

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

имени М. В. ЛОМОНОСОВА»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА ОБЩЕЙ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

«Рождение топ-кварка в pp-соударениях на Большом адронном коллайдере»

Выполнила студентка

213м группы

Артемьева Наталья Михайловна

Научный руководитель:

д. ф.-м. н., профессор

Смирнова Лидия Николаевна

Допущен к защите _____

Зав. кафедрой _____

Москва 2022

Оглавление

1. Введение	3
2. Детектор ATLAS	5
3. Свойства топ-кварка	9
3.1. Парное рождение топ-кварков	10
3.2. Одиночное рождение топ-кварков	12
3.3. Элемент V_{tb} матрицы Кабибо-Кобаяси-Маскавы	16
3.4. Распад топ-кварка	18
3.5. Ширина распада топ-кварка	19
3.6. Масса топ-кварка	20
4. ATLAS Open Data	23
5. Анализ событий одиночного рождения топ-кварка	25
5.1. Отбор событий для анализа	25
5.2. Распределения кинематических характеристик параметров событий с рождением одиночного топ-кварка	27
5.3. Определение массы W -бозона	35
5.4. Определение массы топ-кварка	36
5.5. Определение матричного элемента V_{tb}	37
6. Заключение	39
7. Список литературы	40

1. Введение

Топ-кварк уникален во многих аспектах и является одним из наиболее интересных объектов среди частиц Стандартной Модели. Открытие топ-кварка произошло в 1995 году на протон-антипротонном коллайдере Тэватрон, и это событие окончательно сформировало представление о трех кварковых поколениях. Топ-кварк во многом отличается от остальных кварков, прежде всего своей массой, самой тяжелой из всех элементарных частиц. Время его жизни ($\tau_T \approx 5 * 10^{-25} \text{с}$) намного меньше типичного времени, необходимого для образования связанных состояний кварков в квантовой хромодинамике, и поэтому, благодаря тому что топ-кварк не успевает адронизоваться ($\tau_{\text{адр}} \approx 10^{-23} \text{с}$), появляется 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].

На адронных коллайдерах топ-кварк рождается преимущественно в парах посредством сильного взаимодействия. Возможно также одиночное рождение за счет электрослабого взаимодействия, являющееся особенно чувствительным к возможным проявлениям новой физики и позволяющее исследовать те свойства топ-кварка, которые в процессе парного рождения проявляются менее ярко. Например, сечение одиночного рождения напрямую связано с абсолютной величиной элемента V_{tb} матрицы Кабиббо-Кобаяши-Маскавы, что представляет возможность его прямого измерения и проверки Стандартной Модели. Помимо того, может быть исследована структура вершины Wtb на предмет аномальных вкладов таких, например, как дополнительные векторные бозоны W' , заряженные скалярные бозоны, нейтральные токи, меняющие аромат.

Данная работа посвящена исследованию характеристик событий с одиночным рождением кварков в t -канале в протонных соударениях в эксперименте ATLAS Большого адронного коллайдера при энергии 13 ТэВ. Для анализа событий pp-соударений использовался набор данных проекта ATLAS Open Data. Обработка данных производилась с помощью программы анализа, написанной на C++, и пакета для обработки ROOT.

Актуальность работы заключается в недостаточной изученности процессов одиночного рождения топ кварка из-за малости их сечений и сложности выделения из большого количества фоновых процессов. Данные для анализа, собранные при энергии 13 ТэВ с интегральной светимостью 10 фб^{-1} были опубликованы коллаборацией ATLAS в январе 2020 года. Благодаря более высокой светимости по сравнению с предыдущим набором данных при энергии 8 ТэВ, новый набор данных содержит значительно большее число событий, что позволяет получить более точные данные о свойствах топ-кварка. Ранее мной был проведен анализ событий с рождением пар топ-кварков при энергиях 8 и 13 ТэВ, поэтому теперь, для более обширного анализа свойств топ-кварка, проводится его исследование в событиях одиночного рождения.

В работе приводится описание эксперимента ATLAS Большого адронного коллайдера и теоретическое описание физики топ-кварков, показаны характеристики набора событий и особенности работы с проектом ATLAS Open Data, а также приведены результаты проведенного анализа имеющихся данных ATLAS Open Data.

2. Детектор ATLAS

На данный момент единственным ускорителем, на котором 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.

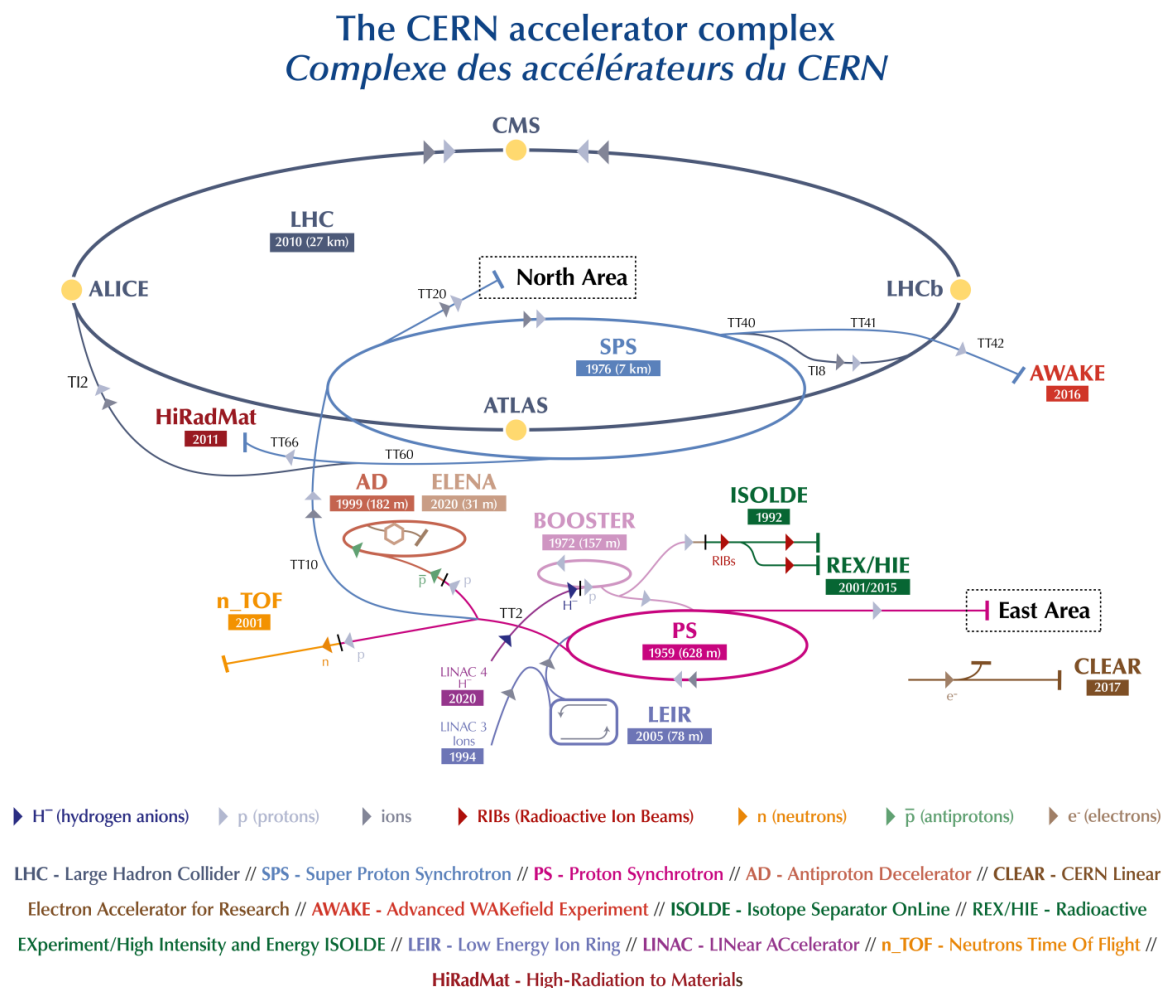


Рисунок 1. Схема ускорительного комплекса ЦЕРН

БАК является последним элементом «цепи» в комплексе ускорителей ЦЕРНа. Схема ускорительного комплекса представлена на рис. 1 [2]. 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 и 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 ТэВ, а затем – в протонный синхротрон (PS), разгоняющий пучок до 25 ТэВ. Финальной ступенью предварительного ускорения является суперсинхротрон (SPS), в котором протоны ускоряются до энергии 450 ТэВ. 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 [3]. Каждый из трех вспомогательных экспериментов связан с одним из основных: аппаратура эксперимента TOTEM технически объединена с аппаратурой детектора CMS, эксперимент MoEDAL расположен в том же зале, где установлен детектор LHCb, а эксперимент LHCf связан с детектором ATLAS и находится в 140 метрах от его центра.

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 [4].

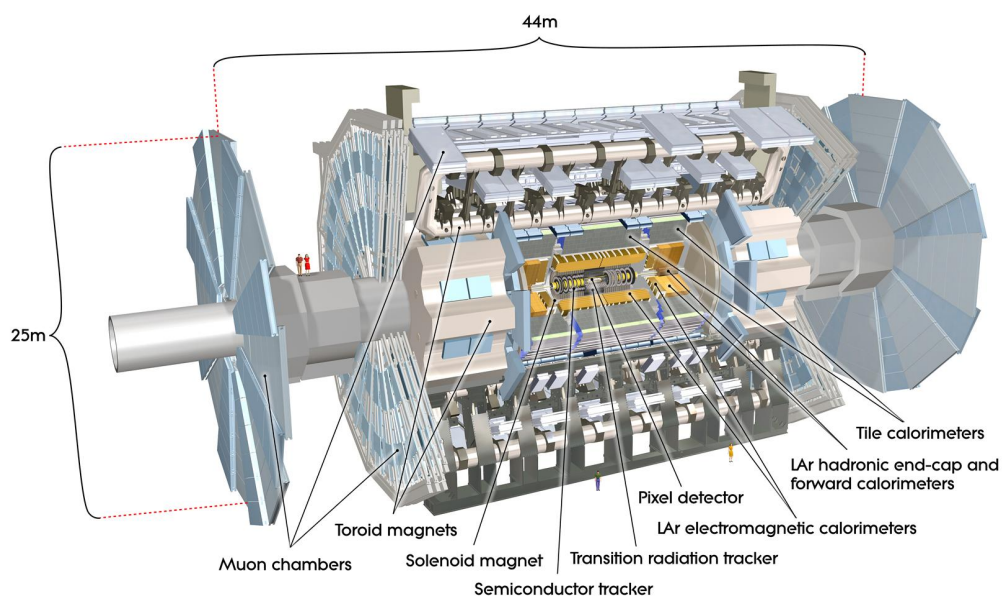


Рисунок 2. Общий вид детектора ATLAS

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.

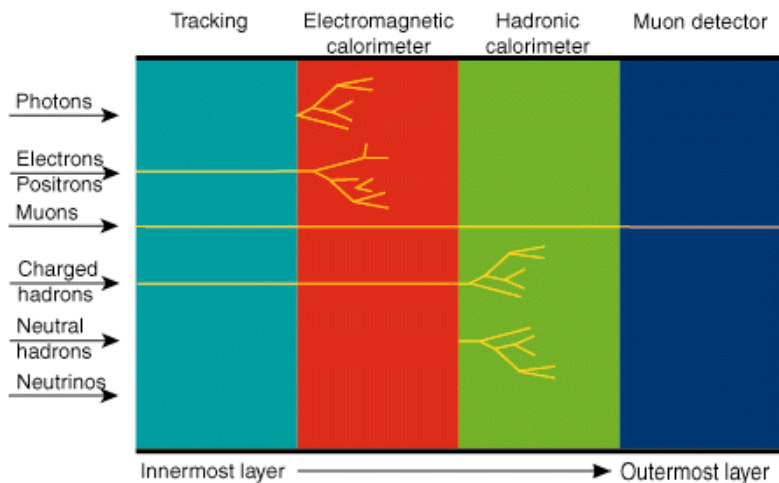


Рисунок 3. Взаимодействие различных типов частиц со структурами детектора

На рис. 3 показано, как различные типы частиц взаимодействуют с отдельными структурами детектора [5].

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 микростриповые 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 путем ионизационных потерь. 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, измеряя энергию ионизации, выделяемую при их 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), узкозорных 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 [6].

В данный момент ЦЕРН готовится к третьему сеансу работы Большого адронного коллайдера (Run 3) после более чем трехлетнего перерыва. 22 апреля 2022 года было проведено первое пробное столкновение пучков протонов, а уже в июле должен начаться 4-летний сеанс работы коллайдера, в котором планируется достижение энергии 13,6 ТэВ и значительное увеличение количества столкновений: в экспериментах ATLAS и CMS ожидается получение большего количества столкновений, чем в двух предыдущих сеансах вместе взятых [7].

3. Свойства топ-кварка

Топ-кварк является фермионом (имеет спин, равный $1/2$) и обладает таким же, как и у других верхних кварков первого (u) и второго (c) поколений, электрическим зарядом, равным $+2/3$. Как и все остальные кварки, топ-кварк - триплет по цвету.

Основным механизмом рождения топ-кварков в адронных взаимодействиях является парное рождение посредством сильного взаимодействия. Кроме того, возможно электрослабое рождение одиночного топ-кварка. Рассмотрим эти процессы подробнее.

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. Диаграммы этих процессов в лидирующем порядке приведены на рис.4. Относительные вклады процессов зависят от энергии и природы пучков: на Тэватроне при энергии соударения протонов и антипротонов около 2 ТэВ 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 ($\approx 87\%$) [6].

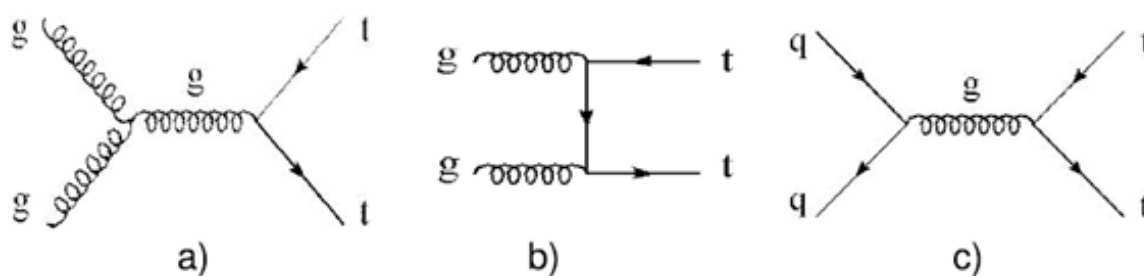


Рисунок 4. Диаграммы образования пар t -кварков в лидирующем порядке КХД: (a), (b) – глюон-глюонное рассеяние; (c) – кварк-антикварковое рассеяние

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. Точные измерения инклюзивных и дифференциальных сечений могут быть использованными для проверки предсказаний Стандартной Модели. В таблице 1 приведены расчёты сечения рождения $t\bar{t}$ -пар для $m_t = 172,5$ ГэВ для трех энергий взаимодействия протонов [8]. Из приведенных данных видно, что сечение рождения пар топ-кварков при изменении энергии от 7 до 13 ТэВ увеличивается более чем в 4 раза.

\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 1. 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:

$$\sigma_{t\bar{t}} = 826.4 \pm 3.6(\text{stat.}) \pm 11.5(\text{syst.}) \pm 15.7(\text{lumi.}) \text{ пб [9].}$$

Полученные результаты совпадают с результатами расчетов. На рисунке 5 представлено сечение рождения $t\bar{t}$ пары в экспериментах ATLAS и CMS для различных энергий, а также на коллайдере Tevatron [10].

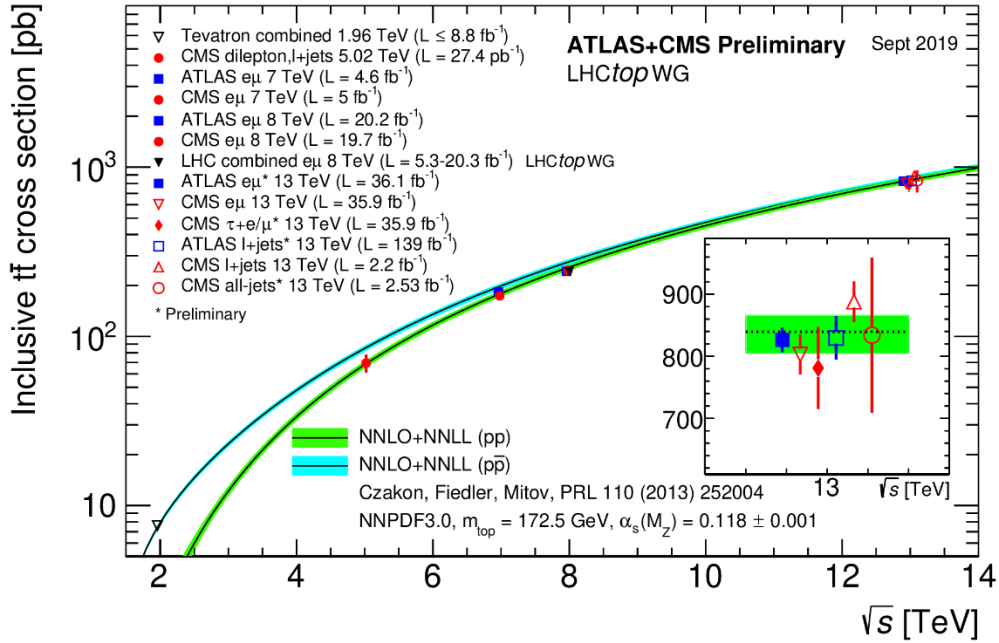


Рисунок 5. Сечение рождения пары топ-кварков на Большом адронном коллайдере и Тэватроне при различных энергиях протонных соударений

3.2. Одиночное рождение топ-кварков

Одиночный топ-кварк образуется за счет электрослабого взаимодействия в результате одного из трех подпроцессов: t - и s -канальные процессы и ассоциированное рождение с W -бозоном. Поперечное сечение одиночного рождения топ-кварка составляет около 35% сечения рождения пары топ-кварков, и одиночный топ-кварк имеет гораздо больший относительный фон, поэтому его сложнее идентифицировать. Именно из-за достаточно большого фона одиночное рождение топ-кварка впервые наблюдали на Тэватроне только в 2009 г. с помощью многомерного анализа, с применением нейронных сетей [11].

Механизмы одиночного рождения t -кварка классифицируются по величине квадрата 4-импульса виртуального W -бозона, который участвует в процессе, и типа обменной частицы. Доминирующим является t -канальное рождение $qb \rightarrow tq'$ с $p_W^2 < 0$. Следующим по величине сечения процессом является ассоциированное рождение с W -бозоном, или tW -канальное рождение: $gb \rightarrow tW$,

с $p_W^2 = M_W^2$. Наименее доминантный процесс – s -канальное рождение $q\bar{q}' \rightarrow t\bar{b}$ с $p_W^2 > 0$. Диаграммы процессов показаны на рисунке 6.

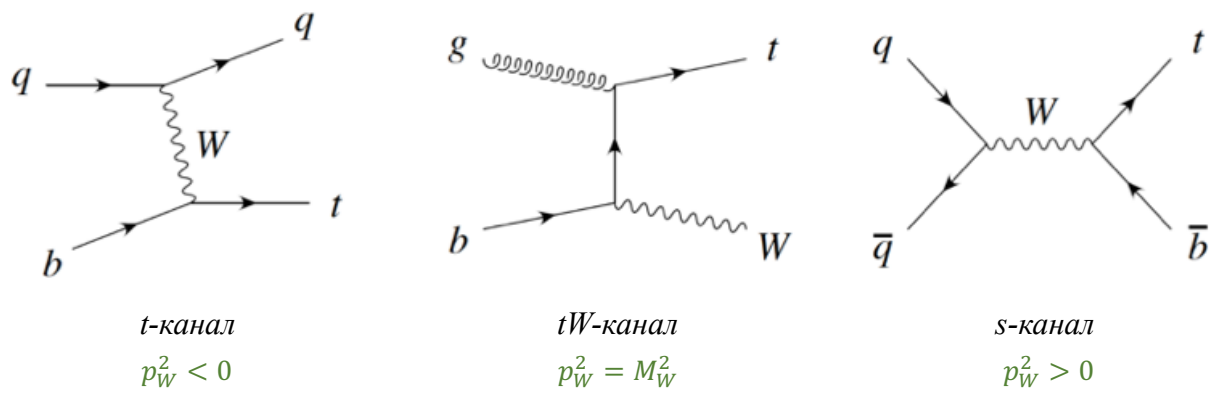


Рисунок 6. Диаграммы механизмов образования одиночных t -кварков в лидирующем порядке КХД: t -канал, tW -канал и s -канал.

В рамках КХД в приближении NNLO были рассчитаны теоретические значения сечений для всех трех механизмов рождения одиночного топ-кварка при энергиях 8 и 13 ТэВ. Результаты расчетов представлены в таблице 2 [12].

ЛHC	t-channel (pb)	tW-channel (pb)	s-channel (pb)
8 ТэВ	$86.5^{+2.8}_{-1.0} {}^{+2.0}_{-2.2}$	$22.0 \pm 0.6 \pm 1.4$	$5.65 \pm 0.08 \pm 0.21$
13 ТэВ	$218^{+5}_{-2} \pm 5$	$70.40 \pm 1.8 {}^{+3.2}_{-3.4}$	$11.17 \pm 0.18 \pm 0.38$

Таблица 2. Расчеты сечения рождения одиночных t - и \bar{t} -кварков для 8 и 13 ТэВ в t -, tW - и s -каналах

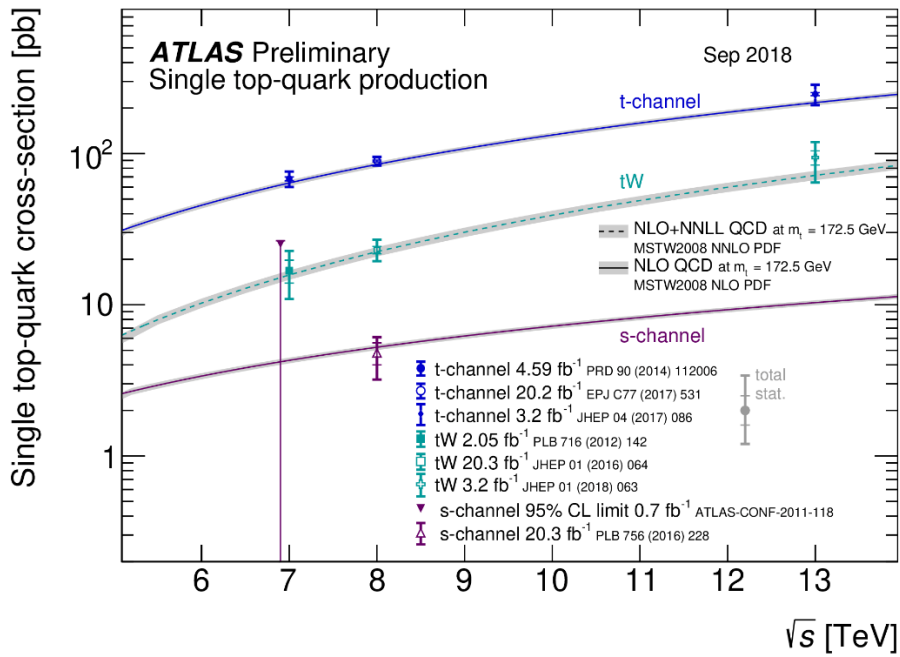


Рисунок 7а. Сечения процессов одиночного рождения топ кварка для различных механизмов рождения для энергий 7, 8 и 13 ТэВ

На рисунке 7а показана энергетическая зависимость сечений одиночного рождения топ кварка, а на рисунке 7б показаны соотношения долей различных механизмов рождения одиночного топ-кварка для энергий 7, 8 и 13 ТэВ, составленное по результатам теоретических расчетов.

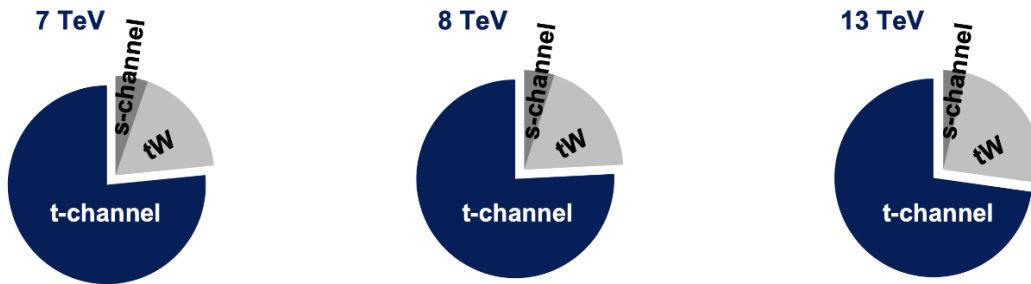


Рисунок 7б. Диаграммы поперечных сечений различных механизмов одиночного рождения топ-кварка для энергий 7, 8 и 13 ТэВ

1. t-канальный процесс одиночного рождения топ-кварка

На долю t-канала приходится около 73% общего производства одиночных топ-кварков на ЛHC. В данном процессе легкий кварк одного из сталкивающихся протонов взаимодействует с b-кварком другого протона, обмениваясь

виртуальным W -бозоном. На рисунке 8 показаны диаграммы t -канального рождения топ-кварка и анти-топ кварка.

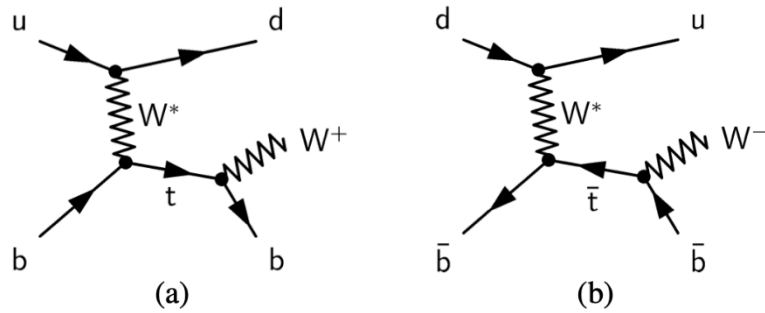


Рисунок 8. Диаграммы механизмов образования одиночных t -кварков в t -канале в лидирующем порядке КХД: (a) – рождение топ-кварка, (b) – рождение анти-топ кварка

В эксперименте ATLAS были измерены сечения одиночного t -канального рождения топ-кварка и топ-антикварка при энергии 13 ТэВ:

$$\sigma_t = 156 \pm 5(stat.) \pm 27(syst.) \pm 3(lumi.) \text{ пб};$$

$$\sigma_{\bar{t}} = 91 \pm 4(stat.) \pm 18(syst.) \pm 2(lumi.) \text{ пб [13]}.$$

Полученные значения сечений согласуются с предсказанными в рамках СМ значениями.

Поскольку плотность валентных u -кварков протона примерно в два раза выше плотности валентных d -кварков, ожидается, что сечение образования одиночных топ-кварков будет выше, чем сечение образования одиночных анти-топ-кварков. Полученное в результате измерений ATLAS отношение сечений для топ-кварка и анти-топ-кварка $R_t = \sigma_t / \sigma_{\bar{t}} = 1.72 \pm 0.09(stat.) \pm 0.18(syst.)$ подтверждает это предположение.

2. tW -канальный процесс одиночного рождения топ-кварка

Доля tW -канала составляет примерно 24% от общего производства одиночных топ-кварков на Большом адронном коллайдере, причем на LHC сечение tW -канала относительно больше, чем на Теватроне, из-за большей доли глюонов в начальных партонах. Сложность наблюдения tW -процесса заключается в том, чтобы отделить сигнал tW -канала от парного рождения топ-кварков. Результат

измерения инклюзивного сечения рождения одиночного топ-кварка в tW -канале, полученный ATLAS ($\sigma_{tW} = 94 \pm 10(stat.) \pm_{-22}^{+28}(syst.) \pm 2(lumi.)$ пб), согласуется с предсказаниями теории [14].

3. s -канальный процесс одиночного рождения топ-кварка

S -канал очень сложен для наблюдения, так как его доля в общем производстве одиночных топ-кварков на LHC – всего 3%. Кроме того, с повышением энергии сталкивающихся протонов его сечение растет намного медленнее, чем у двух других каналов. S -канал чувствителен к новым частицам, предложенным в некоторых моделях физики за пределами СМ, таких как заряженный бозон Хиггса или W бозон. Рождение одиночного топ-кварка в s -канале наблюдалось на ATLAS при энергии 8 ТэВ. Измеренное сечение $\sigma_s = 4.8 \pm 0.8(stat.) \pm_{-1.3}^{+1.6}(syst.)$ пб находится в согласии с предсказаниями СМ [15].

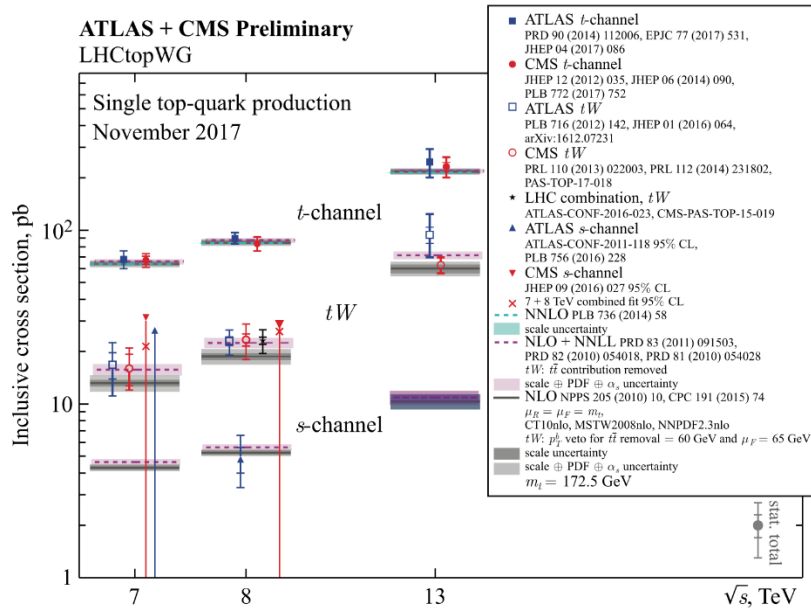


Рисунок 9. Сечения одиночного рождения t -кварка в различных каналах при энергиях 7, 8 и 13 ТэВ, полученные в экспериментах ATLAS и CMS

3.3. Элемент V_{tb} матрицы Кабибо-Кобаяси-Маскавы

В рамках Стандартной Модели смешивание кварков описывается элементами унитарной 3×3 матрицы Кабибо-Кобаяси-Маскавы (ККМ).

$$V = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix}$$

Матрица V содержит элементы $V_{qq'}$ перехода между кварками q и q' с изменением заряда. Элементы 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, в рамках предположений Стандартной модели о существовании лишь трех поколений кварков, элемент V_{tb} должен иметь значение, близкое к единице ($|V_{tb}| \approx 0,999$). Если считать, что поколений может быть больше трех, то элемент V_{tb} оказывается неопределенным. Например, если существует четвертое поколение кварков, то условие унитарности для матрицы смешивания практически не накладывает ограничений на значение V_{tb} . Поэтому прямое измерение элемента V_{tb} является очень важным, ведь отклонения от теоретического значения, принятого в рамках Стандартной Модели, могут свидетельствовать о наличии других кварковых поколений.

Матричный элемент V_{tb} можно измерять напрямую в событиях одиночного рождения t -кварка. При этом наиболее эффективным каналом для измерения V_{tb} является t -канал, так как он имеет наибольшее поперечное сечение и наименьший фон. Результаты измерений, полученные коллаборациями ATLAS и CMS для различных механизмов одиночного рождения топ-кварка показаны на рисунке 10 [16]. В пределах погрешностей измерения, все полученные значения согласуются с предсказаниями Стандартной Модели.

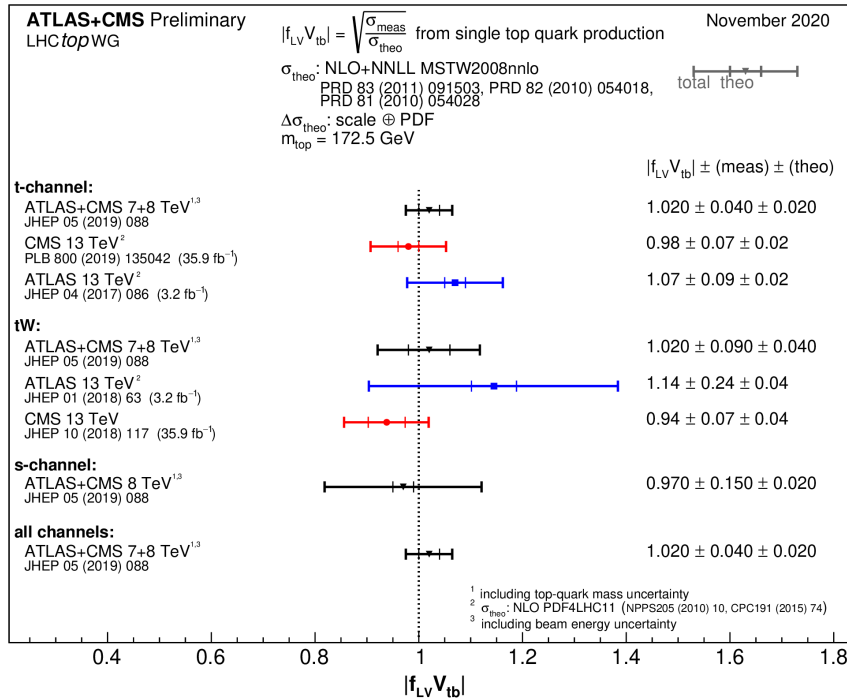


Рисунок 10. Результаты измерений элемента V_{tb} матрицы ККМ в различных каналах одиночного распада t -кварка при энергиях 7, 8 и 13 ТэВ

3.4. Распад топ-кварка

Топ-кварк распадается посредством электрослабого взаимодействия на W -бозон и b -кварк. W -бозон, в свою очередь, распадается на адронные струи или лептоны (струйный/адронный и лептонный каналы соответственно). На рисунке 11 изображена сигнатура распада одиночного t -кварка.

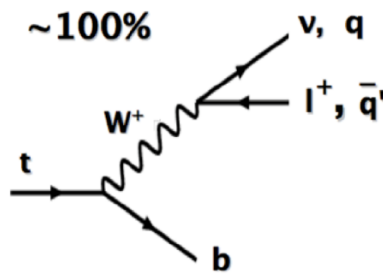


Рисунок 11. Сигнатуры распада топ-кварка

Из-за близкого к 1 значения V_{tb} , почти в 100% случаев топ-кварк распадается именно на W -бозон и b -кварк. Это 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.

В случае распада пары топ-кварков возможны следующие основные каналы:

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 $W \rightarrow l\nu$, а второй – по адронному каналу);
3. Лептонная мода (оба W распадаются по лептонному каналу $W \rightarrow l\nu$).

Относительные доли различных распадов пары топ кварков приведены на рис.12.

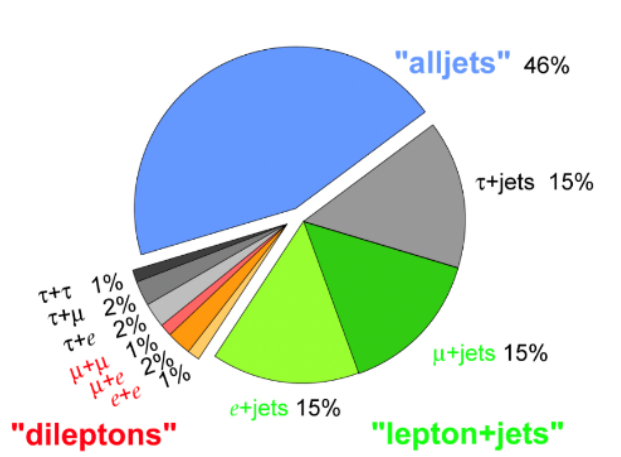


Рисунок 12. Каналы распада пар топ-кварков

3.5. 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.

Ширина распада измеряется косвенно – она извлекается из данных по измерению сечения одиночного рождения топ-кварка в t-канале и измерению отношения вероятностей распада t-кварка на W-бозон и b-кварк и распада на W-бозон и все кварки. Последние результаты измерений ATLAS при энергии 13 ТэВ дают значение ширины распада t кварка $\Gamma_t = 1,9 \pm 0,5$ ГэВ [17], а при энергии 8 ТэВ - значение $\Gamma_t = 1.76 \pm 0.86$ ГэВ [18]. Полученные результаты соответствуют предсказанию Стандартной модели, однако точность измерений относительно невысока.

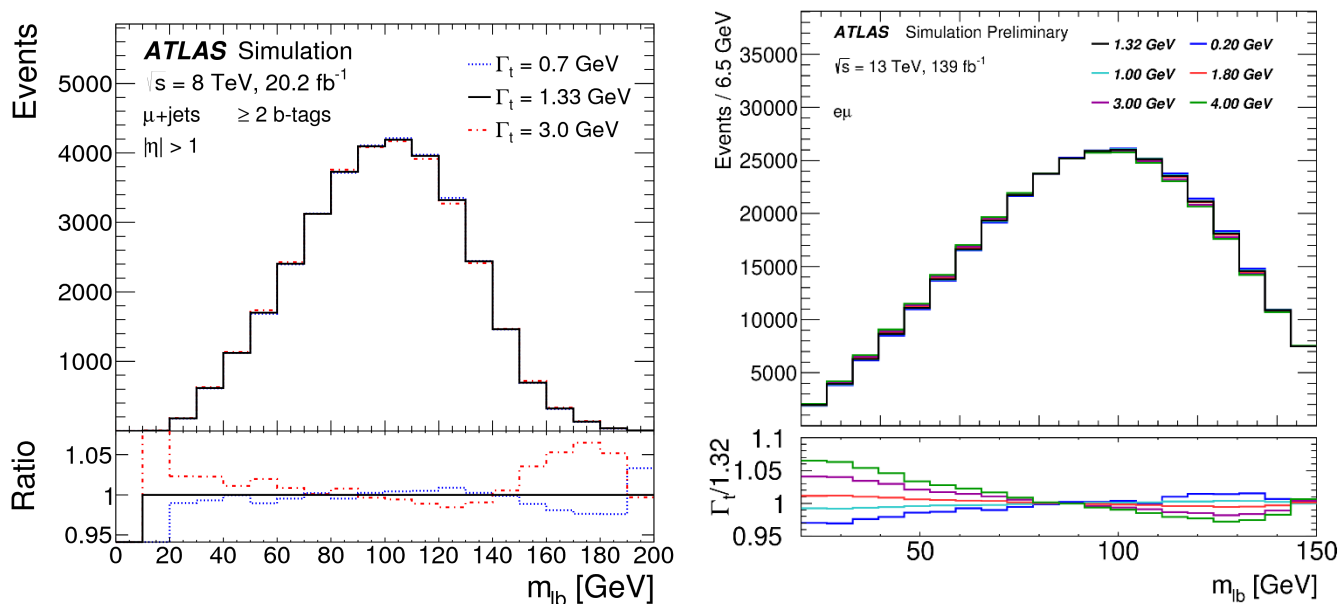


Рисунок 13. Распределения энергии распада топ-кварка, представляющие различные значения ширины распада при 8 ТэВ (слева) и при 13 ТэВ (справа)

3.6. Масса топ-кварка

Масса топ-кварка является одним из фундаментальных параметров Стандартной модели. Несмотря на то, что она уже является наиболее точно известной массой среди всех кварков, стремление к увеличению точности ее измерения сохраняется, поскольку точное значение массы топ-кварка напрямую влияет на ключевые предсказания Стандартной модели, такие как, например, размер квантовых поправок к электрослабым процессам и связь топ-кварка с бозоном Хиггса. Таким образом, точное измерение массы топ-кварка необходимо

как для оценки внутренней согласованности СМ, так и для тестирования возможных расширений СМ.

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 [19].

На рисунках 14 и 15 представлены экспериментальные значения массы топ-кварка, измеренные в экспериментах ATLAS и CMS прямым и косвенным способами соответственно, а также мировое значение, равное $173.34 \pm 0,76$ ГэВ [20].

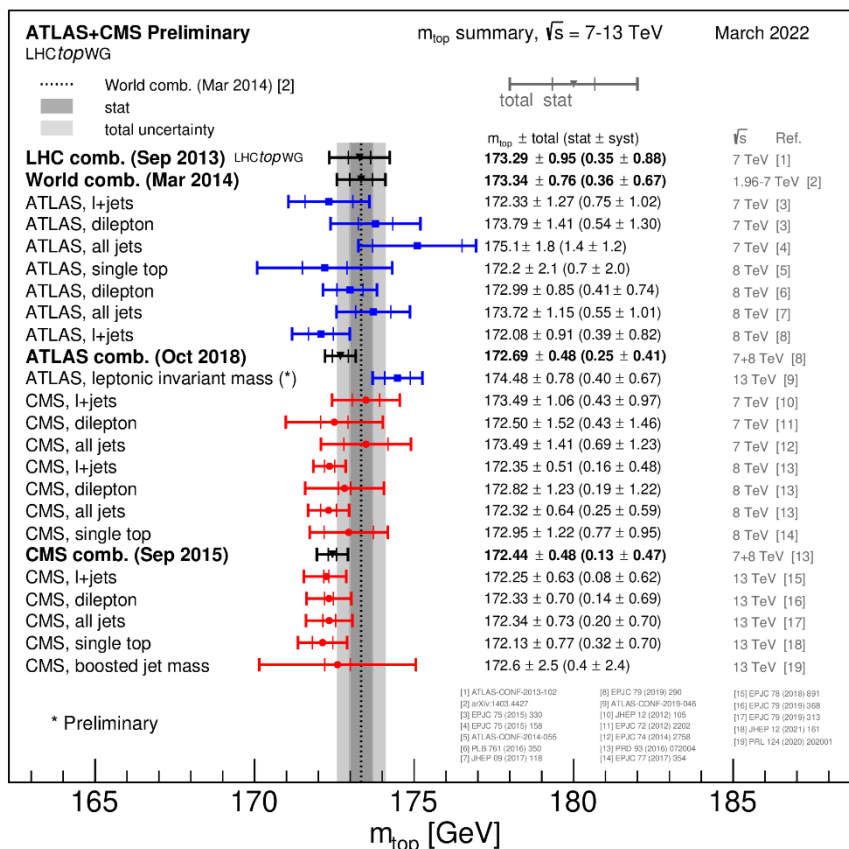


Рисунок 14. Экспериментальные значения массы топ-кварка, полученные на экспериментах ATLAS и CMS прямым способом при энергиях 7, 8 и 13 ТэВ

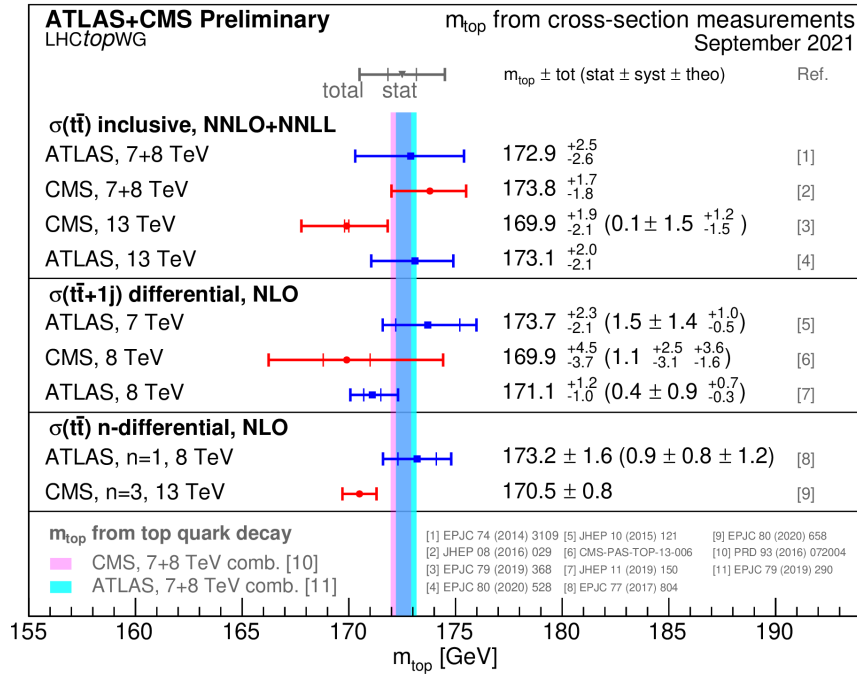


Рисунок 15. Экспериментальные значения массы топ кварка, полученные на экспериментах ATLAS и CMS косвенным способом при энергиях 7, 8 и 13 ТэВ

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. Наиболее эффективным для прямых измерений каналом распада $t\bar{t}$ -пары является лептон-струйный канал, который дает 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 [21].

В 2016 году был выпущен первый набор данных, полученных при энергии 8 ТэВ, что и послужило стартом проекту ATLAS Open Data. Этот набор состоял 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 [22].

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.

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 [23].

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 $m < 50 \text{ GeV}$ или $p_T > 1500 \text{ GeV}$ находятся за пределами хорошо откалиброванной области фазового пространства, они исключаются из выбора.

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

Таблица 3. Требования отбора событий набора данных при 13 ТэВ

Анализ событий для 13 ТэВ можно проводить с помощью виртуальной машины, либо непосредственно на компьютере. Использование виртуальной машины избавляет пользователя от необходимости загружать и устанавливать дополнительные пакеты для проведения анализа. Анализ проводится с помощью аналитического фреймворка, написанного на языке C++ и использующего программный пакет ROOT.

5. Анализ событий одиночного рождения топ-кварка

5.1. Отбор событий для анализа

В данной работе исследовались события с одиночным электрослабым рождением топ-кварка в t-канале. Рассматривались топ-кварки, распадающиеся по лептонному каналу, когда W-бозон распадается на лептоны (электрон или мюон и соответствующее нейтрино):

$$t \rightarrow W^+ b \rightarrow l \nu_l b \quad (1)$$

В случае адронного канала сигнальный процесс становится гораздо сложнее отделить от многоструйного КХД фона, поэтому этот канал не рассматривается в анализе.

Для отбора событий применялись стандартные критерии выбора объектов (см. таблицу 3) с более строгими требованиями к поперечному импульсу лептонов (> 35 ГэВ) и жесткими критериями идентификации лептонов:

- Сработал электронный или мюонный триггер.
- Зарегистрирован только один лептон (электрон или мюон) с $p_T > 35$ ГэВ.
- Величина недостающей поперечной энергии $E_T^{miss} > 30$ ГэВ.
- Величина реконструированной поперечной массы $m_T^W > 60$ ГэВ.
- Зарегистрированы две струи с $p_T > 30$ ГэВ, одна из которых – b-меченая.
- Псевдобыстрота немеченой струи должна быть $|\eta| > 1.5$.

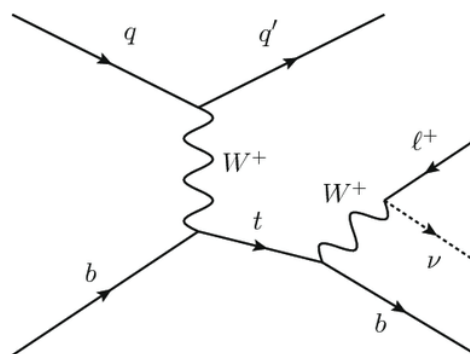


Рисунок 16. Сигнатура распада одиночного топ-кварка по лептонному каналу

- Расстояние по η между струей без метки и b-меченой струей должно быть больше 1,5.
- Скалярная сумма (H_T) поперечных импульсов лептона, струй и потерянной поперечной энергии E_{miss}^T должна быть $H_T > 195$ ГэВ.
- Масса лептона и b-меченой струи $m_{lb} > 150$ ГэВ.

Идентификация топ-кварков в электрослабом одиночном канале рождения топ-кварка намного сложнее, чем в $t\bar{t}$ -канале, из-за менее отчетливой сигнатуры и значительно большего фона, в основном из-за рождения $t\bar{t}$ - и канала W +jets.

5.2. Распределения кинематических характеристик параметров событий с рождением одиночного топ-кварка

С использованием отобранных событий были построены основные распределения для продуктов распада. Необходимо заметить, что даже после применения критериев отбора не менее 70% событий составляют фоновые события от канала парного рождения топ-кварков и рождения векторных бозонов со струями. В экспериментах ATLAS и CMS эти процессы выделяются более

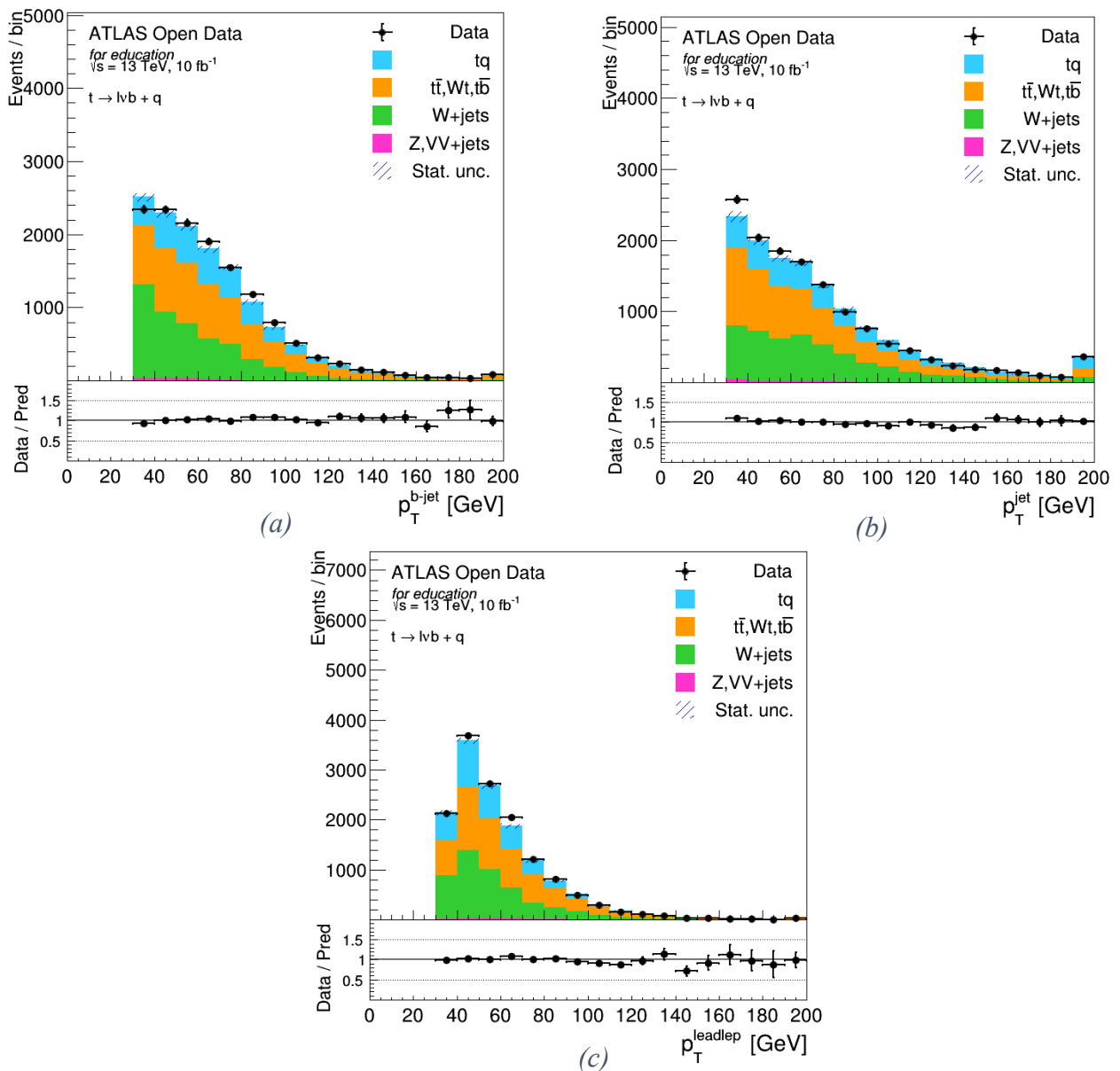


Рисунок 17. Распределения по поперечным импульсам для b -меченых струй, немеченых струй и лептонов в одиночном распаде топ кварка в лептонном канале при энергии 13 ТэВ. Точками показаны экспериментальные данные, цветные гистограммы соответствуют моделированным событиям.

эффективно благодаря применению нейронных сетей. В данной работе этот метод не используется. Однако исследование распределений важно, т.к. в дальнейшем оно используется на стадии подготовки методов с нейронными сетями, в отборе эффективных распределений для тренировки алгоритмов.

В ходе работы были построены распределения по поперечному импульсу струй и лептонов (рисунок 17). Средние значения для данных распределения составляют $66,29 \pm 17,47$, $69,01 \pm 23,39$ и $60,72 \pm 12,24$ ГэВ для *b*-меченой струи, немеченой струи и лептона соответственно. Внизу под графиками распределений показано отношение распределений экспериментальных данных к моделированным, которое близко к единице. Можно заметить, что при увеличении p_T различие между экспериментальными и смоделированными результатами начинает возрастать.

Ранее при работе с ATLAS Open Data был проведен анализ событий с парным рождением топ-кварка при 13 ТэВ [24], в рамках которой были построены распределения по поперечному импульсу для струй и лептонов. Они представлены на рисунке 18 (a, b). Для более наглядного сравнения на рисунках 18 (c, d, e) показаны распределения для одиночного распада с рисунка 17, построенные в логарифмическом масштабе. Сравнивая эти распределения с распределениями для распада одиночного *t*-кварка, можно заметить, что доля фоновых событий в парном распаде намного меньше, чем в одиночном. Кроме того, количество событий значительно различается из-за того, что процесс парного рождения топ-кварков является доминирующим.

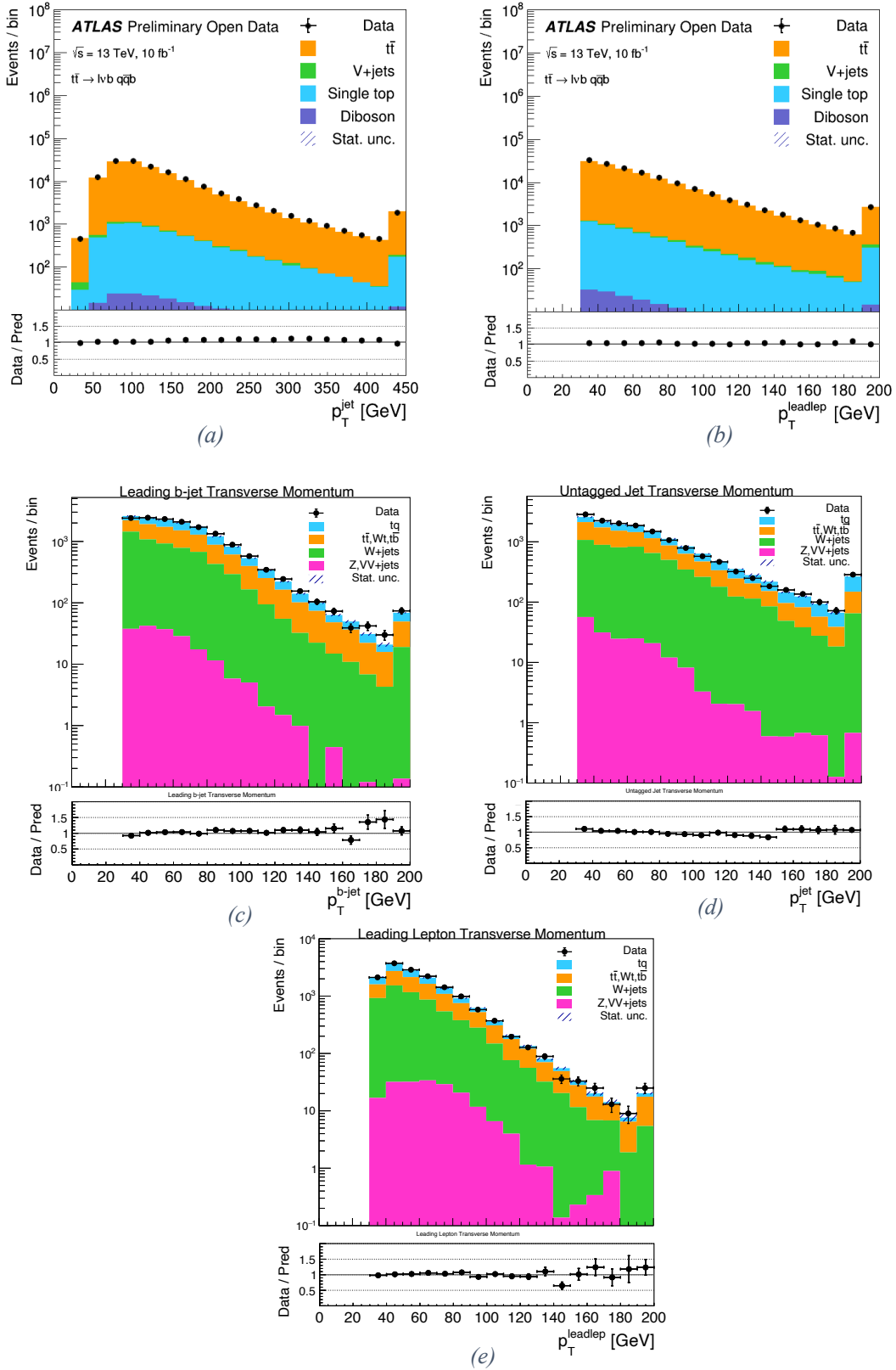


Рисунок 18. Распределения по поперечным импульсам струй (a) и лептонов (b) для лептон-струйных распадов пар топ кварков в pp соударениях при энергии 13 ТэВ, а также распределения для событий одиночного рождения из рис. 17, построенные в логарифмическом масштабе (c, d, e). Точками показаны экспериментальные данные, цветные гистограммы соответствуют моделированным событиям

Величина потерянной поперечной энергии E_t^{miss} является важной характеристикой распадов одиночных топ-кварков в лептонном канале. 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 рисунке 19 представлено распределение по потерянной поперечной энергии при энергии 13 ТэВ. Среднее значение полученного распределения E_t^{miss} составляет $60,26 \pm 12,44$ ГэВ. Можно заметить, что оно совпадает со средним значением p_T лептонов. Такое совпадение соответствует из образованию при распаде массивного W-бозона, имеющего малую скорость в СЦМ pp-соударения.

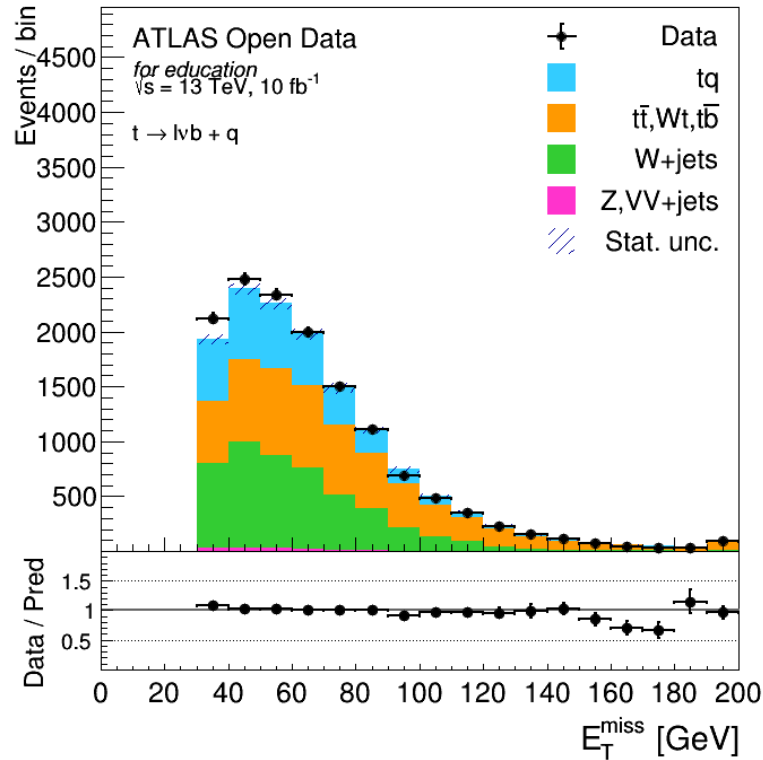


Рисунок 19. Распределение по потерянной поперечной энергии в одиночных распадах топ кварка в лептонном канале при энергии 13 ТэВ. Точками показаны экспериментальные данные, цветные гистограммы соответствуют моделированным событиям.

В работе [25] представлены результаты аналогичного анализа событий распада одиночного топ-кварка в лептонном канале, но для энергии 8 ТэВ и интегральной светимости 20.2 фб^{-1} . На рисунке 20 показаны результаты измерения потерянной поперечной энергии из работы [25] (отдельно для позитронов и мюонов).

Можно заметить, что формы гистограмм, полученных в данной работе для 13 ТэВ и в работе [25] для 8 ТэВ похожи. Количество событий на графиках различается из-за разных масштабов: на рисунке 19 показано количество событий на 1 ГэВ, а на рисунке 20 – количество событий на 10 ГэВ. Кроме того, на графике для 13 ТэВ не учитывается различие между позитронами и мюонами.

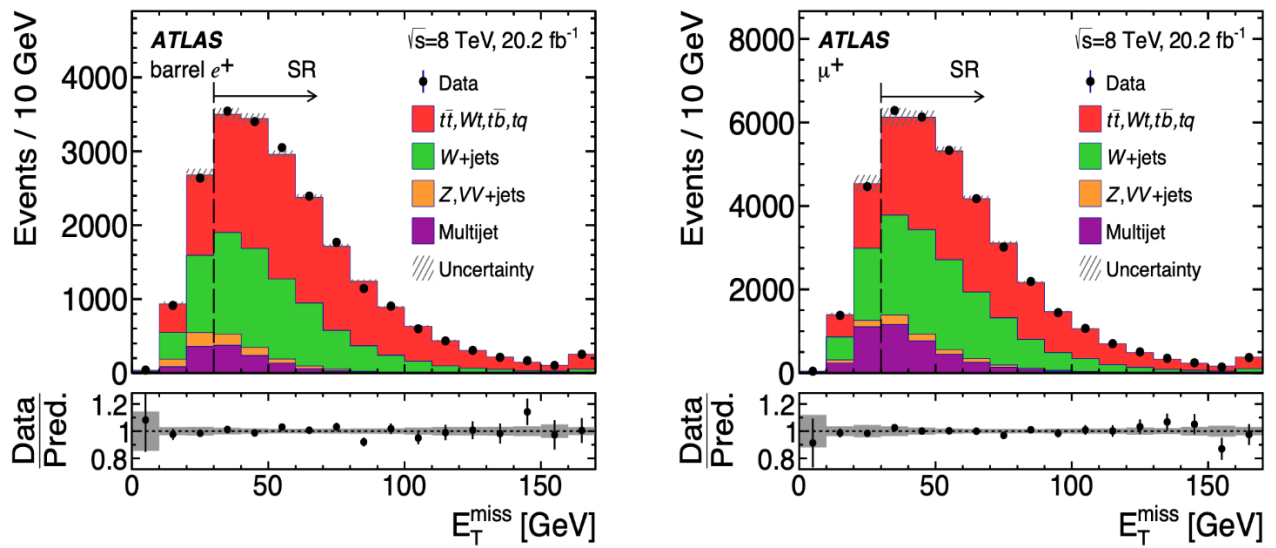


Рисунок 20. Распределение по потерянной поперечной энергии в одиночных распадах топ кварка в лептонном канале при энергии 8 ТэВ для позитронов (слева) и мюонов (справа). Точками показаны экспериментальные данные, цветные гистограммы соответствуют моделированным событиям.

Псевдобыстрота η описывает угол между направлением частицы и осью пучка и является переменной, характеризующей положение частицы в продольном направлении. На рисунке 21 (а – с) представлены распределения по псевдобыстроте для струй и лептонов. Симметричный характер полученных распределений обусловлен симметрией pp-соударений в коллайдере. На рисунке 21 (d) показано расстояние по псевдобыстроте между струей кварка и b-струей. Полученные распределения по показывают, что b-кварк вылетает под углом 90 градусов в СЦМ, т.е. топ-кварк рождается практически в покое. У лептона от распада W-бозона углы более широкие, распределение размывается. Парный к топ-кварку кварк летит в направлении протона под малыми углами к пучку. Большой интервал по псевдобыстроте между немеченой и b-меченой струями соответствует большой передаче импульса топ-кварку, что связано с его большой массой.

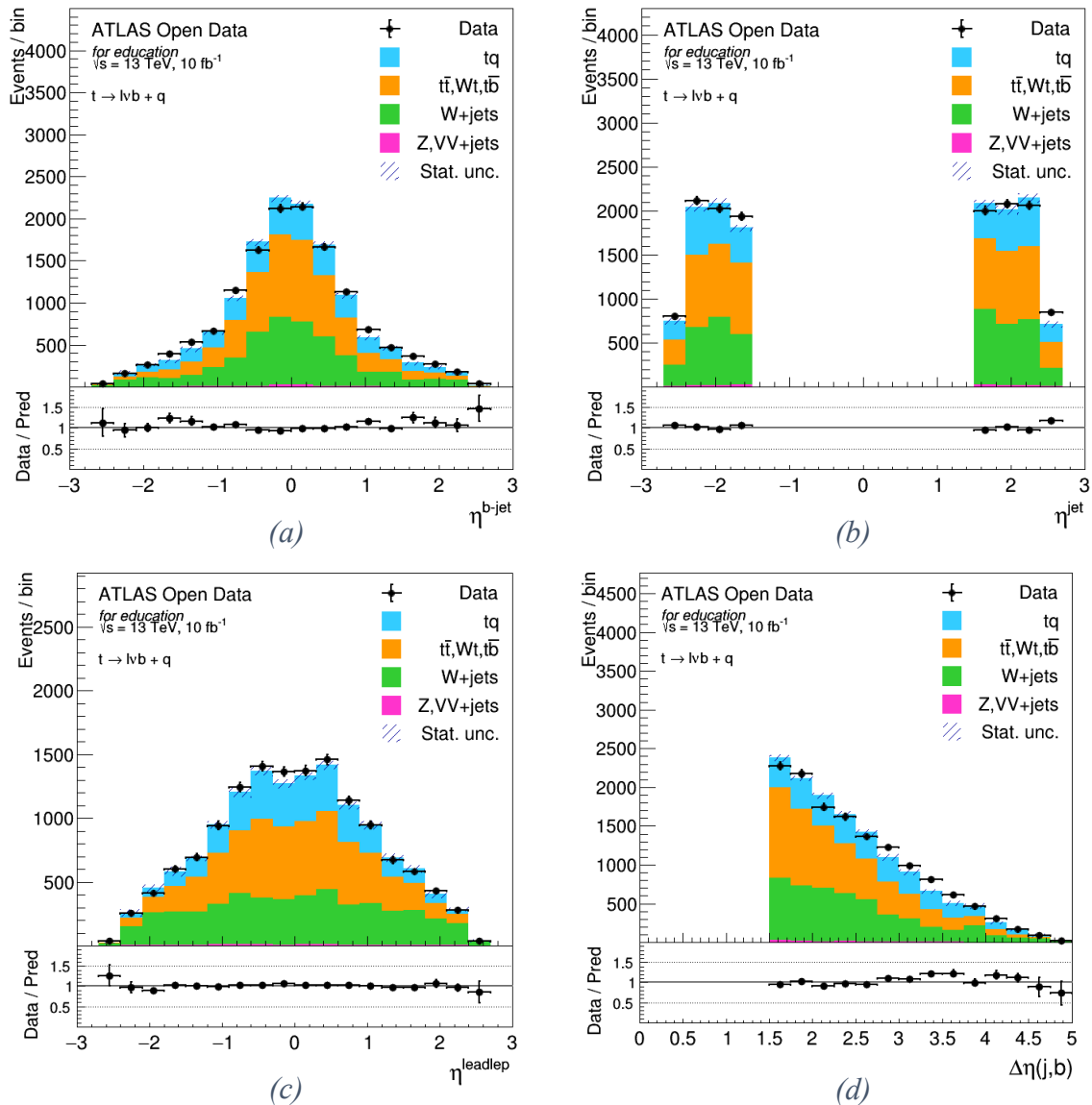


Рисунок 21. Распределения по псевдобыстроте для b -меченых струй (a), немеченых струй (b) и лептонов (c), и расстояние по псевдобыстроте между струей кварка и b -струей (d) в одиночном распаде топ кварка в лептонном канале при энергии 13 ТэВ. Точками показаны экспериментальные данные, цветные гистограммы соответствуют моделированным событиям.

Измерение заряда топ-кварка требует определения зарядов как W - бозона, так и b -кварка. Заряд W -бозона легко извлечь из лептонного распада W , а вот заряд b -кварка не может быть измерен напрямую из-за конфинмента кварка в адронах. Однако можно установить корреляцию между зарядом b -кварка и зарядами коллимированных адронов из адронизации b -кварка, которые образуют b -струю. К сожалению, из-за ограниченного набора данных ATLAS Open Data

установить вышеупомянутую корреляцию для b -кварка в рамках используемого инструментария не представляется возможным, так как отсутствуют данные о заряде b -струи. Однако предоставленные для анализа данные позволяют определить заряды лептонов в распаде топ-кварка. Соответствующее распределение показано на рисунке 22.

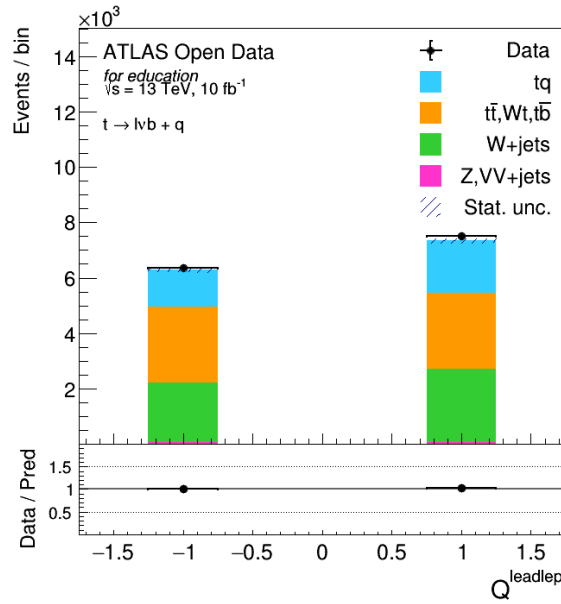


Рисунок 22. Распределение по заряду лептонов в событиях одиночного распада топ кварка в лептонном канале при энергии 13 ТэВ. Точками показаны экспериментальные данные, цветные гистограммы соответствуют моделированным событиям.

С помощью данного распределения можно вычислить отношение числа событий с положительно заряженным лептоном к числу событий с отрицательно заряженным лептоном. Это отношение, в свою очередь, равно отношению числа распавшихся топ-кварков к числу анти-топ кварков.

$$\frac{N_t}{N_{\bar{t}}} = 1,18 \pm 0,02 \quad (2)$$

В эксперименте ATLAS с применением нейронных сетей для исключения фона было получено значение этого отношения $R_t = 1.72 \pm 0.09(\text{stat.}) \pm 0.18(\text{syst.})$ [13], что отличается от полученного в (2) результата. Из-за большого вклада фона парного рождения топ-кварков асимметрия зарядов довольно сильно уменьшена, однако полученное значение в целом подтверждает предположение о

том, что количество рождающихся топ кварков больше, чем анти-топ кварков из-за того, что плотность валентных u-кварков протона примерно в два раза выше плотности валентных d-кварков.

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

5.3. Определение массы W-бозона

С использованием полученных измерений можно посчитать поперечную массу W-бозона. Полную массу W-бозона получить из этих данных невозможно, так как мы не можем рассчитать потерянную продольную энергию. Формула расчета поперечной массы:

$$M_T^W = \sqrt{2p_T^{lept} \cdot E^{miss}(1 - \cos \varphi(l, E^{miss}))},$$

где $\cos \varphi(l, E^{miss})$ – косинус азимутальных углов разлета между продуктами лептонного распада W-бозона.

С помощью приведенной выше формулы было построено распределение для поперечной инвариантной массы W-бозона (Рисунок 23).

Среднее значение полученной поперечной массы, составляющее $94,61 \pm 23,66$ ГэВ в пределах погрешности соответствует табличному значению массы W-бозона ($m_W = 80,379 \pm 0,012$ ГэВ).

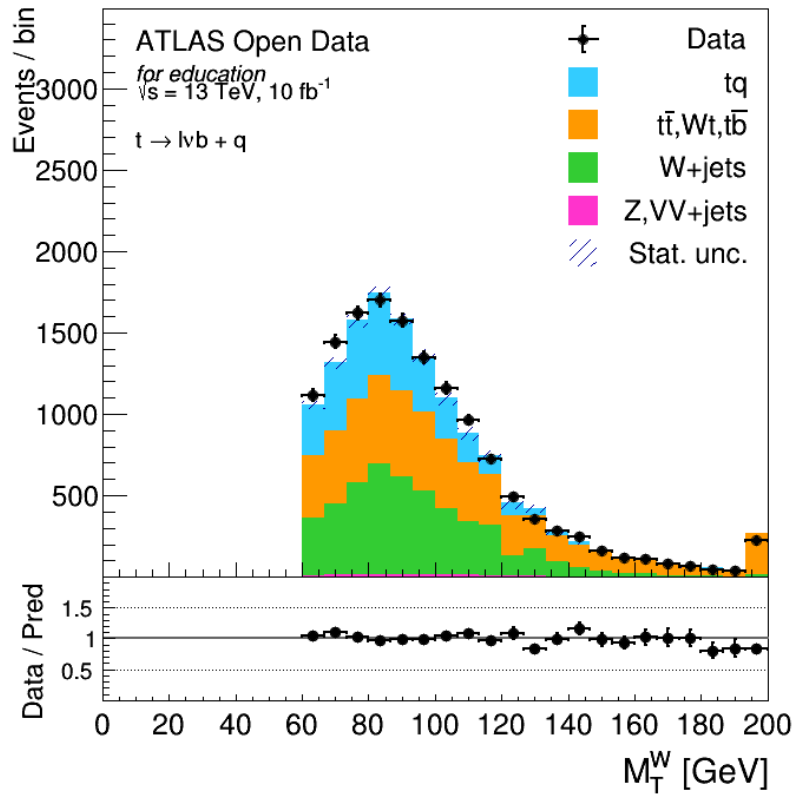


Рисунок 23. Распределение по поперечной инвариантной массе W -бозона в одиночном распаде топ кварка в лептонном канале при энергии 13 ТэВ. Точками показаны экспериментальные данные, цветные гистограммы соответствуют моделированным

5.4. Определение массы топ-кварка

В ходе работы также было построено распределение по поперечной массе топ-кварка, реконструированной из заряженного лептона, нейтрино и b -меченой струи. График распределения представлен на рисунке 24. Среднее значение полученного распределения составляет 171 ± 13 ГэВ, что приблизительно соответствует значению, полученному комбинацией всех мировых результатов измерения массы топ-кварка, равному $173.34 \pm 0,76$ ГэВ.

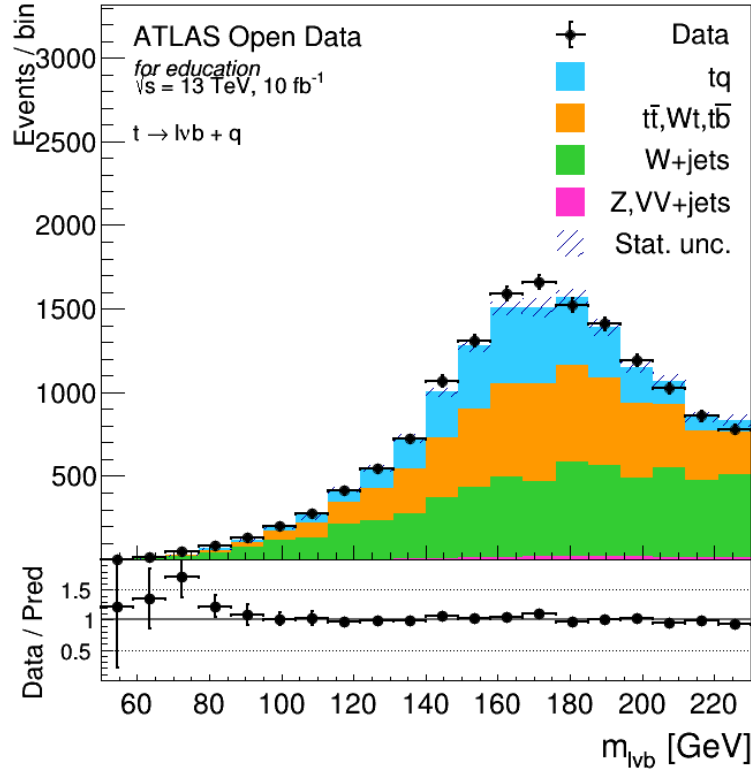


Рисунок 24. Распределение по реконструированной поперечной массе топ-кварка в событиях одиночного распада топ кварка в лептонном канале при энергии 13 ТэВ. Точками показаны экспериментальные данные, цветные гистограммы соответствуют моделированным

5.5. Определение матричного элемента V_{tb}

Сечение одиночного электрослабого рождения топ-кварков прямо пропорционально квадрату матричного элемента V_{tb} матрицы смешивания Кабибо-Кобаяси-Маскавы. Значение V_{tb} может быть получено в эксперименте как отношение измеренного сечения к теоретическому сечению, вычисленному в рамках Стандартной Модели:

$$|f_{LV}V_{tb}| = \sqrt{\frac{\sigma_{measured}}{\sigma_{theoretical}}},$$

где f_{LV} - форм-фактор возможной аномальной вершины Wtb ($f_{LV} = 1$ для СМ).

В данной работе проводился анализ событий при энергии 13 ТэВ. Измеренное в [13] интегральное сечение для этой энергии $\sigma_{measured}(tq + t\bar{q}) =$

247 ± 46 пб, а теоретическое предсказание в NLO $\sigma_{theo}(tq + t\bar{q}) = 217 \pm 10$ пб. Таким образом, получим значение V_{tb} :

$$|V_{tb}| = \sqrt{\frac{\sigma_{measured}}{\sigma_{theoretical}}} = 1,07 \pm 0,09.$$

Это значение согласуется с ожиданием Стандартной Модели.

6. Заключение

В работе приведен обзор свойств топ-кварка и механизмов его рождения, выполнен анализ событий с t -канальным рождением одиночных топ-кварков на открытых данных эксперимента ATLAS в pp -взаимодействиях при энергии 13 ТэВ. В анализе использовано приблизительно 270 миллионов событий.

Построены и проанализированы следующие характеристики распадов одиночного топ кварка в лептонном канале:

- Распределения по поперечным импульсам струй и лептонов.
- Распределение по потерянной поперечной энергии.
- Распределения по псевдобыстроте струй и лептонов.
- Распределение по заряду лептонов. Получено отношение числа событий с топ и анти-топ кварками.

Проведено сравнение полученных результатов анализа с результатами предыдущей работы по анализу событий с рождением пар топ-кварков, а также с результатами измерений коллаборации ATLAS.

Построены распределения по массе W -бозона и реконструированной поперечной массе топ-кварка для лептонном канале распада топ-кварка в событиях при энергии 13 ТэВ. Получена оценка матричного элемента V_{tb} для событий с t -канальным рождением топ-кварка при 13 ТэВ.

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.

7. Список литературы

- [1] Э. Боос, Л. Дудко, П. Мандрик и С. Слабоспицкий, «Топ-кварк. Итоги и перспективы,» 2019.
- [2] «CERN Document Server,» 2019. [В Интернете]. Available: <https://cds.cern.ch/record/2684277>.
- [3] «CERN website,» [В Интернете]. Available: <https://home.cern/science/accelerators/accelerator-complex>.
- [4] «ATLAS Experiment at CERN,» [В Интернете]. Available: <https://atlas.cern/discover/detector>.
- [5] «Ядерная физика в интернете,» [В Интернете]. Available: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/zbozon/z1.htm>.
- [6] Л. Смирнова, Эксперимент ATLAS Большого Адронного Коллайдера, Москва: Университетская книга, 2014.
- [7] CERN, «Large Hadron Collider restarts,» 22 апрель 2022. [В Интернете].
- [8] J. Glatzer, «Inclusive top pair production at 7, 8 and 13 TeV in ATLAS,» в *ATL-PHYS-PROC-2015-172*, 2015.
- [9] 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,» в *ATLAS-CONF-2019-044*, 2019.
- [10] «Top working group cross-section summary plots,» [В Интернете]. Available: <https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/PUBNOTES/ATL-PHYS-PUB-2019-035/>.
- [11] M. Gallinaro, «Top quark physics: A tool for discoveries,» 2013.
- [12] N. Kidonakis, «Theoretical results for electroweak-boson and single-top production,» 2015. [В Интернете]. Available: <https://arxiv.org/pdf/1506.04072.pdf>.
- [13] ATLAS Collaboration, «Measurement of the inclusive cross-sections of single top-quark and top-antiquark t-channel production in pp collisions at 13 TeV with the ATLAS detector,» 2017. [В Интернете]. Available: <https://arxiv.org/pdf/1609.03920.pdf>.
- [14] ATLAS Collaboration, «Measurement of the cross-section for producing a W-boson in association with a single top-quark in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with ATLAS,» 2018. [В Интернете]. Available: [https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/JHEP01\(2018\)063.pdf](https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/JHEP01(2018)063.pdf).
- [15] ATLAS Collaboration, «Evidence for single top-quark production in the s-channel in proton–proton collisions at 8 TeV with the ATLAS detector using the Matrix Element Method,» 2016. [В Интернете]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2016.03.017>.

- [16] «History of LHCTopWG Summary Plots: Single Top Vtb Summary,» [В Интернете]. Available: <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/LHCPhysics/SingleTopVtbHistory>.
- [17] ATLAS Collaboration, «Measurement of the top-quark decay width in top-quark pair events in the dilepton channel at 13 TeV with the ATLAS detector,» 2019. [В Интернете]. Available: <http://cdsweb.cern.ch/record/2684952>.
- [18] ATLAS Collaboration, «Direct top-quark decay width measurement in the $t\bar{t}$ lepton+jets channel at 8 TeV with the ATLAS experiment,» 2017. [В Интернете]. Available: <https://arxiv.org/abs/1709.04207>.
- [19] A. Castro, «Top Quark Mass Measurements in ATLAS and CMS,» 2019. [В Интернете]. Available: <https://arxiv.org/abs/1911.09437>.
- [20] ATLAS Collaboration, «Top quark mass summary plots March 2022,» 2022. [В Интернете]. Available: <https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/PUBNOTES/ATL-PHYS-PUB-2022-016/>.
- [21] «ATLAS Open Data,» [В Интернете]. Available: <http://opendata.atlas.cern/>.
- [22] ATLAS Collaboration, «Review of ATLAS Open Data 8 TeV datasets, tools and activities,» ATL-OREACH-PUB-2018-001, 2018.
- [23] ATLAS Collaboration, «Review of the 13 TeV ATLAS Open Data release,» PUB-OTRC-2020-01, 2020.
- [24] Артемьева Н. М., «Анализ распадов топ-кварков в pp-соударениях в эксперименте ATLAS,» *Бакалаврская работа*, 2020.
- [25] ATLAS Collaboration, «Fiducial, total and differential cross-section measurements of t-channel single top-quark production in pp collisions at 8 TeV using data collected by the ATLAS detector,» 2017. [В Интернете]. Available: [arXiv:1702.02859v3](https://arxiv.org/abs/1702.02859v3).