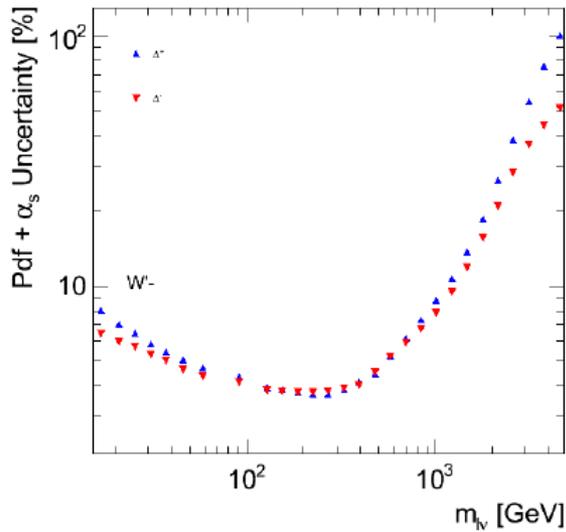
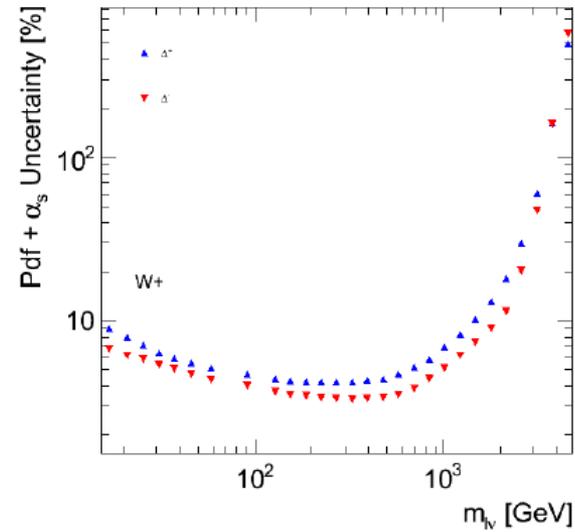
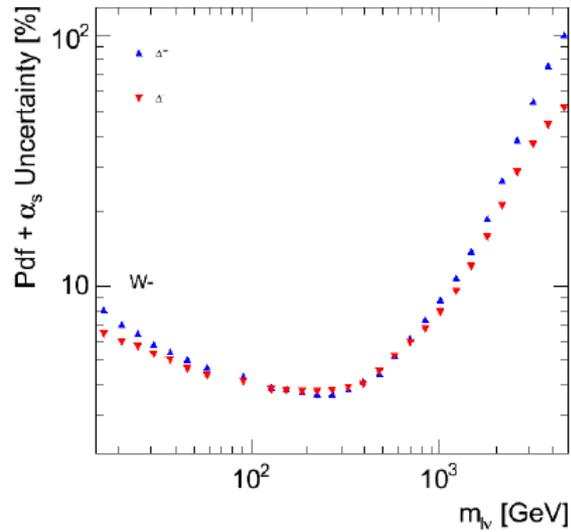
Идентификация: отборы

Тип отбора	Описание переменной
Loose	
Утечка в Адронный калориметр	Отношение E_T в первом слое Адронного калориметра к E_T электромагнитного кластера (используется в областях $ \eta < 0.8$ и $ \eta > 1.37$)
	Отношение E_T в Адронном калориметре к E_T электромагнитного кластера (используется в области $0.8 < \eta < 1.37$)
Средний слой Электромагнитного калориметра	Поперечная ширина электромагнитного ливня
	Отношение энергии в окне 3×7 ячеек к энергии в окне 7×7 ячеек по $\eta \times \phi$
Первый слой Электромагнитного калориметра	Поперечная ширина электромагнитного ливня в окне шириной 20 стрипов по η
	Отношение разницы энергий наибольшего и следующего за ним вкладками в полную энергию кластера к сумме энергий этих вкладов
Качество трека	Число хитов в Пиксельном детекторе
	Полное число хитов в Пиксельном детекторе и Полупроводниковом треkere
Соответствие трека и кластера	$\Delta\eta$ между положением кластера в первом слое Электромагнитного калориметра и экстраполированным треком
Medium	
Третий слой Электромагнитного калориметра	Отношение энергии в третьем слое Электромагнитного калориметра к полной энергии в Электромагнитном калориметре
Качество трека	Число хитов в B-layer
	Поперечный <i>impact</i> параметр
Детектор TRT	Полное число хитов в TRT детекторе
	Отношение хитов с высоким порогом к полному числу хитов в детекторе TRT
Tight	
Соответствие трека и кластера	$\Delta\phi$ между положением кластера в среднем слое Электромагнитного калориметра и экстраполированным треком
	Отношение энергии кластера к импульсу трека
	Вето на кандидаты в электроны, которым соответствуют реконструированные конверсионные фотоны

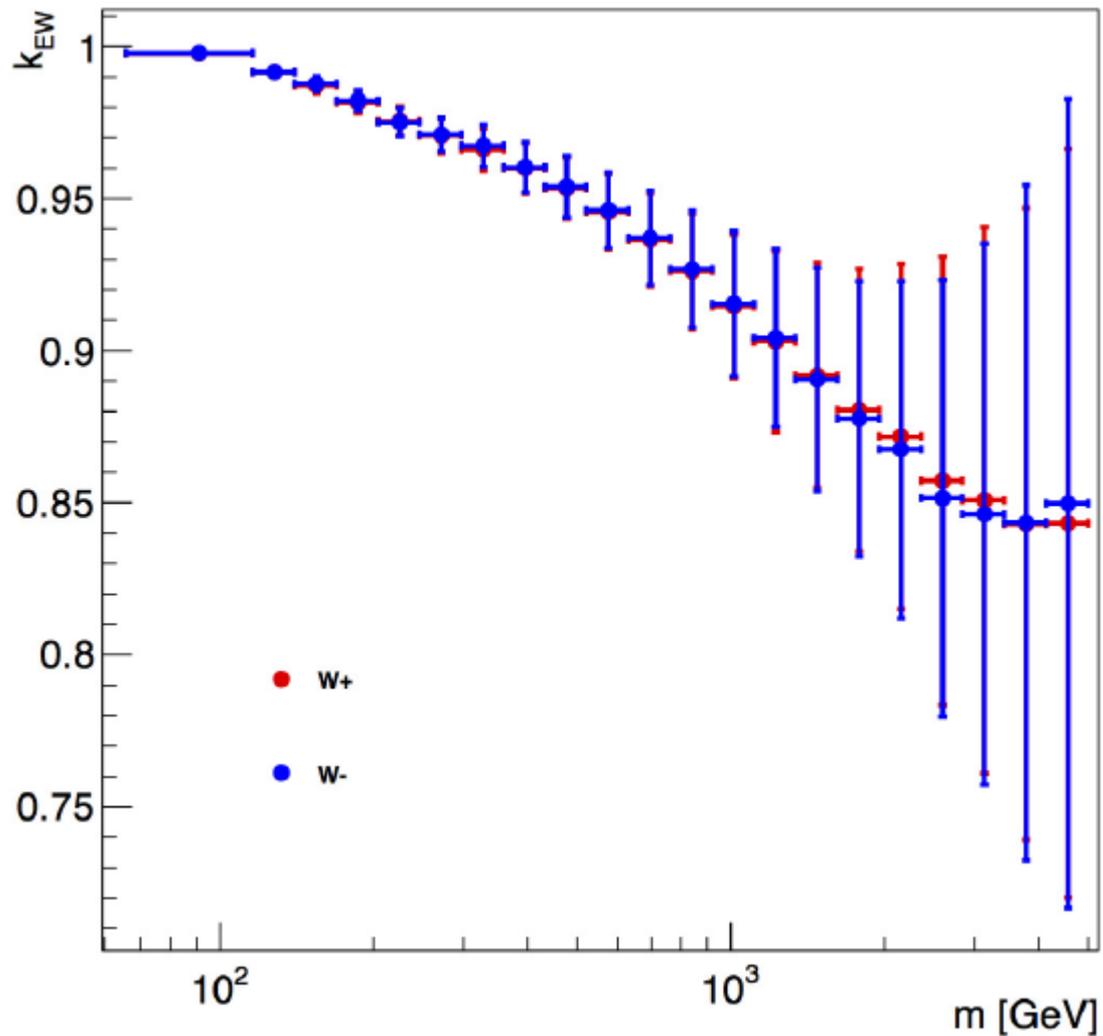
КХД к-факторы



pdf + α_s неопределенности



EW κ -фактор



Оценка КХД фона

Отбор образца, «обогащенного» fake электронами

- ❑ Подавление событий от распада W
 - $E_T^{\text{miss}} < 25$ ГэВ

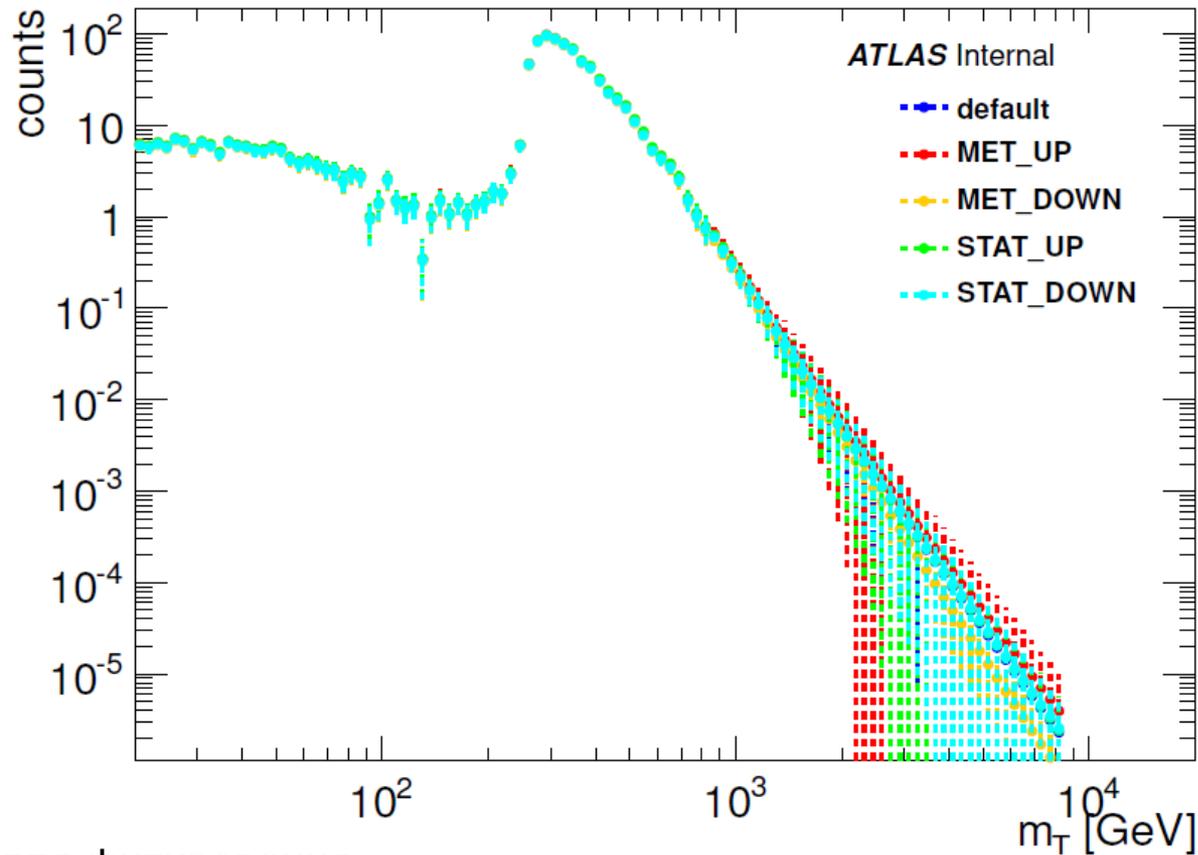
- ❑ Подавление событий от распада Z :
 - $|m_{ee} - m_Z| > 20$ ГэВ для пар e^+e^- с $p_T > 20$ ГэВ, прошедших loose
 - только один medium $e^{+(\cdot)}$ с $p_T > 20$ ГэВ

- ❑ Электроны должны быть вблизи струй ($\Delta R < 0.1$)

- ❑ Остальные критерии отборов такие же как и для W' за исключением отборов по E_T^{miss} и по m_T , которые здесь не используются для улучшения статистики

Оценка КХД фона

Распределение по m_T



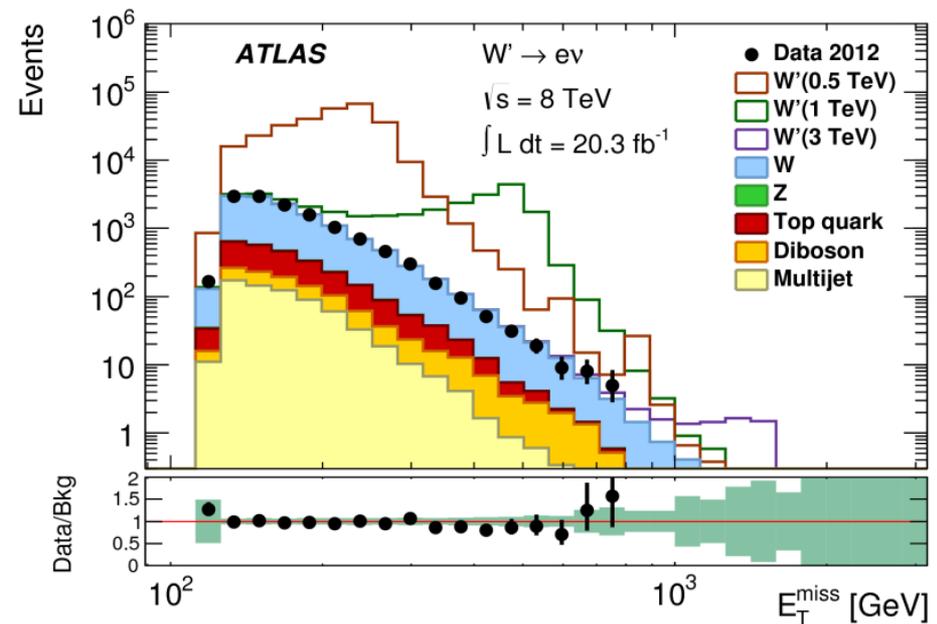
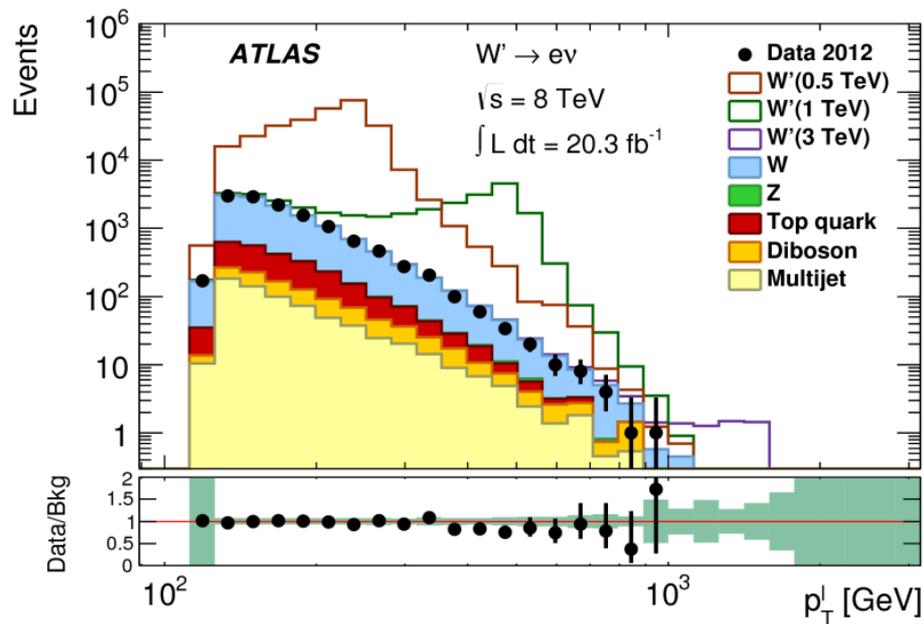
Функции для фитирования

$$f_1(x) = a(1-x)^b (x^{c+d \log x})$$

$$f_2(x) = ax^b$$

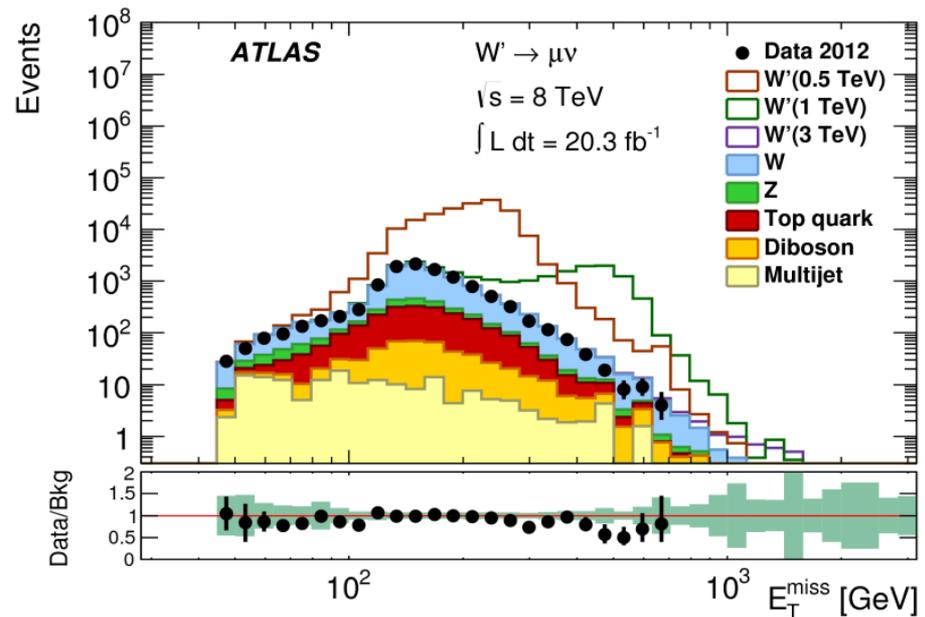
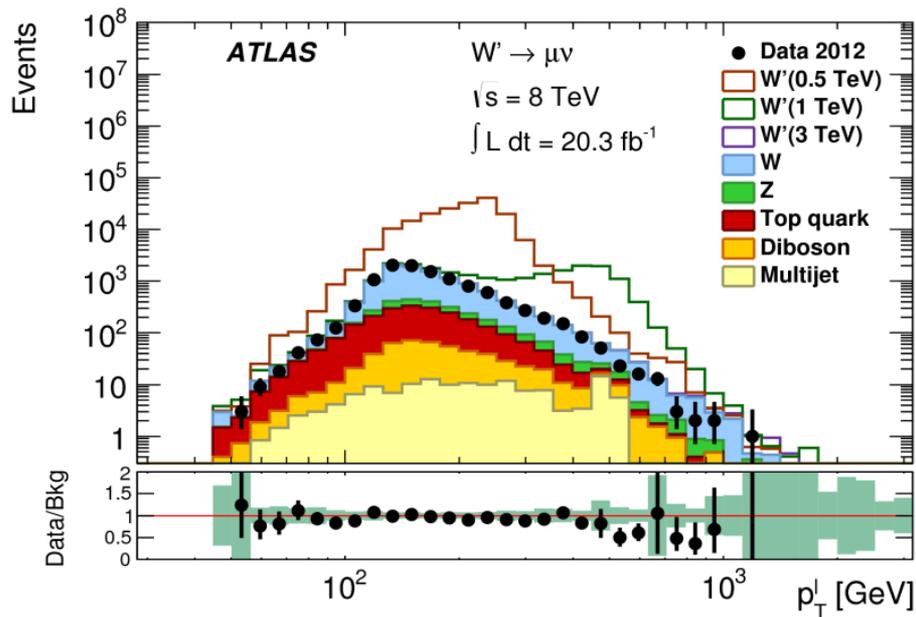
Распределения p_T E_T^{miss}

Электронный канал



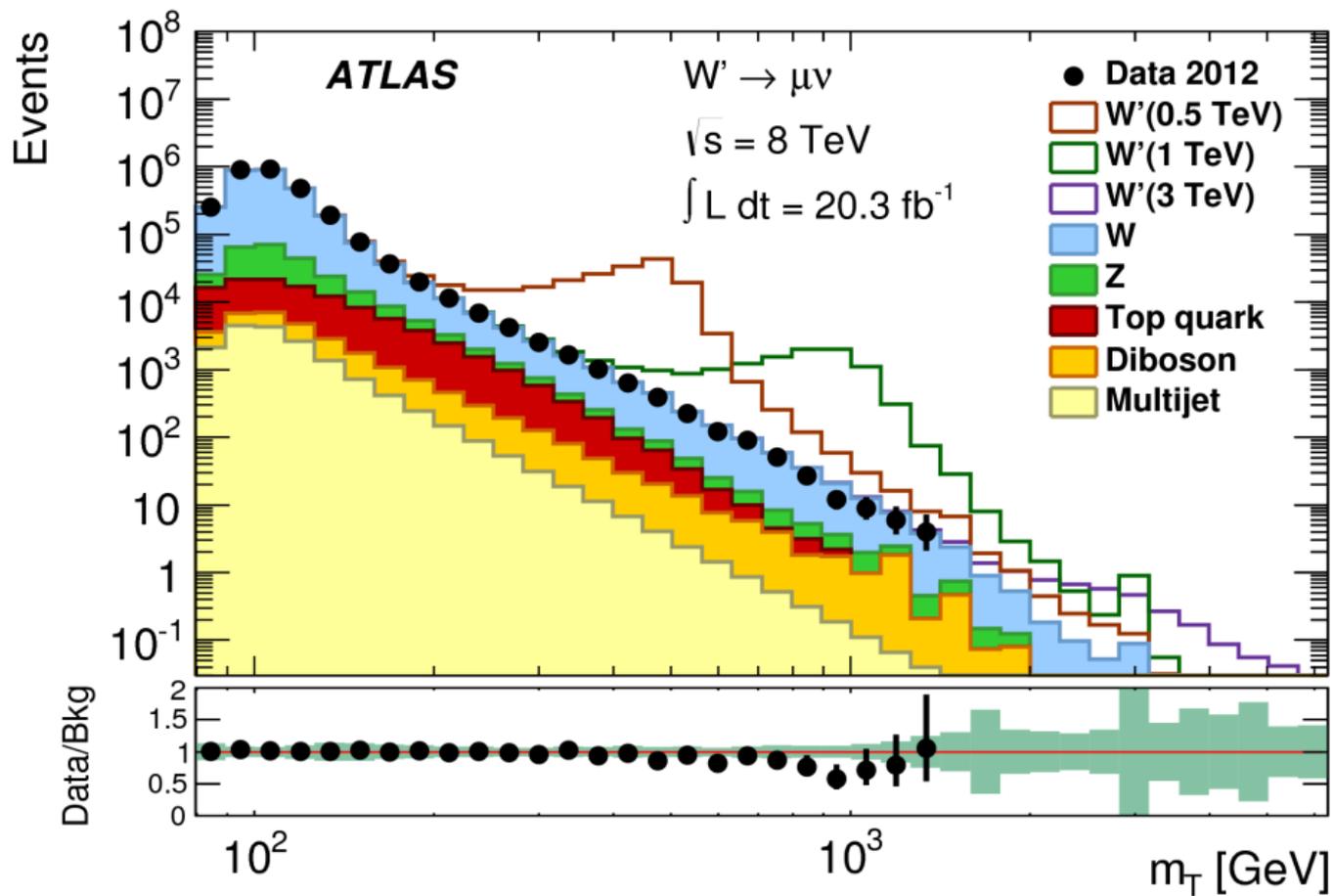
Распределения p_T E_T^{miss}

Мюонный канал



Распределение m_T

Мюонный канал



Дополнительные модели

□ Темная материя (моно-W):

- Поиск слабо взаимодействующих частиц темной материи (WIMP, χ)

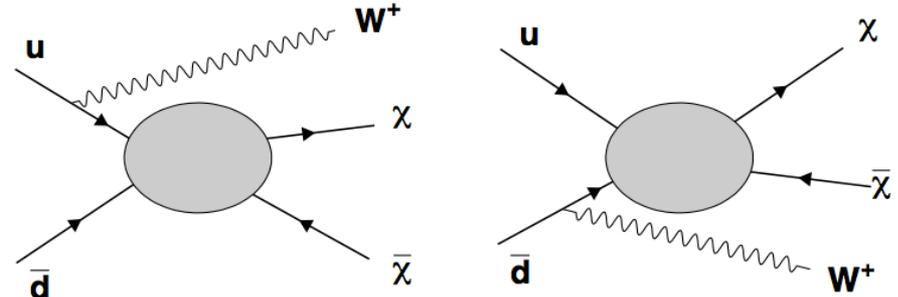
- События могут быть зарегистрированы, если в начальном состоянии была испущена частица CM (W в нашем случае)

- Дополняет другие моно- X поиски

- W – особый случай, т.к. он меняет аромат кварков

- Чувствителен к разным константам связи темной материи с u и d -кваркам

- 4 оператора, WIMP – дираковский фермион



Effective field theory

M_* – параметр

$$D1: \frac{m_q}{M_*^3} \bar{\chi} \chi \bar{q} q$$

$$D5(c): \frac{1}{M_*^2} \bar{\chi} \gamma^\mu \chi \bar{q} \gamma_\mu q$$

$$D9: \frac{1}{M_*^2} \bar{\chi} \sigma^{\mu\nu} \chi \bar{q} \sigma_{\mu\nu} q$$

Сечения W' , W^* , моно- W

Mass [GeV]	$W' \rightarrow l\nu$ σ_B [pb]	$W^* \rightarrow l\nu$ σ_B [pb]
300	149.0	
400	50.2	37.6
500	21.4	16.2
600	10.4	7.95
750	4.16	3.17
1000	1.16	0.882
1250	0.389	0.294
1500	0.146	0.108
1750	0.0581	0.0423
2000	0.0244	0.0171
2250	0.0108	0.00700
2500	0.00509	0.00290
2750	0.00258	0.00120
3000	0.00144	4.9×10^{-4}
3250	8.9×10^{-4}	2.0×10^{-4}
3500	5.9×10^{-4}	8.0×10^{-5}
3750	4.2×10^{-4}	3.2×10^{-5}
4000	3.1×10^{-4}	1.3×10^{-5}

m_χ [GeV]	DM production σ_B [pb]			
	D1	D5d	D5c	D9
	$M_* = 10$ GeV	$M_* = 100$ GeV	$M_* = 1$ TeV	$M_* = 1$ TeV
1	439	72.2	0.0608	0.0966
100	332	70.8	0.0575	0.0870
200	201	58.8	0.0488	0.0695
400	64.6	32.9	0.0279	0.0365
1000	1.60	2.37	0.00192	0.00227
1300	0.213	0.454	0.000351	0.000412

Систематика W'

Source	$m_{W'}, m_{Tmin}$ [GeV]								
	300	400	500	600	750	1000	1250	1500	1750
	252	336	423	474	597	796	1002	1191	1416
Efficiency	2.7	2.7	2.7	2.6	2.6	2.5	2.5	2.5	2.5
Resolution	0.096	0.19	0.25	0.096	0.19	0.1	0.12	0.13	0.15
Scale	2.2	2.4	2.8	1.8	1.7	1.5	1.5	1.6	1.5
E_T^{miss}	1.3	0.11	0.06	0.14	0.056	0.087	0.034	0.081	0.051
Jet resolution	0.52	0.17	0.028	0.12	0.073	0.064	0.06	0.09	0.029
Jet scale	0.7	0.25	0.073	0.21	0.12	0.022	0.043	0.091	0.021
All experimental	3.8	3.6	3.9	3.2	3.1	3	2.9	3	2.9
MC stats	1.4	1.2	1.2	1.1	1	1	0.97	0.93	0.94
K -factor	0.13	0.13	0.21	0.45	0.49	0.69	1.2	1.9	2.5
Beam energy	0.012	0.015	0.018	0.02	0.03	0.056	0.1	0.17	0.31
Total	4.1	3.8	4.1	3.4	3.3	3.2	3.3	3.6	3.9

Source	$m_{W'}, m_{Tmin}$ [GeV]								
	2000	2250	2500	2750	3000	3250	3500	3750	4000
	1500	1683	1888	1888	1888	1888	1888	1888	1888
Efficiency	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Resolution	0.19	0.13	0.11	0.018	0.048	0.091	0.04	0.049	0.041
Scale	1.2	1.1	1.3	1.2	1	0.96	1	1.2	1.5
E_T^{miss}	0.068	0.027	0.043	0.026	0.02	0.03	0.014	0.015	0.018
Jet resolution	0.062	0.024	0.065	0.019	0.022	0.0064	0.0084	0.0089	0.018
Jet scale	0.022	0.007	0.036	0.018	0.022	0.024	0.0064	0.016	0.0035
All experimental	2.8	2.8	2.8	2.8	2.7	2.7	2.7	2.8	2.9
MC stats	0.85	0.87	0.9	0.85	0.81	0.78	0.73	0.65	0.54
K -factor	2.9	3.6	5.9	9.7	15	26	39	51	56
Beam energy	0.52	0.9	1.5	2.3	3.3	4.3	5.1	5.4	5.2
Total	4.2	4.7	6.8	10	16	27	40	52	57

Систематика W^*

Source	m_{W^*}, m_{Tmin} [GeV]								
	400	500	600	750	1000	1250	1500	1750	2000
	317	377	448	564	710	843	1062	1191	1337
Efficiency	2.9	3	3	2.9	2.8	2.8	2.7	2.7	2.7
Resolution	0.22	0.28	0.24	0.23	0.094	0.21	0.18	0.17	0.36
Scale	3.4	2.7	2.7	2.6	2.8	2.4	2.4	2.4	2.4
E_T^{miss}	0.15	0.25	0.13	0.076	0.17	0.12	0.087	0.12	0.083
Jet resolution	0.84	0.083	0.35	0.058	0.019	0.077	0.085	0.17	0.066
Jet scale	0.53	0.32	0.14	0.14	0.15	0.053	0.074	0.094	0.091
All experimental	4.6	4	4	3.9	4	3.7	3.6	3.6	3.6
MC stats	1.7	1.6	1.5	1.6	1.4	1.3	1.3	1.3	1.2
K -factor	0.81	0.58	0.53	0.5	0.24	0.16	0.18	0.2	0.23
Beam energy	0.079	0.051	0.045	0.044	0.036	0.033	0.044	0.049	0.059
Total	4.9	4.4	4.3	4.2	4.2	3.9	3.9	3.9	3.9

Source	m_{W^*}, m_{Tmin} [GeV]							
	2250	2500	2750	3000	3250	3500	3750	4000
	1416	1683	1888	1888	1888	1888	1888	1888
Efficiency	2.7	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6
Resolution	0.074	0.15	0.2	0.14	0.055	0.17	0.18	0.088
Scale	2.1	2.4	2.5	2.1	1.9	1.7	1.5	1.3
E_T^{miss}	0.044	0.031	0.071	0.077	0.038	0.054	0.013	0.031
Jet resolution	0.16	0.06	0.098	0.044	0.057	0.086	0.037	0.068
Jet scale	0.079	0.076	0.076	0.083	0.066	0.018	0.037	0.096
All experimental	3.4	3.6	3.6	3.4	3.3	3.1	3	2.9
MC stats	1.1	1.2	1.3	1.2	1.2	1.3	1.3	1.4
K -factor	0.27	0.48	0.89	1.4	2.2	3.9	10	30
Beam energy	0.068	0.1	0.15	0.2	0.28	0.43	0.66	1
Total	3.6	3.8	4	3.9	4.1	5.2	11	31

Систематика фона

Source	m_{Tmin} [GeV]									
	252	317	336	377	423	448	474	564	597	710
Efficiency	2.5	2.5	2.5	2.5	2.6	2.6	2.6	2.5	2.5	2.5
Resolution	0.022	0.1	0.17	0.11	0.31	0.8	0.28	0.26	0.28	0.26
Scale	1.7	3	3.4	2.7	3.9	3.9	3	3.3	3.6	3.5
E_T^{miss}	0.31	0.23	0.41	0.17	0.38	0.44	0.13	0.21	0.14	0.35
Jet resolution	0.23	0.39	0.29	0.087	0.5	0.18	0.087	0.11	0.14	0.3
Jet scale	0.65	0.46	0.41	0.25	0.36	0.17	0.28	0.33	0.076	0.4
All experimental	3.1	3.9	4.3	3.7	4.7	4.7	3.9	4.2	4.5	4.4
MC stats	0.92	1.2	1.3	1.4	1.5	1.4	1.1	1	1.1	1.7
K -factor	5.3	5.1	5.1	5.2	5.2	5.6	6.2	7.9	8.6	11
Top cross section	0.66	0.65	0.62	0.55	0.46	0.43	0.38	0.28	0.23	0.17
Beam energy	0.85	0.91	0.93	0.99	1.1	1.1	1.1	1.3	1.3	1.5
QCD	0.58	0.32	0.36	0.58	0.83	0.85	1	0.96	1.1	1.2
Total	6.3	6.7	6.9	6.6	7.3	7.6	7.6	9.2	9.9	12

Source	m_{Tmin} [GeV]									
	796	843	1002	1062	1191	1337	1416	1500	1683	1888
Efficiency	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.6	2.7	2.7	2.9	2.4
Resolution	0.93	0.52	0.64	0.77	0.72	3	1.2	1.9	0.37	0.29
Scale	3.6	3.6	3.8	3.6	2.9	3.1	3.3	3.5	3.1	3.9
E_T^{miss}	0.37	0.38	0.83	0.21	1.3	0.26	0.74	1.2	0.08	0.12
Jet resolution	0.43	0.35	0.28	0.61	0.3	3	0.98	0.072	0.079	0.13
Jet scale	0.33	0.15	0.63	0.18	0.54	0.62	0.94	0.025	0.14	0.092
All experimental	4.6	4.5	4.8	4.5	4.1	5.9	4.7	5	4.2	4.6
MC stats	2.1	2.4	3.7	4.3	5.1	6.7	7.2	8.5	17	1.8
K -factor	12	13	15	16	17	17	18	18	16	20
Top cross section	0.14	0.095	0	0	0	0	0	0	0	0
Beam energy	1.7	1.8	2	2.1	2.4	2.5	2.7	2.8	2.8	3.9
QCD	0.53	0.27	0.98	1.2	1.6	1.8	2	2.2	2.5	4.2
Total	13	14	16	17	19	19	20	21	24	21

Систематика W'

Относительные неопределенности для эффективностей отбора сигнала и числа фоновых событий для W' с массой 2 ТэВ

Source	ϵ_{sig}		N_{bkg}	
	$e\nu$	$\mu\nu$	$e\nu$	$\mu\nu$
$W' \rightarrow \ell\nu$				
Reconstruction and trigger efficiency	2.5%	4.1%	2.7%	4.1%
Lepton energy/momentum resolution	0.2%	1.4%	1.9%	18%
Lepton energy/momentum scale	1.2%	1.8%	3.5%	1.5%
$E_{\text{T}}^{\text{miss}}$ scale and resolution	0.1%	0.1%	1.2%	0.5%
Beam energy	0.5%	0.5%	2.8%	2.1%
Multi-jet background	-	-	2.2%	3.4%
Monte Carlo statistics	0.9%	1.3%	8.5%	10%
Cross-section (shape/level)	2.9%	2.8%	18%	15%
Total	4.2%	5.6%	21%	27%

Систематика W^*

Относительные неопределенности для эффективностей отбора сигнала и числа фоновых событий для W^* с массой 2 ТэВ

Source	ϵ_{sig}		N_{bkg}	
	$e\nu$	$\mu\nu$	$e\nu$	$\mu\nu$
$W^* \rightarrow \ell\nu$				
Reconstruction and trigger efficiency	2.7%	4.1%	2.6%	4.0%
Lepton energy/momentum resolution	0.4%	0.9%	3.0%	17%
Lepton energy/momentum scale	2.4%	2.4%	3.1%	1.5%
E_T^{miss} scale and resolution	0.1%	0.4%	3.1%	0.6%
Beam energy	0.1%	0.1%	2.5%	1.9%
Multi-jet background	-	-	1.8%	2.6%
Monte Carlo statistics	1.2%	1.8%	6.7%	8.6%
Cross-section (shape/level)	0.2%	0.2%	17%	15%
Total	3.9%	5.1%	19%	25%

Входные параметры для постановки пределов W' и W^*

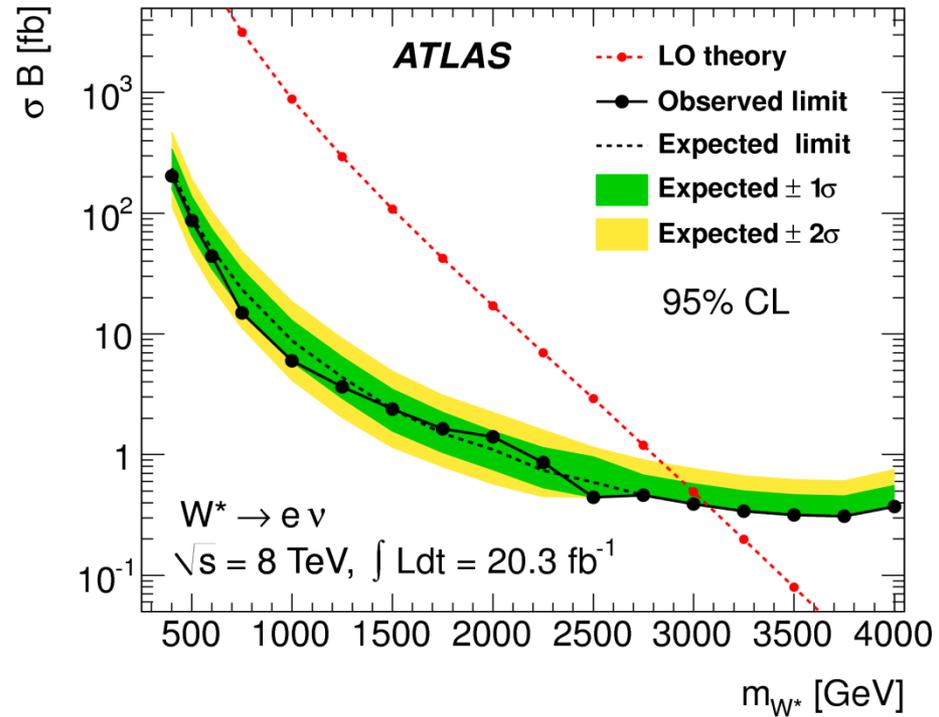
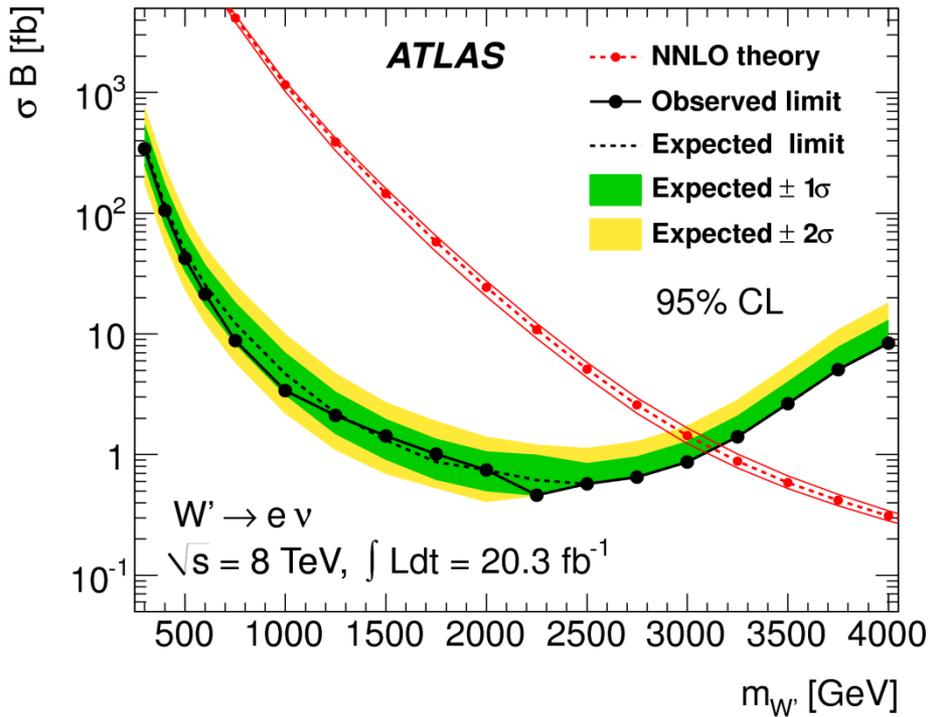
$m_{W'}$ [GeV]	m_{Tmin} [GeV]	Channel	ϵ_{sig}	N_{sig}	N_{bkg}	N_{obs}
500	423	$e\nu$	0.325 ± 0.013	141000 ± 5700	2070 ± 150	2017
		$\mu\nu$	0.186 ± 0.007	80900 ± 3200	1370 ± 100	1219
1000	796	$e\nu$	0.386 ± 0.012	9080 ± 290	116 ± 15	101
		$\mu\nu$	0.219 ± 0.009	5160 ± 220	84 ± 10	58
2000	1500	$e\nu$	0.370 ± 0.015	183.0 ± 7.7	2.99 ± 0.61	3
		$\mu\nu$	0.198 ± 0.011	98.0 ± 5.5	3.01 ± 0.80	0
3000	1888	$e\nu$	0.183 ± 0.029	5.33 ± 0.86	0.432 ± 0.091	0
		$\mu\nu$	0.100 ± 0.016	2.93 ± 0.48	0.61 ± 0.15	0

m_{W^*} [GeV]	m_{Tmin} [GeV]	Channel	ϵ_{sig}	N_{sig}	N_{bkg}	N_{obs}
500	377	$e\nu$	0.246 ± 0.011	80900 ± 3500	3320 ± 220	3275
		$\mu\nu$	0.140 ± 0.006	45900 ± 1900	2210 ± 160	2008
1000	710	$e\nu$	0.302 ± 0.013	5390 ± 230	203 ± 24	177
		$\mu\nu$	0.174 ± 0.007	3100 ± 130	143 ± 17	109
2000	1337	$e\nu$	0.341 ± 0.013	118.0 ± 4.6	6.8 ± 1.3	9
		$\mu\nu$	0.186 ± 0.010	64.6 ± 3.3	5.8 ± 1.4	3
3000	1888	$e\nu$	0.382 ± 0.015	3.80 ± 0.15	0.432 ± 0.091	0
		$\mu\nu$	0.185 ± 0.011	1.84 ± 0.11	0.61 ± 0.15	0

Входные параметры для постановки пределов моно- W

m_χ [GeV]	$m_{T\min}$ [GeV]	Channel	ϵ_{sig}	N_{sig}	N_{bkg}	N_{obs}			
D5c Operator									
1	843	$e\nu$	0.0737 ± 0.0047	30.3 ± 1.9					
		$\mu\nu$	0.0435 ± 0.0034	17.9 ± 1.4					
100		$e\nu$	0.0798 ± 0.0050	31.0 ± 1.9					
		$\mu\nu$	0.0437 ± 0.0034	17.0 ± 1.3					
200		$e\nu$	0.0762 ± 0.0049	25.1 ± 1.6					
		$\mu\nu$	0.0461 ± 0.0034	15.2 ± 1.1					
400		$e\nu$	0.0857 ± 0.0055	16.2 ± 1.0			$e\nu$	86 ± 12	79
		$\mu\nu$	0.0532 ± 0.0040	10.0 ± 0.8			$\mu\nu$	65.5 ± 8.5	40
1000		$e\nu$	0.0987 ± 0.0091	1.28 ± 0.12					
		$\mu\nu$	0.0636 ± 0.0057	0.824 ± 0.074					
1300		$e\nu$	0.1010 ± 0.0095	0.240 ± 0.023					
		$\mu\nu$	0.0589 ± 0.0057	0.140 ± 0.014					

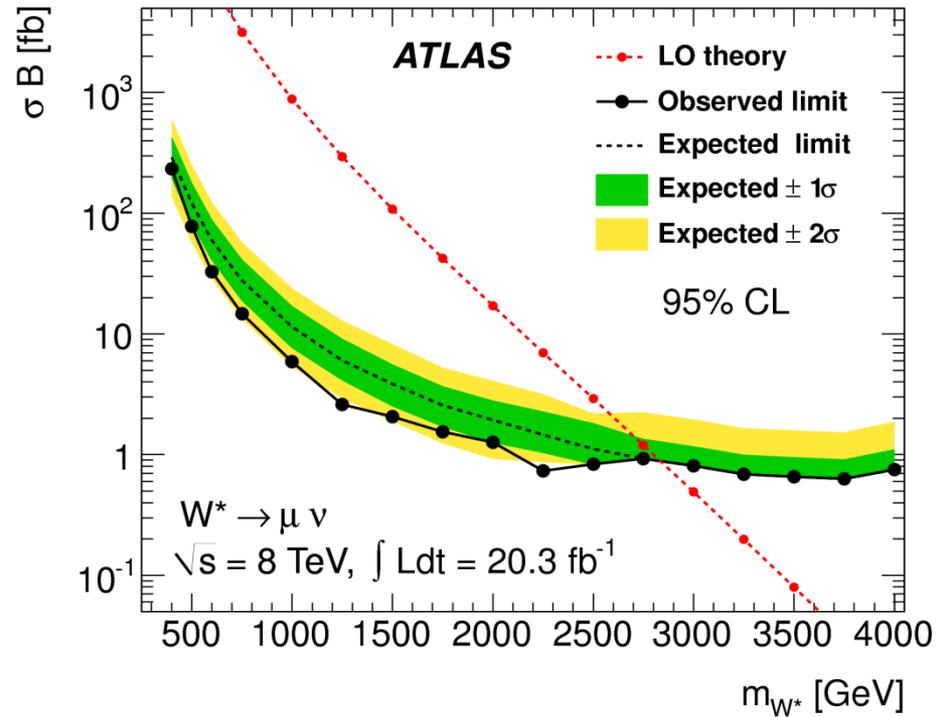
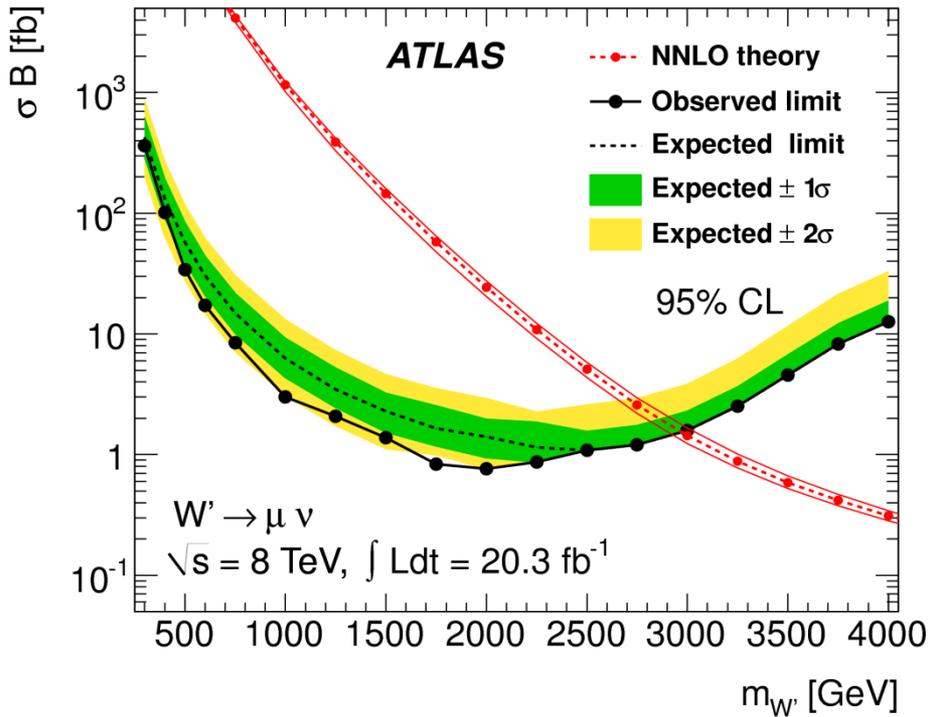
Пределы W' и W^*



Нижние пределы по массе

Модель	Ожидаемый [ТэВ]	Наблюдаемый [ТэВ]
$W' \rightarrow l\nu$	3.13	3.13
$W^* \rightarrow l\nu$	3.08	3.08

Пределы W' и W^*

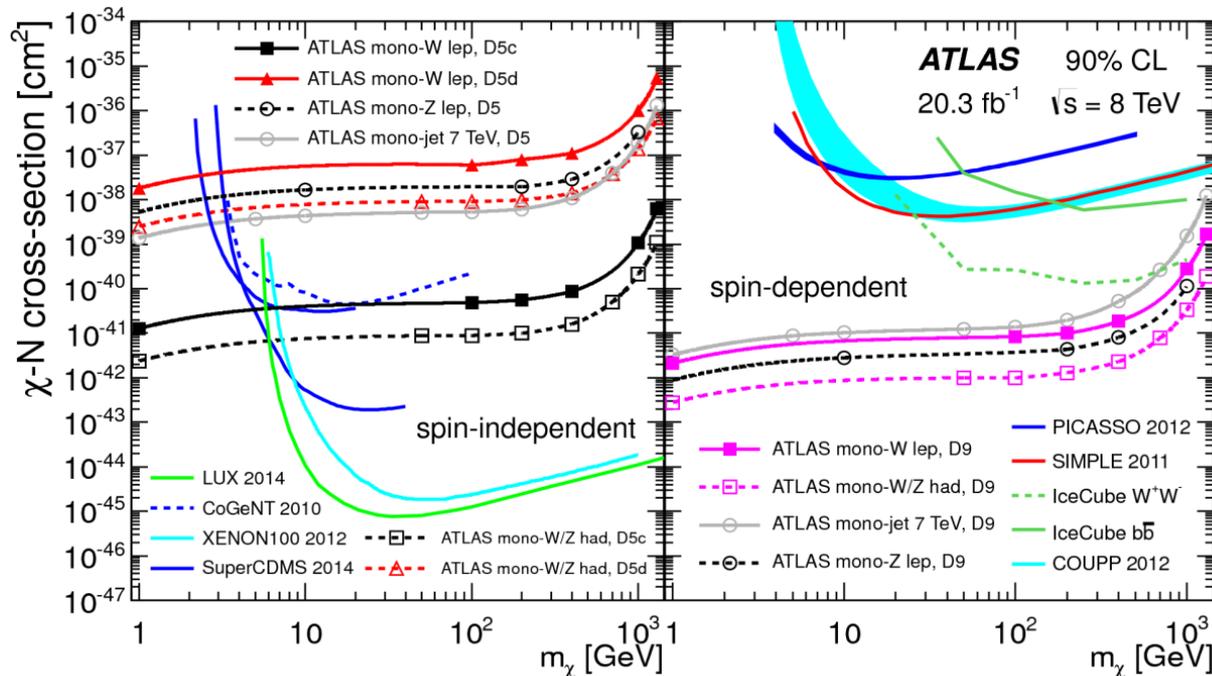


Нижние пределы по массе

Модель	Ожидаемый [ТэВ]	Наблюдаемый [ТэВ]
$W' \rightarrow l\nu$	2.97	2.97
$W^* \rightarrow l\nu$	2.83	2.83

Пределы моно-W

- Установлены пределы на сечения рождения для 90% доверительной вероятности
- Пределы на сечения были пересчитаны в пределы на параметр M^* и в пределы на сечение рассеяния WIMP на нуклонах



- Результаты ATLAS позволяют продвинуться в область малых масс WIMP, где эксперименты по прямому поиску нечувствительны