



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ

имени А. И. Алиханова

На правах рукописи

Жемчугов Евгений Владимирович

**Псевдоголдстоуновские и хиггсовские бозоны
в Стандартной модели и её расширениях**

Специальность 01.04.02 — теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

2017

Работа выполнена в ФГБУ «ГНЦ РФ — Институт теоретической и экспериментальной физики» НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор,
член-корреспондент Российской академии наук

Высоцкий Михаил Иосифович,

заведующий лабораторией теории элементарных частиц
НИЦ «Курчатовский институт» — ИТЭФ, г. Москва

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор

Лиходед Анатолий Константинович,

главный научный сотрудник отдела теоретической физики
НИЦ «Курчатовский институт» — ИФВЭ, г. Протвино

доктор физико-математических наук

Теряев Олег Валерианович,

начальник сектора Лаборатории теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова
Объединённого института ядерных исследований

Ведущая организация

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобел-
цына Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова.

Защита диссертации состоится 6 июня 2017 года в 11:00 на заседании

Диссертационного совета Д 201.002.01 в конференц-зале НИЦ «Курчатовский
институт» — ИТЭФ, 117218, г. Москва, ул. Большая Черёмушкинская, д. 25.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института теоретической
и экспериментальной физики и на сайте института по адресу:

<http://www.itep.ru/science/dis>

Автореферат разослан 5 мая 2017 г.

Учёный секретарь диссертационного совета,
к.ф.-м.н.

В. В. Васильев.

1 Общая характеристика работы

Диссертация посвящена хиггсовским бозонам в расширениях Стандартной модели и псевдоголдстоуновским бозонам в низкоэнергетическом приближении Стандартной модели (киральная теория возмущений). В ней рассматриваются три расширения скалярного сектора Стандартной модели, в которых возможно усиление двойного рождения бозонов Хиггса массой 125 ГэВ за счёт распада второго, тяжёлого бозона Хиггса на два лёгких. Рассматривается методика анализа сигнала новой физики на примере двухфотонного резонанса с инвариантной массой 750 ГэВ, наблюдавшегося в данных коллабораций ATLAS и CMS в конце 2015 года.

Исследование псевдоголдстоуновских бозонов заключается в анализе возможности наблюдения киральной аномалии в реакции фоторождения пионов каонами в электромагнитном поле ядра меди. В результате исследования делается теоретическое предсказание результатов эксперимента, проводящегося в настоящее время в ИФВЭ.

1.1 Актуальность темы исследования

В 2010 году начал свою работу Большой адронный коллайдер (БАК), самый высокоэнергетичный ускоритель из построенных до сих пор. Первый период сбора данных с коллайдера, известный как Run 1, длился с 2010 года по начало 2013 года, с перерывом в зимние периоды. С 2010 года до весны 2012 года

энергия столкновения протонов составляла 7 ТэВ, что почти в 4 раза больше, чем предыдущий рекорд, принадлежащий коллайдеру Tevatron. В 2012 году энергия столкновения была увеличена до 8 ТэВ. В 2013–2014 годах на БАК проводились работы по увеличению светимости и рабочей энергии, и в 2015 году начался второй период сбора данных (Run 2) на энергии 13 ТэВ. Run 2 должен продлиться до 2018 года, после чего опять будет два года технических работ и три года работы на энергии 14 ТэВ. В более отдалённом будущем, не раньше 2025 года, планируется значительное увеличение светимости, что позволит исследовать менее вероятные физические процессы.

Большой адронный коллайдер — это новый, уникальный инструмент, позволяющий проводить лабораторные физические исследования на недоступном ранее уровне энергии.¹ Двумя из основных его задач является поиск бозона Хиггса Стандартной модели и исследование физики в области энергий около 1 ТэВ. Первая задача была выполнена блестяще, когда коллаборации ATLAS и CMS объявили об открытии новой скалярной частицы в 2012 году. Вторая задача требует большей энергии, и работа над ней идёт сейчас. В 2016 году коллаборации ATLAS и CMS собрали по 40 фб⁻¹ интегральной светимости. В настоящее время идёт обработка этих экспериментальных данных, и можно надеяться услышать первые результаты на летних конференциях.

Открытие бозона Хиггса привело к появлению целого нового раздела физики элементарных частиц — физики бозона Хиггса. В рамках этого раздела изучаются свойства бозона Хиггса Стандартной модели, а также свойства и возможные феноменологические проявления других хиггсоподобных бозонов, которые существуют в расширениях скалярного сектора Стандартной модели. Экспериментальные данные Run 1 не обнаруживают отличий открытого бозона от бозона Хиггса Стандартной модели, однако их точность находится на уровне 25%, что оставляет довольно большой простор для новой физики. В связи с этим исследования скалярного сектора приобретают сейчас особую актуальность, так как экспериментальные данные Run 2 позволят поставить новые, более существенные ограничения, а, может быть, даже откроют новые фундаментальные частицы.

¹До постройки БАК такие энергии достигались только в астрономических наблюдениях.

Хиггсоподобные бозоны регистрируются на Большом адронном коллайдере по продуктам их распада. Открытый бозон Хиггса был найден по его распадам на два фотона и два векторных бозона (один виртуальный). Его поиск в распадах на фермионы, прежде всего τ -лептоны и b -кварки, сопряжён с техническими трудностями, но эксперименты всё же видят сигнал, хоть и с невысоким уровнем достоверности. Бозон Хиггса уникален тем, что он может взаимодействовать сам с собой, через тройную или четырёхкратную вершину самодействия. В случае тройной вершины на эксперименте должно наблюдаться одновременное рождение двух бозонов Хиггса. Однако, основной процесс двойного рождения бозона Хиггса Стандартной модели на БАК (слияние глюонов) может проходить двумя способами, и они деструктивно интерферируют между собой. Поэтому, во-первых, сечение этого процесса очень мало, и его не получится зарегистрировать на Run 2, и, во-вторых, этот процесс оказывается чувствителен к вкладу новой физики, который может проявляться в виде двойного рождения открытых бозонов Хиггса.

Такой вклад является одним из феноменологических проявлений Стандартной модели с дополнительными скалярными частицами. Эти частицы смешиваются, образуя два (или более) массивных состояния, одно из которых должно выглядеть как бозон, который был открыт на БАК, в частности, иметь массу 125 ГэВ и свойства, удовлетворяющие экспериментальным измерениям. Тогда, в случае когда масса второго бозона приблизительно в два или более раз больше 125 ГэВ, второй бозон может распадаться на два первых. Как следует из результатов диссертационного исследования, в этом случае сечение двойного рождения бозонов Хиггса может быть на уровне 1 пб. Кроме того, в его зависимости от инвариантной массы продуктов реакции будет пик с центром в массе тяжёлого бозона, в то время как в Стандартной модели преобладает нерезонансное рождение. Подобный сигнал может быть зарегистрирован в Run 2.

Тяжёлые бозоны Хиггса будут взаимодействовать и с другими частицами Стандартной модели, хотя бы за счёт смешивания. В диссертационном исследовании обсуждаются возможные сигналы от их распадов на векторные бозоны и рассматриваются ограничения из соответствующих эксперимен-

тальных поисков. Одним из результатов исследования является указание на то, что существуют модели, в которых тяжёлый бозон распадается почти всегда на два лёгких (98%). В таком случае его не удастся обнаружить на Run 2 в распадах на векторные бозоны, и сигнал проявится только в виде двойного рождения бозонов Хиггса.

Сейчас в физике элементарных частиц сложилась ситуация, нехарактерная для нескольких последних десятилетий, когда теория больше не может чётко указывать направление для экспериментальных исследований. Открытие бозона Хиггса «завершило» открытие Стандартной модели: теперь нет ни неоткрытых предсказанных частиц, ни открытых непредсказанных. Тем не менее, есть много косвенных указаний на неполноту Стандартной модели — на то, что есть какая-то физика за её пределами и она, вероятно, должна проявляться в виде новых элементарных частиц. В связи с этим было разработано много новых моделей, устраняющих «некрасивые» особенности Стандартной модели вроде тонкой настройки или, например, объясняющие барионную асимметрию через электрослабый фазовый переход. Однако, ни одна из этих моделей не занимает такой же статус, какой приобрела теория Глэшоу-Вайнберга-Салама вскоре после её формулирования в 1967 году. Чтобы как-то выделить одну или несколько моделей, нужны новые экспериментальные данные, и самые подходящие данные — это открытие новых частиц на ускорителях. Двухфотонный резонанс при энергии 750 ГэВ, проявившийся в экспериментальных данных Run 2 в конце 2015 года, выглядел как раз как ожидаемый сигнал новой физики, к тому же при самой ожидаемой энергии около 1 ТэВ. Поэтому он привлёк много внимания, несмотря на относительно невысокую достоверность этого наблюдения (меньше пяти стандартных отклонений, текущего стандарта ЦЕРН для объявления об открытии).

Хоть двухфотонный резонанс и оказался всего лишь флуктуацией, он послужил хорошим полигоном для проверки различных теорий на их выживаемость в свете сигналов новой физики. Теоретики со всего мира брали свои любимые модели и смотрели, при каких параметрах они позволяют объяснить резонанс и при этом остаться в пределах других экспериментальных

ограничений. Нельзя сказать, что эти работы потеряли актуальность после «закрытия» резонанса, так как, во-первых, подобный сигнал по-прежнему остаётся ожидаемым и может проявиться в новых данных Run 2, и, во-вторых, эти работы представляют собой богатую библиотеку актуальных моделей, новых идей и смежных направлений поиска новой физики. В этом же смысле остаётся актуальным и исследование двухфотонного резонанса в представленной диссертационной работе, тем более, что его результаты уже используются в других работах.

При всех успехах физики элементарных частиц в области высоких энергий, ещё остаются нерешённые задачи в области не столь высоких энергий, где господствует киральная теория возмущений. Сейчас в Институте Физики Высоких Энергий проводится эксперимент, в котором заряженные каоны рождают пионы в электромагнитном поле ядра. При этом, в реакцию с рождением нейтрального пиона вносит вклад киральная аномалия, а в реакции с рождением заряженного пиона её вклад сокращается. Таким образом, можно экспериментально наблюдать киральную аномалию в виде разницы в числе событий двух одновременно протекающих реакций вблизи порога. Экспериментаторы обратились к автору диссертационного исследования с просьбой сделать теоретическое предсказание для результатов эксперимента, что и было выполнено.

1.2 Цели и задачи исследования

Целью представленного исследования является изучение феноменологических проявлений хиггсовских и псевдоголдстоуновских бозонов. В работе рассматриваются следующие вопросы:

- Возможные проявления новых скалярных частиц на Большом адронном коллайдере в Стандартной модели с расширенным скалярным сектором.
- Возможность регистрации двойного рождения экспериментально обнаруженного бозона Хиггса.
- Варианты интерпретации возможного двухфотонного сигнала от новой скалярной частицы.

- Проявления киральной аномалии в экспериментальных данных.

1.3 Научная новизна

- Сделан независимый актуальный фит Стандартной модели по электро-слабым наблюдаемым.
- Впервые вычислены сечения двойного рождения лёгкого бозона Хиггса за счёт распада тяжёлого бозона Хиггса на два лёгких с учётом экспериментально известной массы лёгкого бозона 125 ГэВ в Стандартной модели с дополнительными синглетом, триплетом или двумя триплетами (модели Georgi-Machacek).
- Впервые получены ограничения из электрослабых наблюдаемых для модели с синглетом.
- Впервые показано, что в модели Georgi-Machacek есть область параметров, в которой доминирует распад тяжёлого бозона Хиггса на два лёгких.
- Впервые представлена модель, позволяющая описать резонанс в двухфотонном сигнале с инвариантной массой 750 ГэВ через распад скалярной частицы посредством векторных фермионов.
- Впервые корректно вычислены сечения реакций $K^+N \rightarrow K^+\pi^0N$ и $K^+N \rightarrow K^0\pi^+N$, где N — ядро, вблизи порога для ультрарелятивистских K -мезонов с учётом вклада киральной аномалии.

1.4 Положения, выносимые на защиту диссертации

В ходе исследования автором были получены следующие результаты:

- Вычислен фит Стандартной модели по электрослабым наблюдаемым с помощью программы LEPTOP с учётом теперь известной массы бозона Хиггса $m_h = 125.14$ ГэВ.
- В Стандартной модели с дополнительным скалярным синглетом:

- С помощью программы LEPTOP вычислен фит по электрослабым наблюдаемым и результатам измерений интенсивностей сигналов бозона Хиггса на Большом адронном коллайдере. Из фита получены ограничения на параметры модели.
 - Вычислено сечение двойного рождения бозона Хиггса массой 125 ГэВ в зависимости от параметров модели. Получено, что значение сечения может достигать 0.5 пб в области разрешённых параметров.
 - Показано, что поиск второго бозона Хиггса можно проводить теми же методами, что были использованы при поиске бозона Хиггса Стандартной модели. Экспериментальные данные по каналу $pp \rightarrow H \rightarrow ZZ$ в настоящее время становятся чувствительны к сигналу в области параметров, разрешённых электрослабыми наблюдаемыми.
- В Стандартной модели с дополнительным скалярным триплетом:
 - Показано, что в области разрешённых параметров наибольшее значение сечения двойного рождения бозона Хиггса массой 125 ГэВ будет достигаться при массе второго бозона около 300 ГэВ и вакуумном среднем триплете около 5 ГэВ.
 - Вычислены сечения рождения второго бозона Хиггса при указанных выше параметрах путём слияния глюонов, W - или Z -бозонов, ассоциативного рождения с W -, Z -бозонами или с t -кварками. Показано, что, как и в случае бозона Хиггса Стандартной модели, доминирует рождение путём слияния глюонов, но, в отличие от бозона Хиггса Стандартной модели, рождение путём слияния W -бозонов сильно подавлено.
 - Получено, что в области разрешённых параметров максимальное значение сечения двойного рождения бозона Хиггса массой 125 ГэВ путём рождения и распада второго бозона Хиггса составляет 20 фб.
 - В Стандартной модели с двумя дополнительными скалярными трипле-

тами (модель Georgi-Machacek):

- Показано, что в области разрешённых параметров сечение двойного рождения бозона Хиггса массой 125 ГэВ может достигать 1.5 пб.
- Показано, что есть область разрешённых параметров, внутри которой относительная вероятность распада второго бозона Хиггса на два лёгких достигает 98%. В этом случае второй бозон Хиггса не может быть обнаружен на Большом адронном коллайдере по его распадам на два векторных бозона.
- Показано, как можно интерпретировать сигнал новой физики на примере двухфотонного резонанса с энергией 750 ГэВ.
- Сделано теоретическое предсказание для проводящегося в настоящее время эксперимента в ИФВЭ по фоторождению пионов каонами в электромагнитном поле ядра. Показано, как будет проявляться киральная аномалия в условиях этого эксперимента.

1.5 Апробация работы и публикации

Результаты исследования опубликованы в 5 статьях в ведущих российских и иностранных рецензируемых журналах и обсуждены на следующих конференциях:

1. Е. В. Жемчугов, **Двойное рождение бозона Хиггса в Стандартной модели с дополнительными скалярами.** // Молодёжная конференция по физике высоких энергий, квантовой теории поля, математической физике и космологии, посвящённая 70-летию ИТЭФ. 22–23 апреля 2015 г., ИТЭФ, Москва, Россия.
2. E. V. Zhemchugov, **Double Higgs production in the Standard model with extra scalar particles.** // 27th Rencontres de Blois: Particle Physics and Cosmology. 31 мая–5 июня 2015 г., Блуа, Франция.

3. E. V. Zhemchugov, **Double Higgs production at LHC in the Standard model with an isosinglet.** // The XXIII International Workshop «High Energy Physics and Quantum Field Theory». 25 июня–1 июля 2015 г., Самара, Россия.
4. E. V. Zhemchugov, **Double Higgs production in the Standard model with extended scalar sector.** // International conference on particle physics and astrophysics. 5–10 октября 2015 г., Москва, Россия.
5. E. V. Zhemchugov, **Looking for chiral anomaly in $K\gamma \rightarrow K\pi$ reactions.** // 44th ITEP Winter School (19th International Moscow School of Physics). 16–23 февраля 2016 г., Серпухов, Россия.
6. E. V. Zhemchugov, **Looking for chiral anomaly in pion photoproduction on kaons.** // International session-conference of the Section of Nuclear Physics of PSD RAS. 12–15 апреля 2016 г., Дубна, Россия.
7. E. V. Zhemchugov, **Looking for chiral anomaly in $K\gamma \rightarrow K\pi$ reactions.** // 14th International Workshop on Meson Production, Properties and Interaction. 2–7 июня 2016, Краков, Польша.
8. E. V. Zhemchugov, **Search of chiral anomaly in kaon-photon reactions.** // Quantum Field Theory at the Limits: from Strong Fields to Heavy Quarks. 18–30 июля 2016, Дубна, Россия.

1.6 Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения (глава 1), четырёх глав основного текста (главы 2–4) и заключения (глава 5). Общий объём диссертации составляет 92 страницы, включая 30 рисунков и 10 таблиц. Список литературы содержит 194 ссылки.

2 Основное содержание работы

2.1 Введение

Введение работы (первая глава) поделено на две части: хиггсовские и псевдоскалярные бозоны. В первой части приведено описание скалярного и электрослабого секторов Стандартной модели. Представлены механизмы рождения бозонов Хиггса на Большом адронном коллайдере, рассмотрены каналы распада бозона Хиггса и их использование для регистрации бозонов Хиггса на БАК. Там же описан механизм интерференции между резонансным и нерезонансным процессами двойного рождения бозонов Хиггса и приведены сечения двойного рождения на БАК с энергией столкновения протонов 8 и 14 ТэВ. Во второй части введения рассматривается киральная аномалия и её проявления на эксперименте: в распаде $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ и в процессе $\pi^-\gamma \rightarrow \pi^-\pi^0$.

2.2 Стандартная модель с дополнительным синглетом

Во второй главе рассматривается Стандартная модель с дополнительной скалярной частицей, инвариантной относительно преобразований группы симметрий Стандартной модели. В этой модели есть две нейтральные скалярные частицы, которые, смешиваясь, образуют два массивных состояния. Одно из них ассоциируется с бозоном Хиггса h , открытым на Большом адронном коллайдере в 2012 году. Поскольку цель работы — исследовать возможные усиления двойного рождения этого бозона в результате распада второго массивного состояния, H , был исследован интервал масс второго бозона Хиггса m_H от 150 до 1000 ГэВ. Для этого процесса оптимальной является масса второго бозона около 300 ГэВ, так как, с одной стороны, ширина распада $H \rightarrow hh$ растёт с m_H , а с другой — при $m_H > 2m_t = 346$ ГэВ открывается канал распада на два t -кварка, что уменьшает относительную вероятность распада $H \rightarrow hh$.

В скалярном секторе рассмотренной модели есть шесть параметров. Два из них фиксируются требованием о нахождении Вселенной в минимуме потенциала, ещё два получаются из экспериментальных данных: из распада мюона

(постоянная Ферми) и из измерений массы одного из бозонов Хиггса. Два параметра остаются независимыми, и в качестве них были выбраны синус угла смешивания скалярных полей $\sin \alpha$ и масса второго бозона Хиггса m_H .

Для этой модели было рассмотрено три вида экспериментальных ограничений на параметры: измерения интенсивностей сигналов известного бозона Хиггса на Большом адронном коллайдере, поиск скалярных частиц там же и измерения электрослабых наблюдаемых. Расчёт фита модели по электрослабым наблюдаемым проводился с помощью программы LEPTOP. При этом сначала был вычислен фит Стандартной модели, так как предыдущие фиты Стандартной модели с помощью программы LEPTOP вычислялись когда масса бозона Хиггса ещё была неизвестна. В результате получился фит с отношением χ^2 к количеству степени свободы равным 19.6/13. Этот фит является отдельным результатом исследования.

Далее был вычислен фит для модели с синглетом. Для этого в программу LEPTOP был внесён ряд изменений, учитывающих наличие второго бозона Хиггса в поляризационных операторах и в вершинах. В данные фита были добавлены комбинированные оценки интенсивности сигнала бозона Хиггса, отдельно для коллабораций ATLAS и CMS. В результате были получены ограничения на параметры модели, из которых следует, что $\sin \alpha \lesssim 0.35$ для интервала $150 \text{ ГэВ} < m_H < 1000 \text{ ГэВ}$ с доверительной вероятностью 95%. При этом центр фита оказался при минимальных допусках значениях параметров: $m_H = 150 \text{ ГэВ}$ и отсутствии смешивания. Экспериментальные данные отдадут предпочтение лёгкому второму бозону Хиггса.

С точки зрения прямого поиска тяжёлого бозона Хиггса, наиболее перспективной в данной модели, как и при поиске тяжёлого бозона Хиггса Стандартной модели, является «золотая мода» — канал распада $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\ell$. Интенсивность сигнала в этом канале оказывается не зависящей от энергии столкновения протонов. Экспериментальные ограничения БАК для энергии 7 и 8 ТэВ находятся на том же уровне, что и ограничения из фита по электрослабым наблюдаемым и измерениям интенсивностей сигнала лёгкого бозона Хиггса.

Для масс второго бозона Хиггса от 150 до 1000 ГэВ было вычислено

сечение двойного рождения лёгкого бозона Хиггса в процессе $pp \rightarrow H \rightarrow hh$ с энергией столкновения протонов 14 ТэВ. Оказалось, что в области разрешённых параметров его максимальное значение составляет ≈ 0.5 пб для $m_H \approx 300$ ГэВ и $\sin \alpha \approx 0.4$, что на порядок больше, чем в Стандартной модели. Столь большое сечение может быть зарегистрировано в Run 2.

2.3 Стандартная модель с дополнительным триплетом

В третьей главе рассматривается Стандартная модель с шестью дополнительными скалярными частицами, которые преобразуются электрослабой группой симметрий Стандартной модели как комплексный триплет. В этой модели есть две нейтральные скалярные и одна нейтральная псевдоскалярная частица. Нейтральные скалярные частицы смешиваются и, как и в модели с дополнительным синглетом, образуют два массивных состояния, одно из которых ассоциируется с бозоном Хиггса, открытым на Большом адронном коллайдере.

В отличие от синглета, триплет взаимодействует с калибровочными бозонами, и его вакуумное среднее вносит неодинаковый вклад в их массу. Другими словами, вакуумное среднее триплета нарушает охранную симметрию Стандартной модели. На отношение масс калибровочных бозонов установлено сильное экспериментальное ограничение из электрослабых наблюдаемых, и в моделях с нарушением охранной симметрии оно обычно оказывается доминирующим. Оно же является доминирующим и в модели с триплетом.

В скалярном секторе рассмотренной модели с триплетом есть шесть параметров, так же, как и в скалярном секторе модели с синглетом. Четыре из них фиксируется тем же способом (минимум потенциала, постоянная Ферми и масса одного бозона Хиггса). Нарушение охранной симметрии на уровне трёх стандартных отклонений фиксирует ещё один параметр (вакуумное среднее триплета). В результате остаётся один независимый параметр — масса второго бозона m_H , который был выбран равным 300 ГэВ, чтобы максимизировать сечение двойного рождения лёгкого бозона Хиггса. Из-за охранной симметрии, угол смешивания скалярных частиц в этой модели

оказывается малым.

Интересной особенностью модели с триплетом оказалось сильное подавление взаимодействия тяжёлого бозона Хиггса с W -бозонами.

Взаимодействие триплета с калибровочными бозонами усложняет вычисление сечения рождения тяжёлого бозона Хиггса H путём слияния векторных бозонов по сравнению с моделью с синглетом. Для его вычисления была использована программа HAWK. Вычисление было проведено в два этапа, первый из которых включал в себя воспроизведение вычислений Стандартной модели. В итоге были получены сечения рождения тяжёлого бозона Хиггса путём слияния отдельно W - и Z -бозонов (без учёта электромагнитных поправок). Сечение рождения путём слияния W -бозонов оказалось подавлено. Однако сечение рождения путём слияния глюонов доминирует над остальными процессами, как и в Стандартной модели.

В результате было получено, что сечение двойного рождения лёгких бозонов Хиггса h в процессе $pp \rightarrow H \rightarrow hh$ с энергией столкновения 14 ТэВ и при $m_H = 300$ ГэВ составляет 20 фб. Для сравнения, сечение Стандартной модели — 40 фб. Однако, следует иметь в виду, что сечение процесса $pp \rightarrow H \rightarrow hh$ будет иметь резонансный характер, в то время как сечение Стандартной модели распределено по большому интервалу инвариантных масс продуктов реакции.

В той же главе изучается модель с двумя дополнительными триплетами, известная также как модель Georgi-Machacek. Вторым триплетом — вещественный, поэтому всего в теории есть 13 скалярных частиц (четыре из них составляют дублет Стандартной модели). Эти частицы образуют триплет голдстоуновских бозонов и пятиплет, триплет и два синглета массивных состояний. Один из синглетов ассоциируется с открытым бозоном Хиггса и исследуется возможность усиления его двойного рождения в результате распада второго синглета.

В работе модель Georgi-Machacek рассматривается как расширение модели с триплетом, поэтому используется упрощённая версия потенциала с теми же шестью параметрами.

Ключевой особенностью модели Georgi-Machacek является то, что, несмот-

ря на взаимодействие с калибровочными бозонами, триплеты не нарушают охранную симметрию. Происходит это в том случае, когда триплеты имеют одинаковое вакуумное среднее. Ограничения на параметры модели Georgi-Machasek ставятся из результатов измерений интенсивностей сигналов бозона Хиггса на Большом адронном коллайдере в различных каналах. Эти ограничения позволяют увеличить вакуумное среднее триплетов на порядок по сравнению с вакуумным средним триплета в модели с одним триплетом. В результате сечение двойного рождения лёгких бозонов Хиггса вырастает на два порядка.

Интересной особенностью модели Georgi-Machasek является то, что в ней существует область параметров, в которой распад второго бозона Хиггса на два лёгких доминирует над остальными каналами распада. Так, для минималистичного потенциала с шестью параметрами, массы второго бозона Хиггса равной 300 ГэВ, и вакуумного среднего триплетов равного 50 ГэВ,² относительная вероятность распада $H \rightarrow hh$ составляет 98%. Сечение двойного рождения h при тех параметрах равно 1.4 пб.

2.4 Двухфотонный резонанс как проявление новой физики

В третьей главе приведён анализ возможного сигнала новой физики на примере двухфотонного резонанса, существовавшего в экспериментальных данных Run-2 коллабораций ATLAS и CMS 2015 года (впоследствии он оказался статистической флуктуацией). Резонанс рассматривается как результат распада скалярной частицы массой 750 ГэВ в Стандартной модели с дополнительным синглетом и дираковскими («векторными») фермионами. В отличие от модели, рассмотренной во второй главе, не предполагается, что синглет смешивается с полем Хиггса Стандартной модели, но такая возможность не исключается. Изучается два варианта модели: в одной новые фермионы участвуют в сильных взаимодействиях, а в другой — не участвуют.

Если новые фермионы участвуют в сильных взаимодействиях, то рожде-

²В большинстве работ, посвящённых Georgi-Machasek, вакуумное среднее триплета определено как величина, в $\sqrt{2}$ раз меньшая вакуумного среднего триплета в этой работе.

ние синглета происходит преимущественно в результате слияния глюонов, аналогично доминирующему механизму рождения бозона Хиггса Стандартной модели. В работе были вычислены сечение рождения синглета, его ширина и вероятность распада на два фотона в зависимости от параметров модели. Сечение рождения было вычислено численно, путём интегрирования партонных распределений MMHT2014 с помощью библиотеки партонных распределений LHAPDF6. Остальные величины вычислены аналитически.

В этой модели есть следующие свободные параметры: количество новых фермионов, их массы и константы их связи с синглетом. Массы и константы предполагались одинаковыми для всех фермионов (расширение анализа на фермионы с разными параметрами громоздко, но тривиально). Оказалось, что экспериментальные данные можно описать в модели с шестью фермионами с массами 750 ГэВ и константой связи 1, но можно и в модели с одним фермионом массой 400 ГэВ и константой связи 2.5. Последние параметры лежат на границе возможного, так как если новые фермионы будут легче, то синглет будет распадаться на них, и он будет по-другому проявляться в данных ATLAS и CMS, а если константа связи будет больше, то перестанет работать теория возмущений. Модель же с шестью фермионами может иметь красивую реализацию в виде «зеркального изображения» Стандартной модели на уровне энергии 1 ТэВ с тремя поколениями векторных кварков и лептонов.

Для модели с одним фермионом были исследованы ограничения из других экспериментальных данных Большого адронного коллайдера. Если синглет смешивается с дублетом Хиггса как в модели, рассмотренной в главе 2, то в его распадах будут доминировать векторные бозоны, что приведёт к уменьшению произведения сечения рождения синглета на вероятность его распада на два фотона ниже наблюдаемого значения. Отсюда следует, что угол смешивания не может превышать $\approx 1/150$. В таком случае удовлетворяются также и ограничения из поиска новых скалярных частиц в их каналах распада на ZZ и hh .

Возможно смешивание новых фермионов с фермионами Стандартной модели, что делает их нестабильными. Экспериментальные данные по поиску

распадов $T \rightarrow Wb$, $T \rightarrow Zt$ и $T \rightarrow ht$, где T — новый фермион, исключают векторные кварки с массой меньше 700 ГэВ. Однако, этого ограничения можно избежать, если предположить, что смешивание T с t мало и доминирует смешивание с кварками первых двух поколений.

Распад синглета на два глюона оказывается скрыт фоном из двух адронных струй, получающихся при развале протонов. Экспериментальное ограничение на два порядка выше сечения, получающегося в модели.

Также для этой модели вычислено сечение рождения синглета на электрон-позитронном коллайдере SLIC, которое оказалось равным 0.46 фб.

В модели с бесцветными фермионами рождение синглета происходит через такую же петлю, что и его распад. Сечение этого процесса также было получено численно, путём интегрирования партонных распределений. Оказалось, что для воспроизведения экспериментальных данных требуется, чтобы сумма квадратов зарядов лептонов была около 30, то есть, должны быть либо 30 лептонов с единичным зарядом, либо один лептон с зарядом 6, либо несколько мультизарядных лептонов. При этом экспериментальных ограничений для лептонов массой больше 200 ГэВ практически нет.

2.5 Поиск киральной аномалии в реакции фоторождения пионов каонами

В пятой главе делается теоретическое предсказание для эксперимента, в котором заряженные каоны рождают пионы в электромагнитном поле ядра меди. В результате протекают две реакции с виртуальными фотонами: $K^+\gamma \rightarrow K^+\pi^0$ и $K^+\gamma \rightarrow K^0\pi^+$. Киральная аномалия даёт вклад в первую реакцию, но не во вторую. Во введении к пятой главе поясняется как правильно считать вклад аномалии через петли из регуляторов и показывается, что вклад аномалии во вторую реакцию сокращается, а в первую — оказывается таким же же, что и в реакцию $\pi^-\gamma \rightarrow \pi^-\pi^0$, которая исследовалась экспериментально в ИФВЭ в 1980-х годах.

Далее вычисляются дифференциальные сечения реакций с реальными фотонами с учётом вклада векторных мезонов K^* , ρ , ω , ϕ . При этом необ-

ходимо обеспечить правильное поведение амплитуды реакции: при нулевом переданном импульсе должен оставаться только вклад аномалии. Это является следствием требования аксиальной симметрии, однако оно не выполняется автоматически, так как векторные мезоны вводятся в теорию не аксиально симметричным образом. Поэтому из вкладов векторных мезонов, вычисленных с помощью диаграммной техники Фейнмана, сделано вычитание их значений в нуле. Таким образом сохраняются правильные интерполяционные свойства амплитуды между нулевым переданным импульсом и импульсом на массовой оболочке векторного мезона в пропагаторе (K^*). В этом приведённые вычисления отличаются от проделанных ранее работ на ту же тему, которые, по-видимому, являются ошибочными.

Чтобы численно вычислить сечение, необходимо знать численные значения констант связи векторных мезонов с псевдоскалярными мезонами и с фотонами. Часть из них вычисляются из ширин распадов вида $V \rightarrow P\gamma$ и $V \rightarrow PP$, где V — векторный мезон, а P — псевдоскалярный. Константы, для которых подобные распады невозможны кинематически, определяются из соображений $SU(3)$ -симметрии для октета псевдоскалярных мезонов и нонета векторных. Поскольку из ширины распада можно определить лишь абсолютное значение константы связи, значения констант связи векторного мезона, псевдоскалярного мезона и фотона определены с точностью до общего знака; аналогично для констант связи векторного мезона и двух псевдоскалярных. В выражения для амплитуд рассматриваемых реакций они входят в виде произведения, поэтому амплитуды оказываются определены с точностью до произвольного знака. В результате остаётся неопределённым знак интерференции между вкладом киральной аномалии и вкладом векторных мезонов в реакцию $K^+\gamma \rightarrow K^+\pi^0$.

В эксперименте заряженные каоны взаимодействуют с виртуальными фотонами, порождёнными электромагнитным полем ядер меди. Чтобы вычислить дифференциальные сечения реакций с виртуальными фотонами из сечений реакций с реальными фотонами, используется метод эквивалентных фотонов. В этом методе предполагается, что взаимодействие идёт с ультра-релятивистской частицей (в эксперименте энергия каонов равняется 18 ГэВ).

Тогда в системе отсчёта каона ядро представляется в виде фотонов, распределённых по известному спектру. В работе интеграл по спектру фотонов взят аналитически, в приближении, что плотность заряда в ядре подчиняется распределению Гаусса.

В результате получены дифференциальные зависимости сечений реакций от s , где \sqrt{s} — инвариантная масса пары $K\pi$. Для реакции с аномалией вычислено два сечения: для конструктивной и деструктивной интерференции между вкладом аномалии и вкладом векторных мезонов. Интегрирование сечений в области $s < 0.6 \text{ ГэВ}^2$, даёт для условий эксперимента и интегральной светимости 60 мкб^{-1} приблизительно 10 событий рождения $K^0\pi^+$ и 20 или 70 событий рождения $K^+\pi^0$ в зависимости от знака интерференции. Таким образом, киральная аномалия проявляется в виде увеличения числа событий рождения $K^+\pi^0$ вблизи порога.

2.6 Заключение

В заключении ещё раз перечисляются основные результаты исследования:

- Полученный фит Стандартной модели по электрослабым наблюдаемым с помощью программы LEPTOP с массой бозона Хиггса $m_h = 125 \text{ ГэВ}$ имеет отношение χ^2 к количеству степеней свободы, равное 19.6/13.
- В Стандартной модели с дополнительным синглетом для масс второго бозона Хиггса $m_H \lesssim 400 \text{ ГэВ}$ основное ограничение получается из измерений констант связи скалярного бозона на БАК. Для больших масс лучшее ограничение дают электрослабые наблюдаемые. Оптимальным направлением для поиска второго бозона Хиггса в этой модели, как и для тяжёлого бозона Хиггса Стандартной модели, является поиск резонансов от процесса $pp \rightarrow H \rightarrow ZZ \rightarrow \ell^+\ell^-\ell'^+\ell'^-$. Сечение двойного рождения бозона Хиггса массой 125 ГэВ в этой модели достигает 0.5 пб при $\sin \alpha \approx 0.4$, $m_H \approx 300 \text{ ГэВ}$, где α — угол смешивания скалярных бозонов, m_H — масса второго бозона Хиггса.
- В Стандартной модели с дополнительным триплетом основное ограни-

чение получается из нарушения охранной симметрии. Разрешёнными остаются лишь такие малые углы смешивания, что тяжёлый бозон Хиггса почти не искажает феноменологическую картину Стандартной модели. Поиск в ZZ -канале по-прежнему наиболее перспективный, но обнаружить новый бозон будет сложно из-за малых сечений. В этой модели резонансное сечение двойного рождения открытого бозона Хиггса составляет 20 фб.

- В модели Georgi-Machasek охранный симметрия сохраняется, и новые ограничения тоже следуют из измерений констант связи. В этой модели есть область параметров, в которой доминирует распад тяжёлого бозона Хиггса на два лёгких, поэтому поиск по Z -бозонам может не принести результатов даже в случае реализации в природе этой модели. При этом двойное рождение лёгкого бозона Хиггса составляет 1.5 пб.
- Двухфотонный резонанс на энергии 750 ГэВ может появиться в Стандартной модели с дополнительными синглетом и дираковскими (векторными) фермионами. При этом фермионы могут участвовать, а могут и не участвовать в сильных взаимодействиях. Если фермионы участвуют в сильных взаимодействиях, то, чтобы удовлетворить известные в начале 2016 года экспериментальные данные, достаточно одного фермиона массой 400 ГэВ с константой взаимодействия на границе применимости теории возмущений. Либо можно построить зеркальное изображение Стандартной модели с тремя поколениями кварков и лептонов на уровне 1 ТэВ. Если фермионы не участвуют в сильном взаимодействии, то необходимо, чтобы сумма квадратов их зарядов приблизительно равнялась 30. Изложенную методику можно использовать в случае обнаружения похожего резонанса в будущем.
- В эксперименте по рождению пионов каонами в электромагнитном поле ядра можно увидеть киральную аномалию в виде разницы между вероятностями двух одновременно протекающих реакций — рождения пар $K^+\pi^0$ или $K^0\pi^+$. Вблизи порога амплитуда второй реакции обращается в ноль в соответствии с законом сохранения аксиального тока, в то вре-

мя как в первой реакции остаётся вклад аномалии. При этом имеющиеся экспериментальные данные не позволяют определить знак интерференции между вкладом аномалии и вкладом от обмена векторными мезонами. Поэтому для эксперимента, проводящегося в настоящее время в Институте Физики Высоких Энергий, было сделано предсказание с двумя возможными сечениями реакции $K^+N \rightarrow K^+\pi^0N$. В зависимости от знака интерференции, в эксперименте в области $s < 0.6 \text{ ГэВ}^2$ ожидается в 2 или в 7 раз больше событий для реакции с аномалией, чем для реакции без аномалии.

Публикации по теме диссертации

- [1] S. I. Godunov, M. I. Vysotsky, E. V. Zhemchugov, **Double higgs production at LHC, see-saw type II and Georgi-Machacek model.** // ЖЭТФ 147, 426 (2015); [arXiv:1408.0184](#).
- [2] S. I. Godunov, M. I. Vysotsky, E. V. Zhemchugov, **Suppression of $H \rightarrow VV$ decay channels in the Georgi-Machacek model.** // Phys.Lett. B751, 505 (2015); [arXiv:1505.05039](#).
- [3] S. I. Godunov, A. N. Rozanov, M. I. Vysotsky, E. V. Zhemchugov, **Extending the Higgs sector: an extra singlet.** // Eur.Phys.J. C76, 1 (2016); [arXiv:1503.01618](#).
- [4] S. I. Godunov, A. N. Rozanov, M. I. Vysotsky, E. V. Zhemchugov, **New physics at 1 TeV?** // Письма в ЖЭТФ 103, 635 (2016); [arXiv:1602.02380](#).
- [5] M. I. Vysotsky, E. V. Zhemchugov, **Looking for chiral anomaly in $K\gamma \rightarrow K\pi$ reactions.** // Phys.Rev. D93, 094029 (2016), erratum: Phys. Rev. D94, 019901 (2016); [arXiv:1512.04438](#).