

Исследование свойств t -кварка в эксперименте ATLAS

В.М. Соловьев

Семинар ОФВЭ

1 октября 2019

Содержание

- Введение
- Распад t -кварка
- Рождение t -кварка на адронных коллайдерах
- Измерение сечений рождения t -кварка
- Измерение массы t -кварка
- Измерение ширины t -кварка
- Зарядовая асимметрия в процессах $t\bar{t}$
- Измерение элемента V_{tb} матрицы СКМ
- Спиновые корреляции в процессах $t\bar{t}$
- Заключение

Введение

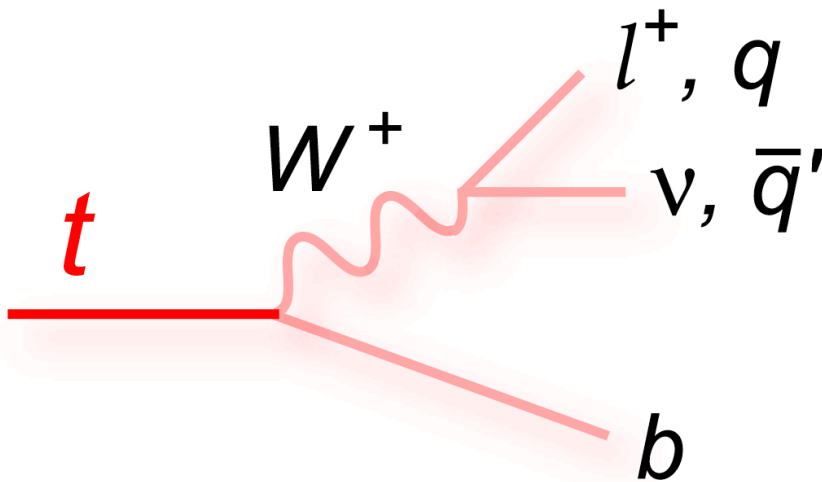
- Открыт в 1995 году экспериментами CDF и D0 на Tevatron
- Самая тяжелая из всех открытых элементарных частиц

Q	S	m_t , ГэВ	Γ_t , ГэВ	τ , с
$2/3$	$1/2$	$173,0 \pm 0,4$	$1,41 \pm_{0,15}^{0,19}$	5×10^{-25}

- В основном рождается парами ($t\bar{t}$)
- Процессы с одиночным рождением t -кварка вносят существенно меньший вклад
- С началом работы LHC продолжилось начатое на Tevatron активное изучение свойств t -кварка
- LHC является «фабрикой» частиц, в том числе и t -кварка

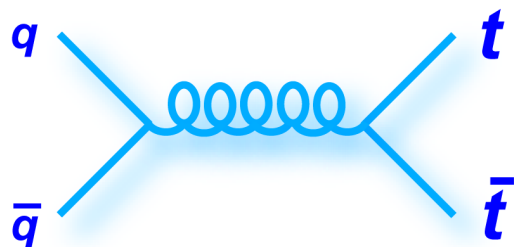
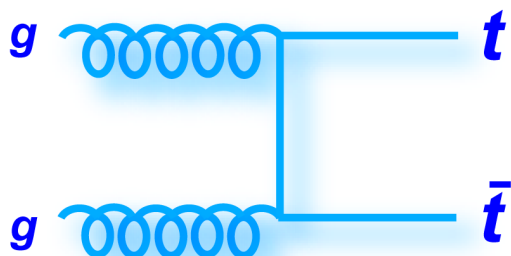
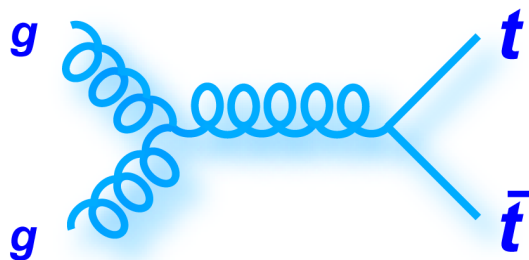
Produced in 139 fb^{-1} @ $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$	
Higgs Bosons	7.7 million
Top Quarks	275 million
Z Bosons	2.8 billion
W Bosons	12 billion
Bottom Quarks	~40 trillion

Распад t -кварка



- С вероятностью 99,9% t -кварк распадается в канале $t \rightarrow Wb$
 - Вследствие малого времени жизни t -кварк распадается до адронизации
 - Продукты распада t -кварка сохраняют информацию о его спине
- Возможные конечные состояния будут определяться каналом распада W -бозона (лептонным или адронным)
 - При распаде W -бозона в лептонном ($\approx 33\%$) канале детектором регистрируется заряженный лептон и недостающая поперечная энергия (E_T^{miss})
 - При распаде W -бозона в адронном ($\approx 67\%$) канале детектором регистрируются 2 струи
 - Помимо этого детектором будет регистрироваться b -струя (для этого используются специальные алгоритмы, т.н. “b-tagging”)

Парное рождение t -кварка



- На коллайдерах t -кварк в основном рождается парами ($t\bar{t}$)
- Парное рождение t -кварка ($t\bar{t}$) происходит за счет сильного взаимодействия

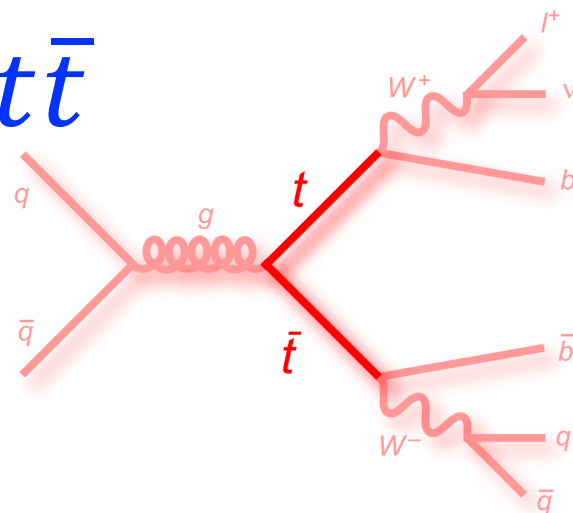
Коллайдер (\sqrt{s})	$\sigma_{t\bar{t}}$, пб
Tevatron (1,96 ТэВ)	7,16
LHC (8 ТэВ)	252,9
LHC (13 ТэВ)	831,8

90% на LHC ($p\bar{p}$ при 13 ТэВ)

85% на Tevatron ($p\bar{p}$ при 1,96 ТэВ)

Регистрация пары $t\bar{t}$

- alljets (all-hadronic):
 - 6 струй в конечном состоянии
 - наибольшая вероятность
 - большой вклад от КХД фона
- lepton + jets:
 - 1 заряженный лептон + 4 струи + E_T^{miss} в конечном состоянии
 - высокая вероятность
 - вклад от КХД фона ниже
- dilepton:
 - 2 заряженных лептона + 2 струи + E_T^{miss} в конечном состоянии
 - низкая вероятность
 - наименьший вклад от КХД фона
 - наилучшее соотношение сигнал/фон

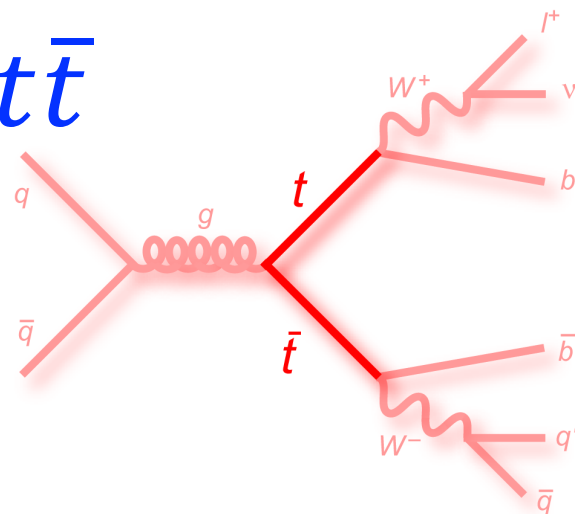


Top Pair Decay Channels

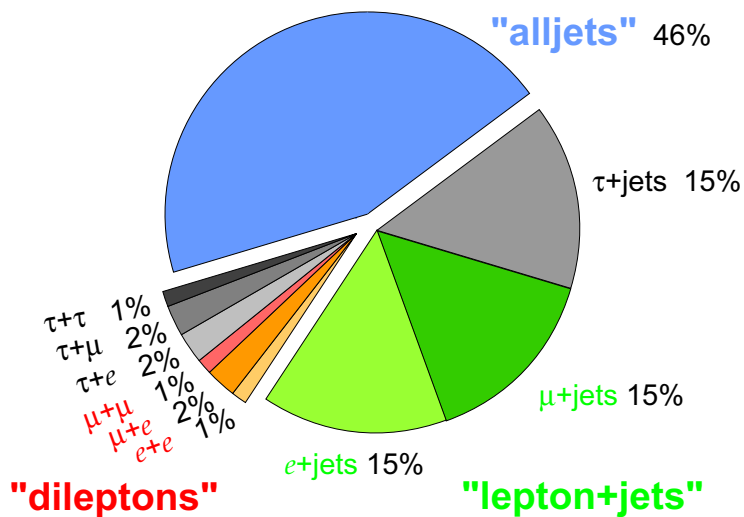
$c\bar{s}$	electron+jets	muon+jets	tau+jets	all-hadronic	
$u\bar{d}$					
τ^+	$e\tau$	$\mu\tau$	$\tau\tau$	tau+jets	
μ^+	$e\mu$	$\mu\mu$	$\tau\mu$	muon+jets	
e^+	$e\tau$	$e\mu$	$e\tau$	electron+jets	
W decay	e^+	μ^+	τ^+	$u\bar{d}$	$c\bar{s}$

Регистрация пары $t\bar{t}$

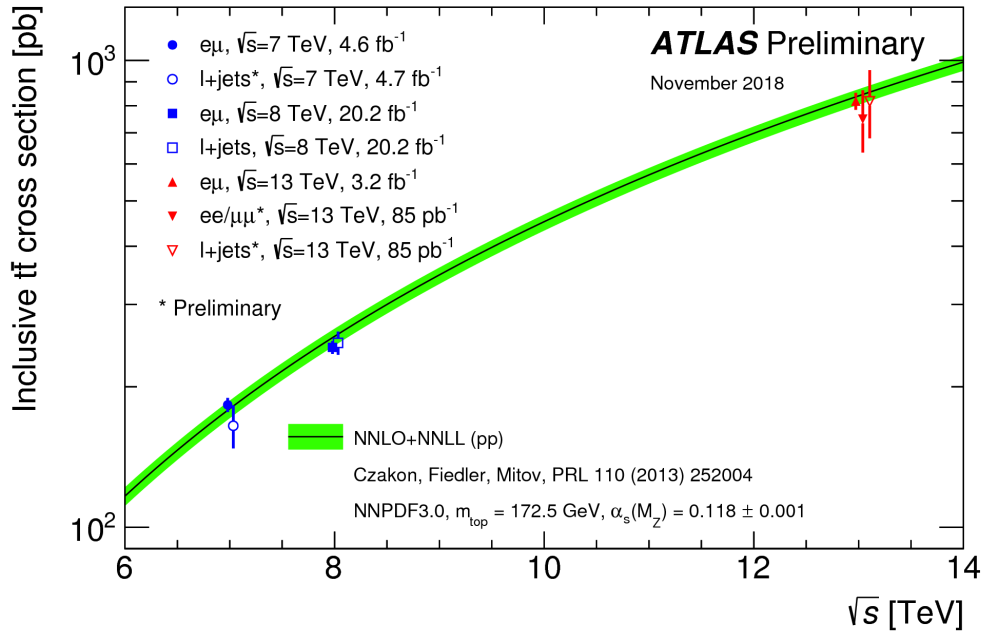
- alljets (all-hadronic):
 - 6 струй в конечном состоянии
 - наибольшая вероятность
 - большой вклад от КХД фона
- lepton + jets:
 - 1 заряженный лептон + 4 струи + E_T^{miss} в конечном состоянии
 - высокая вероятность
 - вклад от КХД фона ниже
- dilepton:
 - 2 заряженных лептона + 2 струи + E_T^{miss} в конечном состоянии
 - низкая вероятность
 - наименьший вклад от КХД фона
 - наилучшее соотношение сигнал/фон



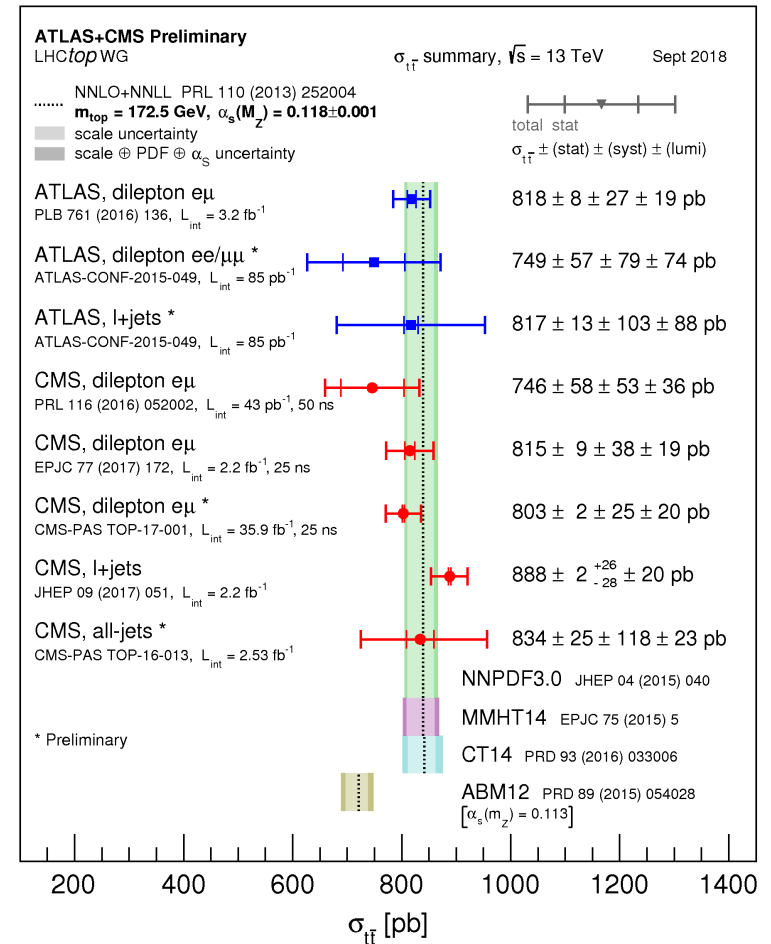
Top Pair Branching Fractions



Сечение рождения $t\bar{t}$

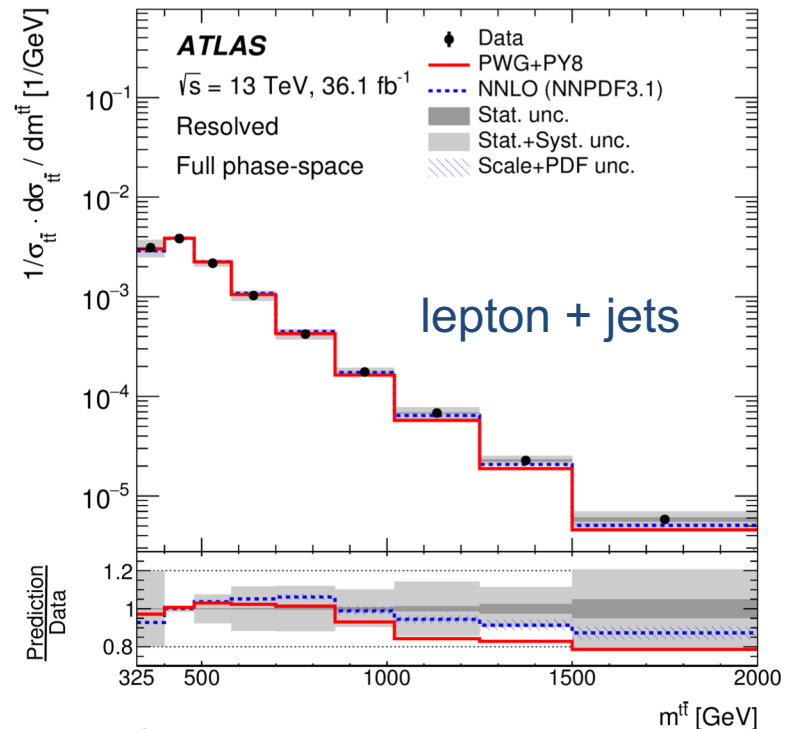
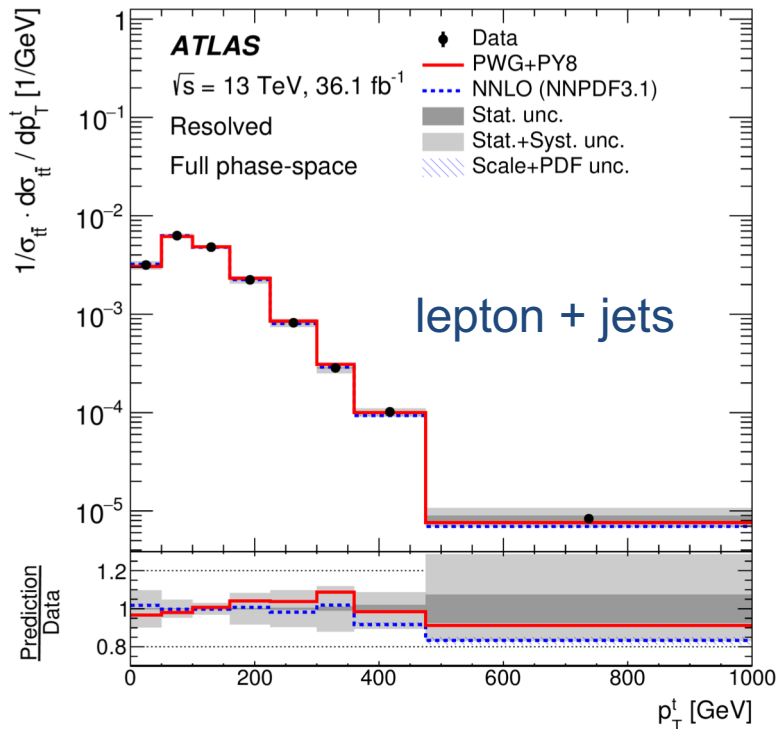


- Точное измерение сечений – проверка предсказаний SM
- Хорошее согласие измеренных интегральных сечений для различных конечных состояний с расчетными
- Результаты ATLAS и CMS находятся в достаточно хорошем согласии



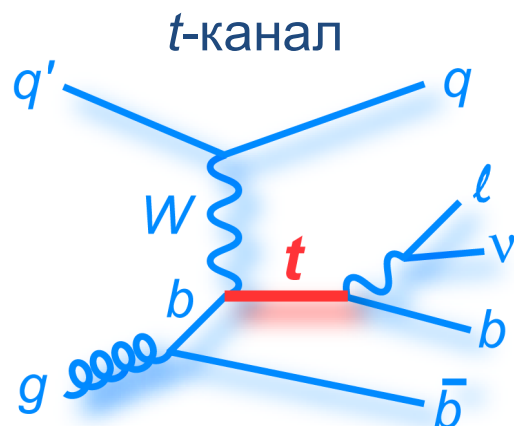
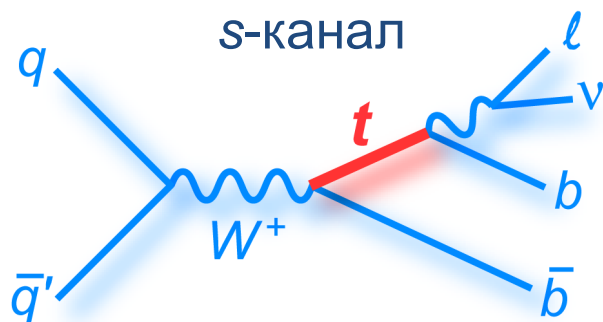
Сечение рождения $t\bar{t}$

- Измерение дифференциальных сечений – более чувствительный способ поиска явлений «новой физики»
- Такие явления могут быть обнаружены по отклонениям данных в спектре по поперечному импульсу, инвариантной массе и т.д.



Отклонений от СМ не обнаружено

Рождение одиночного t -кварка



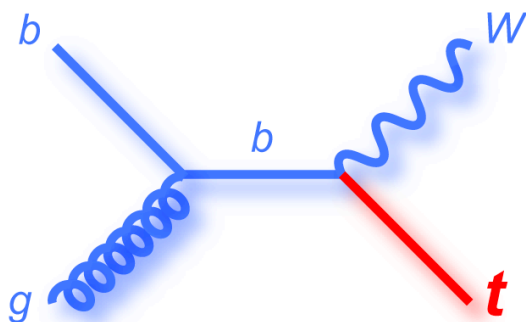
- Рождение одиночного t -кварка происходит в электрослабых процессах

Коллайдер (\sqrt{s})	$\sigma (s)$, пб	$\sigma (t)$, пб
Tevatron (1,96 ТэВ)	1,03	2,06
LHC (8 ТэВ)	5,24	84,7
LHC (13 ТэВ)	10,3	217

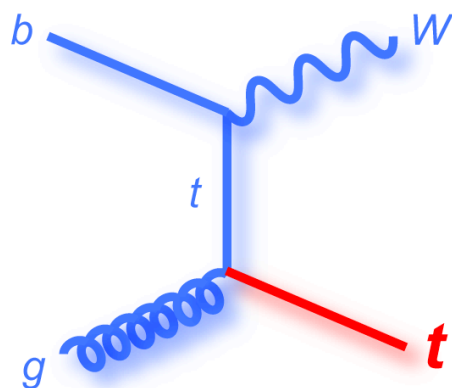
- На LHC $\sigma_t/\sigma_{\bar{t}} \approx 2$
- Меньшее количество струй и лептонов в конечном состоянии (по сравнению $t\bar{t}$) делает регистрацию одиночного t -кварка значительно сложнее из-за больших фонов (особенно W +струи)
- Рождение одиночного t -кварка было открыто на Tevatron лишь в 2009
- Для регистрации используется лептонный канал распада W -бозона
- 1 заряженный лептон + струи (в т.ч. b -струи) + E_T^{miss} в конечном состоянии

Рождение одиночного t -кварка

- Третий процесс – ассоциированное рождение W и t

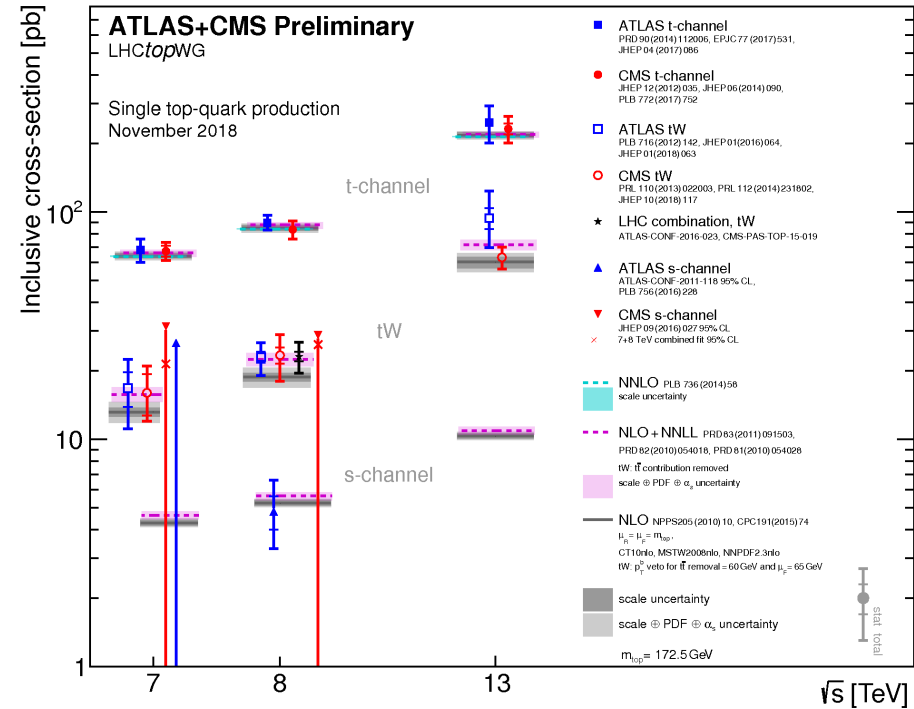
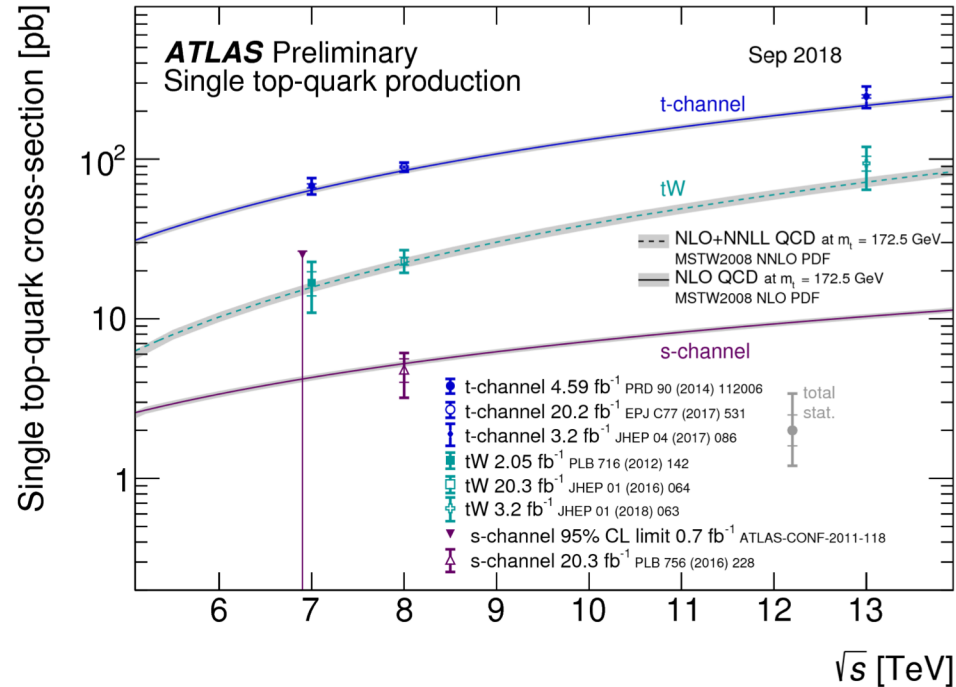


Коллайдер (\sqrt{s})	$\sigma (Wt)$, пб
Tevatron (1,96 ТэВ)	пренебр.
ЛНС (8 ТэВ)	22,4
ЛНС (13 ТэВ)	71,7



- Сечение рождения на Tevatron пренебрежимо мало
- Несмотря на значительную величину сечения на ЛНС, наблюдение этого процесса затруднено наличием большого фона от рождения $t\bar{t}$
- 2 заряженных лептона + b -струя + E_T^{miss} в конечном состоянии

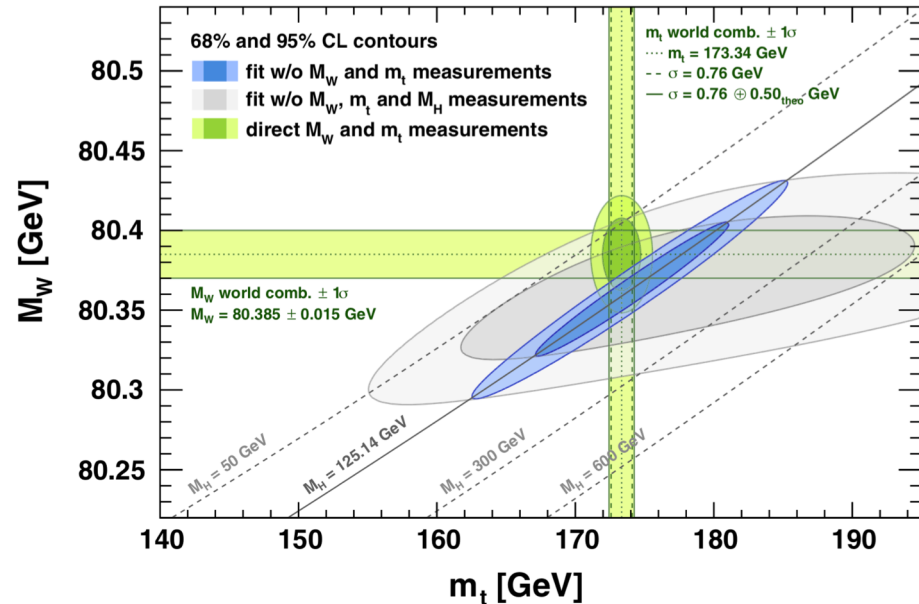
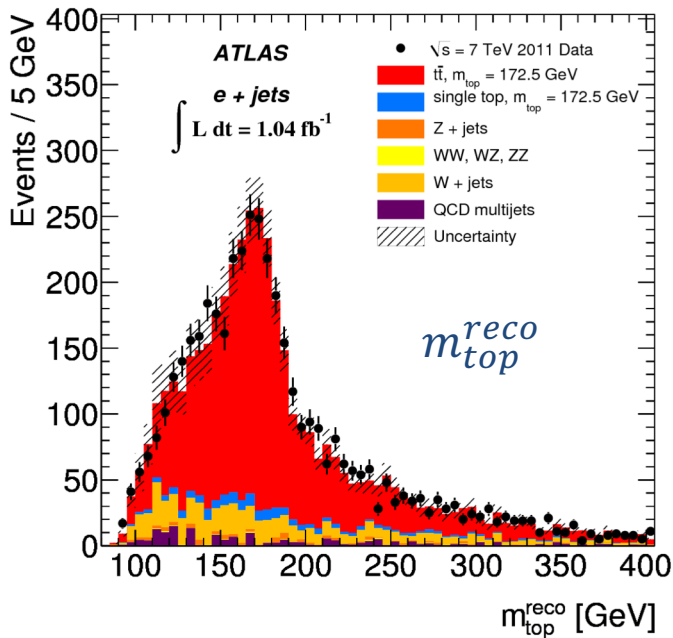
Сечение рождения одиночного t -кварка



- Измеренные сечения совпадают с теоретическими расчетами (при $m_t = 172,5$ ГэВ)
- Результаты ATLAS и CMS находятся в хорошем согласии
- s-канал является самым «сложным» для измерений вследствие малого сечения

Измерение массы t -кварка

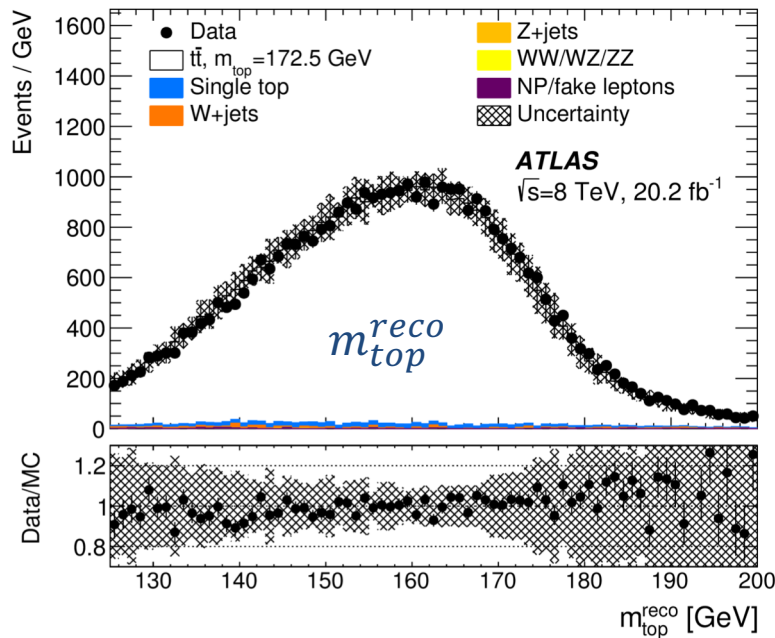
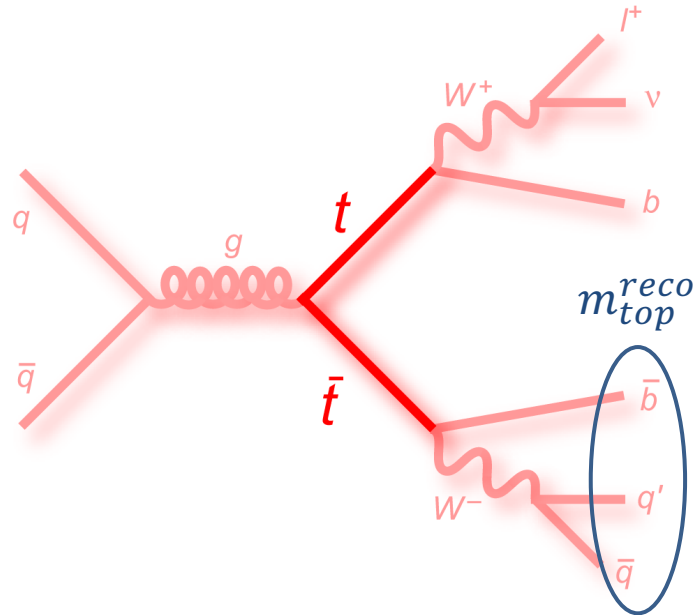
- Точное измерение массы t -кварка, m_t , а также масс W - и H -бозонов (m_W и m_H) позволяет проверить результаты полученные из фитирования электрослабых измерений в рамках СМ



- Измерение массы t -кварка осуществляется только для процесса парного рождения $t\bar{t}$
- Реконструированная масса t -кварка «искажена» разрешением детектора
- Существуют специальные методы измерения масса t -кварка

Измерение массы t -кварка

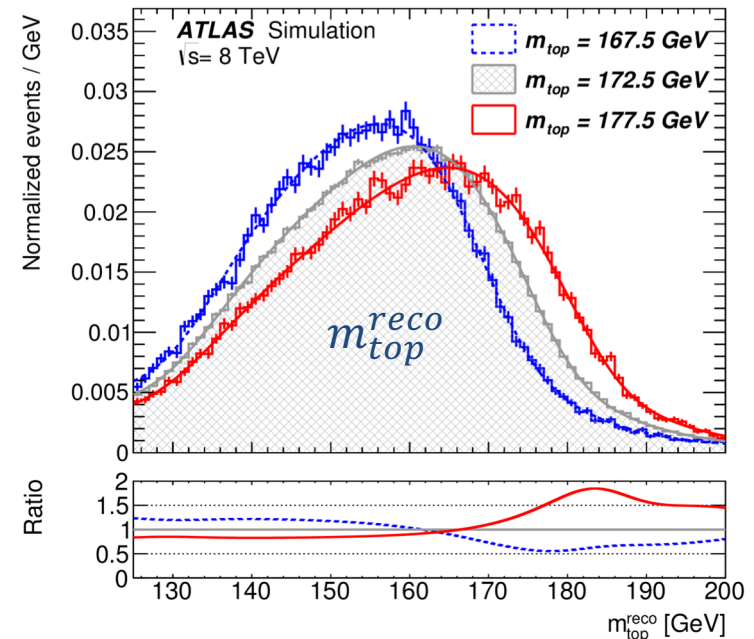
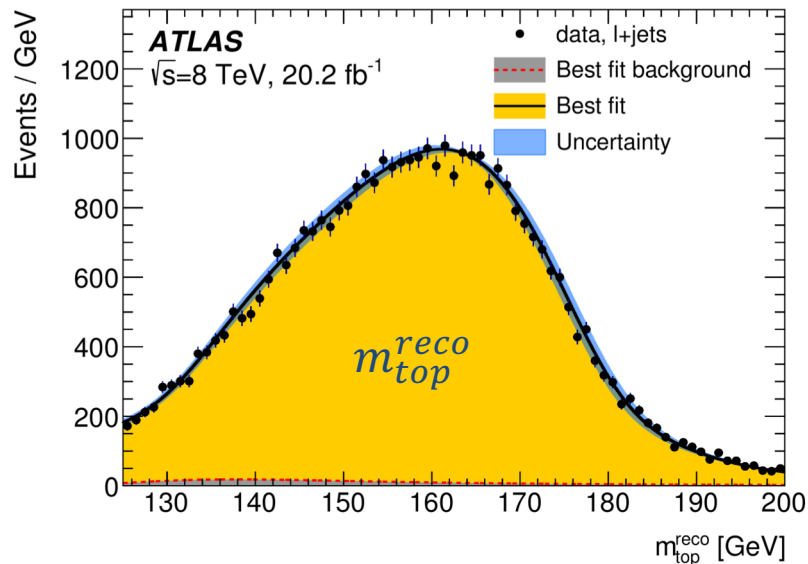
- Для прямого измерения массы t -кварка используется т.н. «метод шаблонов» (template method)
- Например, в канале “lepton+jets” отбираются события с электроном или мюоном, 4 струями (2 из которых – это b -струи) и E_T^{miss}



- Выбирается наблюдаемая величина чувствительная к массе t -кварка, например реконструированная масса m_{top}^{reco}
- m_{top}^{reco} реконструируется по 3-м струям: 2 струи от распада W -бозона, 1 b -струя

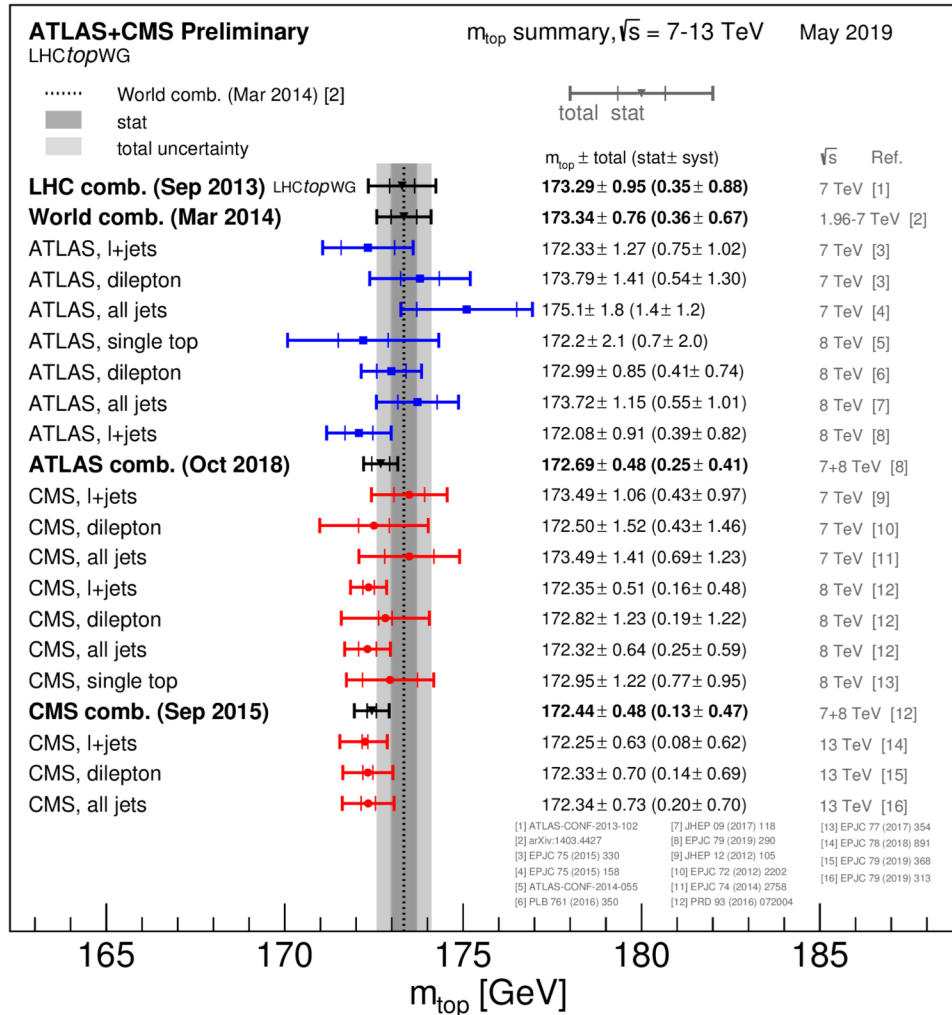
Измерение массы t -кварка

- Для m_{top}^{reco} методом Монте-Карло моделируются шаблоны для сигнала для разных масс t -кварка и шаблоны для фона
- Шаблоны для сигнала фитируются суммой функции Гаусса и двух функций Ландау. Фон фитируется функцией Ландау



- Коэффициенты функций фитирования сигнала линейно зависят от m_{top}
- Функция фитирования фона не зависит от m_{top}
- Распределение в данных фитируется, используя метод максимального правдоподобия

Измерение массы t -кварка



- Сравнение результатов в в экспериментах ATLAS и CMS с комбинацией Tevatron+LHC 2014 года
- Результаты находятся в хорошем согласии друг с другом

Измерение ширины t -кварка

- В рамках СМ ширина t -кварка:

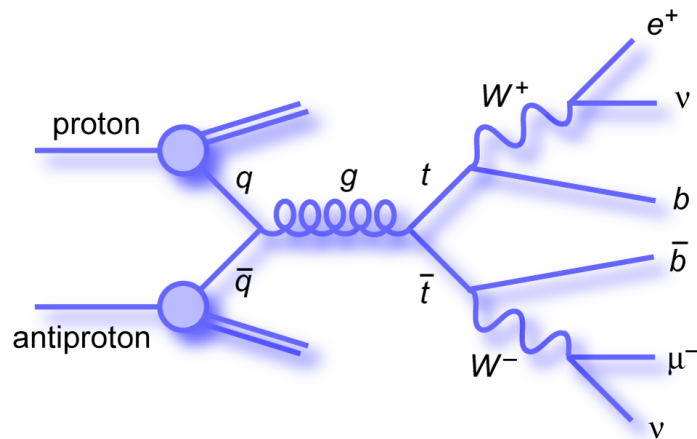
$$\Gamma_t^{SM} = 1,322 \text{ ГэВ для } m_t = 172,5 \text{ ГэВ}$$

- Некоторые теории за рамками СМ предсказывают ширину отличную от Γ_t^{SM}
- Измерения ширины делятся на прямые и не прямые

- В не прямых измерениях ширина определяется следующим образом:

$$\Gamma(t \rightarrow Wb) = \Gamma_{SM}(t \rightarrow Wb) \frac{\sigma_{meas}^{t\text{-chan}}}{\sigma_{SM}^{t\text{-chan}}} \rightarrow \Gamma_t = \frac{\Gamma(t \rightarrow Wb)}{B_{meas}(t \rightarrow Wb)}$$

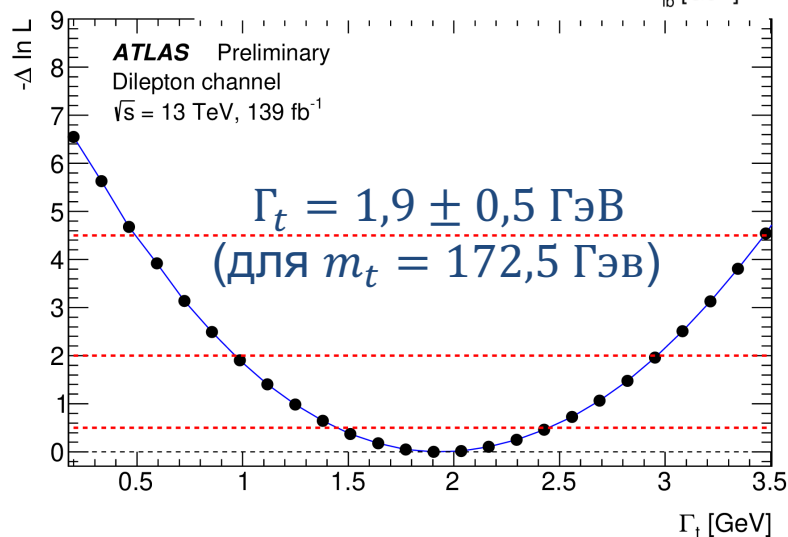
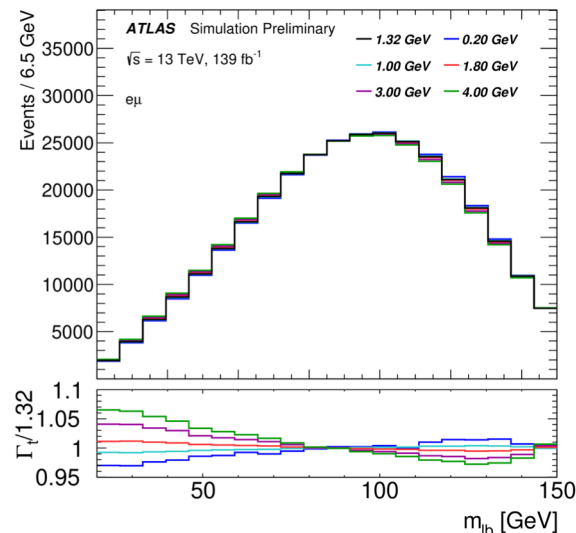
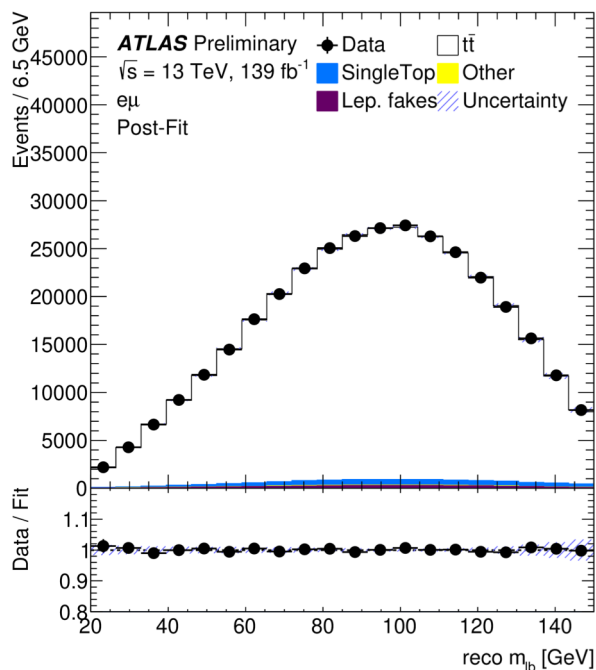
- Недостаток не прямых измерений – их сильная модельная зависимость



- ATLAS недавно опубликовал результаты прямого измерения ширины для дилептонного канала на полной статистике Run-II
- Для этого канала невозможно восстановить инвариантную массу t -кварка т.к. часть энергии уносится нейтрино
- В качестве наблюдаемой величины использовалась инвариантная масса заряженного лептона и b -струи m_{lb}

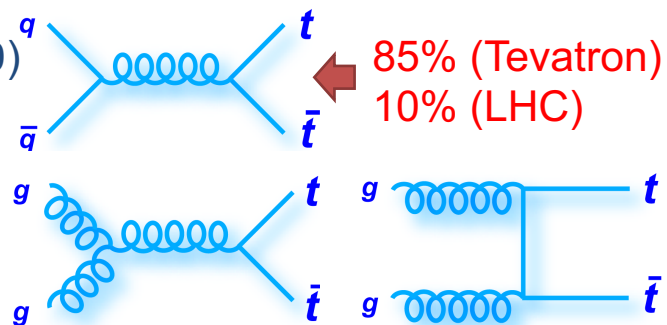
Измерение ширины t -кварка

- Для прямого измерения ширины использовался метод шаблонов
- Были получены шаблоны для различных Γ_t для фиксированной массы $m_t = 172,5$ ГэВ
- Данные фитировались методом наибольшего правдоподобия



Зарядовая асимметрия $t\bar{t}$

- На Tevatron в LO приближении КХД асимметрия рождения $t\bar{t}$ при аннигиляции $q\bar{q}$ отсутствует ($A_{FB} = 0$)
- В (N)NLO приближении КХД для этого процесса предсказывается, что t -кварк будет рождаться преимущественно в направлении q , а \bar{t} – в направлении \bar{q}

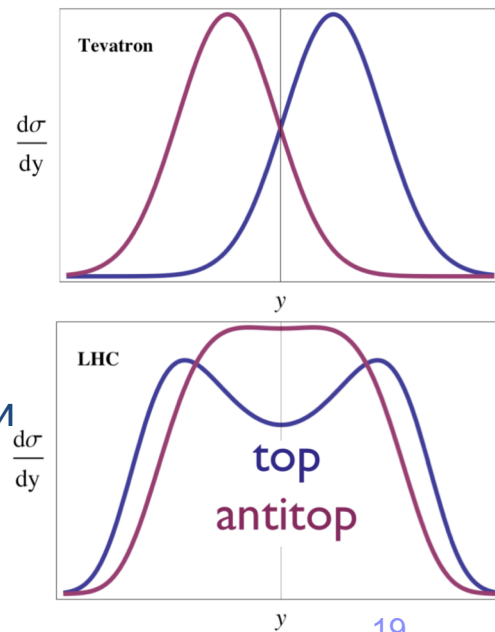


- На Tevatron это приводит к преимущественному рождению t (\bar{t}) по направлению p (\bar{p}). Вводится понятие асимметрии вперед-назад:

$$A_{FB} = \frac{N(\Delta y > 0) - N(\Delta y < 0)}{N(\Delta y > 0) + N(\Delta y < 0)}, \quad \Delta y = y_t - y_{\bar{t}}$$

- На LHC симметричное начальное состояние протонов не позволяет различить переднее и заднее направления и измерить A_{FB}
- Разница в PDF для валентных и морских кварков приводит к тому, что t -кварки процессе аннигиляции $q\bar{q}$ рождаются преимущественно с большими $|y|$ по сравнению с \bar{t} -кварками
- На LHC доминирующий процесс – зарядово-симметричный глюонный синтез, который не приводит к асимметрии и затрудняет наблюдение асимметрии от аннигиляции $q\bar{q}$

$$A_{FB} = (9,5 \pm 0,7)\% \text{ (Tevatron)}$$

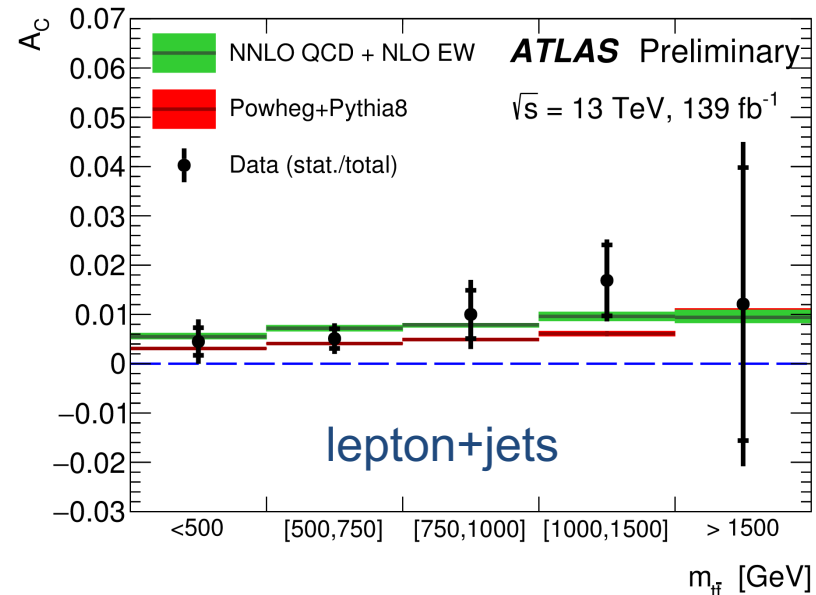
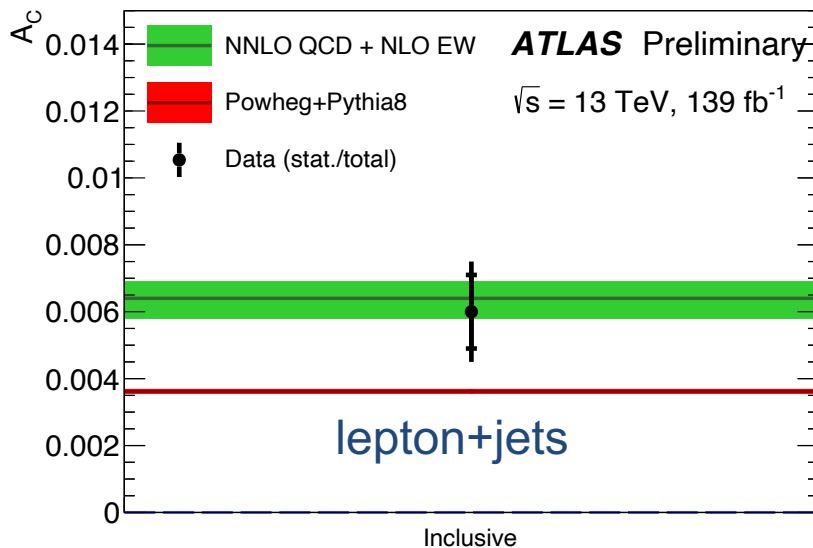


Зарядовая асимметрия $t\bar{t}$

- Вместо A_{FB} на LHC вводится понятие зарядовой асимметрии A_C :

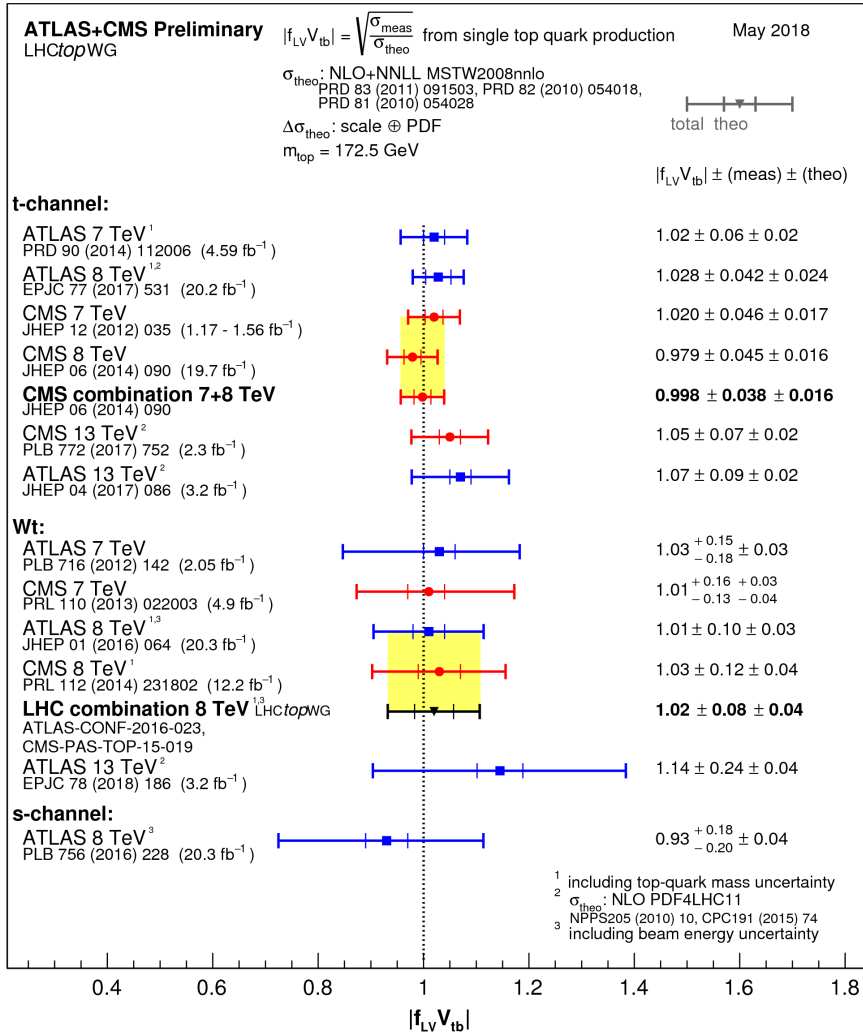
$$A_C = \frac{N(\Delta|y| > 0) - N(\Delta|y| < 0)}{N(\Delta|y| > 0) + N(\Delta|y| < 0)},$$

$$\Delta|y| = |y_t| - |y_{\bar{t}}| \quad A_C = (0,64^{+0,05}_{-0,06})\% \text{ (LHC)}$$



- Величина измеренной зарядовой асимметрии $0,6\% \pm 0,15\%$ согласуется с расчетами NNLO QCD + NLO EW и отличается на 4σ от 0

Элемент V_{tb} матрицы CKM



- Сечение образования одиночного t -кварка в СМ $\sigma_t \sim |V_{tb}|^2$, где V_{tb} – элемент матрицы CKM (смешивания кварков).
- Это дает возможность непосредственно определить величину V_{tb} из измеренного сечения
- $|V_{tb}| = \sqrt{\frac{\sigma_{meas}}{\sigma_{theor}(V_{tb}=1)}}$
- Непрямые измерения V_{tb} в распадах B -мезонов, основанные на предположении об унитарности ($\sum_j |V_{ij}|^2 = 1$) матрицы CKM и о количестве поколений кварков, дают $|V_{tb}| = 0,999105 \pm 0,000032$

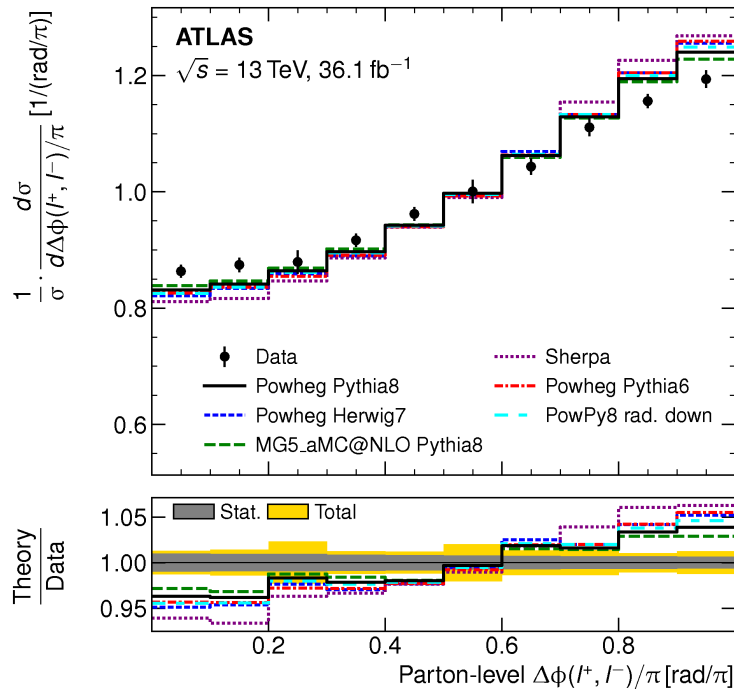
Корреляция спинов $t\bar{t}$

- В СМ ожидается близкая к нулю поляризация t - и \bar{t} -кварков, однако предсказывается значительная корреляция их спинов
- Коэффициент корреляции спинов:

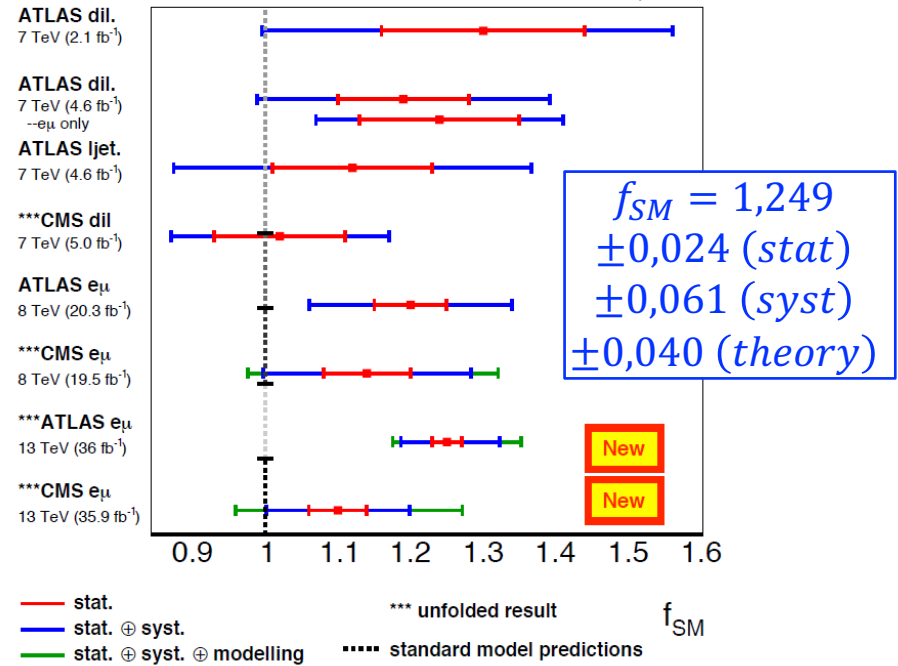
$$A = \frac{N_{like} - N_{unlike}}{N_{like} + N_{unlike}} = \frac{N(\uparrow\uparrow) + N(\downarrow\downarrow) - N(\uparrow\downarrow) - N(\downarrow\uparrow)}{N(\uparrow\uparrow) + N(\downarrow\downarrow) + N(\uparrow\downarrow) + N(\downarrow\uparrow)} > 0$$

- Отклонение корреляций от предсказаний СМ – намек на «новую физику»
- t -кварк распадается до адронизации, поэтому корреляция «передается» продуктам его распада
- Заряженные лептоны от распадов W -бозонов (от распадов t -кварков) несут почти всю спиновую информацию t -кварка
- Эта информация может быть получена из измерения их угловых координат ($\Delta\varphi$ и $\Delta\eta$)

Корреляция спинов $t\bar{t}$



Отклонение от СМ $3,2\sigma$



- Методом МК моделируются нормированные дифф. сечения для гипотезы коррелированных согласно СМ спинов (x_{spin}) и некоррелированных (x_{nospin}) спинов
- Нормированное сечение для данных фитируется как функция f_{SM} в i -ом бине:

$$x_i = f_{SM} \cdot x_{spin,i} + (1 - f_{SM}) \cdot x_{nospin,i}$$

f_{SM} – доля «СМ-подобных» корреляций

Заключение

- LHC – фабрика t -кварков, предоставляет отличную возможность для исследования его свойств, и, следовательно, дает возможность уточнения параметров СМ
- Получены сечения рождения t -кварков
- Получены точные значения массы и ширины t -кварков
- Исследована зарядовая асимметрия рождения $t\bar{t}$
- Определена величина элемента V_{tb} матрицы СКМ
- Ведутся работы по измерению корреляции спинов $t\bar{t}$