

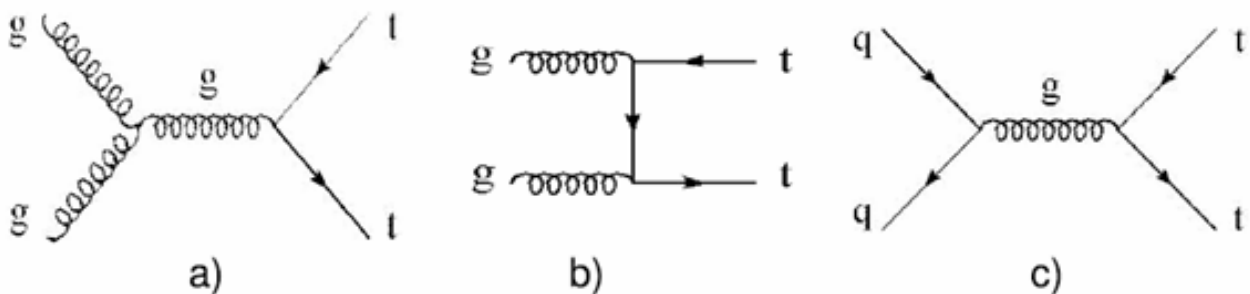
Характеристики топ-кварков в pp-соударениях в эксперименте ATLAS

Н.М. Артемьева

Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова
artemeva.nm16@physics.msu.ru

Топ-кварк – самая тяжелая фундаментальная частица Стандартной Модели, которая была открыта в 1995 году на протон-антипротонном коллайдере Тэватрон, что окончательно сформировало три кварковых поколения [1]. Т-кварк уникален во многих аспектах и является одним из наиболее интересных объектов среди элементарных частиц. В отличие от остальных кварков, топ-кварк распадается настолько быстро ($t_\tau \sim 10^{-25}$ с), что не успевает адронизоваться, что, в свою очередь, дает возможность изучать «голый» кварк, свойства которого не скрыты эффектами адронизации. [2] Топ-кварк имеет большое значение для изучения более редких процессов, учитывая, что рождение $t\bar{t}$ -пар является фоном практически для всех процессов, имеющих лептоны и струи в их конечных состояниях.

В настоящее время топ-кварк исследуется преимущественно в адронных взаимодействиях. Образование $t\bar{t}$ -пар в протон-протонных взаимодействиях на Большом Адронном Коллайдере происходит либо при аннигиляции кварка и антикварка, либо при взаимодействии глюонов в сталкивающихся протонах. Относительные вклады процессов зависят от энергии и природы пучков: на Тэватроне доля процессов аннигиляции $q\bar{q}$ составляет около 85%, а на БАК при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ топ-кварки рождаются преимущественно в реакциях взаимодействия глюонов ($\approx 87\%$) [3].



Диаграммы образования t -кварков в лидирующем порядке КХД: (a), (b) – глюон-глюонное взаимодействие; (c) – кварк-антикварковая аннигиляция.

Высокие энергии соударения протонов на БАК приводят к тому, что учета диаграмм лидирующего порядка недостаточно для полного описания сечения процессов рождения пар топ-кварков. Для этого необходимо использовать следующие порядки пертурбативной КХД. В рамках КХД в приближении NNLO (Next-to-Next-to-Leading Order)+NNLL (Next-to-Next-to-Leading-Log order) были выполнены расчёты инклюзивного сечения рождения $t\bar{t}$ -пар, погрешности которых, связанные со вкладами от процессов более высокого порядка, составили порядка 5% для БАК. Точные измерения инклюзивных и

дифференциальных сечений могут быть использованными для проверки предсказаний Стандартной Модели. В таблице ниже приведены расчёты сечения рождения $t\bar{t}$ -пар для $m_t = 172,5$ ГэВ для трех энергий взаимодействия протонов [4]. Из приведенных данных видно, что сечение рождения пар топ-кварков при изменении энергии от 7 до 13 ТэВ увеличивается более чем в 4 раза, то есть, наблюдается интенсивный рост сечения рождения.

Таблица 1

\sqrt{s} (TeV)	$\sigma(tt) \pm \text{PDF}/\alpha_s \pm \text{scale}$	$\Delta\sigma/\sigma$
7	$177.3 \pm 9.0 +4.6 -6.0$ pb	6.1%
8	$252.9 \pm 11.7 +6.4 -8.6$ pb	5.7%
13	$832 \pm 35 +20 -29$ pb	5.5%

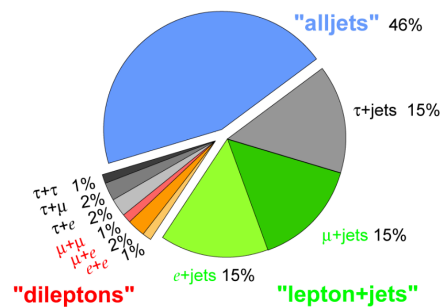
Первые измерения при $\sqrt{s}=13$ ТэВ на ATLAS дали следующий результат для величины сечения рождения топ-кварка:

$$\sigma_{t\bar{t}} = 830.4 \pm 0.4(\text{stat.}) \pm 38.2(\text{syst.}) \text{ пб. [5]}$$

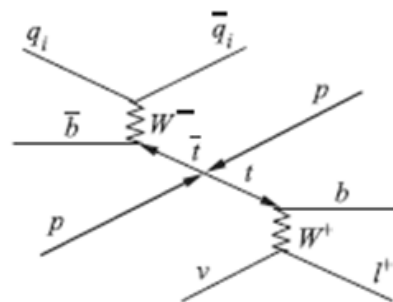
Полученные результаты совпадают с результатами расчетов.

Топ-кварк распадается посредством электрослабого взаимодействия на W-бозон и кварк. W-бозон, в свою очередь, распадается на адронные струи или лептоны. Поэтому, распады пар топ-кварков классифицируются следующим образом:

- 1) Адронная или струйная мода (оба W распадаются по струйному каналу $W \rightarrow qq$);
- 2) Лептон-струйная мода (один из W распадается по лептонному каналу $W \rightarrow lv$, а второй – по адронному каналу);
- 3) Лептонная мода (оба W распадаются по лептонному каналу $W \rightarrow lv$).



Примерно в 99,8% случаев топ-кварк распадается на W-бозон и b-кварк, что означает, что для измерения характеристик t-кварка необходимо использовать идентифицированные струи b-кварков.



Электрический заряд топ-кварка такой же, как у двух других верхних кварков первого и второго поколений, и равен $+\frac{2}{3}$. Точность современных экспериментов не позволяет прямо измерить этот заряд. В эксперименте ATLAS были проведены измерения

заряда топ-кварка путем изучения корреляций зарядов W^\pm -бозонов и b-струй в распадах t- и \bar{t} -кварков:

$$Q_t = 0,64 \pm 0,02(stat.) \pm 0,08(syst.). [6]$$

Отличие заряда топ-кварка от $+\frac{2}{3}$ привело бы к серьезным проблемам в структуре взаимодействий Стандартной Модели.

Масса топ кварка является очень важным параметром Стандартной модели, и поэтому ее точное измерение необходимо как для оценки внутренней согласованности СМ, так и для тестирования возможных расширений. Экспериментально массу топ кварка обычно определяют путем сравнения подходящих восстановленных распределений продуктов распада топ кварка в данных с данными моделирования. Затем настраивается параметр массы в симуляции, чтобы оптимально описать данные. Последние результаты таких измерений в экспериментах ATLAS и CMS составляют [7]:

$$m_t(ATLAS) = (172,51 \pm 0,50) \text{ ГэВ}; \quad m_t(CMS) = (172,44 \pm 0,48) \text{ ГэВ}.$$

С помощью проекта ATLAS Open Data [8] можно проводить анализ событий с рождением топ-кварков. На начальном этапе проекта для анализа были доступны лишь данные, полученные при энергии 8 ТэВ с интегральной светимостью 1 фб^{-1} . Теперь, в 2020 году стали доступны новые данные, которые были зарегистрированы при энергии 13 ТэВ с интегральной светимостью 10 фб^{-1} . Данные при 8 ТэВ анализируются непосредственно с помощью виртуальной машины с предустановленным программным пакетом ROOT, а возможный вариант обработки данных написан с помощью языка Python. Анализ событий для 13 ТэВ, хотя и требует наличия виртуальной машины для доступа в репозиторий GitHub, проводится с помощью аналитического фреймворка, написанного на языке C++ и использующего программный пакет ROOT.

Кроме того, у пользователя ATLAS Open Data есть доступ к событиям, смоделированным методом Монте Карло. Эти события представляют собой рассчитанные физические реакции, продукты которых проходят ту же систему регистрации и анализа, что и экспериментальные события. Доступ к смоделированным событиям позволяет проводить детальное сравнение экспериментальных результатов с теоретическими.

С использованием отобранных событий были построены основные распределения продуктов распада: распределения по поперечным импульсам струй и лептонов для распадов по лептон-струйному каналу, распределение по потерянному поперечной энергии и распределения по псевдобыстроте для струй и лептонов. Эти распределения приведены на рисунках 1-5, соответственно.

Из гистограмм на рисунках 1, 2 и 3, 4 видно, что количество событий различается благодаря более высокой интегральной светимости. Внизу под графиками показано отношение распределений экспериментальных данных к моделированным, которое близко к единице. Данные эксперимента хорошо согласуются с результатами моделирования.

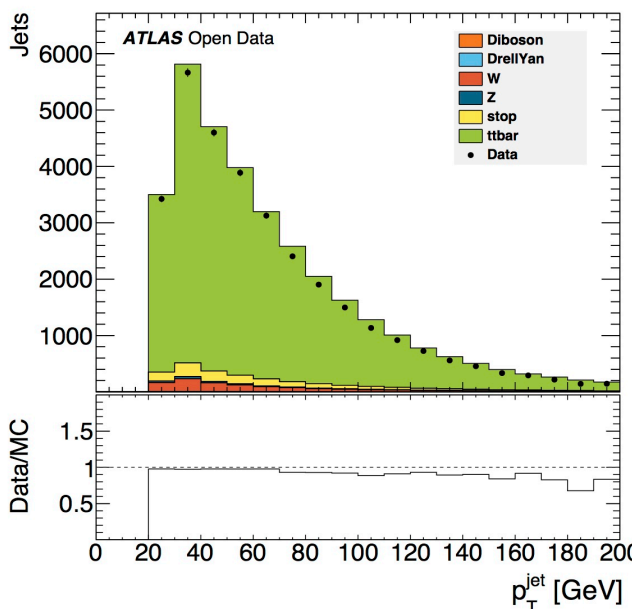


Рисунок 1

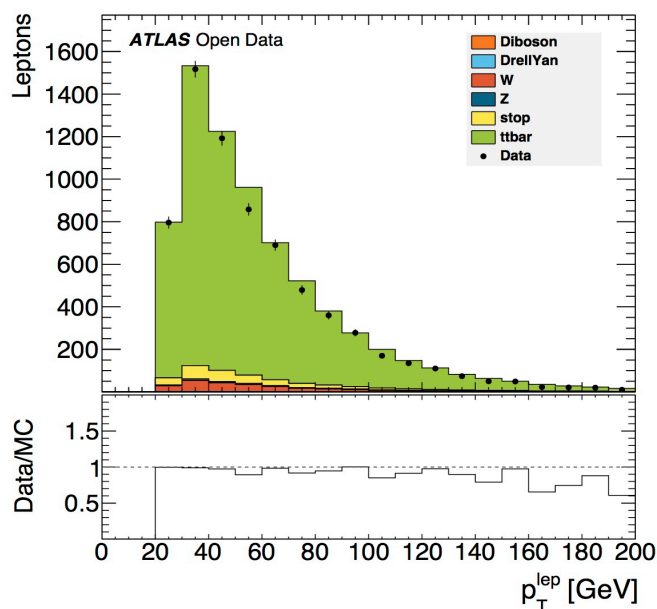


Рисунок 2

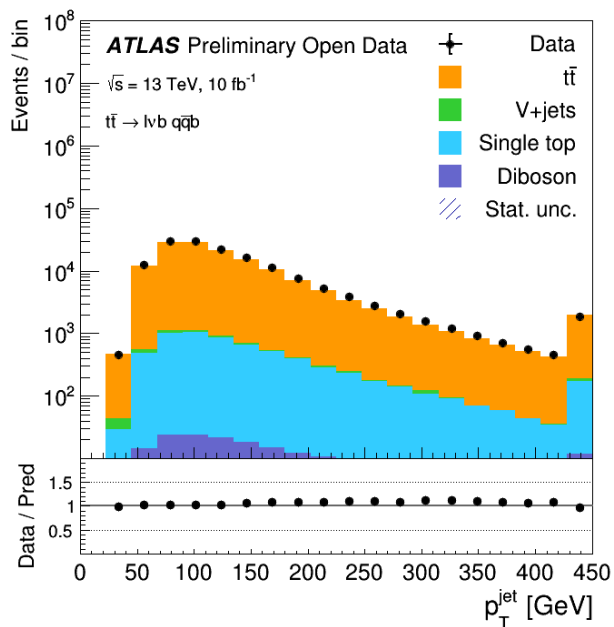


Рисунок 3

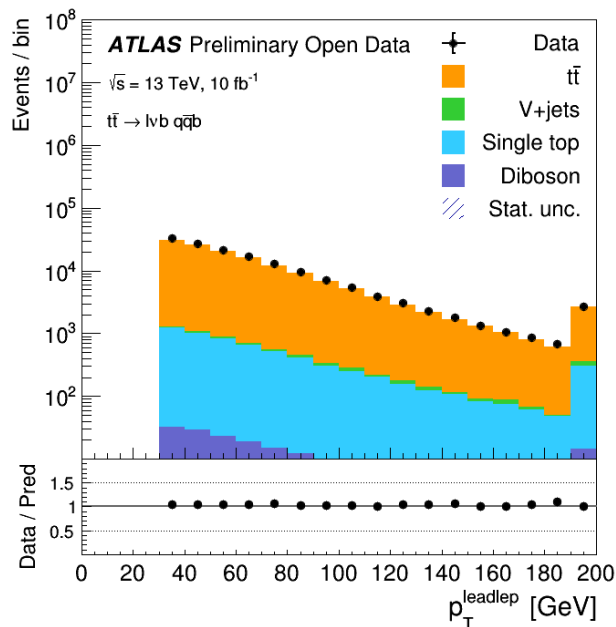


Рисунок 4

Распределения по поперечным импульсам струй (рис. 1 и 3) и лептонов (рис. 2 и 4) для лептон-струйных распадов пар топ кварков в pp соударениях при энергиях 8 и 13 ТэВ соответственно. Точками показаны экспериментальные данные, цветные гистограммы соответствуют моделированным событиям

Величина потерянной поперечной энергии E_t^{miss} является важной характеристикой лептон-струйных распадов пар топ кварков. Вследствие того, что в событиях с топ кварками присутствуют нейтрино, которые уносят большое количество энергии, в событиях с рождением топ кварков наблюдаются большие значения E_t^{miss} по сравнению с событиями с Z-бозонами.

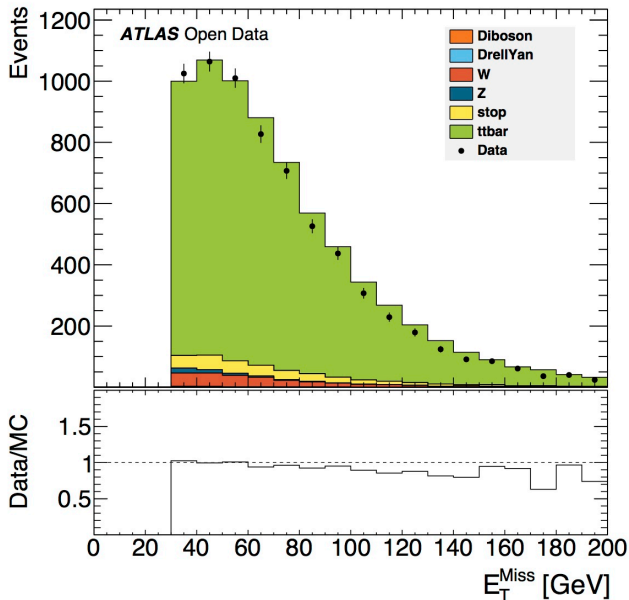


Рисунок 5

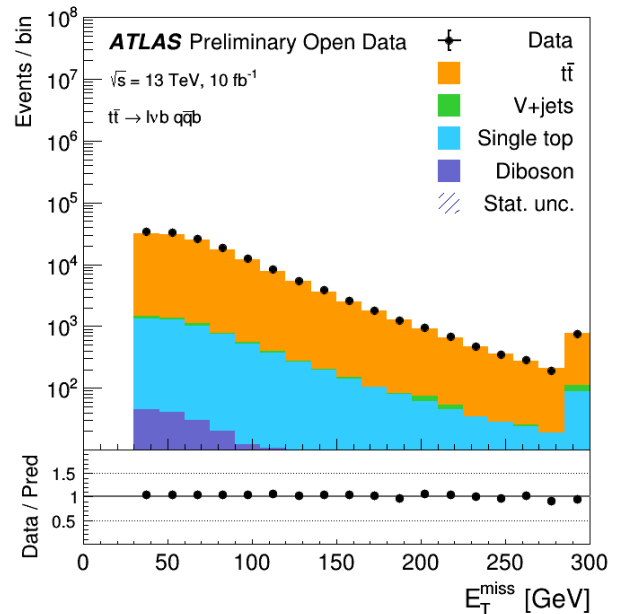


Рисунок 6

Распределения по потерянной поперечной энергии для лептон-струйных распадов пар топ кварков в pp соударениях при энергиях 8 и 13 ТэВ. Точками показаны экспериментальные данные, цветные гистограммы соответствуют моделированным событиям.

Из распределений по псевдобыстроте на рисунках 7 - 10 видно, что акцептанс детектора перекрывает практически всю кинематическую область лептонов и струй в событиях с рождением пар топ кварков. Экспериментальное распределение совпадает с предсказанным результатом Монте-Карло моделирования.

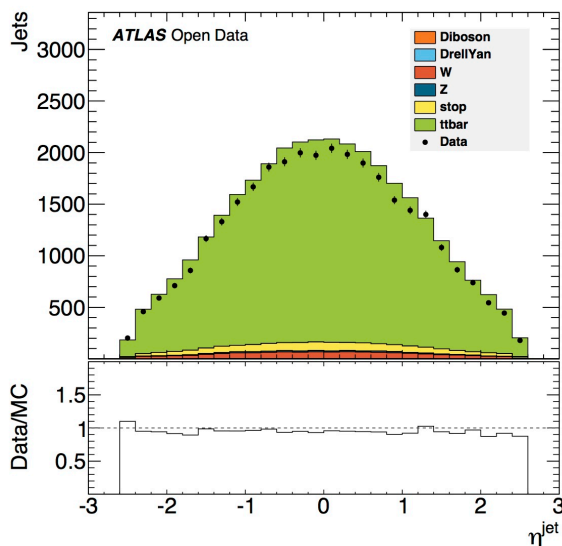


Рисунок 7

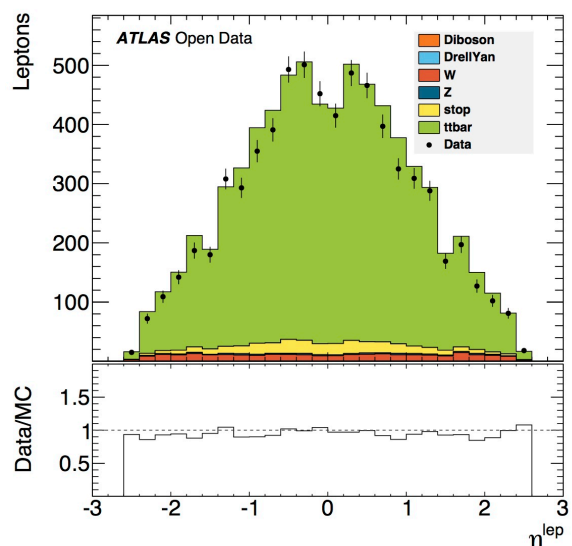


Рисунок 8

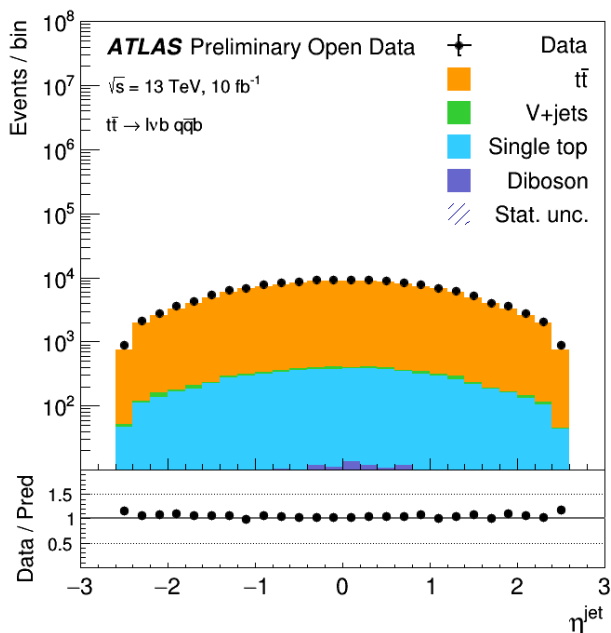


Рисунок 9

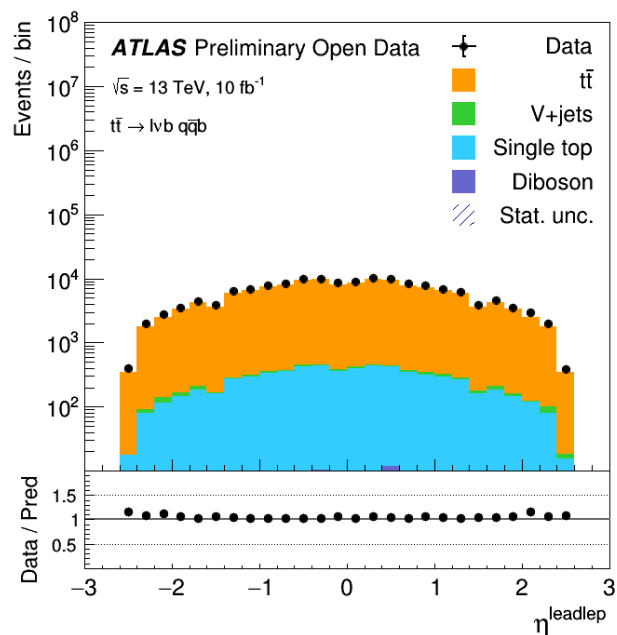


Рисунок 10

Распределения по псевдобыстроте струй (рис. 7 и 9) и лептонов (рис. 8 и 10) для распадов пар топ-кварков в pp соударениях при энергиях 8 и 13 ТэВ соответственно. Точками показаны экспериментальные данные, цветные гистограммы соответствуют моделированным событиям.

В заключение отметим, что в работе был выполнен анализ событий с рождением пары топ-антитоп кварков на открытых данных эксперимента ATLAS в pp-взаимодействиях при энергиях 8 и 13 ТэВ. В анализе было использовано приблизительно 270 миллионов событий с рождением топ-антитоп пары [9]. Все построенные распределения хорошо описываются расчетами Монте-Карло генераторов, что позволяет проводить измерения свойств топ-кварков. Полученные в ходе анализа данные согласуются с предсказаниями Стандартной модели.

Литература

- 1) Э.Э. Боос О.Е. Брандт, Д.С. Денисов, С.П. Денисов, П.Д. Граннис Топ-кварк (к 20-летию открытия). - 2015 г.
- 2) Э. Боос, Л. Дудко, П. Мандрик, С. Слабоспицкий Топ-кварк. Итоги и перспективы – 2019 г.
- 3) Л.Н. Смирнова Эксперимент ATLAS Большого Адронного Коллайдера - Москва : Университетская книга, 2014.
- 4) **Julian Glatzer** Inclusive top pair production at 7, 8 and 13 TeV in ATLAS, ATL-PHYS-PROC-2015-172
- 5) **ATLAS Collaboration** Measurement of the $t\bar{t}$ production cross-section in the lepton+jets channel at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS experiment, ATLAS-CONF-2019-044
- 6) **ATLAS Collaboration** Measurement of the top quark charge in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector, CERN-PH-EP-2013-056
- 7) **Benjamin Pearson** Top quark mass in ATLAS, Top2017 Conference, ATL-PHYS-PROC-2017-259
- 8) <http://opendata.atlas.cern/>
- 9) **ATLAS Collaboration** Review of the 13 TeV ATLAS Open Data release, PUB-OTRC-2020-01