

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

имени М. В. ЛОМОНОСОВА»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА ОБЩЕЙ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

«Анализ распадов топ-кварков в pp-соударениях в эксперименте ATLAS»

Выполнила студентка

413 группы

Артемьева Наталья Михайловна

Научный руководитель:

д. ф.-м. н., профессор

Смирнова Лидия Николаевна

Допущен к защите _____

Зав. кафедрой _____

Москва 2020

Оглавление

Введение.....	3
1. Открытие топ-кварка	5
2. Детектор ATLAS	8
3. Свойства топ-кварка	13
3.1. Парное рождение топ-кварков	13
3.2. Распад топ-кварка.....	15
3.3. Ширина распада топ-кварка	16
3.4. Масса топ-кварка	17
4. ATLAS Open Data	19
4.1. Набор данных ATLAS Open Data при 8 ТэВ.....	19
4.2. Отбор событий для анализа пар топ-кварков.....	21
4.3. Набор данных ATLAS Open Data при 13 ТэВ.....	22
5. Результаты анализа событий с рождением пар топ-кварков при энергиях 8 и 13 ТэВ	23
6. Определение масс W-бозона и топ-кварка по инвариантной массе струй 28	
Заключение	31
Список литературы	32

Введение

Топ-кварк по праву можно назвать одной из наиболее интересных частиц Стандартной Модели. Он во многом отличается от остальных кварков, прежде всего являясь самой тяжелой из всех известных элементарных частиц. Его связь с другими поколениями кварков очень мала: элемент V_{tb} матрицы смешивания Каббиро-Кобаяси-Маскавы близок к единице, в то время как элементы V_{td} и V_{ts} значительно меньше единицы. Время жизни топ-кварка ($\tau_T \approx 5 * 10^{-25} \text{с}$) намного меньше типичного времени, необходимого для образования связанных состояний кварков в квантовой хромодинамике, и поэтому в отличие от остальных кварков, топ-кварк распадается настолько быстро, что не успевает адронизоваться, что, в свою очередь, дает возможность изучать «голый» кварк, свойства которого не скрыты эффектами адронизации. Еще одна важная особенность t-кварка – он сохраняет информацию о спине и поляризации (т.е. спин, которым он обладал в момент образования, передается продуктам его распада и может быть определен из угловых распределений частиц распада). [1]

Возникает закономерный вопрос: почему же топ-кварк такой уникальный, и с чем связана такая большая масса? В данный момент ответ на этот вопрос так и не найден. За особенностями t-кварка могут стоять проявления «новой физики», поэтому исследование его свойств остается очень важным направлением в изучении физики частиц Стандартной Модели и поиске физики за ее пределами.

Данная работа посвящена исследованию характеристик событий с рождением пар топ-анти топ кварков в протонных соударениях в эксперименте ATLAS Большого адронного коллайдера при энергиях 8 и 13 ТэВ. Для анализа событий pp-соударений использовались наборы данных проекта ATLAS Open Data. Обработка данных производилась с помощью виртуальной машины с

предустановленным программным пакетом ROOT, были использованы программы анализа, написанные на Python и C++ (для разных наборов данных).

Актуальность работы заключается в проведении анализа событий с рождением пар топ-кварков на Большом Адронном Коллайдере (БАК) при энергии соударений, равной не только 8, но и 13 ТэВ. Данные для анализа, собранные при энергии 13 ТэВ с интегральной светимостью 10 фб^{-1} были опубликованы коллаборацией ATLAS совсем недавно, в январе 2020 года. Благодаря более высокой светимости, новый набор данных содержит значительно большее число событий, что позволяет получить более точные данные о свойствах топ-кварка.

В работе кратко рассказывается об истории открытия топ-кварка, приводится описание эксперимента ATLAS Большого адронного коллайдера и теоретическое описание физики топ-кварков, показаны характеристики наборов событий и особенности работы с проектом ATLAS Open Data, а также приведены результаты проведенного анализа имеющихся данных и расчёта массы W-бозона и t-кварка с использованием данных ATLAS Open Data.

1. Открытие топ-кварка

В 1973 году для объяснения CP-инвариантности Макото Кобаяси и Тосихидэ Маскавой было предсказано существование третьего поколения кварков, а в 1977 лаборатории Фермилаб в составе Υ -мезона был открыт b -кварк. Всё это, в свою очередь, подразумевало наличие партнера b -кварка с зарядом $+\frac{2}{3}$ – топ-кварка.

На основании соотношений масс других кварков ожидалось, что t -кварк будет приблизительно в три раза тяжелее b -кварка, и предполагалось, что его можно обнаружить в системе $t\bar{t}$ в составе тяжелого адрона массой примерно в 30 ГэВ.

Многие электрон-позитронные коллайдеры (PETRA в DESY, TRISTAN в КЕК, SLC и LEP в ЦЕРНе) подключились к поискам топ-кварка, друг за другом повышая предполагаемые пределы его массы. В табл. 1 показано, как возрастал нижний предел массы топ-кварка с 1980-х до начала 1990-х годов. [2]

Год	Коллайдер	Пучки	Предел m_t , ГэВ
1984	PETRA (DESY)	e^+e^-	$> 23,3$
1990	TRISTAN (КЕК)	e^+e^-	$> 30,2$
1990	SLC (SLAC), LEP (ЦЕРН)	e^+e^-	$> 45,8$
1988	$S\bar{p}pS$ (ЦЕРН)	$p\bar{p}$	> 45
1990	$S\bar{p}pS$ (ЦЕРН)	$p\bar{p}$	> 69
1991	Тэватрон (Фермилаб)	$p\bar{p}$	> 91
1994	Тэватрон (Фермилаб)	$p\bar{p}$	> 131

Таблица 1. Пределы массы t -кварка, полученные в 1980-х – начале 1990-х годов

С появлением $S\bar{p}pS$ (540 – 630 ГэВ) в ЦЕРНе и Тэватрона (1800 ГэВ) в Фермилаб, «планка» массы топ кварка повысилась еще больше. При больших массах обнаружение связанного состояния топ-анти топ казалось маловероятным, и ожидалось наблюдать распад изолированного топ-кварка. Кроме того предполагалось, что W -бозон имеет массу, большую, чем масса топ-кварка, а

распад $W^+ \rightarrow t\bar{b} \rightarrow e^+ \nu_e b\bar{b}$ считался подходящим для поиска топ-кварка. Однако безуспешные поиски одиночных топ-кварков в таких распадах повышали вероятность того, что масса t-кварка все-таки должна быть больше массы W-бозона. [3]

В 1992 году коллаборация CDF начала новые поиски образования топ-анти топ пар, в которых каждый из кварков распадается на b-кварк и реальный или виртуальный (в зависимости от массы t-кварка) W-бозон. Для этого отбирались события с двумя лептонами, или с лептоном и струями в конечном состоянии. В случае со струями дополнительно было необходимо, чтобы хотя бы одна струя была связана с b-кварком. На наличие b-струи указывает присутствие в струе «мягкого» мюона с малым поперечным импульсом от полулептонного распада W-адрона. Таким образом, минимальный предел предполагаемой массы t-кварка повысился до 91 ГэВ, а возможность распада W-бозона на t- и b-кварки была исключена.

В 1994 году на эксперименте D0, использующем жидкоаргоновую калориметрию высокого разрешения и обладающем большим аксептансом для электронов и мюонов, нижний предел m_t был увеличен до 131 ГэВ. В это же время установка CDF была улучшена путем помещения кремниевого микрострипового вершинного детектора вблизи места встречи пучков p и $\bar{p}$, что позволило увеличить надежность идентификации b-струй и подавить фоновые процессы, связанные с сильными взаимодействиями.

В течение 1992-1995 годов в обоих экспериментах наблюдались события, преобладающие над ожидаемым фоном и вселяющие надежду на скорое открытие топ-кварка при увеличении статистики. Летом 1994 года, во время остановки Тэватрона была обнаружена конструкционная ошибка, после устранения которой значительно возросла мгновенная светимость, и к началу 1995 года количество данных выросло приблизительно в три раза по сравнению с предыдущим годом. Благодаря этому CDF и D0 посчитали, что набранных данных достаточно для открытия. Обе коллаборации параллельно работали над анализом данных,

договорившись, что когда у одной из них будет готов черновик статьи, другая будет иметь неделю для завершения своей статьи, чтобы они были представлены к публикации одновременно. Коллаборация CDF представила свой черновик первой, и через неделю, 24 февраля 1995 года CDF и D0 представили свои статьи об открытии t -кварка в журнал Physical Review Letters.

2. Детектор ATLAS

На данный момент единственным, помимо Тэватрона, ускорителем, на котором в принципе возможно изучение топ-кварка, является Большой адронный коллайдер (БАК, или LHC – Large Hadron Collider). Его глобальная задача – проверка Стандартной Модели и поиск «новой физики» за ее пределами. С момента запуска в 2009 году были проведены два сеанса работы коллайдера: в период Run1 с 2009 по 2013 годы энергия столкновений встречных пучков достигла 8 ТэВ, а во время Run2 (2015-2018) – 13 ТэВ.

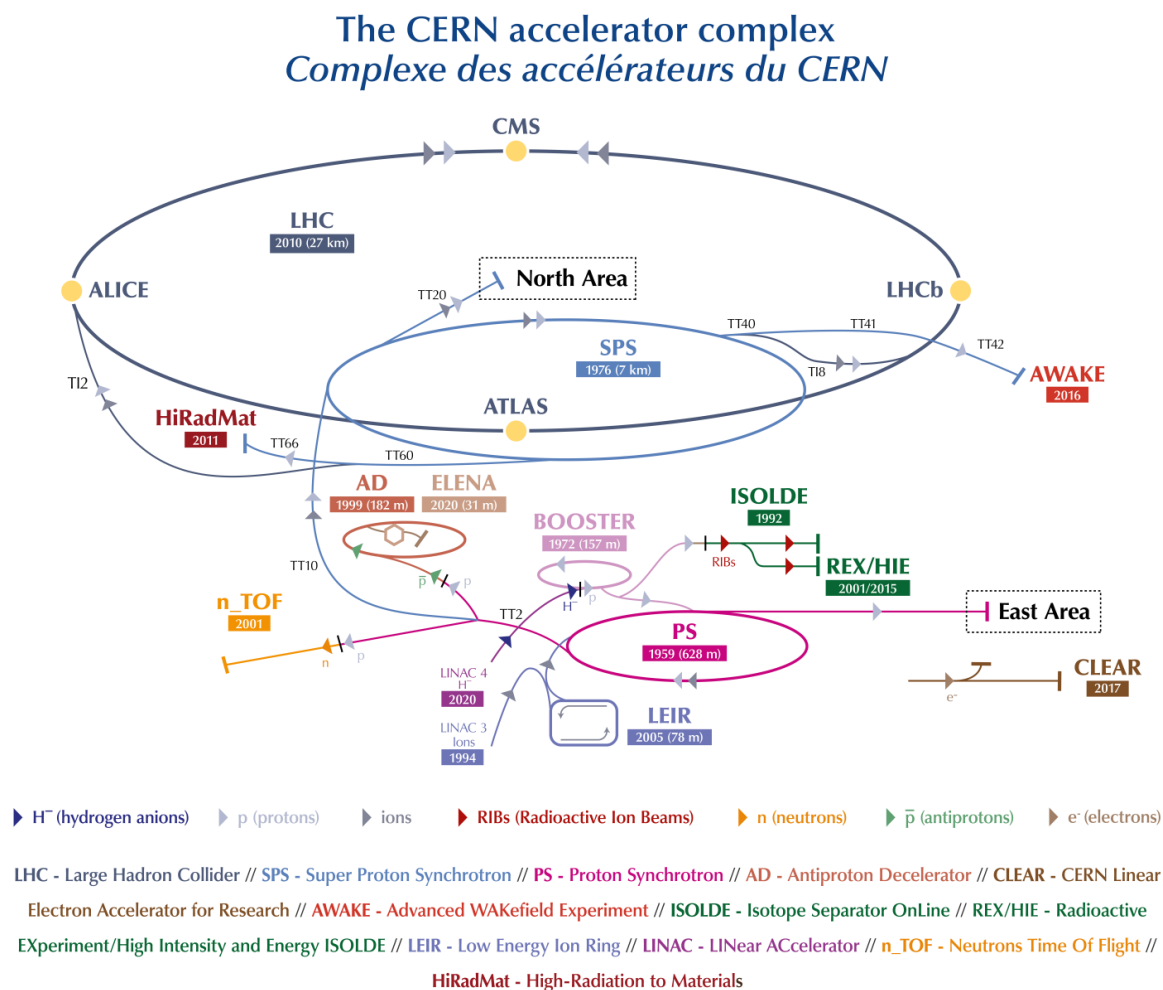


Рисунок 1. Схема ускорительного комплекса ЦЕРН

БАК является последним элементом «цепи» в комплексе ускорителей ЦЕРНа. Схема ускорительного комплекса представлена на рис. 1 [4]. Каждый из

ускорителей повышает энергию пучка частиц, прежде чем вводить пучок в следующую установку в последовательности. Источником протонов является газообразный водород. Электрическое поле используется, чтобы лишить атомы водорода их электронов, чтобы получить протоны. LINAC-2, первый ускоритель в цепи, разгоняет протоны до энергии 50 МэВ. Далее пучок вводится в протон-синхротронный бустер (PSB), который ускоряет протоны до 1,4 ГэВ, а затем – в протонный синхротрон (PS), разгоняющий пучок до 25 ГэВ. Финальной ступенью предварительного ускорения является суперсинхротрон (SPS), в котором протоны ускоряются до энергии 450 ГэВ. После SPS протоны, наконец, попадают в 27-километровое кольцо Большого адронного коллайдера, где они достигают максимальной энергии в 6,5 ТэВ в течение 20 минут. Банчи протонов (сгустки протонов, в каждом из которых около 100 миллиардом частиц) движутся внутри кольца в противоположных направлениях и пересекаются в определенных точках, в которых размещены детекторы, регистрирующие события при столкновениях банчей. Сейчас на кольце БАК расположены 4 основных детектора, два из которых (ATLAS и CMS) являются детекторами общего назначения, а остальные (ALICE, LHCb) имеют свои, более узконаправленные цели. Кроме того, имеются еще три вспомогательных детектора: TOTEM, MoEDAL и LHCf. [5]

ATLAS является многоцелевым детектором, основной задачей которого является изучение механизма возникновения масс фундаментальных частиц, поиск сверхтяжелых элементарных частиц, таких как бозон Хиггса и суперсимметричные партнеры частиц Стандартной модели, а также изучение свойств тяжелых кварков.

Детектор ATLAS обладает осевой симметрией относительно направления движения пучка ускоренных протонов и состоит из ряда больших концентрических цилиндров вокруг точки взаимодействия сталкивающихся частиц. Он делится на четыре основные части: внутренний детектор, калориметры, мюонный спектрометр и магнитные системы, которые определяют размеры и внешний вид детектора. В состав компонентов детектора также

интегрированы триггерная система и система сбора данных; специализированная многоуровневая вычислительная система, которая отбирает физические события с отличительными характеристиками; вычислительная система, которая разрабатывает и совершенствует программное обеспечение, используемое для хранения, обработки и анализа огромных объемов данных о столкновениях в 130 вычислительных центрах по всему миру. Общий вид детектора изображен на рисунке 2. [6]

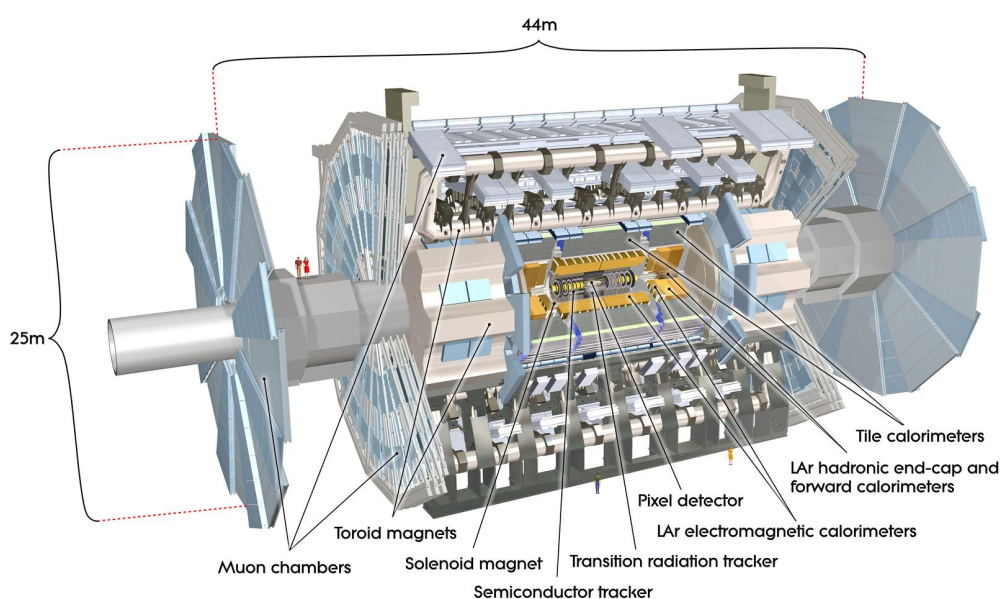


Рисунок 2. Общий вид детектора ATLAS

Различные частицы, проходя через части детектора, по-разному взаимодействуют с ними, и оставляют определенную информацию о прошедшей через них частице, на основе которой затем восстанавливаются ее тип, энергия, характеристики распада.

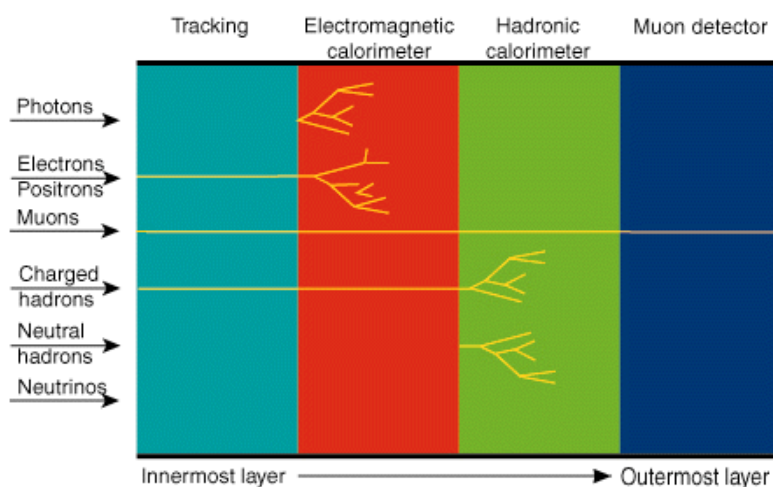


Рисунок 3. Взаимодействие различных типов частиц со структурами детектора

На рис. 3 показано, как различные типы частиц взаимодействуют с отдельными структурами детектора. [7]

Внутренний детектор - это первая часть ATLAS, которая «видит» продукты столкновений, поэтому она очень компактна и очень чувствительна. Внутренний детектор состоит из трех различных систем датчиков, помещенных в магнитное поле, параллельное оси пучка. Он измеряет направление, импульс и заряд электрически заряженных частиц, образующихся при каждом протон-протонном столкновении. Основными компонентами внутреннего детектора являются пиксельные детекторы, полупроводниковые микроstriповые детекторы (SCT) и трековые детекторы переходного излучения (TRT).

Калориметры измеряют энергию, которую теряет частица при прохождении через детектор. Обычно они предназначены для того, чтобы остановить или полностью «поглотить» большинство частиц, возникающих при столкновении, заставляя их вкладывать всю свою энергию в вещество детектора. Калориметры обычно состоят из слоев «пассивного» или «поглощающего» материала высокой плотности, например, свинца, чередующихся со слоями «активной» среды, такой как жидкий аргон или твердый сцинтиллятор. Но существуют и электромагнитные калориметры сплошного типа из тяжелого свинцового стекла.

Электромагнитные калориметры измеряют энергию электронов и фотонов при взаимодействии с веществом. Адронные калориметры измеряют энергию частиц, которые проходят ЕМ калориметр, но подвержены сильному взаимодействию. Калориметры способны остановить большинство известных частиц, кроме мюонов и нейтрино. Компонентами калориметрической системы ATLAS являются жидкоаргоновый (LAr) калориметр и адронный калориметр Tile.

Мюоны теряют мало энергии в веществе, поэтому проходят через внутренний детектор и калориметр «незамеченными». Мюонный спектрометр, состоящий из 4000 отдельных мюонных камер, определяет и измеряет импульсы мюонов. Мюонная система детектора ATLAS состоит из мониторируемых дрейфовых трубок (MDT), узкоазорных камер (TGC), камер с резистивными пластинами (RPC) и катодных стриповых камер (CSC).

Магнитная система ATLAS необходима для отклонения заряженных частиц таким образом, чтобы детекторы могли измерять их импульсы и заряды. Она разделяется на две компоненты: внешнюю, состоящую из тороидальных магнитов, и внутреннюю в виде соленоида. Во внешней системе расположен мюонный спектрометр, в соленоиде – внутренний трековый детектор. [8]

Свойства t -кварка, обнаруженного на Тэватроне в 1995 году, были измерены на тот момент времени довольно неточно. Сейчас БАК производит огромное число t -кварков с намного большей энергией и большими частотами столкновений, позволяя сделать более точные измерения его массы и взаимодействия с другими частицами. Эти измерения предоставляют косвенную информацию о деталях Стандартной Модели, которые, возможно, могут дать какие-то несогласованности, указывающие на новую физику.

3. Свойства топ-кварка

3.1. Парное рождение топ-кварков

Образование $t\bar{t}$ -пар в протон-протонных взаимодействиях на БАК 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 ($\approx 87\%$). [8]

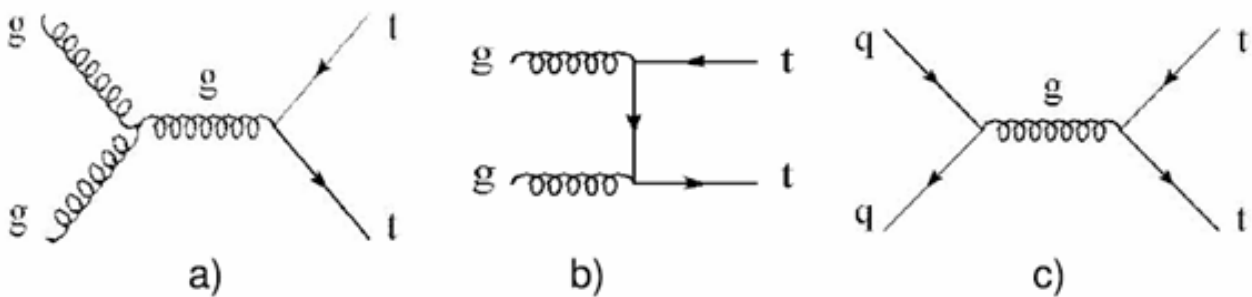


Рисунок 4. Диаграммы образования t -кварков в лидирующем порядке КХД: (a), (b) – глюон-глюонное рассеяние; (c) – кварк-антикварковое рассеяние

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 2 приведены расчёты сечения рождения $t\bar{t}$ -пар для $m_t = 172,5$ ГэВ для трех энергий взаимодействия протонов [9]. 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.

$\sqrt{s}$ (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%

Таблица 2. Расчеты сечения рождения пар t -кварков для 7, 8 и 13 ТэВ

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

$$\sigma_{t\bar{t}} = 830.4 \pm 0.4(\text{stat.}) \pm 38.2(\text{syst.}) \text{ пб. [10]}$$

Полученные результаты совпадают с результатами расчетов. На рис. 5 представлено сечение рождения $t\bar{t}$ пары в экспериментах ATLAS и CMS, а также Tevatron [11].

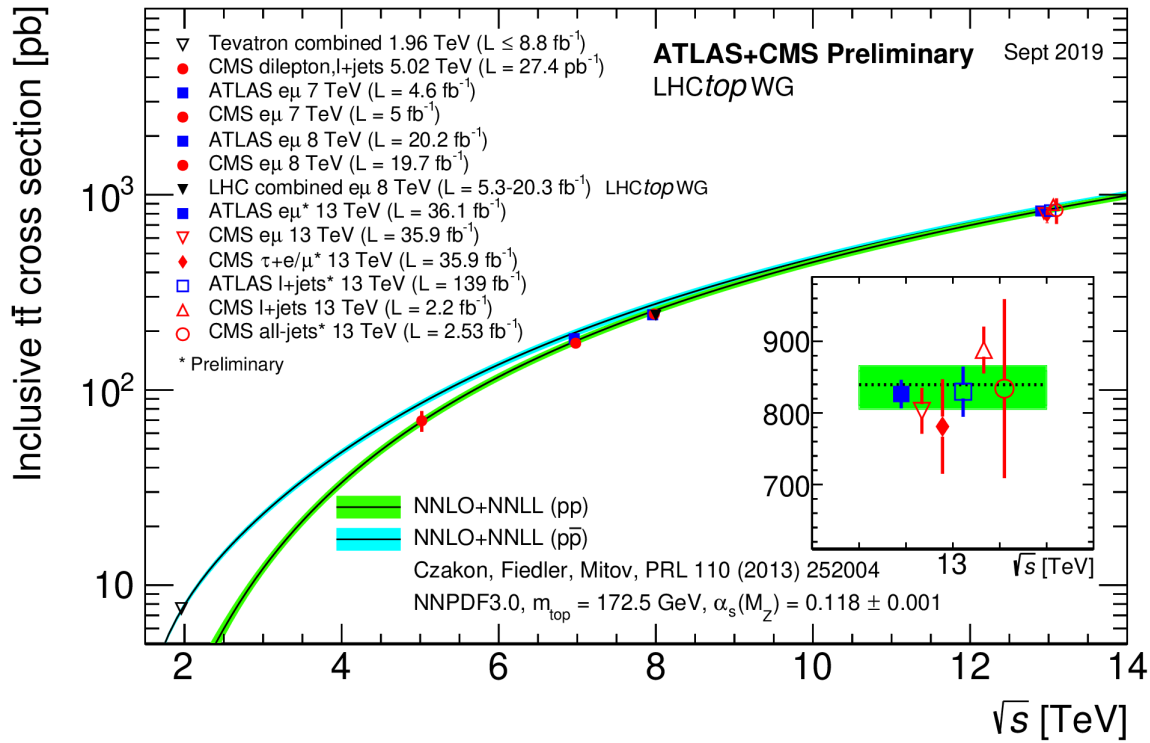


Рисунок 5. Сечение рождения пары топ-кварков на Большом адронном коллайдере и Тэватроне при различных энергиях протонных соударений

3.2. Распад топ-кварка

Топ-кварк распадается посредством электрослабого взаимодействия на W-бозон и кварк. W-бозон, в свою очередь, распадается на адронные струи или лептоны по следующим основным каналам:

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 $W \rightarrow lv$).

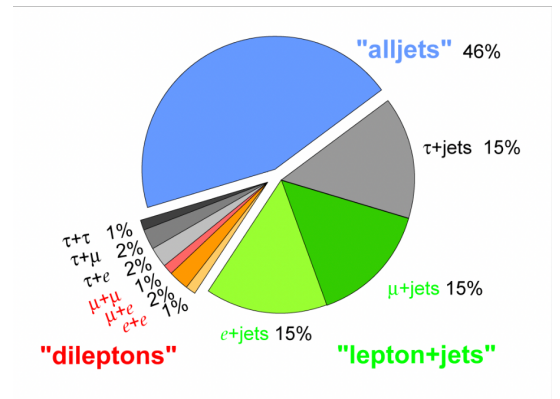


Рисунок 6. Каналы распада топ-кварков

В рамках Стандартной Модели смешивание кварков описывается элементами унитарной 3×3 матрицы Каббибо-Кобаяси-Маскавы (ККМ). Элементы этой матрицы входят во взаимодействия заряженных кварков с W-бозоном как константы. Взаимодействие t-кварка, b-кварка и W-бозона пропорционально элементу V_{tb} матрицы ККМ. В силу условия унитарности матрицы ККМ, а также предположений Стандартной модели о существовании лишь трех поколений кварков, элемент V_{tb} оказывается близким к единице. Экспериментально матричный элемент V_{tb} измеряется, например, при наблюдении одиночного рождения топ-кварка. Последнее глобальное фитирование экспериментальных результатов дало значение $1.020 \pm 0.040 \pm 0.020$, что соответствует предсказаниям СМ [12].

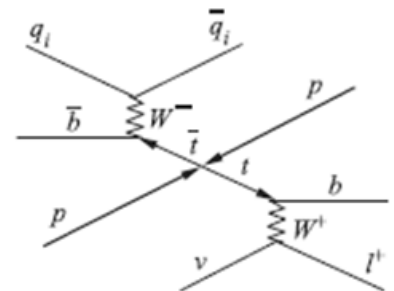


Рисунок 7. Распад пары топ-кварков по лептон-струйному каналу

Именно из-за большого значения V_{tb} , почти в 100% случаев топ-кварк распадается на W-бозон и b-кварк, что означает, что для измерения характеристик

t-кварка необходимо использовать идентифицированные струи b-кварков. От струй более легких кварков струи b-кварков отличаются присутствием вторичной вершины вблизи первичной вершины протонного соударения.

3.3. Ширина распада топ-кварка

Ширина распада топ кварка является самой большой среди всех фермионов, она обратно пропорциональна времени жизни, и любое статистически значимое отклонение от теоретических предсказаний СМ может указывать на распады топ-кварка вне Стандартной Модели. Теоретические расчеты СМ предсказывают значение для ширины распада 1,32 ГэВ для массы топ кварка, равной 172,5 ГэВ. Последние результаты измерений ATLAS дают значение ширины распада t кварка $1,9 \pm 0,5$ ГэВ, что соответствует предсказанию Стандартной модели и показывает, как увеличилась точность измерения ширины распада по сравнению с предыдущими измерениями для энергии 8 ТэВ [13].

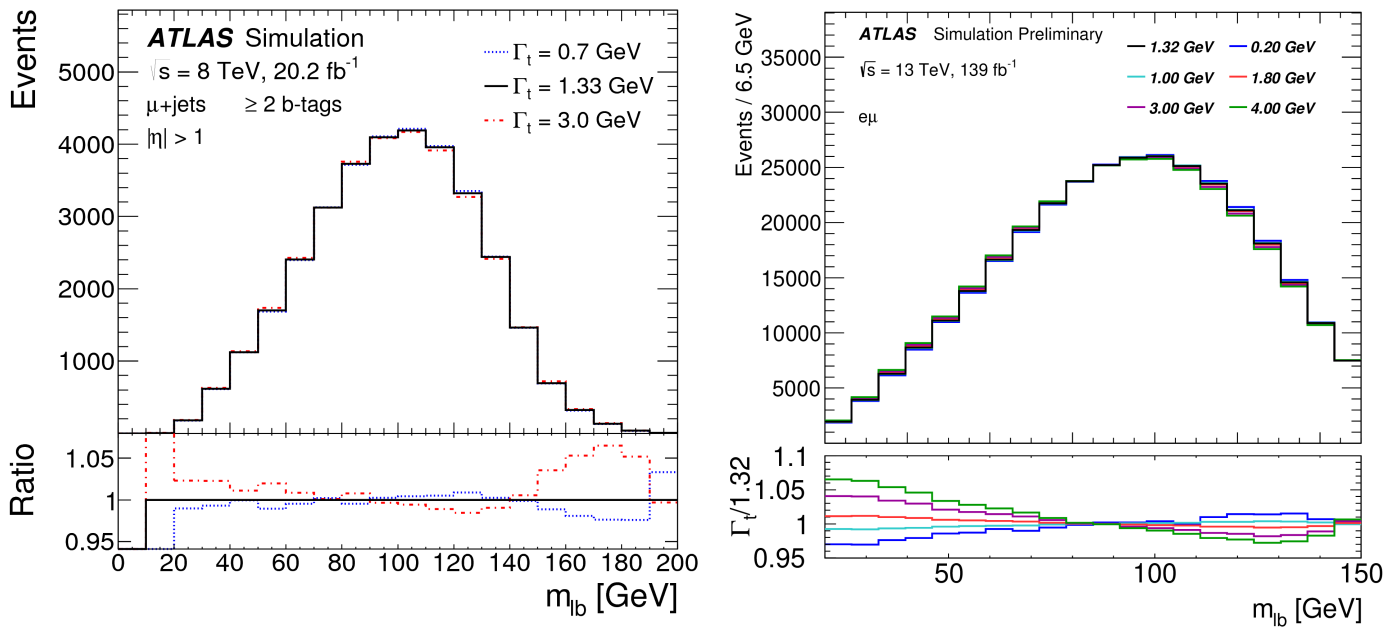


Рисунок 8. Распределения энергии распада топ-кварка, представляющие различные значения ширины распада при 8 ТэВ (слева) и при 13 ТэВ (справа)

3.4. Масса топ-кварка

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 можно измерить напрямую путем сравнения подходящих восстановленных распределений продуктов распада топ кварка в данных с данными моделирования. Затем настраивается параметр массы в симуляции, чтобы оптимально описать данные. Массу t-кварка можно измерить и косвенно, сравнивая сечение рождения $t\bar{t}$ -пары с теоретическими ожиданиями, получая значение, определенное в четко обозначенной теоретической схеме. [14]

На рис. 9 и 10 представлены экспериментальные значения массы топ кварка, измеренные в экспериментах ATLAS и CMS прямым и косвенным способами соответственно, а так же мировое значение, равное $173.34 \pm 0,76$ ГэВ [15].

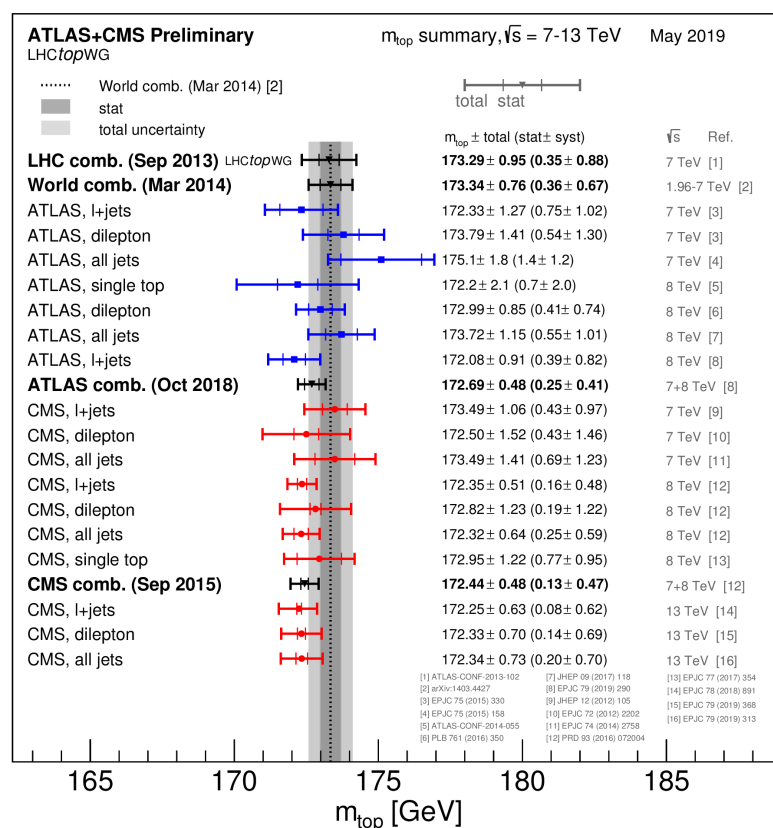


Рисунок 9. Экспериментальные значения массы топ кварка, полученные на экспериментах ATLAS и CMS прямым способом при энергиях 7, 8 и 13 ТэВ

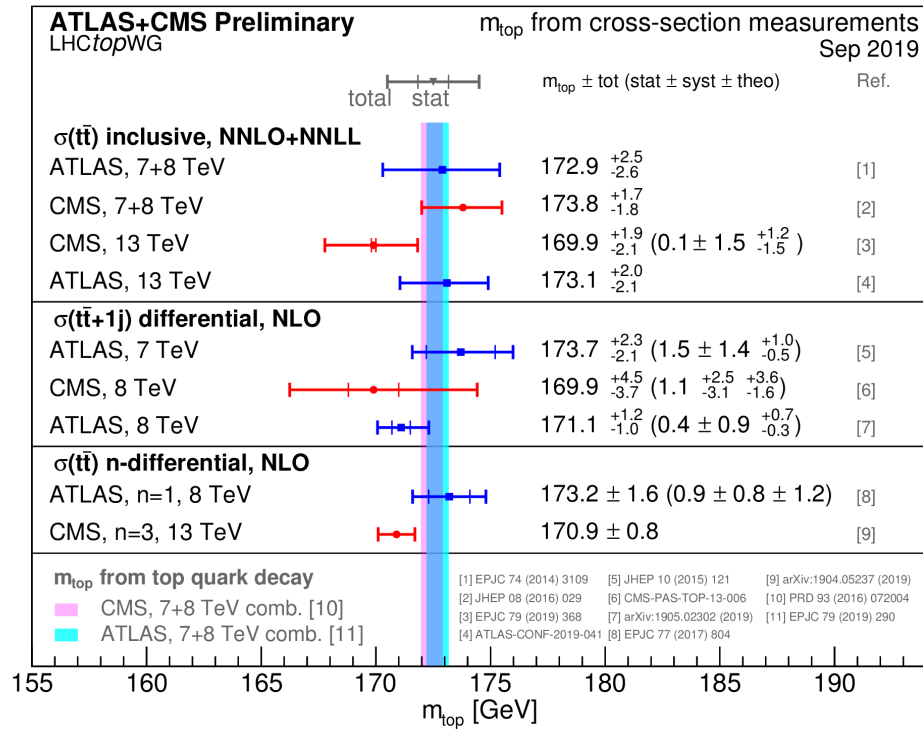


Рисунок 10. Экспериментальные значения массы топ кварка, полученные на экспериментах ATLAS и CMS косвенным способом при энергиях 7, 8 и 13 ТэВ

Как видим, мировое значение массы топ-кварка близко к средним значениям, полученным на Большом адронном коллайдере. Можно также отметить, что значения погрешностей уменьшаются с увеличением энергии столкновения протонов. Кроме того, прямые измерения с использованием лептон-струйного канала $l+jets$ распада топ-анти топ пары, дают меньшее значение погрешности по сравнению с дилептонным и адронным каналами.

4. ATLAS Open Data

Проект ATLAS Open Data был запущен для того, чтобы предоставить студентам возможность ознакомиться с методами обработки и анализа данных эксперимента ATLAS и научиться самостоятельно работать с полученными на детекторе данными [16].

4.1. Набор данных ATLAS Open Data при 8 ТэВ

В 2016 году был выпущен первый набор данных, полученных при энергии 8 ТэВ, что и послужило стартом проекту ATLAS Open Data. Этот набор состоит из данных 15 миллионов событий протон-протонных столкновений, собранных коллаборацией ATLAS в 2012 году при интегральной светимости 1 фб^{-1} , а также соответствующих смоделированных событий. [17]

Для данных набора был выполнен отбор событий, что позволило уменьшить размер и объем информации стандартного формата данных, используемого в ATLAS, что позволило ускорить обработку событий. Окончательный набор данных помещается на типичный жесткий диск, что облегчает проблемы с хранением. Отбор событий включал в себя следующие критерии:

- Исключены «поврежденные» события: события должны быть включены в Good Run List («список хороших сеансов»)
- Сработал однолептонный триггер (где лептон может быть электроном или мюоном) с порогом p_T , равным 5 ГэВ
- Лептоны должны быть изолированы в конусе с параметрами $ptcone30$ и $etcone20 < 0,15$
- Исключены события с плохими струями (то есть, со струями, не связанными с накоплением энергии в калориметрах)
- Есть хотя бы одна первичная вершина с по крайней мере пятью треками

- Зарегистрирован хотя бы один хороший лептон с $p_T > 25$ ГэВ

Для наиболее глубокой работы в ATLAS Open Data используется специально созданная для этого виртуальная машина (ВМ), которая объединяет в себе как программное обеспечение для проведения анализа, так и сам набор данных. Таким образом, использование ВМ избавляет пользователей от необходимости загружать и устанавливать различные пакеты.

Виртуальная машина позволяет немодифицированной операционной системе со всем ее установленным ПО работать в специальной среде «поверх» другой операционной системы. Физический компьютер - это «хост», а виртуальная машина - «гость». Большая часть гостевого кода выполняется без изменений непосредственно на главном компьютере, а гостевая операционная система ведет себя так, как будто она работает на реальной машине. Данные на ВМ при 8 ТэВ анализируются с предустановленным программным пакетом ROOT, а возможный вариант обработки данных написан с помощью языка Python.

Помимо реально зарегистрированных данных, 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. События моделируются с использованием современных теоретических моделей и используются для сравнения теории с реальными данными.

Полная симуляция требует следующих шагов:

1. Генерация событий: конечные состояния генерируются с использованием программ, основанных на теоретических расчетах, феноменологических моделях и экспериментальных данных.

2. Моделирование детектора: моделируется взаимодействие генерируемых частиц внутри детектора ATLAS.
3. Оцифровка: отклик детектора получается из взаимодействий частиц и записывается в формате, совместимом с реальным выходом детектора. Кроме того, из-за высокой частоты столкновений в LHC оцифрованные сигналы от нескольких смоделированных событий могут накапливаться для создания образцов с реалистичным экспериментальным фоном.
4. Реконструкция: восстанавливаются траектории частиц и энергии детектора, и именно эти финальные образцы используются для анализа.

4.2. Отбор событий для анализа пар топ-кварков

В данной работе объектом исследования были события с рождением пар топ-кварков. Рассматривались $t\bar{t}$ -пары, распадающиеся по лептон-струйному каналу, когда топ-кварк распадается на b-кварк и W-бозон, при этом один из W распадается по лептонному каналу, а второй – по адронному каналу:

$$t\bar{t} \rightarrow W^+ b W^- \bar{b} \rightarrow l \nu_l b q \bar{q} \bar{b} \quad (1)$$

Для отбора событий для такого случая применялись следующие критерии:

- Сработал электронный или мюонный триггер
- Событие включено в Good Run List
- В событии «хорошая» вершина: не менее пяти треков
- Зарегистрирован только один хороший лептон с $p_T > 25$ ГэВ
- Присутствуют по меньшей мере 4 хорошие струи
- Присутствуют по меньшей мере 2 b-меченные струи
- Величина недостающей поперечной энергии $E_T^{miss} > 30$ ГэВ
- Величина реконструированной поперечной массы $m_T^W > 30$ ГэВ

4.3. Набор данных ATLAS Open Data при 13 ТэВ

В январе 2020 года коллаборация ATLAS выпустила новый набор данных протонных соударений, теперь уже при энергии 13 ТэВ. Данные были собраны детектором ATLAS в течение 2016 года, соответствуют интегральной светимости 10 fb^{-1} и содержат приблизительно 270 миллионов событий. Так же, как и опубликованные ранее данные при 8 ТэВ, новые данные сопровождаются набором смоделированных методом Монте Карло образцов. [18]

В таблице 3 приведена сводка стандартных требований отбора, примененных для всех событий набора. Дополнительные требования предъявляются к калориметрической и трековой изоляции электронов, мюонов и фотонов. Изоляция калориметра (etcone20) рассчитывается как сумма энергий энергетических кластеров калориметра в конусе с размером $\Delta R = 0,2$ вокруг объекта, тогда как изоляция трека (ptcone30) определяется как скалярная сумма p_T треков в пределах конуса размером $\Delta R = 0,3$ вокруг объекта. Поскольку струи с большим R и с $m < 50 \text{ ГэВ}$ или $p_T > 1500 \text{ ГэВ}$ находятся за пределами хорошо откалиброванной области фазового пространства, они исключаются из выбора.

Electrons & Muons	Small- R jets	Photons	Large- R jets	τ_h
$p_T > 25 \text{ GeV}$ $\text{lep_ptcone30} < 0.15$ $\text{lep_etcone20} < 0.15$	$p_T > 25 \text{ GeV}$ $\text{JVT} > 0.59$	$\text{photon_ptcone30} < 0.065$ $\text{photon_etcone20} < 0.065$	$p_T < 1500 \text{ GeV}$ $\text{mass} > 50 \text{ GeV}$	$p_T > 25 \text{ GeV}$

Таблица 3. Требования отбора событий набора данных при 13 ТэВ

Анализ событий для 13 ТэВ, хотя и требует наличия виртуальной машины для доступа к серверу Jupyter, проводится с помощью аналитического фреймворка, написанного на языке C++ и использующего программный пакет ROOT.

5. Результаты анализа событий с рождением пар топ-кварков при энергиях 8 и 13 ТэВ

С использованием отобранных событий были построены основные распределения продуктов распада и выполнено их сравнение для двух наборов данных.

Как было показано в (1), продуктами лептон-струйного распада пары топ-кварков являются заряженный лептон, нейтрино или антинейтрино, b -струи и струи, которые образуются от адронного распада W -бозона. Это означает, что в событиях должно наблюдаться как минимум 4 струи. На рис. 11 показано распределение отобранных событий по количеству струй. Количество струй варьируется, и можно заметить, что события с большим количеством струй являются более редкими. При сравнении распределений для разных значений энергии протонных соударений видно, что события с пятью и более струями оказываются не настолько редкими, как могло показаться при рассмотрении данных при 8 ТэВ. Таким образом, видно, что с ростом энергии увеличивается вклад сопровождающих топ-кварки струй.

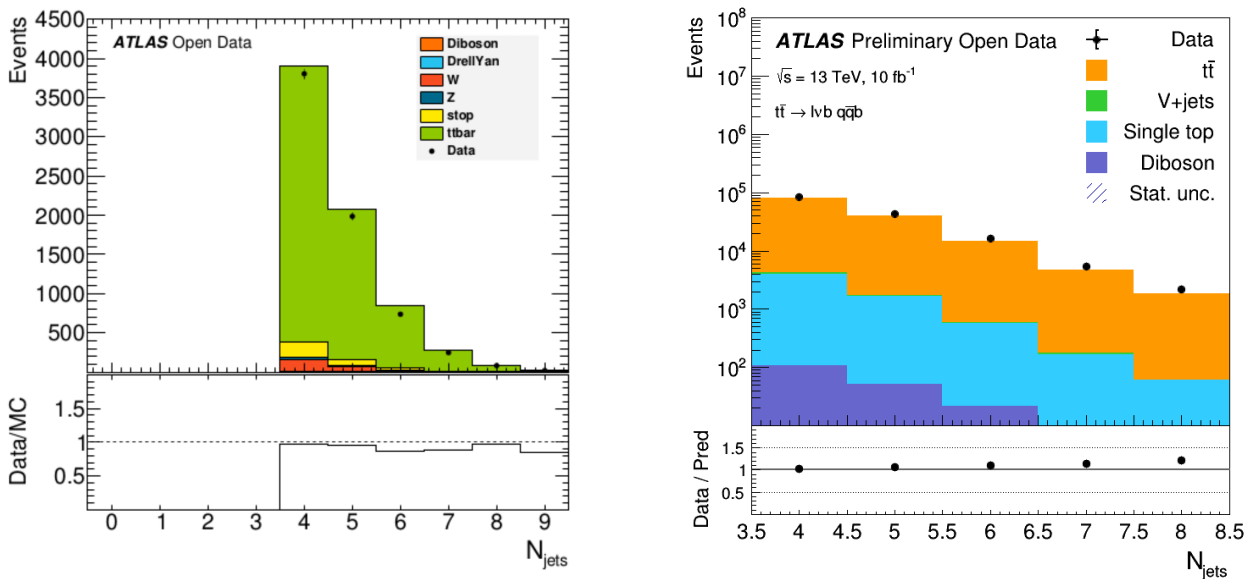


Рисунок 11. Распределение по количеству струй в событиях с распадом пар топ-кварков по лептон-струйному каналу при энергиях 8 (слева) и 13 (справа) ТэВ.

В ходе работы также были построены распределения по поперечному импульсу струй и лептонов. Из гистограмм на рисунках 12, 13 и 14, 15 видно, что количество событий различается благодаря более высокой интегральной светимости. Внизу под графиками показано отношение распределений экспериментальных данных к моделированным, которое близко к единице. При рассмотрении графиков распределений при 8 ТэВ можно увидеть, что при больших p_T экспериментальные значения числа событий ниже расчетных. Эта проблема устраняется увеличением количества экспериментальных событий, что подтверждают графики распределений для энергии 13 ТэВ, для которых данные эксперимента хорошо согласуются с результатами моделирования.

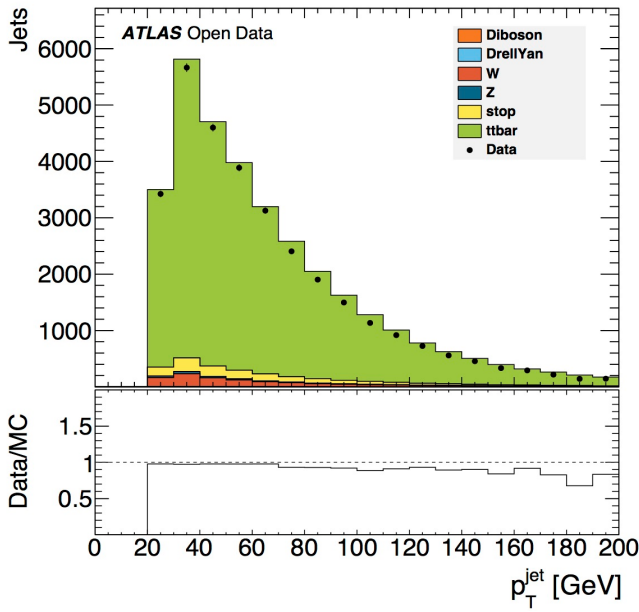


Рисунок 12

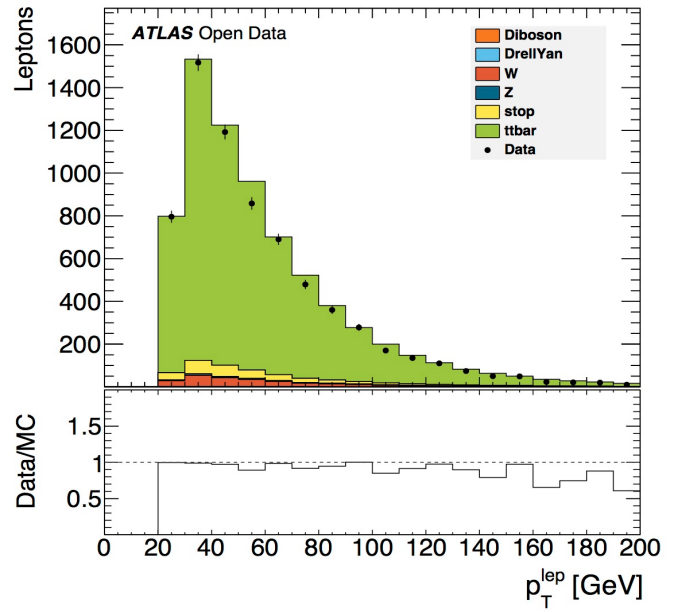


Рисунок 13

Распределения по поперечным импульсам струй (рис. 12) и лептонов (рис. 13) для лептон-струйных распадов пар топ кварков в pp соударениях при энергии 8 ТэВ. Точками показаны экспериментальные данные, цветные гистограммы соответствуют моделированным событиям

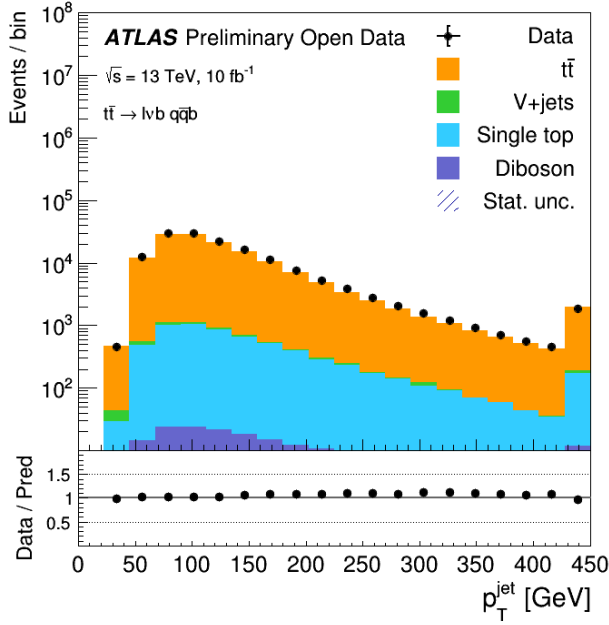


Рисунок 14

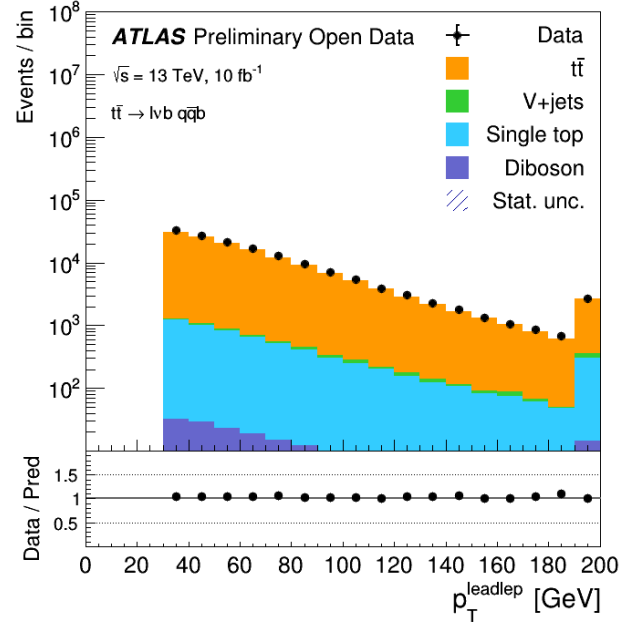


Рисунок 15

Распределения по поперечным импульсам струй (рис. 14) и лептонов (рис. 15) для лептон-струйных распадов пар топ кварков в pp соударениях при энергии 13 ТэВ. 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. Потерянная поперечная энергия определяется как несоответствие импульса в плоскости, поперечной оси пучка, где ожидается сохранение импульса. Такое отклонение может сигнализировать о наличии необнаружимых частиц, таких как нейтрино или новые стабильные, слабо взаимодействующие частицы. Вследствие того, что в событиях с топ-кварками присутствуют нейтрино, которые уносят большое количество энергии, в событиях с рождением топ кварков наблюдаются довольно большие значения E_t^{miss} . На рис. 16 и 17 представлены распределения по потерянной поперечной энергии при энергиях 8 и 13 ТэВ. Здесь также хорошо видно, как увеличение количества событий при 13 ТэВ улучшает согласие с расчетами.

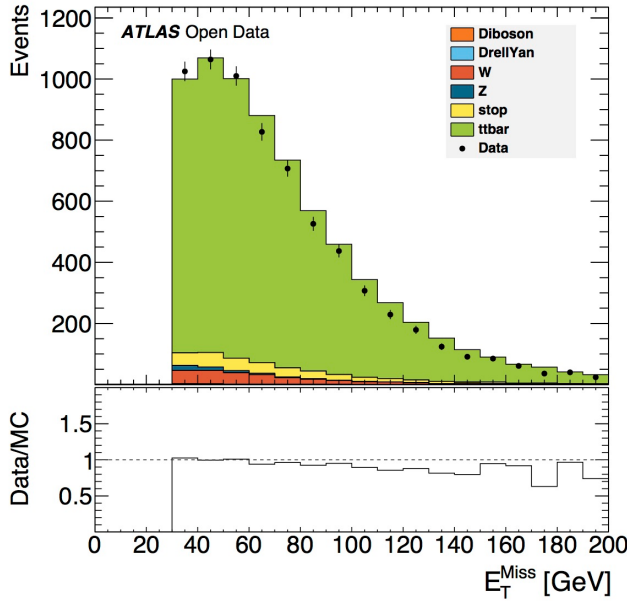


Рисунок 16

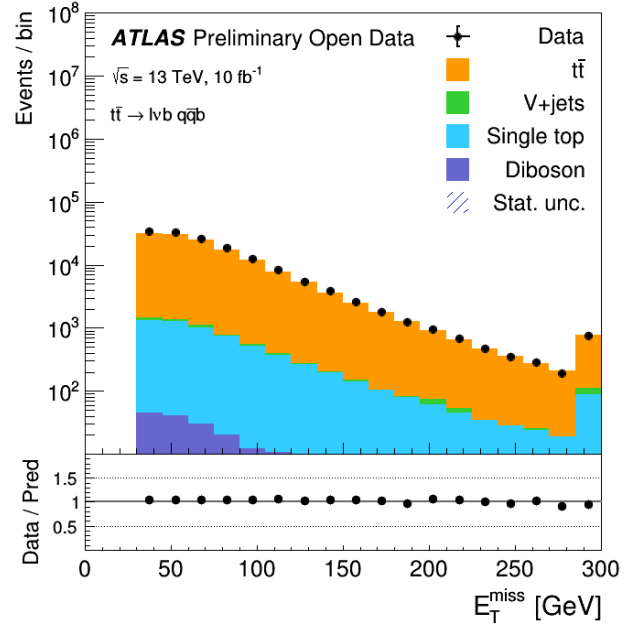


Рисунок 17

Распределения по потерянной поперечной энергии для лептон-струйных распадов пар топ-кварков в pp соударениях при энергиях 8 (рис.16) и 13 (рис.17) ТэВ. Точками показаны экспериментальные данные, цветные гистограммы соответствуют моделированным событиям.

Псевдобыстрота η описывает угол между направлением частицы и осью пучка и является переменной, характеризующей положение частицы в продольном направлении. Конструкция детектора ATLAS симметрична по псевдобыстроте, что также подтверждают полученные распределения по псевдобыстроте как струй, так и лептонов (рис. 18 – 21). Большое количество событий при 13 ТэВ позволяет использовать логарифмический масштаб при построении распределений и увидеть вклад основных фоновых процессов. Из рис. 20, 21 видно, что основной фоновый процесс при выделении событий с рождением пары топ-кварков является процесс одиночного рождения топ-кварка.

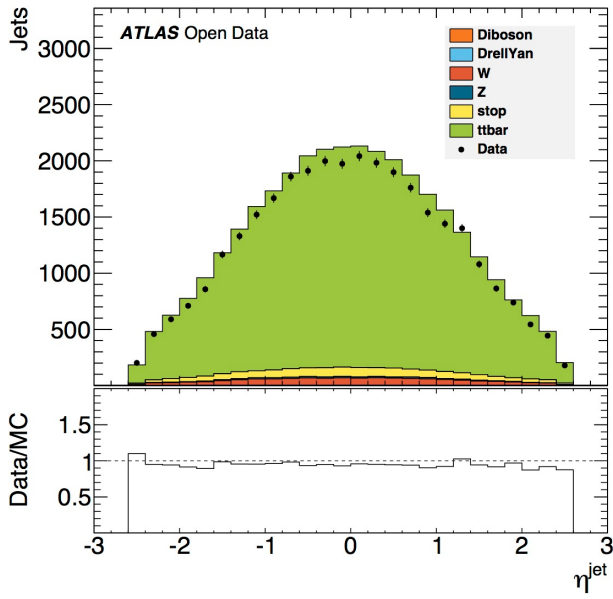


Рисунок 18

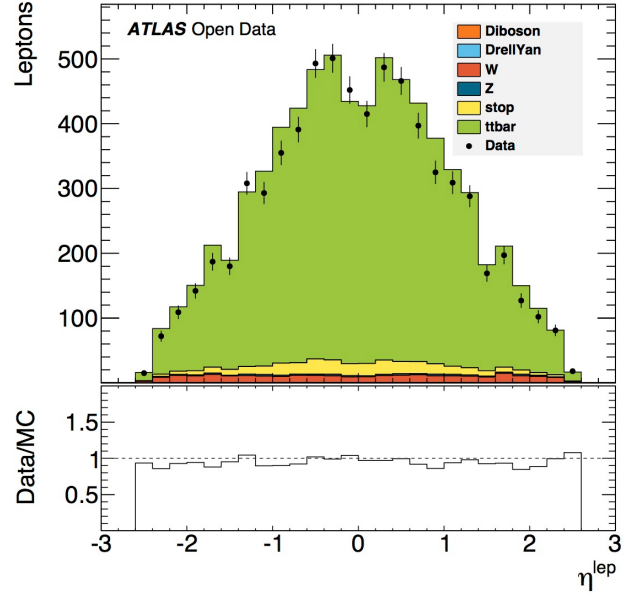


Рисунок 19

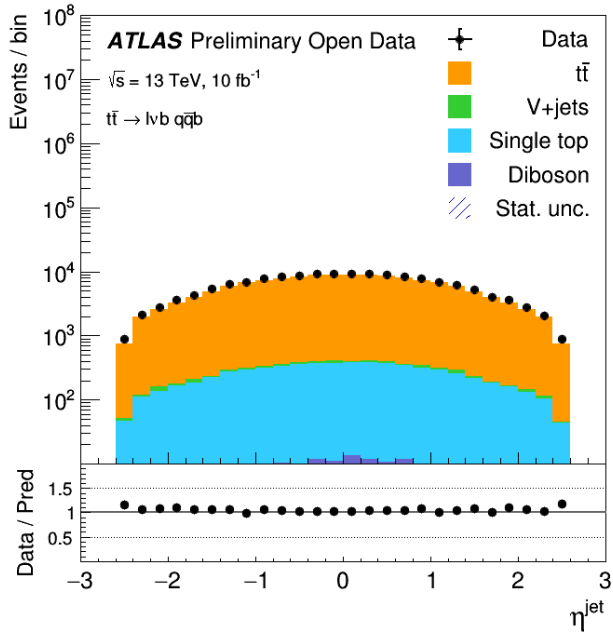


Рисунок 20

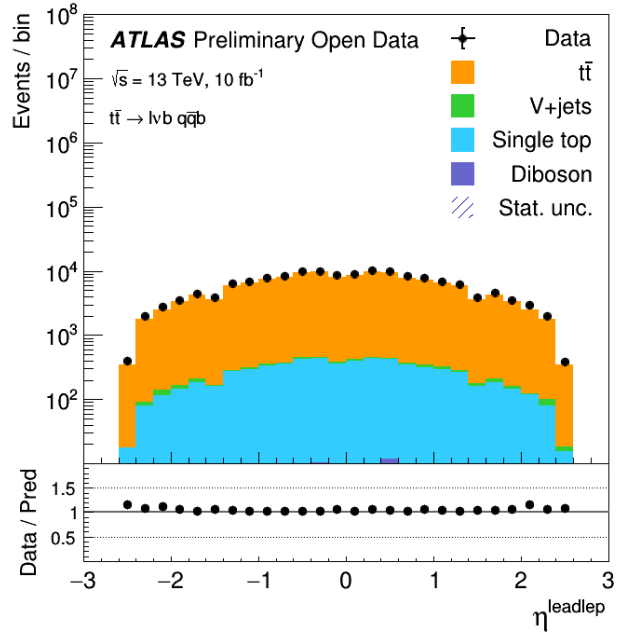


Рисунок 21

Распределения по псевдобыстроте струй (рис. 18 и 20) и лептонов (рис. 19 и 21) для распадов пар топ-кварков в pp соударениях при энергиях 8 и 13 ТэВ соответственно. Точками показаны экспериментальные данные, цветные гистограммы соответствуют моделированным событиям.

Все построенные распределения показывают хорошее согласие экспериментальных данных с расчетными. Это является подтверждением Стандартной Модели на выполненном уровне сравнения.

6. Определение масс W-бозона и топ-кварка по инвариантной массе струй

Напомним, что при лептон-струйном распаде пары топ-кварков среди продуктов распада присутствуют заряженный лептон, нейтрино или антинейтрино, b-струи и струи, которые образуются от адронного распада W-бозона:

$$t\bar{t} \rightarrow W^+bW^-\bar{b} \rightarrow l\nu_l b q \bar{q} \bar{b}$$

Как видно из построенных распределений по количеству струй в событиях с распадом пар топ-кварков (рис. 11), нередко могут встречаться события с более, чем четырьмя струями.

Для того, чтобы уменьшить количество ложных комбинаций, которые могут повлечь за собой несоответствие искомым значениям масс W-бозона и t-кварка расчетным или общемировым значениям, необходимо ужесточить критерии отбора событий. Будем выбирать для анализа такие события, в которых присутствует лишь 4 струи, при этом две из них являются b-струями. Таким образом, для определения массы W-бозона есть только одна комбинация, а для топ-кварка – две.

Через инвариантную массу двух струй, образованных адронным распадом W-бозона можно определить массу W-бозона, причем ей будет соответствовать лишь одна комбинация в событии.

Для определения массы W-бозона с использованием набора данных ATLAS Open Data для энергии 13 ТэВ было построено распределение по инвариантной массе пар струй, являющихся кандидатами W-бозона (рис. 22). Искомой массе соответствует максимум на графике распределения. Аппроксимируя его по Гауссу, получаем значение массы W-бозона:

$$M_W = 80,62 \pm 0,34 \text{ ТэВ}$$

Масса W-бозона, рассчитанная в рамках предсказаний Стандартной Модели, равна $80,356 \pm 0,008$ ГэВ [19]. Полученная оценка согласуется с расчетным значением в пределах погрешности.

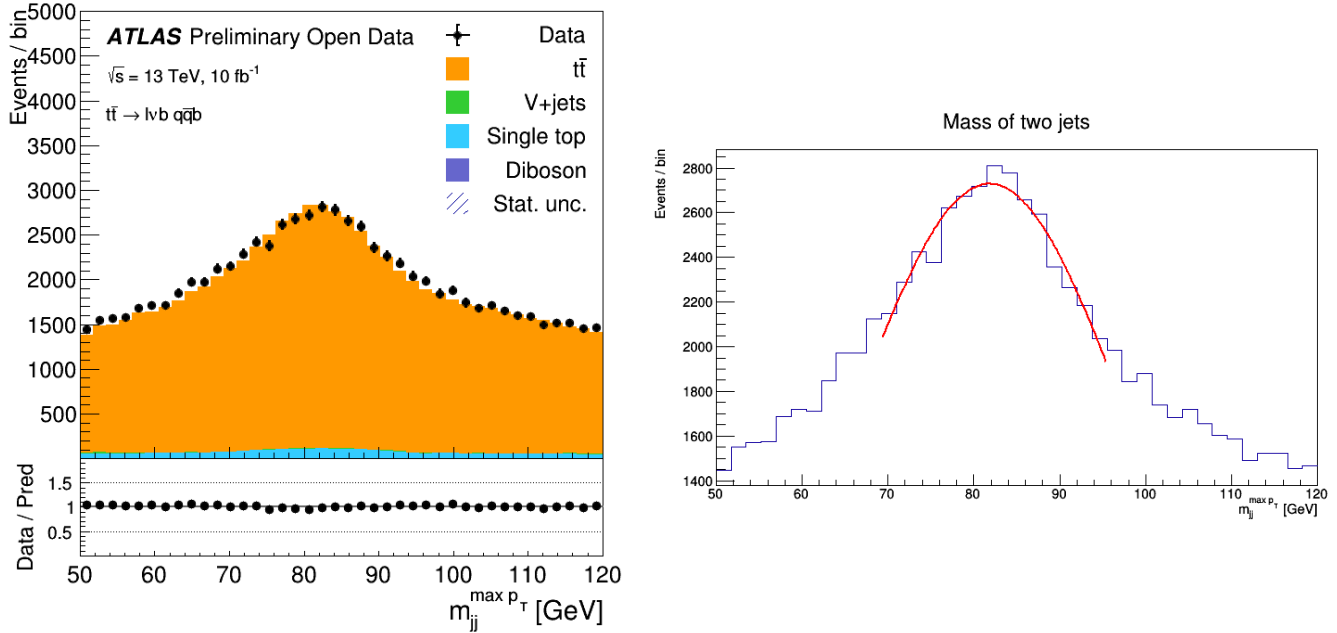


Рисунок 22. Распределение по инвариантной массе двух струй - кандидатов W-бозона (слева) и его аппроксимация по Гауссу (справа). Использованы данные при энергии 13 ТэВ.

Массу топ-кварка можно определить с помощью одной из b-струй и двух струй, не связанных с b-кварком. В событиях будет присутствовать одна ложная комбинация, так как в них имеется две b-струи, а определить, какая из них относится к данному распаду топ-кварка, невозможно. На рис. 23 слева представлено распределение по инвариантной массе трех струй с максимумом в области массы топ-кварка. Полученная с помощью аппроксимации распределения по Гауссу оценка массы топ-кварка:

$$M_{\text{top}} = 172,8 \pm 0,6 \text{ ГэВ}$$

Полученное значение в пределах погрешности соответствует значению, полученному комбинацией всех мировых результатов измерения массы топ-кварка, равному $173.34 \pm 0,76$ ГэВ.

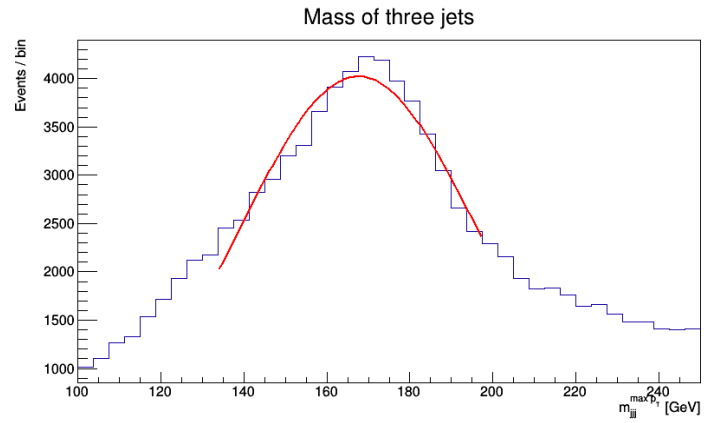
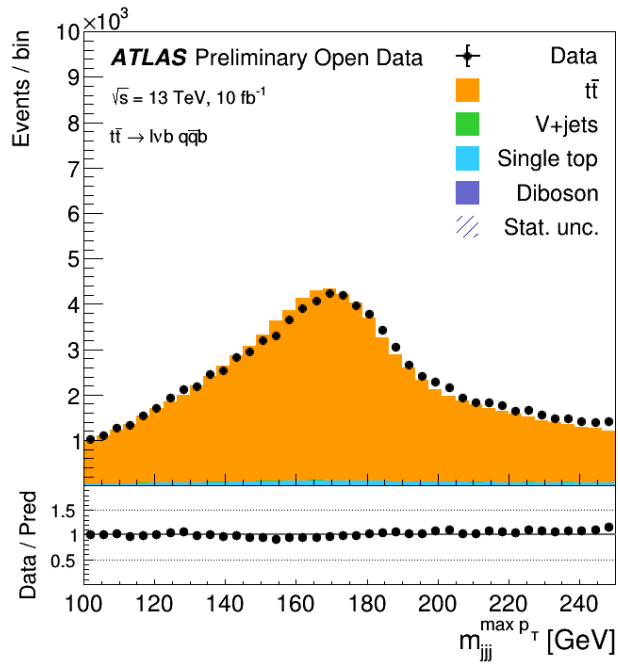


Рисунок 23. Распределение по инвариантной массе трех струй - кандидатов топ-кварка (слева) и его аппроксимация по Гауссу (справа). Использованы данные при энергии 13 ТэВ.

Заключение

В работе выполнен анализ событий с рождением пары топ-анти топ кварков на открытых данных эксперимента ATLAS в pp-взаимодействиях при энергиях 8 и 13 ТэВ. В анализе использовано приблизительно 270 миллионов событий с рождением топ-анти топ пары.

Построены и проанализированы такие характеристики, как:

- Распределение по количеству струй в событиях с распадом пар топ-кварков по лептон-струйному каналу
- Распределения по поперечным импульсам струй и лептонов для лептон-струйных распадов пар топ кварков
- Распределения по потерянной поперечной энергии для лептон-струйных распадов пар топ кварков
- Распределения по псевдобыстроте струй и лептонов

Все перечисленные распределения построены как для энергии 8 ТэВ, так и с использованием новых данных, опубликованных в январе 2020 года, содержащих события при энергии 13 ТэВ. Проведено сравнение результатов анализа этих двух наборов данных.

Построены распределения по инвариантной массе двух и трех струй для лептон-струйной моды распада пар топ-кварков в событиях при энергии 13 ТэВ. С помощью полученных распределений произведен расчет инвариантных масс W-бозона и топ-кварка.

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.

Список литературы

- [1] Э. Боос, Л. Дудко, П. Мандрик и С. Слабоспицкий, «Топ-кварк. Итоги и перспективы», 2019.
- [2] Э. Боос, О. Брандт, Д. Денисов, С. Денисов и П. Граннис, «Топ-кварк (к 20-летию открытия)», 2015.
- [3] M. F. Claudio Campagnari, «The discovery of the top quark», *Reviews of Modern Physics*, 1996.
- [4] «CERN Document Server», 2019. [В Интернете]. Available: <https://cds.cern.ch/record/2684277>.
- [5] «CERN website», [В Интернете]. Available: <https://home.cern/science/accelerators/accelerator-complex>.
- [6] «ATLAS Experiment at CERN», [В Интернете]. Available: <https://atlas.cern/discover/detector>.
- [7] «Ядерная физика в интернете», [В Интернете]. Available: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/zbozon/z1.htm>.
- [8] Л. Смирнова, Эксперимент ATLAS Большого Адронного Коллайдера, Москва: Университетская книга, 2014.
- [9] J. Glatzer, «Inclusive top pair production at 7, 8 and 13 TeV in ATLAS», *ATL-PHYS-PROC-2015-172*, 2015.
- [10] 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*, 2019.
- [11] «Top working group cross-section summary plots», [В Интернете]. Available: <https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/PUBNOTES/ATL-PHYS-PUB-2019-035/>.
- [12] «Single Top Vtb Summary», 2019 [В Интернете]. Available: <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/LHCPhysics/SingleTopVtbHistory>.
- [13] ATLAS Collaboration, «ATLAS delivers new direct measurement of the top-quark decay width with improved precision», 2019. [В Интернете]. Available: <https://atlas.cern/updates/physics-briefing/direct-measurement-top-width>.
- [14] A. Castro, «Top Quark Mass Measurements in ATLAS and CMS», *arXiv:1911.09437v1 [hep-ex]*, 2019.

- [15] «Top Quark Mass Summary Plots», 2019 [В Интернетe]. Available: <https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/PUBNOTES/ATL-PHYS-PUB-2019-036/>.
- [16] «ATLAS Open Data», [В Интернетe]. Available: <http://opendata.atlas.cern/>.
- [17] The ATLAS Collaboration, «Review of ATLAS Open Data 8 TeV datasets, tools and activities», ATL-OREACH-PUB-2018-001, 2018.
- [18] The ATLAS Collaboration, «Review of the 13 TeV ATLAS Open Data release», PUB-OTRC-2020-01, 2020.
- [19] «Measuring the W boson mass», [В Интернетe]. Available: <https://atlas.cern/updates/physics-briefing/measuring-w-boson-mass>.