

Анализ процессов рождения тяжелых кварков в столкновениях протонов при энергии 13 ТэВ

И.А. Кочергин,^{*} Л.Н. Смирнова[†]

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра общей физики
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д.1, стр. 2

(Поступила в редакцию 25.12.2023; подписана в печать 07.03.2024)

Результаты экспериментов на Большом адронном коллайдере принесли яркое подтверждение современной Стандартной модели (СМ) фундаментальных взаимодействий, но одновременно поставили задачу расширения этой модели для решения ее существующих проблем. Одним из проявлений моделей расширения СМ являются новые массивные переносчики взаимодействий, которые могут быть обнаружены в виде резонансов. Особое внимание уделяется поиску резонансов, которые рождаются в сопровождении тяжелых кварков и распадаются на тяжелые кварки. Для анализа таких процессов рассматриваются системы, состоящие из двух t - и двух b -кварков, образованные в pp -соударениях при энергии 13 ТэВ, где накоплена максимальная интегральная светимость 140 фб^{-1} . В работе приведены модели взаимодействий, которые включают рождение и распад таких резонансов. Рассматриваются методы их выделения и категории событий, в которых присутствуют пары тяжелых кварков, эффективные переменные анализа событий, связь этих переменных с параметрами резонансов. Показана роль Монте-Карло моделирования процессов СМ и рождения новых резонансов для описания характеристик измеряемых взаимодействий. Приведены результаты совместного описания характеристик таких взаимодействий и предварительные оценки вероятности присутствия новых массивных резонансов в системах нескольких тяжелых кварков СМ.

PACS: 14.80.-j, 12.60.-i, 13.85.-t, 14.80.-j УДК: 539.12

Ключевые слова: Стандартная модель, Большой адронный коллайдер, тяжелые кварки, новые резонансы.

ВВЕДЕНИЕ

Стандартная модель в настоящее время включает в себя все известные фундаментальные частицы и с высокой точностью описывает экспериментальные данные в широкой области кинематических параметров, достигнутой на современных коллайдерах. Важнейшим успехом СМ является открытие бозона Хиггса с массой 125 ГэВ в экспериментах ATLAS и CMS [1, 2] на Большом адронном коллайдере (БАК, ЛНС) в 2012г. [3, 4]. Скалярное хиггсовское поле обеспечивает нарушение электрослабой симметрии СМ и наличие масс фундаментальных фермионов модели (кварков, заряженных лептонов). Однако остается целый ряд нерешенных проблем. Это проблемы собственно СМ, такие как проблема иерархии [5], наличие масс нейтрино, так и невозможность описать такие наблюдаемые свойства вселенной, как наличие темной материи и темной энергии вселенной, барионная анизотропия вселенной, аномальное соотношение заряженных частиц в околосреднем космическом пространстве. Решение указанных проблем может быть найдено в рамках более общей теории, включающей СМ. Проявлением такой теории является существование массивных переносчиков взаимодействий, которые могут проявляться в виде новых массивных резонансов. Интегральная светимость соударений прото-

нов (pp) 140 фб^{-1} , собранная при энергии соударений 13 ТэВ, позволяет проводить поиск таких новых резонансов для разных механизмов рождения и каналов распада резонанса.

Обзор результатов эксперимента ATLAS поиска новых резонансов в инклюзивных процессах и распадом на пары лептонов (мюонов, электронов) с противоположными электрическими зарядами или две адронные струи, образованные преимущественно ($\sim 85\%$) легкими кварками и глюонами, приведен в работе [6]. Поиск резонансов проводился преимущественно методом обнаружения избытка событий в спектрах инвариантных масс пар струй или лептонов, гладкая форма которых предсказывается квантовой хромодинамикой и квантовой электродинамикой. Эксперимент не показал присутствия каких-либо значимых отклонений в инклюзивных распределениях. Полученные верхние границы сечений для резонансов с массами более нескольких ТэВ установлены на уровне десятков фб или долей фб в зависимости от параметров резонанса: массы, ширины, типа распада и модели. Особое внимание уделяется поиску резонансов среди частиц, от распада которых присутствуют тяжелые кварки t и b . Такие резонансы могут рождаться как с сопровождением других тяжелых кварков в системе $t\bar{t}bb$, так и без такого сопровождения. Ряд моделей расширения СМ с усиленной симметрией предполагают существование массивного W' -бозона, который является медиатором нового заряженного тока, и масса его может быть достаточной для распада на t и b -кварки. Существование взаимодействия такого заряженного тока учитывается в моделях с дополнительными размерностями, малого

^{*} iliya_kochergin@mail.ru

[†] lns@physics.msu.ru

Хиггса, составного Хиггса. Часть моделей предсказывает предпочтительный распад такого тока на тяжелые кварки и даже предпочтительный последующий распад на кварки, т.е. подавление лептонной моды распада. На полных данных pp соударений при энергии 13 ТэВ выполнен поиск такого W' -резонанса в экспериментах CMS и ATLAS [7, 8], где W' рождается в s -канале без сопровождения другими тяжелыми кварками. Так, в эксперименте CMS проведен, например, поиск для полностью адронного распада W' с массой в интервале значений 1–4 ТэВ [7]. При таких массах t кварк в распаде имеет высокий поперечный импульс и наблюдается в виде широкой струи, образованной двумя слившимися струями от легких кварков. Ожидаемый сигнал проявляется в виде избытка событий в спектре инвариантных масс $t\bar{b}$ -кварков. Анализ проведен для W' как с левой, так и с правой хиральностью. В случае W' с левой хиральностью возможна интерференция этого процесса с одиночным рождением t -кварка в СМ [9]. В результате на уровне 95% достоверности установлен верхний предел для массы W' -резонанса как левой, так и правой хиральности — 3.4 ТэВ. В эксперименте ATLAS поиск W' -бозона выполнен в чисто адронных состояниях и состояниях с наличием одного лептона в диапазоне $t\bar{b}$ -инвариантных масс 0.5–6 ТэВ для резонанса с правой и левой хиральностью и учетом интерференции [9]. В результате анализа исключены массы W' с правой хиральностью менее 4.6 ТэВ и менее 4.2 ТэВ для левой хиральности.

Особое внимание в настоящее время уделяется анализу систем, состоящих из двух пар рожденных тяжелых кварков $t\bar{t}b\bar{b}$, как на рис. 1.

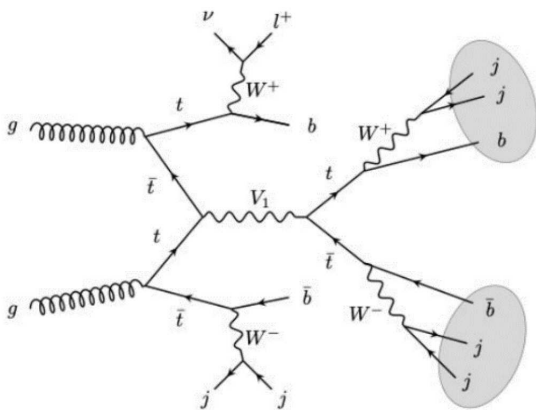


Рис. 1. Основная фейнмановская диаграмма рождения нового резонанса в pp -соударениях

Преимуществом таких состояний является возможность наблюдать процессы СМ-ассоциированного рождения бозона Хиггса H в канале $t\bar{t}H$, векторного бозона $t\bar{t}V$ ($V = W, Z$) и других. Одновременно существует возможность поиска новых состояний, примером которых является заряженный хиггсовский бозон H^\pm , предсказываемый моделями суперсимметрии.

Поиск такого резонанса в pp -соударениях при энергии 13 ТэВ на полной интегральной светимости выполнен в эксперименте ATLAS [10]. В данной работе рассматриваются предварительные результаты анализа системы тяжелых кварков $t\bar{t}b\bar{b}$, образованной в pp -соударениях при энергии 13 ТэВ, собранных в эксперименте ATLAS, с целью поиска тяжелого резонанса W^* с распадом на $t\bar{b}$ -кварки. Метод анализа аналогичен выполненному в работе [10].

1. УСЛОВИЯ НАБЛЮДЕНИЯ СИСТЕМЫ $t\bar{t}b\bar{b}$

Изначально в 2008 г. Чижовым в работе [11] была предложена модель с расширением сектора Хиггса СМ путем введения новых тяжелых возбужденных векторных бозонов, обозначенных как Z^* , W^{*+} , W^{*-} . Существование таких частиц может обеспечить решение проблемы иерархии. Чуть позже идея получила дальнейшее развитие и теоретическое рассмотрение в работе [12]. Предполагаемая масса новых частиц оценивалась примерно в 1 ТэВ. Проводилось сравнение с расширением СМ через калибровочный бозон Z' . Модели схожи, однако из-за разных подходов к тензорам групп симметрий получаются различные распределения, пример можно видеть на рис. 2. Дополнительные обоснования для поиска Z^* , W^* и их отличительные особенности рассмотрены в работах [13, 14].

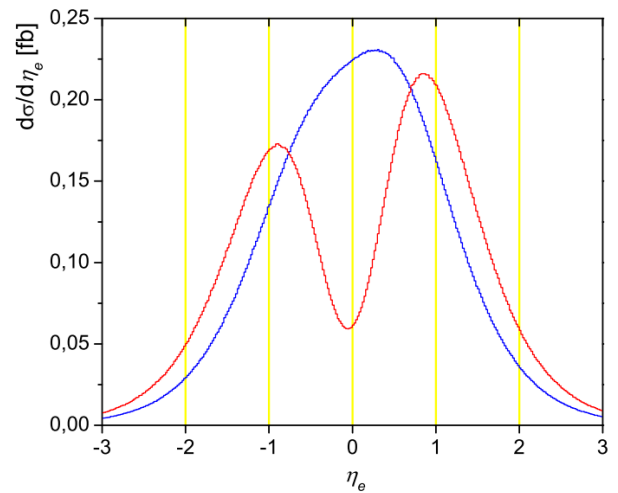


Рис. 2. Дифференциальные сечения калибровочного бозона Z' (синий) и возбужденного кирального бозона Z^* (красный), распадающихся на лептонную пару с инвариантной массой $800 \text{ ГэВ} < M_{ll} < 1200 \text{ ГэВ}$, в зависимости от псевдобыстроты лептонов [11]

В эксперименте ATLAS было проведено много анализов по поиску калибровочного W' . Так, например, анализ с лептоном и потерянным импульсом в конечном состоянии [15] не показал значительного отклонения от СМ ни для W' , ни для W^* в канале лептонно-

го распада с одним лептоном и потерянным импульсом в конечном состоянии $W' \rightarrow l\nu$. Нижняя граница массы возможного бозона W' была оценена в 1490 ГэВ, при этом в эксперименте CMS на то время нижняя граница была установлена на уровне 1580 ГэВ [16] с уровнем достоверности 95%. Граница для W^* в этом канале составляла в то время 1350 ГэВ [11].

В 2012 г. был представлен ещё один анализ [17] по поиску W' с распадом на заряженный лептон и нейтрино на статистике 4.7 фмб^{-1} при энергии pp -соударений 7 ТэВ. Были установлены пределы нижней массы в 2.55 ТэВ для W' и 2.42 ТэВ для W^* , при этом проведено сравнение распределений этих бозонов по псевдобыстроте и поперечной массе, что можно видеть на рис. 3. Наблюдается значительно различное поведение, особенно в случае псевдобыстроты η : большая центральность для W' и два отдельных пика для W^* .

В 2011 г. в эксперименте ATLAS при инклюзивном поиске W^* с распадом на две адронные струи были исключены значения его массы до 3.21 ТэВ [12]. Эта оценка была получена в результате анализа конечных состояний с легкими лептонами (электронами, мюонами и недостающими нейтрино) как наиболее четкими каналами для поиска новых тяжелых резонансов на адронных коллайдерах. То есть, предполагалась кварк-лептонная и семейная универсальность. Но поскольку векторные дублеты существуют вместе со скалярными дублетами, естественно предположить взаимодействие в основном с фермионами третьего поколения [18].

Теоретические оценки дают следующие представления о свойствах новых резонансов W^* :

1. Масса около 1 ТэВ;
2. Квантовые числа идентичны хиггсовскому дублету;
3. Взаимодействуют главным образом с фермионами из 3-его поколения.

Для заряженного бозона W^* :

$$gg \rightarrow t\bar{b}W^{(*-)} \rightarrow t\bar{t}b\bar{b}, \quad (1)$$

с массой $M = 0.7 \text{ ТэВ}$ в pp -взаимодействиях при энергии $\sqrt{s} = 13 \text{ ТэВ}$ оценка дает значение сечения рождения порядка 230 fb. Заряженный хиггсовский бозон H^+ , рассмотренный в [10], близок по своим ожидаемым параметрам к состоянию W^* и имеет почти такую же кинематику, что и W^* .

На рис. 4 показаны варианты образования и распада рассматриваемой системы тяжелых кварков $t\bar{t}b\bar{b}$.

Конечное состояние системы содержит большое число адронных струй, в том числе образованных b -кварками. Выделение различных комбинаций массивных частиц, например состояний с рождением пар кварков третьего поколения $t\bar{t}b\bar{b}$, дает возможность провести поиск резонансов в такой системе. Из-за схожести процессов образования и распада W^* -бозона и заряженного бозона Хиггса H^+ применяется подобный метод анализа и отбора событий [10].

2. МЕТОД ВЫДЕЛЕНИЯ ОБЪЕКТОВ КОНЕЧНОГО СОСТОЯНИЯ

Для поиска сигнала резонанса W^* с распадом на tb , важным этапом является моделирование процессов SM, приводящих к рассматриваемому конечному состоянию. Конечное состояние $t\bar{t}b\bar{b}$ в эксперименте можно характеризовать количеством адронных струй j и числом струй среди них, образованных $b(\bar{b})$ -кварком. Проверкой соответствия результатов моделирования эксперименту является согласие модельных и экспериментальных распределений по выбранным переменным в контрольных областях анализа. Такой контрольной областью (CR) для рассматриваемого состояния является область событий с рождением 5 струй, две из которых образованы b -кварками, и обозначается как 5j2b. В качестве сигнальных областей, в которых сигнал ожидается максимальным и наиболее различимым, выбраны 4 области:

1. 5j3b — 5 струй, из которых 3 струи с b -кварком;
2. 5j4bin — 5 струй, из которых 4 струи и более с b -кварком;
3. 6jin3b — 6 и более струй, из которых 3 струи с b -кварком;
4. 6jin4bin — 6 и более струй, из которых 4 струи и более с b -кварком.

Лептоны в анализе не используются из-за технической сложности их идентификации как объектов искомого события. В качестве исследуемых данных используются сгенерированные с помощью Монте-Карло генераторов наборы событий для 6 различных масс искомого W^* , по 1 млн событий для каждого значения массы. Таким образом, используются сгенерированные наборы событий рождения резонанса W^* с массой 600, 700, 800, 900, 1000 и 1200 ГэВ. Генерация проведена для условий всего второго этапа работы коллайдера Run 2 и включает в себя три периода: 2015–2016 гг., 2017 г. и 2018 г., и в сумме составляет 1 миллион событий для каждого значения массы W^* . Для анализа используется набор переменных, который в том числе включает:

1. Centrality — скалярная сумма p_T всех струй и лептонов в событии, разделенная на сумму их энергий;
2. leading jet p_T — поперечный импульс лидирующей струи;
3. H_{T_jets} — скалярная сумма E_T всех струй в событии;
4. p_T — поперечный импульс.

Дополнительно можно ввести и рассмотреть переменную, коррелирующую с инвариантной массой сигнального резонанса. Для этого используем параметры

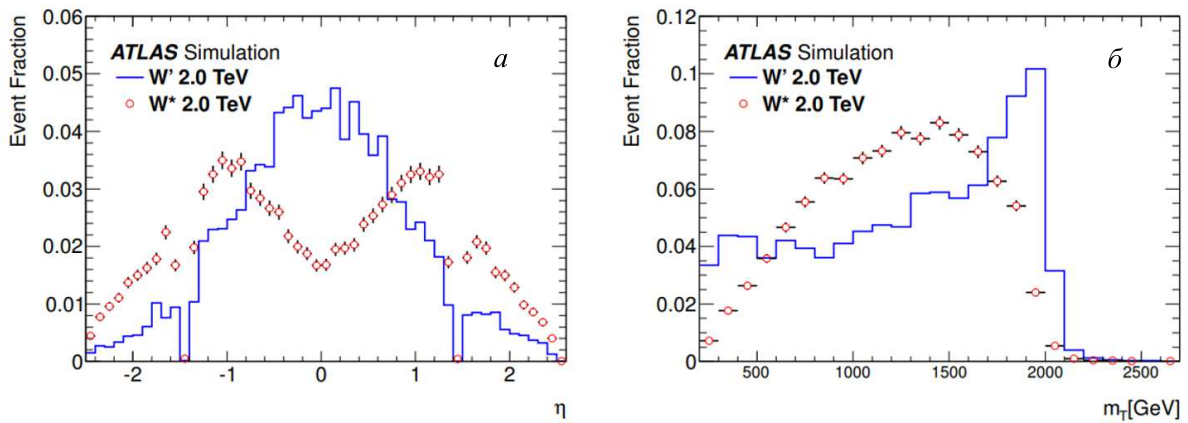


Рис. 3. Восстановленные распределения электронов η (а) и m_T (б) для $W' \rightarrow e\nu$ и $W^* \rightarrow e\nu$ при $m_{W'} = m_{W^*} = 2.0$ ТэВ. Все распределения нормированы на единицу площади [17]

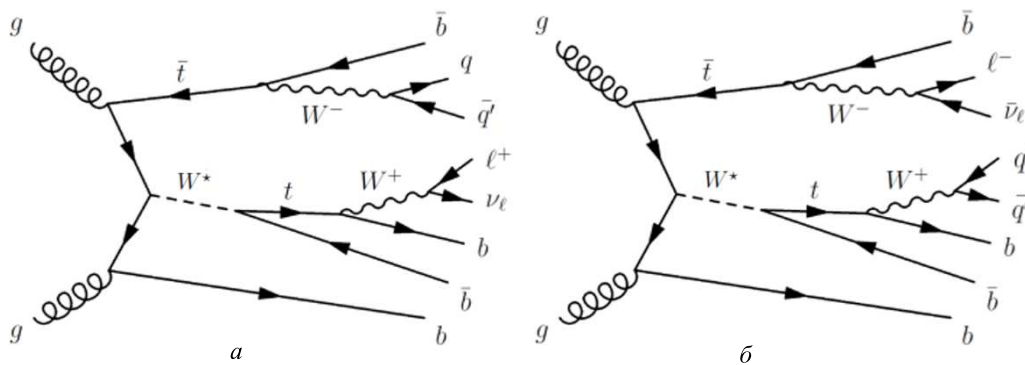


Рис. 4. Схемы распада системы $tt\bar{b}b$ при рождении заряженного бозона W^{*+}

4-х струй, образованных от распада W^* в случае безлептонного (адронного) распада, и оценим величину инвариантной массы резонанса m_{inv} как:

$$m_{inv} = \sqrt{H_T^2 - \sum p_T^2}. \quad (2)$$

Возникают варианты подбора соответствующих струй из всего набора моделированных данных после этапа реконструкции. Наибольшее же значение имеет вопрос включения в набор лидирующей струи. При рассмотрении распределений инвариантной массы m_{inv} для сигнальной области $5j3b$ в системе 4-х струй без лидирующей и с лидирующей для моделированных сигнальных событий с рождением W^* массой 600 ГэВ оказалось, что включение или исключение лидирующей струи в набор учитываемых оказывает очень сильное влияние. В первом случае с набором из 2-й, 3-й, 4-й и 5-й струй, среднее значение около 250 ГэВ, во втором же случае в наборе струй с 1-й по 4-ю и среднее значение около 550 ГэВ, при массе резонанса 600 ТэВ. Аналогично и для других масс бозона W^* . Таким образом, при исключении лидирующей струи из набора общая масса оставшихся значительно меньше

массы резонанса, их образовавшего, и разницу нельзя объяснить потерянными (незарегистрируемыми) моментом и энергией. Следовательно, лидирующая струя является одной из образованных искомым резонансом.

3. ОПТИМИЗАЦИЯ СЕЧЕНИЙ ПРОЦЕССОВ СМ

В качестве фоновых событий в анализе используются моделированные события процессов СМ, чьи конечные состояния схожи с конечным состоянием сигнала резонанса W^* . Такие процессы вносят значительный или основной вклад в конечные состояния с парами тяжелых кварков, струями с высоким поперечным импульсом p_T . Процессами СМ, для которых выполнено моделирование, являются рождение конечных состояний $t\bar{t}$, $t\bar{t}H$, $t\bar{t}V$, $t\bar{t}W$, tWH , $tHjb$, W -струй и других (табл. 1).

При моделировании фоновых процессов, как и сигнальных, используются Монте-Карло генераторы Pythia 8.2, Herwig, Sherpa 2.2, Powheg-Box, MadGraph. Неопределенности в процессе моделирования Монте-Карло генераторов компенсируются вве-

Таблица 1. Процессы СМ, используемые в качестве фоновых событий в анализе по поиску W^*

ttbar + jets	lep, ljets_BBFilt, ljets_BFiltBBVeto, ljets_CFiltBVeto, dil_BFiltBBVeto, dil_CFiltBVeto
single top t-chan	lep_tbar, BW50_lep_tbar, lep_t, BW50_lep_t
single-top tW	HThalfscale_tW_inclusive, Wt_DR_inclusive_t, Wt_DR_inclusive_tbar
single top s-chan	lep, H7UE_lep_t, lep_tH7UE_lep_tbar, lep_tbar
ttbar V	ttee, ttmm, tttt, ttW
ttbar H	allhad,ljets, dilep
tHjb	4fl_CPalpha_0
tHW	4fl_CPalpha_0
four top quarks	SM4topsNLO
Diboson	llll, llvv, llvv, lvvv, vvvv, ZqqZvv, ZqqZll, WqqZvv, WqqZll, WpqqWmlv, WplvWmqq, WlvZqq, llllj, llvvj, llvvjj, llvvjj_ss, gglll_0M4l130, gglll_130M4l, ggllvvZZ

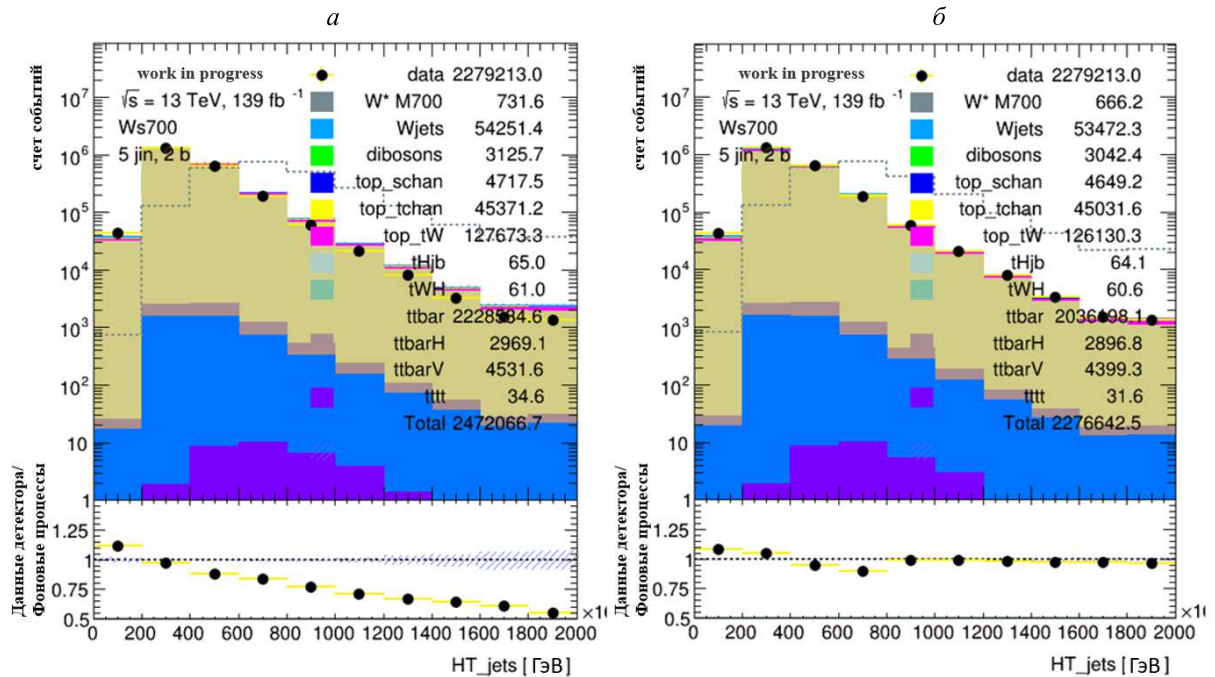


Рис. 5. Распределения по переменной $H_{T,jets}$ для контрольной области (а) до и (б) после осуществления нормировки, проведенной с помощью программы TRExFitter [19]

дением весов и нормировкой моделированных данных. На рис. 5 приведены распределения по одной из коллективных переменных H_T для контрольной области до (рис. 5, а) и после (рис. 5, б) осуществления нормировки, построенные с помощью программы TRExFitter [19].

После многоступенчатого отбора и процедуры перенормирования основной вклад в фоновые события для ассоциированного рождения тяжелых бозонов вносит процесс рождения пар топ кварков $t\bar{t}$. Меньшее влияние оказывают процессы $t\bar{t}H$, $t\bar{t}W$ и процессы с W -струями. Остальные можно объединить вместе, и их влияние почти незначительное. Удовлетвори-

тельное описание экспериментального распределения на рис. 5, б показывает, что моделированные распределения могут быть использованы для выделения резонансных состояний.

Получаемые распределения в результате применения перенормировки к сигнальным областям схожи по поведению с подобными в анализе $H^+ \rightarrow tb$, которые можно видеть на рис. 6, с точностью до средних значений.

Основной вклад в неопределенности вносит статистическая погрешность, и она связана с количеством событий, прошедших отбор. Так, для области пяти струй с 4 или более струй от b кварков общее число

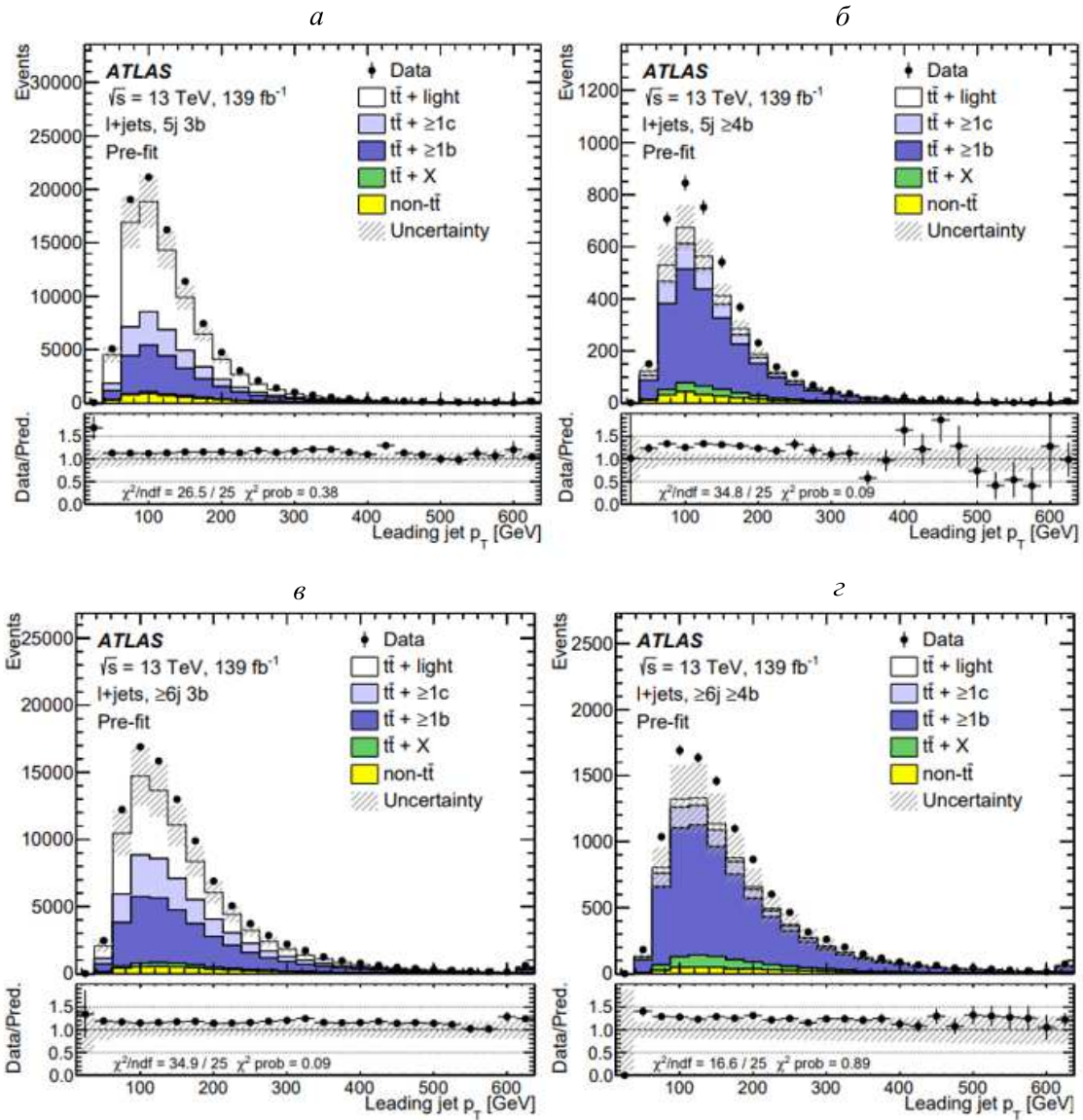


Рис. 6. Распределения поперечного импульса p_T лидирующей струи после применения нормировки для событий СМ и сигнала резонанса H [10] в области (а) 5 струй, из которых 3 струи с b -кварком, (б) 5 струй, из которых 4 струи и более с b -кварком, (в) 6 и более струй, из которых 3 струи с b -кварком, (г) 6 и более струй, из которых 4 струи и более с b -кварком

событий после отбора составляет менее 10 тысяч, из-за чего получается высокая погрешность, как на рис. 6, б. Аналогично, области распределений при больших значениях переменной H_T содержат небольшое число событий и погрешность для них также возрастает.

На возможность применения результатов нормировки также влияет и соотношение событий сигнала с фоновыми событиями в разных областях анализа. Это соотношение достаточно близко для всех рассматриваемых масс W^* , во всех областях фоновые процессы многократно превышают сигнальные, но наибольшее отношение, равное $S/B = 0.7\%$, достигается в области 6 струй с 4 или более b -струями. Таким образом, можно заключить, что при поиске нового бозона W^* имеет

смысл обращать основное внимание на область 6 струй с 4 или более b -струями, как области с наибольшей значимостью, хотя и с не максимальным количеством прошедших отбор событий. В дальнейшем этой сигнальной области будет уделено наибольшее внимание.

В качестве итога возможно оценить количество событий для сигналов разной массы в рассматриваемых состояниях. В табл. 2 приведены такие оценки для всех задаваемых масс W^* в области 6 струй с 4 или более b -струями.

Наибольшее число сигнальных событий после перенормировки Монте-Карло моделирования и сравнения с экспериментом можно ожидать в области 6 струй с 4 или более b -струями с массой искомого W^* око-

Таблица 2. Оценка количества событий SM и сигнального резонанса для разной массы W^* в области 6 струй с 4 или более b -струями

$M(W^*) =$	600 ГэВ	700 ГэВ	800 ГэВ	900 ГэВ	1000 ГэВ	1200 ГэВ
Data	21480					
$t\bar{t}b\bar{b}$	20150	20270	20340	20380	20400	20430
$t\bar{t}b\bar{b}H$	580	580	580	580	580	580
top_tW	590	590	590	590	590	590
$Wjets$	140	140	140	140	140	140
others	260	260	270	270	270	270
Total	22110	22080	22070	22060	22050	22040
Signal	400	240	150	90	60	25

ло 600 ГэВ, что соответствует и оценкам работы [10]. Схожесть с анализом по поиску H^+ позволяет грубо оценить ожидания сечения W^* в значение, порядка 10 фмб, при общем сечении рождения W^* от всех процессов в 230 фмб. Значимость такой оценки около 1σ , что объясняется подавляюще большим числом фоновых событий со схожими конечными состояниями. Для улучшения оценки результата актуально применение методов анализа с использованием нейронных сетей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Успехи SM делают актуальным поиск новых моделей для решения ее проблем, как внутренних, так и в описании свойств космической вселенной. Раз-

работано большое количество моделей для решения этих проблем, включающих SM . Проверка этих моделей проводится на данных БАК для pp -взаимодействий при энергии 13 ТэВ, где имеется максимальный объем зарегистрированных событий, соответствующий интегральной светимости 140 fb^{-1} .

В работе исследуются предсказания модели с возбужденным бозоном W^* с рождением резонанса W^* в системе тяжелых кварков $t\bar{t}b\bar{b}$ и с распадом на пару $t\bar{b}$ -кварков. Описаны новые коллективные переменные, используемые для анализа системы $t\bar{t}b\bar{b}$, исследованы их свойства. Проведена нормировка сечений фоновых процессов SM , участвующих в анализе. На их основе получены первые предварительные оценки количества событий в рассмотренных наблюдаемых состояниях системы $t\bar{t}b\bar{b}$.

-
- [1] The ATLAS Collaboration *Aad G., Abat E., Abdallah J.* et al. // JINST. 3. S08003 (2008).
- [2] The CMS Collaboration *Chatrchyan S., Hmayakyan G., Khachatryan V.* et al. // JINST. 3. S08004 (2008).
- [3] ATLAS Collaboration *Aad G., Abajyan T., Abbott B.* et al. // Phys. Lett. B. **716**, N 1. 1 (2012).
- [4] CMS Collaboration *Chatrchyan S., Khachatryan V.* et al. // Phys. Lett. B. **716**, N 1. 30 (2012).
- [5] *Jegerlehner F.* // DESY 18-211, HU-EP-18 /38, arXiv:1812.03863v2.
- [6] *Кочергин И.А., Смирнова Л.Н.* // Ядерная физика. **86**, № 2. 296. (2023).
- [7] CMS Collaboration *Sirunyan A.M., Tumasyan A., Adam W.* et al. // Phys. Lett. B. **820**. 136535 (2021).
- [8] ATLAS Collaboration *Aad G., Abbott B., Abeling K.* et al. // arXiv:2308.08521, subm.JHEP.
- [9] *Boos E., Bunichev V., Dudko L., Perfilov M.* // Phys. Lett. B. 2007. 655. 245
- [10] ATLAS Collaboration *Aad G., Abbott B., Abbott D.C.* et al. // JHEP. 2021. 06. P. 145; arXiv:2102.10076
- [11] *Chizhov M.V., Bednyakov V.A., Budagov J.A.* // Nuovo Cimento C33 343 (2010), arXiv:0801.4235.
- [12] *Chizhov M.V., Gia Dvali* // CERN-PH-TH/2009-146, arXiv:0908.0924.
- [13] *Chizhov M.V., Bednyakov V.A., Budagov J.A.* // arXiv:1005.2728 [hep-ph]
- [14] *Chizhov M.V.* // arXiv:1005.4287.
- [15] The ATLAS Collaboration // CERN-PH-EP-2011-023, arXiv:1103.1391 [hep-ex].
- [16] CMS Collaboration, *Chatrchyan S.* et al. // Phys. Lett. B (2011), submitted), hep-ex/1103.0030.
- [17] The ATLAS Collaboration // CERN-PH-EP-2012-245, arXiv:1209.4446v2 [hep-ex].
- [18] *Chizhov M.V., Bednyakov V.A.* // arXiv:1509.07610.
- [19] <https://gitlab.cern.ch/TRExStats/TRExFitter>

Analysis of heavy quark production processes in proton collisions at the energy of 13 TeV

I.A. Kochergin^a, L.N. Smirnova^b

*Department of General Physics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University
Moscow 119991, Russia*

E-mail: ^ailiya_kochergin@mail.ru, ^blns@physics.msu.ru

The results of experiments at the Large Hadron Collider gave clear confirmation of the modern Standard Model (SM) of fundamental interactions, but at the same time they raised the challenge of expanding this model to solve its existing problems. One of the demonstrations of the SM expansion models is new massive carriers of interactions, which can be detected in the form of resonances. Particular attention is paid to the search for resonances that are born accompanied by heavy quarks and decay into heavy quarks. To analyze such processes, we consider systems consisting of two t and two b quarks, formed in pp collisions at an energy of 13 TeV, where a maximum cumulative luminosity of 140 fb^{-1} has been accumulated. The work presents models of interactions that include the birth and decay of such resonances. Methods for their identification and categories of events in which pairs of heavy quarks are present, effective event analysis variables, and the relationship of these variables with resonance parameters are considered. The role of Monte Carlo modeling of SM processes and the birth of new resonances for describing the characteristics of measured interactions is shown. The results of a joint description of the characteristics of such interactions and preliminary estimates of the probability of the presence of new massive resonances in systems of several heavy SM quarks are presented.

PACS: 14.80.-j

Keywords: Standard Model, Large Hadron Collider, heavy quarks, new resonances.

Received 25 December 2023.

Сведения об авторах

1. Кочергин Илья Александрович — аспирант; e-mail: iliya_kochergin@mail.ru.
2. Смирнова Лидия Николаевна — доктор физ.-мат. наук, профессор; тел.: (495) 932-89-72, e-mail: lns@physics.msu.ru.