

На правах рукописи



Беляев Никита Леонидович

**Эффекты CP-нарушения и аномальные  
взаимодействия в хиггсовском секторе**

Специальность 01.04.23 —  
«Физика высоких энергий»

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва — 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

Научный руководитель: д.ф.-м.н., профессор  
**Рубин Сергей Георгиевич**

Научный консультант: д.ф.-м.н., профессор  
**Коноплич Ростислав Всеволодович**

Официальные оппоненты: **Красников Николай Валерьевич**,  
доктор физико-математических наук,  
Институт ядерных исследований РАН,  
главный научный сотрудник

**Лыкасов Геннадий Иванович**,  
доктор физико-математических наук,  
Лаборатория ядерных проблем ОИЯИ,  
старший научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»

Защита состоится **DD mmmmmmmm YYYY г. в XX часов** на заседании диссертационного совета Д002.023.02 при Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН по адресу: 119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д.53, ФИАН.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке **Название библиотеки**.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д.53, ФИАН, учёному секретарю диссертационного совета Д002.023.02.

Автореферат разослан **DD mmmmmmmm YYYY года**.  
Телефон для справок: **+7 (0000) 00-00-00**.

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
Д002.023.02,  
д-р физ.-мат. наук

Истомин Яков Николаевич

## Общая характеристика работы

В 1964 году британский физик Питер Хиггс вместе с пятью другими учёными предсказал существование нового физического поля, которое впоследствии было названо полем Хиггса. Квантом данного поля является так называемый бозон Хиггса, который с необходимостью возникает при рассмотрении хиггсовского механизма спонтанного нарушения электрослабой симметрии [1]. Механизм спонтанного нарушения электрослабой симметрии позволяет в рамках Стандартной модели элементарных частиц (СМ) элегантно объяснить тот экспериментальный факт, что фотон является безмассовым, в то время как  $W^\pm$  и  $Z$ -бозоны являются массивными. Если электрослабая симметрия спонтанно нарушается, то вследствие теоремы Голдстоуна в теории появляются четыре безмассовых нambu-голдстоуновских бозона [2]. Однако данные бозоны не проявляются в физическом спектре, а взаимодействуют с полем Хиггса, в результате чего три из них приобретают массу ( $Z$  и  $W^\pm$ ), а фотон остаётся безмассовым.

Многочисленные эксперименты по поиску бозона Хиггса, проведённые в конце 20-го и начале 21-го веков, всё больше и больше ограничивали интервал масс, в которых мог бы существовать бозон Хиггса, предсказываемый СМ. Однако сам бозон при этом долгое время не был обнаружен. Широкий круг исследований проводился, в частности, на Большом электрон-позитронном коллайдере (LEP) в Европейском центре ядерных исследований (CERN) [3]. Эксперименты на LEP были завершены в 2011 году, суммарная энергия пучков в системе центра масс при этом составила около 208 ГэВ. Каких-либо следов бозона Хиггса обнаружено не было. Впоследствии стало понятно, что максимально достигнутая энергия пучков в системе центра масс на LEP оказалась примерно на 10 – 15% ниже того предела, который сделал бы возможным рождение бозона Хиггса в рамках проводимых экспериментов. Однако, летом 2012-го года коллаборации ATLAS и CMS сообщили о наблюдении нового нейтрального резонанса в рамках программы поиска бозона Хиггса СМ [4; 5] на Большом адронном коллайдере (БАК). Это открытие впоследствии было подтверждено обеими коллаборациями с помощью анализа полного набора данных, полученных на БАК в течение первого этапа его исследовательской программы (так называемый Run 1). При этом было показано, что новая частица обладает массой около 125 ГэВ, доминирующим механизмом её рождения является механизм глюонного слияния ( $ggF$ ), а распад происходит в пару калибровочных бозонов ( $\gamma\gamma$ ,  $ZZ$  и  $W^+W^-$ ). Наблюдаемые на эксперименте каналы распада позволили идентифицировать новую частицу как нейтральный бозон. Последующие измерения констант связи нового бозона с фермионами и калибровочными бозонами продемонстрировали согласие полученных данных с предсказаниями СМ в пределах достигнутых статистических погрешностей.

Детальное изучение свойств бозона Хиггса при этом представляет собой задачу первостепенной важности, поскольку необходимо экспериментально подтвердить, что обнаруженный резонанс является именно бозоном Хиггса  $SM$ . В противном случае, обнаруженные отклонения могут привести к кардинальному пересмотру принципов физических теорий элементарных частиц, разработанных на сегодняшний день. Так, например, в настоящий момент проводятся обширные исследования, направленные на поиск эффектов  $CP$ -нарушений в различных процессах. Вопросы  $CP$ -нарушения сами по себе являются крайне актуальными как минимум в контексте того, что чёткое понимание физики подобных процессов может объяснить природу барионной асимметрии Вселенной, которая на данный момент не имеет непротиворечивого и экспериментально подтверждённого объяснения в рамках существующих теорий. Особый интерес среди этих исследований представляет поиск возможного  $CP$ -нарушения в хиггсовском секторе. На данный момент экспериментально установлено, что  $CP$ -чётность нарушается лишь в слабых взаимодействиях, а именно в распадах  $\eta$ ,  $K$ ,  $D$  и  $B$ -мезонов [6]. Подобное нарушение  $CP$ -симметрии в рамках  $SM$  реализовано посредством включения комплексной фазы в СКМ-матрицу, описывающую смешивание кварков. При этом бозон Хиггса в рамках  $SM$  обладает исключительно положительной  $CP$ -чётностью и никаких эффектов  $CP$ -нарушения в хиггсовском секторе не предсказывается. Однако, если подобное нарушение в хиггсовском секторе будет обнаружено, то это станет убедительным доказательством того, что новая физика вне рамок  $SM$  действительно существует, поскольку на данный момент никаких статистически значимых отклонений от  $SM$  экспериментально обнаружено не было [7].

Коллаборация ATLAS опубликовала более сотни работ, среди которых есть монографии, статьи, сборники трудов конференций и обзоры анализов данных, в которых обсуждаются различные аспекты взаимодействия бозона Хиггса с частицами  $SM$ . Более подробная информация может быть найдена, например, в статьях [8–10] и других. Подробные исследования спина и чётности кандидата на роль бозона Хиггса, выполненные коллаборациями ATLAS и CMS, продемонстрировали, что доминирующей является гипотеза о спине и чётности  $j_{CP} = 0^{++}$  [11; 12].

Однако, на сегодняшний день не исключена возможность того, что хиггсовский сектор содержит дополнительные  $CP$ -чётные или  $CP$ -нечётные физические состояния, а наблюдаемые в эксперименте свойства бозона Хиггса определяются их суперпозицией. Подобная конфигурация хиггсовского поля рассматривается в широком спектре теорий вне рамок  $SM$  [13–15]. В данной работе происходит непосредственное рассмотрение подобных теорий и предлагаются новые методики, с помощью которых возможно будет либо непосредственно обнаружить эффекты  $CP$ -нарушения в хиггсовском секторе, либо установить экспериментальные ограничения

на значения констант связи в Лагранжианах соответствующих теоретических моделей.

Поскольку в данный момент идёт активная подготовка БАК к третьему этапу исследовательской программы, особый интерес с физической точки зрения также представляют процессы, изучение которых станет возможным после улучшения технических характеристик ускорителя в 2021-2023 годах. На сегодняшний день, с помощью БАК на каждом из экспериментов собрано около  $120 \text{ фб}^{-1}$  данных, доступных для анализа с помощью разработанных методик. После того, как в рамках третьего этапа исследовательской программы на БАК будет собрана дополнительная статистика, станет возможно проводить измерения с процентной точностью, что позволит напрямую проверить на достоверность многие современные физические модели элементарных частиц вне рамок СМ.

**Целью** данной работы является изучение эффектов СР-нарушения и аномальных взаимодействий в хиггсовском секторе путём разработки и апробации новых методик поиска соответствующих эффектов в процессах взаимодействия бозона Хиггса с бозонами и фермионами СМ.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи задачи:

1. Провести теоретическое рассмотрение процессов взаимодействия бозона Хиггса с калибровочными бозонами и фермионами СМ в рамках современных моделей взаимодействия элементарных частиц, основанных на формализме Эффективной теории поля (ЭТП), а именно: Higgs Characterisation (HC), SMEFT (Варшавский и Хиггс базисы), а также модели, основанной на эффективной амплитуде вершины  $HVV$ . Получить аналитические соотношения между параметрами данных моделей.
2. Провести Монте-Карло анализ данных и получить ожидаемые пределы на величину угла смешивания СР-чётного и СР-нечётного физических состояний бозона Хиггса, а также на величину сечения данного процесса для значений интегральной светимости БАК в  $300 \text{ фб}^{-1}$  и  $3000 \text{ фб}^{-1}$  в процессе  $gg \rightarrow H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$ , используя информацию об асимметриях специальных угловых переменных, чувствительных к наличию аномальных взаимодействий в Лагранжиане.
3. Получить расчётные распределения по специальным угловым переменным, чувствительным к значению СР-чётности бозона Хиггса, для процессов  $gg \rightarrow H \rightarrow \tau^+\tau^- \rightarrow \pi^+\pi^-\nu_\tau\bar{\nu}_\tau$  и  $gg \rightarrow H \rightarrow \tau^+\tau^- \rightarrow \rho^+\rho^-\nu_\tau\bar{\nu}_\tau$ . При этом рассмотреть случаи как чистых, так и смешанных СР-состояний бозона Хиггса. Установить чувствительность рассматриваемых переменных к значению

CP-чётности бозона Хиггса при учёте адронизации конечного состояния и упрощённого моделирования детекторных эффектов установки ATLAS.

4. Получить расчётные распределения по оптимальным наблюдаемым для случаев распада бозона Хиггса в четыре лептона и его рождения посредством механизма VBF в рамках модели SMEFT и вычислить ожидаемые пределы на параметры данной модели.
5. Провести теоретическое рассмотрение процессов с участием гипотетического тяжёлого бозона Хиггса спина 0 ( $S_0$ ): вычислить спиральные амплитуды взаимодействия данного бозона с фотонами и  $Z$ -бозонами и получить теоретическую зависимость сечения от разности азимутальных углов адронных струй в процессе  $qq' \rightarrow qq' S_0$ . Также с помощью Монте-Карло моделирования получить расчётные распределения по кинематическим переменным, чувствительным к CP-природе тяжёлого бозона Хиггса.
6. Установить наличие новых кинематических корреляций адронных струй в процессах рождения бозона Хиггса посредством механизмов глюонного слияния (ggF) и слияния векторных бозонов (VBF) в рамках повышения эффективности анализов данных, направленных на поиск эффектов CP-нарушения. На основе полученных результатов разработать новую расчётную методику разделения каналов рождения ggF и VBF и провести её апробацию на Монте-Карло данных.

### Научная новизна:

1. Впервые были получены аналитические соотношения, связывающие параметры современных теоретических моделей: HC, SMEFT (в Варшавском и Хиггс базисах), а также модели, основанной на эффективной амплитуде вершины  $HVV$ . Полученные соотношения, помимо прочего, позволяют сравнивать между собой результаты, получаемые коллаборациями ATLAS и CMS, а также результаты независимых научных групп.
2. С целью последующего получения предсказаний теории, не являющихся заведомо противоречащими эксперименту, впервые были определены рабочие области значений параметров рассматриваемых моделей на основе данных об уровне точности современных экспериментальных ограничений на сечения процессов с участием бозона Хиггса.
3. Впервые было установлено, что вклады интерференционных эффектов в кинематические распределения в процессе распада бозона Хиггса в четыре лептона ожидаются на уровне нескольких процентов. Также впервые была проведена оценка чувствительности интерференционных эффектов к значению CP-чётности бозона Хиггса в данном процессе.

4. В ходе Монте-Карло анализа данных в рамках модели НС впервые были получены ожидаемые пределы на величину угла смешивания CP-чётных и CP-нечётных физических состояний бозона Хигса, а также на величину сечения для процесса  $gg \rightarrow H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$  уровне интегральных светимостей в  $300 \text{ фб}^{-1}$  и  $3000 \text{ фб}^{-1}$ .
5. Впервые была продемонстрирована возможность определения CP-чётности бозона Хигса с помощью специальных угловых переменных в процессах  $gg \rightarrow H \rightarrow \tau^+\tau^- \rightarrow \pi^+\pi^-\nu_\tau\bar{\nu}_\tau$  и  $gg \rightarrow H \rightarrow \tau^+\tau^- \rightarrow \rho^+\rho^-\nu_\tau\bar{\nu}_\tau$  при учёте адронизации конечного состояния и упрощённого учёта детекторных эффектов установки ATLAS.
6. Впервые было проведено теоретическое рассмотрение процессов с участием гипотетического тяжёлого бозона Хигса спина 0 ( $S_0$ ): вычислены спиральные амплитуды взаимодействия данного бозона с фотонами и  $Z$ -бозонами и получена теоретическую зависимость сечения от разности азимутальных углов адронных струй в процессе  $qq' \rightarrow qq'S_0$ . С помощью Монте-Карло моделирования в рамках феноменологической модели НС впервые получены расчётные распределения по кинематическим переменным, чувствительным к CP-природе тяжёлого бозона Хигса
7. Впервые были получены распределения по оптимальным наблюдаемым для случаев распада бозона Хигса в четыре лептона и его рождения посредством механизма VBF в рамках модели SMEFT. Также на основе полученных распределений впервые были получены ожидаемые пределы, соответствующие интегральной светимости в  $140 \text{ фб}^{-1}$ . Было установлено, что использование техники оптимальных наблюдаемых в анализе процесса рождения бозона Хигса посредством механизма VBF позволяет получать ожидаемые пределы, точность которых на два порядка превосходит таковую в анализе процесса распада бозона Хигса в четыре лептона.
8. Впервые в рамках коллаборации ATLAS был реализован метод морфинга и продемонстрирована его работоспособность на основе анализа процессов рождения бозона Хигса и его распада в четыре лептона. Кроме того, был разработан и реализован метод расширенного морфинга, а также проведена его апробация с помощью Монте-Карло наборов данных. Данные методы, в частности, впоследствии неоднократно использовались для получения гладких зависимостей функций правдоподобия от параметров рассматриваемых моделей, что способствовало получению более точных значений ожидаемых пределов на параметры моделей.
9. Был разработан и протестирован новый программный пакет классификации событий, основанный на использовании расширенных

деревьев решений (BDT). С помощью разработанного пакета была впервые проведена оценка чувствительности кинематических переменных к механизму рождения бозона Хиггса на будущем ускорителе High Luminosity LHC (HL-LHC).

**Практическая значимость** результатов обеспечивается в первую очередь применением разработанных методик поиска аномальных взаимодействий и сопутствующего математического аппарата в анализе экспериментальных данных - так, например, методы обычного и расширенного морфинга и их конкретные программные реализации, разработанные в ходе данной работы, уже используются членами коллаборации ATLAS для проведения исследований в области физики бозона Хиггса. Также в ходе работы был разработан программный пакет для классификации событий, который применяется в исследованиях, направленных на изучение ассоциированного рождения бозона Хиггса с  $Z$ -бозоном. При этом важно отметить, что разработанные программные пакеты и математические методы, на которых они базируются, в силу своей общности могут применяться не только в области физики бозона Хиггса, но также и в других областях физики и даже в других отраслях науки. Результаты, полученные в рамках данной работы, также используются членами коллаборации ATLAS для текущих физических исследований в области физики бозона Хиггса.

Результаты диссертационного исследования использовались в НИР, выполненных при поддержке РФФИ (проект № 17-72-10021) в рамках группы МИФИ в эксперименте ATLAS на базе кафедры «Физика элементарных частиц» НИЯУ МИФИ.

Цикл статей, составляющих основу данного диссертационного исследования, был отмечен премией Правительства Москвы для молодых учёных в 2018 году.

**Методология и методы исследования.** В качестве методов исследования были использованы следующие инструменты:

- Метод Монте-Карло моделирования.
- Метод асимметрий.
- Метод оптимальных наблюдаемых.
- Метод спиральных амплитуд.
- Метод максимального правдоподобия.
- Метод классификации на основе расширенных деревьев решений (BDT).
- Метод морфинга.
- Метод расширенного морфинга.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Аналитические выражения, связывающие параметры моделей  $HC$ , SMEFT (в Варшавском и Хиггс базисах), а также модели, основанной на эффективной амплитуде вершины  $HVV$ . Области значений



- параметров данных моделей, определённые с использованием современных экспериментальных ограничений на величины сечений процессов с участием бозона Хиггса.
2. Ожидаемые пределы на величину угла смешивания CP-чётных и CP-нечётных физических состояний бозона Хиггса, а также на величину сечения для процесса  $gg \rightarrow H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$  уровне интегральных светимостей в  $300 \text{ фб}^{-1}$  и  $3000 \text{ фб}^{-1}$ .
  3. Расчётная методика определения CP-чётности бозона Хиггса с помощью специальных угловых переменных в процессах  $gg \rightarrow H \rightarrow \tau^+\tau^- \rightarrow \pi^+\pi^-\nu_\tau\bar{\nu}_\tau$  и  $gg \rightarrow H \rightarrow \tau^+\tau^- \rightarrow \rho^+\rho^-\nu_\tau\bar{\nu}_\tau$  при учёте адронизации конечного состояния и упрощённого учёта детекторных эффектов установки ATLAS.
  4. Спиральные амплитуды взаимодействия гипотетического тяжёлого бозона Хиггса с фотонами и Z-бозонами и теоретическая зависимость сечения от разности азимутальных углов адронных струй в процессе  $qq' \rightarrow qq'S_0$ . Расчётные распределения по кинематическим переменным, чувствительным к CP-природе тяжёлого бозона Хиггса.
  5. Расчётные распределения по оптимальным наблюдаемым для случаев распада бозона Хиггса в четыре лептона и его рождения посредством механизма VBF в рамках модели SMEFT, а также ожидаемые пределы, соответствующие интегральной светимости в  $140 \text{ фб}^{-1}$ .

**Достоверность** полученных результатов подтверждается их согласием с опубликованными теоретическими работами и экспериментальными результатами, опубликованными коллаборациями ATLAS и CMS. Также в ходе выполнения работы проводилось сравнение получаемых результатов с помощью общеизвестных Монте-Карло генераторов событий. Проверка разработанных методик и инструментов проводилась на примере изученных ранее процессов как в рамках SM, так и за её пределами.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы были изложены в следующих докладах на всероссийских и международных и конференциях:

- Выступление с докладом «Изучение эффектов CP-нарушения в распаде  $gg \rightarrow H \rightarrow \tau\tau$ » на научной конференции «Международная сессия - конференция Секции ядерной физики ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий». 17.11.2014 - 21.11.2014, Москва, Россия.
- Выступление с докладом «Анализ асимметрий как способ обнаружения CP - нарушения в хиггсовском секторе» на научной конференции «Научная Сессия НИЯУ МИФИ - 2015». 16.02.2015 - 21.02.2015, Москва, Россия.

- Выступление с докладом «Monte Carlo for the tensor structure analysis in the Higgs sector» на научной конференции «LHC Reweighting Workshop». 20.05.2015 - 20.05.2015, Женева, Швейцария.
- Выступление с докладом «Further developments on Morphing» на научной конференции «ATLAS ZZ Workshop». 26.04.2016 - 29.04.2016, Мюнхен, Германия.
- Выступление с докладом «Observables sensitive to tensor structure of di-photon interaction of a hypothetical heavy spin-0 boson» на научной конференции «II международная научная конференция НАУКА БУДУЩЕГО». 20.09.2016 - 23.09.2016, Казань, Россия.
- Выступление с докладом «Limits on Higgs boson couplings in Effective field theory» на научной конференции «The International Conference on Particle Physics and Astrophysics - 2016». 10.10.2016 - 14.10.2016, Москва, Россия.
- Выступление с докладом «Measurement of cross sections and couplings of the Higgs Boson in bosonic decay channels with the ATLAS detector» на научной конференции «The 6th International Conference on New Frontiers in Physics (ICNFP 2017)». 17.08.2017 - 26.08.2017, Колимвари, Греция.
- Выступление с докладом «High performance computing system in the framework of the Higgs boson studies» на научной конференции «The 26th Symposium on Nuclear Electronics and Computing (NEC2017)». 24.09.2017 - 29.09.2017, Будва, Черногория.
- Выступление с докладом «Study of CP-sensitive kinematic observables in  $pp \rightarrow Hjj$  process» на научной конференции «The International Conference on Particle Physics and Astrophysics - 2017». 02.10.2017 - 05.10.2017, Москва, Россия.
- Выступление с докладом «The Framework of the Extended morphing method» на научной конференции «ATLAS  $H \rightarrow ZZ$  Workshop». 10.04.2018 - 13.04.2018, Оксфорд, Великобритания.

Полученные результаты также неоднократно докладывались и обсуждались в рамках рабочих совещаний коллаборации ATLAS.

**Личный вклад.** Результаты, изложенные в данной работе, были получены либо непосредственно автором, либо его вклад в получение результатов являлся определяющим. При этом автор принимал активное участие в исследованиях, проводимых коллаборацией ATLAS, и является соавтором большого количества результатов, опубликованных коллаборацией. С момента вступления автора в коллаборацию ATLAS в 2012 году, на рабочих совещаниях научных групп им был представлен 31 доклад по теме диссертационного исследования. Также результаты, в получении которых автор принимал непосредственное участие, были представлены докладчиками от коллаборации ATLAS на крупных международных конференциях

(ICHEP 2014, ICHEP 2016, EPS-HEP 2017, LHCP 2017, Moriond EW 2017 и других).

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в 13 печатных изданиях [1–13], 5 из которых изданы в периодических журналах, рекомендованных ВАК, 4 — в неперiodических журналах, рекомендованных ВАК (тезисы докладов), 3 — в технических статьях коллаборации ATLAS, 1 — в монографиях.

## Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы. В последующих главах сперва приводится изложение теоретического аппарата данного исследования, приводится описание рассматриваемых теорий элементарных частиц и обозначаются границы их применимости. Далее, с помощью введённого теоретического аппарата, приводится изложение новых математических инструментов, разработанных в ходе данного исследования, после чего проводится апробация полученного инструментария на данных, полученных с помощью генераторов Монте-Карло и реальных данных с БАК.

**Первая глава** содержит базовое описание устройства и основных параметров детектора ATLAS как главной экспериментальной установки, на которой был сделан акцент в данной работе. Кратко рассматривается как общая конфигурация детектора, так и устройство отдельных его подсистем.

**Вторая глава** посвящена краткому изложению основ Стандартной модели элементарных частиц. Подробно рассматривается электрослабый сектор СМ и приводится описание механизма Хиггса спонтанного нарушения электрослабой симметрии.

**Третья глава** посвящена описанию теоретического аппарата Эффективной теории поля (ЭТП). Рассматриваются общие принципы построения ЭТП и основные свойства эффективных Лагранжианов. В общем виде, Лагранжиан ЭТП может быть представлен следующим образом:

$$\mathcal{L}_{\text{eff}} = \mathcal{L}_{SM} + \sum_i \frac{c_i^{(5)}}{\Lambda} \mathcal{O}_i^{(5)} + \sum_i \frac{c_i^{(6)}}{\Lambda^2} \mathcal{O}_i^{(6)} + \sum_i \frac{c_i^{(7)}}{\Lambda^3} \mathcal{O}_i^{(7)} + \sum_i \frac{c_i^{(8)}}{\Lambda^4} \mathcal{O}_i^{(8)} + \dots, \quad (1)$$

где каждый член  $\mathcal{O}_i^{(D)}$  представляет собой  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$  инвариантный оператор размерности  $D$ , а параметры  $c_i^{(D)}$ , являющиеся множителями операторов в Лагранжиане, называются *коэффициентами Вильсона*. Обсуждение затрагивает Лагранжианы и их слагаемые в рамках конкретных

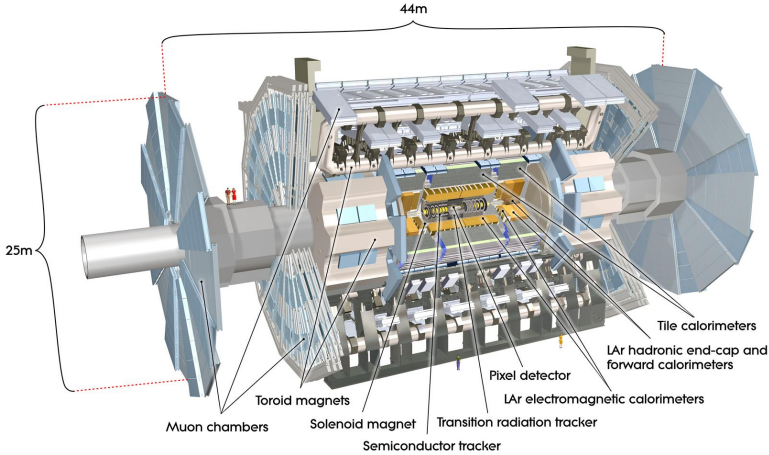


Рис. 1 — Схематичное изображение детектора ATLAS с указанием базовых его подсистем.

реализаций ЭТП размерности  $D = 5$ ,  $D = 6$ ,  $D = 7$  и  $D = 8$  описывающих взаимодействие частиц как в рамках СМ, так и за её пределами. Рассматриваются и подробно обсуждаются следующие современные модели: SMEFT (базисы SILH, Warsaw и Higgs), Higgs Characterisation (HC) и модель, основанная на эффективной амплитуде вершины  $HVV$ . Также обсуждаются программные пакеты, позволяющие моделировать события в рамках широкого спектра феноменологических моделей: Монте-Карло генераторы MadGraph5, JhuGen, Mela и программный пакет Rosetta, позволяющий пересчитывать величины констант связи из одного базиса модели SMEFT в другой.

**Четвёртая глава** посвящена теоретическому рассмотрению процессов взаимодействий бозона Хиггса с бозонами и фермионами СМ. Приводятся полученные аналитические соотношения, связывающие между собой параметры моделей HC, SMEFT и модели, основанной на эффективной амплитуде вершины  $HVV$ . В данной главе также приводится описание исследования, целью которого было определение рабочих областей значений параметров моделей (констант связи) для последующего получения предсказаний теорий, не являющихся заведомо противоречащими эксперименту. Подобные вычисления проводились для случаев, соответствующих нынешним средним уровням точности экспериментального определения сечений в процессах рождения бозона Хиггса ( $\pm 25\%$ ,  $\pm 50\%$  и  $\pm 75\%$  от величины соответствующих сечений в СМ). Для получения данных пределов, из теоретических соображений были составлены многочлены степени не выше 4, описывающие сечения рассматриваемых процессов, числовые

коэффициенты в которых были определены с помощью Монте-Карло генератора MadGraph5. Результаты подобного моделирования для случая констант связи  $\tilde{c}_{HWB}$ ,  $\tilde{c}_{HW}$  и  $\tilde{c}_{HB}$ , соответствующих СР-нечётным слагаемым в Лагранжиане модели SMEFT (Варшавский базис), приведены на рис. 2.

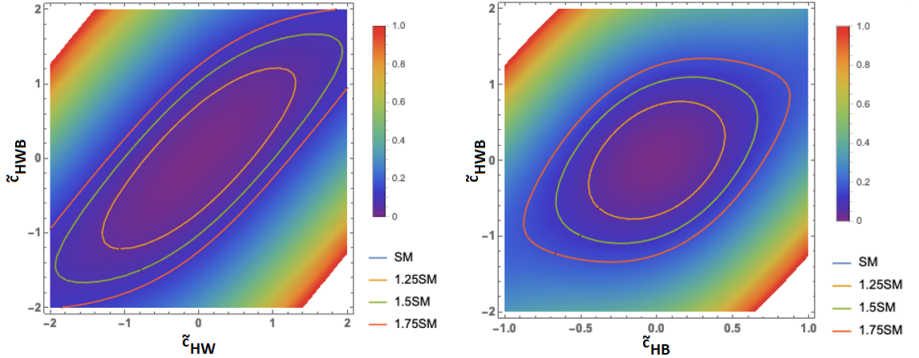


Рис. 2 — Примеры двумерных контуров, ограничивающих значения констант связи в Лагранжиане модели SMEFT (Варшавский базис) для случаев ненулевых значений констант  $\tilde{c}_{HWB}$ ,  $\tilde{c}_{HW}$  (слева) и  $\tilde{c}_{HWB}$ ,  $\tilde{c}_{HB}$  (справа).

Также в четвёртой главе описывается математический метод морфинга, с использованием которого становится возможным моделировать кинематические распределения и/или сечения конкретных процессов, используя при этом лишь заранее заданную и ограниченную выборку из нескольких наборов данных. По сути, процедура морфинга сводится к суммированию вкладов в искомое распределение от каждого из наборов данных с учётом специально вычисленных весовых коэффициентов, которые зависят от рассматриваемой точки в многомерном пространстве констант связи. При этом стоит отметить, что метод перевзвешивания распределений, широко используемый в анализе экспериментальных данных с ускорителей, является частным случаем метода морфинга. Использование метода морфинга позволяет избавиться от необходимости в генерации дополнительных Монте-Карло наборов данных в том случае, если необходимо изучить кинематические распределения для каких-либо новых значений констант связи в Лагранжиане. Также метод морфинга особенно удобно применять при проведении сканирования функции правдоподобия в зависимости от величин выбранных констант связи. В этом случае сигнальное распределение, которое будет сравниваться с распределением СМ, в каждой точке графика моделируется с помощью метода морфинга, что позволяет получить гладкую кривую без генерации соответствующих Монте-Карло наборов данных в каждой точке.

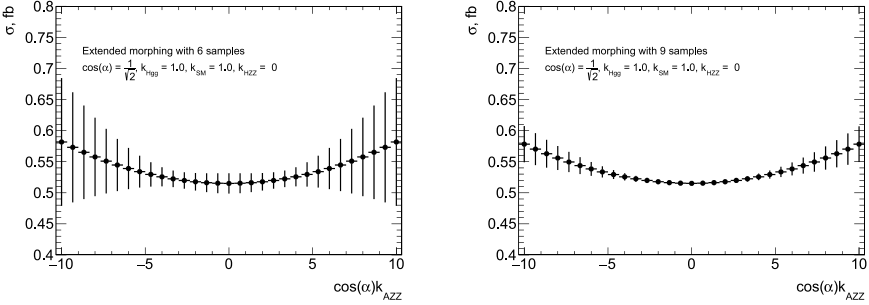


Рис. 3 — Реконструированное распределение полного сечения процесса  $pp \rightarrow H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$  как функция произведения  $\cos(\alpha)k_{AZZ}$  с использованием алгоритма классического морфинга с выборкой из 6 базовых наборов данных (слева) и с использованием алгоритма расширенного морфинга с выборкой из 9 базовых наборов данных (справа).

Однако, обычный метод морфинга обладает серьёзным недостатком, а именно - эффективность реконструкции кинематических распределений резко падает при удалении от точек многомерного пространства констант связи Лагранжиана, в которых определены базовые наборы данных. Устранить данную проблему помогает так называемый метод расширенного морфинга, который был разработан в ходе данного исследования. Суть метода расширенного морфинга состоит в том, что для реконструкции используется выборка наборов данных, более широкая, чем необходимо для проведения обычной процедуры. При этом все используемые наборы данных взвешиваются с помощью специальной весовой функции в соответствии с расстоянием в многомерном пространстве констант связи в Лагранжиане в зависимости от расстояния до моделируемой точки. Таким образом в каждом конкретном случае основной вклад в реконструированные кинематические распределения будут давать различные конфигурации наборов данных, что позволяет увеличить эффективность метода реконструкции распределений. На рис. 3 приведены результаты одной из проверок, демонстрирующий масштаб улучшения эффективности реконструкции распределений на примере полного сечения процесса.

В **Пятая глава** посвящена изложению разработанных методик поиска аномальных взаимодействий в хиггсовском секторе.

Для изучения потенциальных возможностей поиска эффектов CP-нарушения в процессе распада бозона Хиггса в четыре лептона был использован метод асимметрий, суть которого состоит в использовании специальных переменных, распределения по которым будут асимметричны в случае присутствия CP-нечётных членов в Лагранжиане. Пример распределения по одной из подобных наблюдаемых приведён на рис. 4 (слева). Величина полученных асимметрии для некоторых значений угла смешивания  $\alpha$  составляет более 10%.

В ходе проведённого Монте-Карло анализа данных полученные распределения были использованы для получения ограничений на параметры широко используемой в физическом сообществе феноменологической модели НС с учётом влияния фоновых событий, адронизации конечного состояния и упрощённого учёта детекторных эффектов установки ATLAS. Ограничения были получены для интегральных светимостей в 300 и 3000  $\text{fb}^{-1}$ . Пример области, ограниченной в результате проведённого Монте-Карло анализа данных, приведён на рис. 4 (справа). Также в

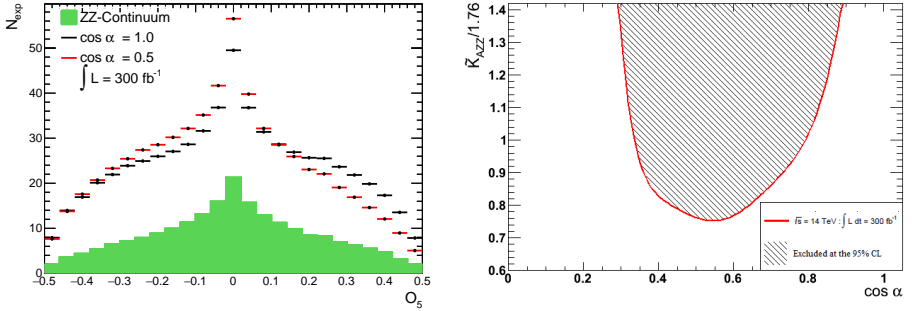


Рис. 4 — Пример распределения по специальной наблюдаемой  $O_5$ , чувствительной к наличию смешанного CP-состояния бозона Хиггса (слева) и область исключения параметров модели на уровне интегральной светимости в 300  $\text{fb}^{-1}$  (справа) [1].

пятой главе приводится исследование, направленное на разработку расчётной методики поиска эффектов CP-нарушения в процессе распада бозона Хиггса на два тау-лептона. Рассматривались адронные моды распадов тау-лептонов в пару  $\rho$  или  $\pi$ -мезонов с дополнительными нейтрино. В ходе исследования, в соответствии с известными теоретическими работами, были построены расчётные распределения по специальным угловым кинематическим переменным, демонстрирующим чувствительность к значению CP-чётности бозона Хиггса. Также впервые были получены расчётные распределения для смешанных CP-состояний бозона Хиггса. Данные распределения были получены с учётом адронизации конечного состояния и упрощённой симуляции детекторных эффектов установки ATLAS. Распределения по кинематическим переменным  $\phi$  и  $\Theta_{CP}^*$ , чувствительным к значению CP-чётности бозона Хиггса, для процесса  $gg \rightarrow H \rightarrow \tau^+\tau^- \rightarrow \rho^+\rho^-\nu_\tau\bar{\nu}_\tau$  приведены на рис. 5.

Кроме того, в пятой главе представлено исследование, направленное на изучение чувствительности наблюдаемых, основанных на матричных элементах рассматриваемых процессов (так называемых оптимальных наблюдаемых), к возможным эффектам CP-нарушения в хиггсовском секторе. Оптимальные наблюдаемые рассматривались как для случая распада

бозона Хиггса в четыре лептона, так и для случая рождения бозона Хиггса с двумя ассоциированными адронными струями. Чувствительность оптимальных наблюдаемых проверялась для тех значений констант связи в Лагранжиане, которые ещё не были экспериментально ограничены с помощью данных с БАК. Полученные результаты позволяют говорить о том, что чувствительность оптимальных наблюдаемых на уровне актуальных экспериментальных ограничений в случае процесса  $pp \rightarrow Hjj$  на порядок больше, нежели в случае процесса  $H \rightarrow 4l$ . Пример распределения по оптимальной наблюдаемой  $OO_1$  для процесса  $pp \rightarrow Hjj$  и результаты сканирования функцией правдоподобия распределения по  $OO_1$  в зависимости от величины константы связи  $c_{ZZ}$  приведены на рис. 6.

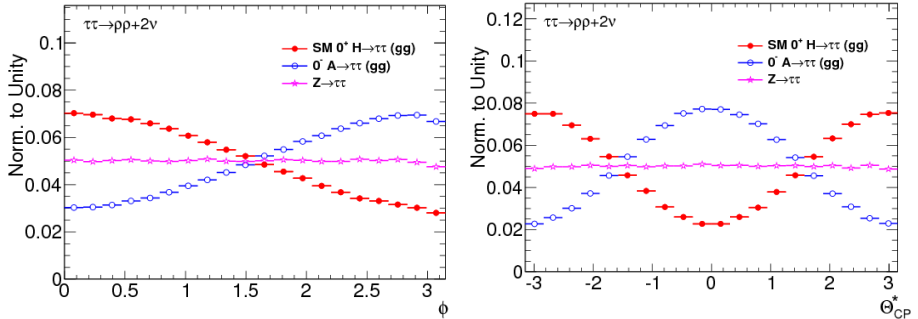


Рис. 5 — Распределения по угловым кинематическим переменным  $\phi$  (слева) и  $\Theta_{CP}^*$  (справа) для процесса  $pp \rightarrow H \rightarrow \tau\tau \rightarrow 2\rho 2\nu_\tau$  [3].

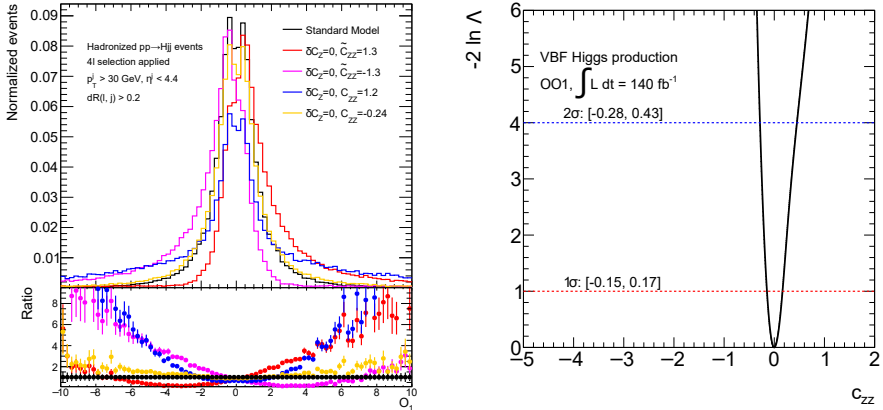


Рис. 6 — Распределение по оптимальной наблюдаемой  $OO_1$  для процесса  $pp \rightarrow Hjj$  (слева) и результат сканирования функцией правдоподобия распределения по  $OO_1$  в зависимости от величины константы связи  $c_{ZZ}$  (справа).



Также в пятой главе описывается расчётная методика определения CP-природы гипотетического тяжёлого бозона Хиггса спина 0 ( $S_0$ ) массой порядка 1 ТэВ, который распадается преимущественно в пару фотонов.

При этом подробно рассматриваются кинематические особенности процессов с участием подобного резонанса, приводятся вычисления соответствующих спиральных амплитуд и зависимости сечения от разности азимутальных углов адронных струй. Также описываются результаты Монте-Карло симуляции рассматриваемых событий в рамках модели НС. Результаты проведённого исследования показывают, что различия в расчётных распределениях по кинематическим переменным находятся в согласии с предсказаниями, полученными с помощью техники спиральных амплитуд. Разработанная расчётная методика может быть использована для экспериментального определения CP-свойств нового резонанса, если таковой будет обнаружен. Примеры полученных расчётных распределений по кинематическим переменным приведены на рис. 7.

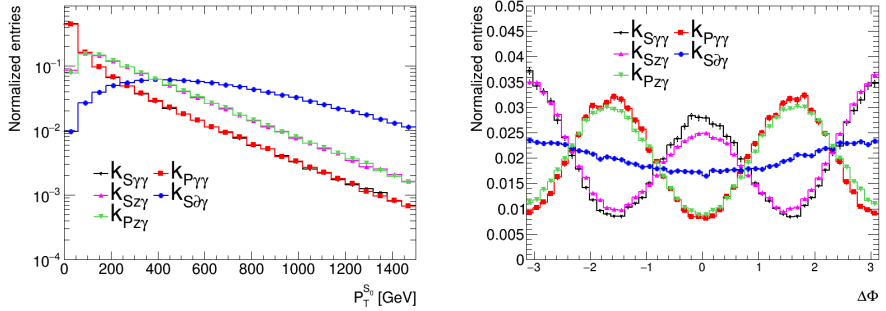


Рис. 7 — Распределение по поперечному импульсу гипотетического тяжёлого бозона Хиггса  $S_0$  (слева) и по разнице азимутальных углов ассоциированных адронных струй в процессе  $pp \rightarrow S_0 jj \rightarrow \gamma\gamma jj$  (справа) [13].

В **шестой главе** приведено описание исследования процессов рождения бозона Хиггса на ускорителях высоких энергий.

В частности, в данной главе описывается исследование, направленное на разработку эффективных методов разделения процессов рождения бозона Хиггса с помощью механизмов ggF и VBF. Эффективность подобного разделения крайне важна для анализов экспериментальных данных коллабораций ATLAS и CMS, направленных на поиск аномальных взаимодействий. В ходе исследования было проведено теоретическое изучение кинематических особенностей рассматриваемых процессов и определены наблюдаемые, чувствительные к механизму рождения бозона Хиггса. Примеры изучаемых распределений приведены на рис. 8.

Кроме того, для проведения эффективного разделения каналов ggF и VBF был разработан программный пакет классификации под названием

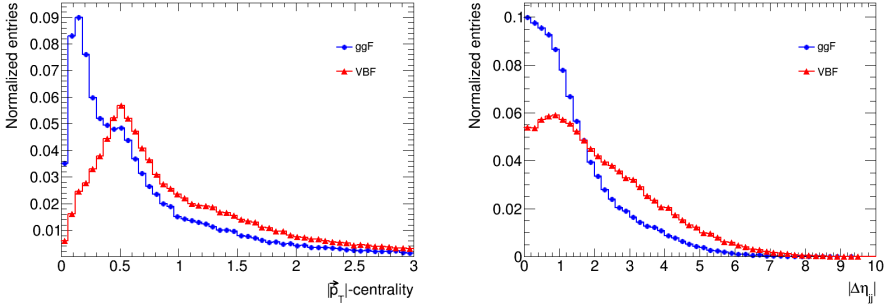


Рис. 8 — Распределение по  $p_T$ -центральности (слева) и абсолютной величине разности псевдобыстрот адронных струй (справа) в процессе  $pp \rightarrow Hjj$  для рождения бозона Хиггса с помощью механизмов ggF (синие маркеры) и VBF (красные маркеры), иллюстрирующие отличия в кинематике рассматриваемых механизмов рождения [8].

FSClassifier, основанный на использовании технологии BDT для глубокой классификации данных. Особенность разработанного пакета в том, что он позволяет осуществлять полную цепочку статистического анализа процесса - начиная с автоматической генерации кинематических переменных и заканчивая построением кривых ошибок полученного классификатора. Сам программный пакет классификации общедоступен в сети Интернет по адресу <https://fsclassifier.hepforge.org/>.

Также в шестой главе оцениваются перспективы поиска четырёхлептонных процессов распада бозона Хиггса на будущем ускорителе HL-LHC. Подробно изучаются три возможных сценария расширения покрытия трековой системы детектора ATLAS - так называемые сценарии Low, Middle и Reference. Для каждого из этих сценариев строятся распределения по кинематическим переменным, чувствительным к механизму рождения бозона Хиггса, а затем с помощью алгоритма, основанного на использовании технологии BDT, в процессе Монте-Карло анализа данных производится классификация событий на основе информации, полученной из заранее смоделированных, тренировочных наборов данных. Для значений интегральной светимости в  $300 \text{ fb}^{-1}$  и  $3000 \text{ fb}^{-1}$  производится оценка числа сигнальных и фоновых событий, вычисляются величины неопределённостей и строятся кривые ошибок классификации. В результате данного исследования было оценено влияние сценариев расширения покрытия трековой системы эксперимента ATLAS на эффективность разделения каналов рождения ggF и VBF для будущего ускорителя HL-LHC. Пример распределения по отклику алгоритма BDT для сценария Reference и кривые ошибок для всех трёх сценариев приведены на рис. 9.

Кроме того, в шестой главе на основе изложенного феноменологического аппарата приводится описание исследований канала распада бозона Хиггса в четыре лептона и результаты комбинации данного канала с

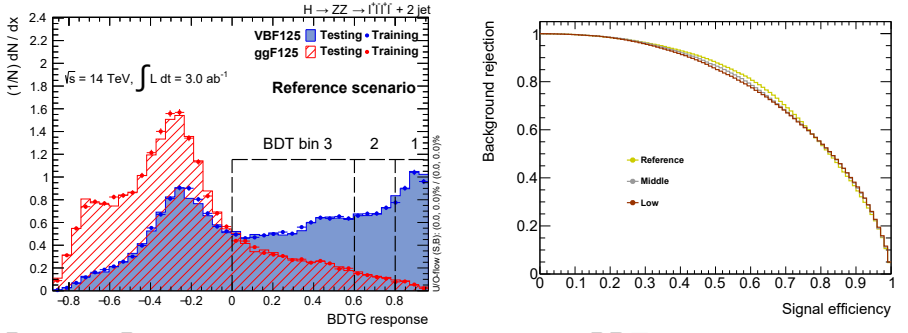


Рис. 9 — Распределение по отклику алгоритма BDT для сценария покрытия трековой системы “Reference (слева) и кривые ошибок для всех трёх рассматриваемых сценариев (справа) [6].

каналом распада бозона Хиггса в пару фотонов. В ходе исследования, проведённого в рамках коллаборации ATLAS, было проведено измерение дифференциальных сечений как функций кинематических переменных и были установлены пределы на величины констант связи в рамках  $\kappa$ -модели [10]. Также были вычислены отличия экспериментально измеренных величин сечений от сечений в рамках СМ.

В **заклЮчении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Был проведён Монте-Карло анализ, основанный на использовании асимметрий специальных угловых наблюдаемых, и впервые получены ожидаемые пределы на величину угла смешивания СР-чётных и СР-нечётных физических состояний бозона Хиггса, а также на величину сечения для процесса  $gg \rightarrow H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$  уровне интегральных светимостей в  $300 \text{ fb}^{-1}$  и  $3000 \text{ fb}^{-1}$ .
2. Была разработана расчётная методика определения СР-чётности бозона Хиггса с помощью специальных угловых переменных в процессах  $gg \rightarrow H \rightarrow \tau^+\tau^- \rightarrow \pi^+\pi^-\nu_\tau\bar{\nu}_\tau$  и  $gg \rightarrow H \rightarrow \tau^+\tau^- \rightarrow \rho^+\rho^-\nu_\tau\bar{\nu}_\tau$  при учёте адронизации конечного состояния и упрощённого учёта детекторных эффектов установки ATLAS.
3. Были впервые получены соотношения, связывающие между собой параметры моделей НС, SMEFT (Варшавский и Хиггс базисы), а также модели, основанной на использовании эффективной амплитуды  $HVV$ .
4. Была разработана методика поиска возможных эффектов СР-нарушения в хиггсовском секторе с использованием оптимальных наблюдаемых, основанных на матричных элементах рассматриваемых процессов, и впервые получены ожидаемые пределы на параметры модели SMEFT на уровне интегральной светимости в  $140 \text{ fb}^{-1}$ .

5. Была разработана расчётная методика определения CP-природы гипотетического тяжёлого бозона Хиггса спина 0 ( $S_0$ ), распадающегося преимущественно в пару фотонов и оценён масштаб возможных эффектов CP-нарушения. Также для процесса  $qq' \rightarrow qq'S_0$  были впервые вычислены спиральные амплитуды и получена аналитическая зависимость сечения от разности азимутальных углов ассоциированных адронных струй.
6. Впервые в рамках коллаборации ATLAS был реализован метод морфинга и продемонстрирована его работоспособность на основе анализа процессов рождения бозона Хиггса и его распада в четыре лептона. Кроме того, был разработан и реализован метод расширенного морфинга, а также проведена его апробация с помощью Монте-Карло наборов данных. Данные методы, в частности, впоследствии неоднократно использовались для получения гладких зависимостей функций правдоподобия от параметров рассматриваемых моделей, что способствовало получению более точных значений ожидаемых пределов на параметры моделей.
7. Для выполнения задачи разделения процессов рождения бозона Хиггса с помощью механизмов ggF и VBF был создан программный пакет глубокой классификации процессов, имеющих различную топологию, но одинаковое конечное состояние. Программный пакет классификации доступен в сети Интернет по адресу <https://fsclassifier.hepforge.org/>.

## Публикации автора по теме диссертации

1. *Belyaev, N. et al.* Angular asymmetries as a probe for anomalous contributions to HZZ vertex at the LHC. Phys. Rev. D. Vol. 91, no. 11. 2015. P. 115014.
2. *Kaluza, A., Belyaev, N. et al.* A morphing technique for signal modelling in a multidimensional space of coupling parameters. ATLAS Public Note, 2015. ATL-COM-PHYS-2015-457, ATL-PHYS-PUB-2015-047. URL: <https://cds.cern.ch/record/2018491>.
3. *Belyaev, N. L. and Konoplich, R. V.* Study of the CP-violating effects with  $gg \rightarrow H \rightarrow \tau^+\tau^-$  process. Phys. Atom. Nucl. Vol. 78, no. 13. 2015. P. 1489—1492.
4. *Belyaev, N. and Reid, T.* Limits on Higgs boson couplings in Effective field theory. J. Phys. Conf. Ser. Vol. 675, no. 2. 2016. P. 022023.
5. *Belyaev, N., de Florian, D. et al.* Handbook of LHC Higgs Cross Sections: 4. Deciphering the Nature of the Higgs Sector. CERN Monography, 2016.
6. *Belyaev, N. et al.* Prospective results for vector-boson fusion-mediated Higgs-boson searches in the four lepton final state at the High Luminosity Large Hadron Collider. ATLAS Public Note, 2016. ATL-PHYS-PUB-2016-008, ATL-COM-PHYS-2015-1507. URL: <https://cds.cern.ch/record/2145377>.
7. *Abidi, S. H., Belyaev, N. et al.* Couplings and simplified cross section studies in the  $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow l^+l^-l^+l^-$  channel. ATLAS Internal Note, 2016. ATL-COM-PHYS-2016-1604. URL: <https://cds.cern.ch/record/2231596>.
8. *Belyaev, N., Konoplich, R. and Prokofiev, K.* Study of kinematic observables sensitive to the Higgs boson production channel in  $pp \rightarrow Hjj$  process. J. Phys. Conf. Ser. Vol. 934, no. 1. 2017. P. 012030.
9. *Belyaev, N., Konoplich, R. and Prokofiev, K.* CP-sensitive observables of a hypothetical heavy spin-0 particle with the dominant  $\gamma\gamma$  and  $Z\gamma$ -interaction.. J. Phys. Conf. Ser. Vol. 798, no. 1. 2017. P. 012094.
10. *Belyaev, N.* Measurement of cross sections and couplings of the Higgs Boson in bosonic decay channels with the ATLAS detector.. EPJ Web Conf. Vol. 182. 2018. P. 02013.
11. *Aaboud, M., Belyaev, N. et al. [ATLAS Collaboration].* Measurement of the Higgs boson coupling properties in the  $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$  decay channel at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector. JHEP. Vol. 03. 2018. P. 095.

12. *Aaboud, M., Belyaev, N. et al. [ATLAS Collaboration].* Measurement of inclusive and differential cross sections in the  $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$  decay channel in pp collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector. JHEP. Vol. 10. 2017. P. 132.
13. *Belyaev, N., Konoplich, R. and Prokofiev, K. CP Sensitive Observables of a Hypothetical Heavy Spin-0 Particle with the Dominant Photon-Photon Interaction.* Phys. Atom. Nucl. Vol. 81, no. 6. 2018. P. 758—765.

## Список литературы

1. *Higgs, P. W.* Broken Symmetries and the Masses of Gauge Bosons. Phys. Rev. Lett. Vol. 13, issue 16. 1964. P. 508—509.
2. *Nambu, Y.* Quasi-Particles and Gauge Invariance in the Theory of Superconductivity. Phys. Rev. Vol. 117, issue 3. 1960. P. 648—663.
3. *Horváth, D.* Twenty years of searching for the Higgs boson: Exclusion at LEP, discovery at LHC. Mod. Phys. Lett. A. Vol. 29, no. 4. 2014. P. 1430004.
4. *Aad, G. et al. [ATLAS Collaboration].* Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC. Phys. Lett. B. Vol. 716. 2012. P. 1—29.
5. *Chatrchyan, S. et al. [CMS Collaboration].* Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC. Phys. Lett. B. Vol. 716. 2012. P. 30—61.
6. *Beringer, J. et al. [Particle Data Group].* Review of Particle Physics. Phys. Rev. D. Vol. 86, issue 1. 2012. P. 010001. 1528 P.
7. *Aad, G., Chatrchyan, S. et al. [ATLAS and CMS Collaborations].* Measurements of the Higgs boson production and decay rates and constraints on its couplings from a combined ATLAS and CMS analysis of the LHC  $pp$  collision data at  $\sqrt{s} = 7$  and 8 TeV. JHEP. Vol. 08. 2016. P. 045.
8. *Aad, G. et al. [ATLAS Collaboration].* Test of CP Invariance in vector-boson fusion production of the Higgs boson using the Optimal Observable method in the ditau decay channel with the ATLAS detector. Eur. Phys. J. C. Vol. 76, no. 12. 2016. P. 658.
9. *Aad, G. et al. [ATLAS Collaboration].* Search for an additional, heavy Higgs boson in the  $H \rightarrow ZZ$  decay channel at  $\sqrt{s} = 8$  TeV in  $pp$  collision data with the ATLAS detector. Eur. Phys. J. C. Vol. 76, no. 1. 2016. P. 45.
10. *Aad, G. et al. [ATLAS Collaboration].* Observation and measurement of Higgs boson decays to  $WW^*$  with the ATLAS detector. Phys. Rev. D. Vol. 92. 2015. P. 012006.

11. *Aad, G. et al. [ATLAS Collaboration]*. Evidence for the spin-0 nature of the Higgs boson using ATLAS data. *Phys. Lett. B*. Vol. 726. 2013. P. 120—144.
12. *Khachatryan, V. et al. [CMS Collaboration]*. Observation of the diphoton decay of the Higgs boson and measurement of its properties. *Eur. Phys. J. C*. Vol. 74. 2014. P. 3076.
13. *Artoisenet, P. et al.* A framework for Higgs characterisation. *JHEP*. Vol. 11. 2013. P. 043.
14. *Falkowski, A. et al.* Rosetta: an operator basis translator for Standard Model effective field theory. *Eur. Phys. J. C*. Vol. 75. 2015. P. 583.
15. *Baglio, J., Krauss, C.O., Mühlleitner, M. and Walz, K.* Next-to-Leading Order NMSSM Decays with CP-odd Higgs Bosons and Stops. *JHEP*. Vol. 10. 2015. P. 024.

*Беляев Никита Леонидович*

Изучение эффектов CP-нарушения и аномальных взаимодействий в хиггсовском секторе вне рамок Стандартной модели

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Подписано в печать \_\_\_\_\_.\_\_\_\_.\_\_\_\_\_. Заказ № \_\_\_\_\_

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография \_\_\_\_\_