

На правах рукописи

Астапов
Константин Олегович

Феноменология
суперсимметричных моделей со сголдстино
в ускорительных экспериментах

01.04.02 – Теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН).

Научный руководитель:

Демидов Сергей Владимирович к. ф.-м. н. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук, отдел теоретической физики, старший научный сотрудник.

Официальные оппоненты:

Дубинин Михаил Николаевич д. ф.-м. н. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына (НИИЯФ МГУ), лаборатория теории фундаментальных взаимодействий, ведущий научный сотрудник.

Невзоров Роман Борисович к. ф.-м. н. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и экспериментальной физики имени А.И. Алиханова Национального исследовательского центра Курчатовский институт (НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ), лаборатория теории элементарных частиц, старший научный сотрудник.

Ведущая организация:

Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ) г. Дубна

Защита состоится _____ в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 002.119.01 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН) по адресу: 117312, г. Москва проспект 60-летия Октября, дом 7а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ИЯИ РАН по адресу:

<http://www.inr.ru/rus/referat/dis-zasch.html>

Автореферат разослан _____

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 002.119.01

доктор физико-математических наук ,

чл.-корр. РАН

С. В. Троицкий

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Открытие новой скалярной частицы коллаборациями ATLAS [1] и CMS [2] на Большом адронном коллайдере (Large Hadron Collider, далее по тексту — LHC) стало одним из важнейших событий в физике частиц за последние несколько лет. В течение первого этапа работы LHC в 2011–2012 гг. в столкновениях протонных пучков была набрана статистика около 5 фб^{-1} при энергии $\sqrt{s} = 7 \text{ ТэВ}$ и до 20.6 фб^{-1} при $\sqrt{s} = 8 \text{ ТэВ}$. Полученные результаты свидетельствуют о том, что свойства новой частицы очень близки к теоретически предсказанным для бозона Хиггса [3,4] в рамках Стандартной модели (СМ). Данный факт подчеркивает триумф Стандартной модели. Однако, несмотря на свои красоты и способность объяснить подавляющее большинство экспериментальных результатов в физике частиц, СМ имеет ряд серьезных недостатков.

Поэтому предполагается, что СМ является частью другой, более фундаментальной теории, которая неким образом решает проблемы СМ. В настоящее время предложено большое количество моделей так называемой «новой физики» — моделей, описывающих явления за рамками СМ. К таким теориям относятся модели с дополнительными измерениями, нарушением лоренцевой симметрии, и многие другие.

В ряду моделей новой физики выделяются суперсимметричные модели. Они являются одними из самых привлекательных и многообещающих идей расширения СМ [5, 6]. Этот класс моделей базируется на идее о существовании симметрии между бозонами и фермионами. Суперсимметрия предполагает, что у каждой частицы существует так называемый суперпартнер, который обла-

дает теми же квантовыми числами за исключением спина. Спин суперпартнера частицы отличается на $1/2$ от спина самой частицы. Эта симметрия приводит к сокращению квадратично расходящихся поправок к массе бозона Хиггса, что позволяет решить проблему иерархий.

Одночастичные состояния в суперсимметричных теориях объединяются в *супермультиплеты*, которые описываются представлениями алгебры суперсимметрии. Каждый супермультиплет содержит бозонные и фермионные состояния, которые являются суперпартнерами друг друга. Простейшим вариантом супермультиплета является совокупность одного скалярного комплексного поля и одного вейлевского фермиона. Такая комбинация полей называется *скалярным* или *киральным* супермультиплетом. Другой тип супермультиплета содержит векторный бозон со спином 1. Если теория предполагается перенормируемой, то он должен быть калибровочным бозоном. Суперпартнером данного бозона должен быть вейлевский фермион со спином $1/2$. Как и его суперпартнер этот фермион преобразуется по присоединенному представлению калибровочной группы и называется *калибрино*. Супермультиплет с таким составом называется *калибровочным* или *векторным* супермультиплетом. Если включать в рассмотрение гравитацию, то гравитон со спином 2 будет иметь в качестве суперпартнера *гравитино* со спином $3/2$.

В суперсимметричных расширениях Стандартной модели, каждая известная фундаментальная частица оказывается компонентой кирального либо векторного супермультиплетов. Простейшее суперсимметричное расширение СМ называется Минимальной суперсимметричной стандартной моделью (МССМ). Скалярные суперпартнеры кварков и лептонов называются *скварки* и *слептоны* соответственно. Что касается бозона Хиггса, то он должен

входить в некоторый киральный супермультиплет. Однако оказывается, что в минимальном суперсимметричном расширении СМ необходимо введение двух хиггсовских супермультиплетов.

Суперпартнеры нейтральных хиггсовских полей — *хиггсино* и нейтральные калибрино (*вино* и *бино*) могут смешиваться и формировать 4 массовых состояния, называемых *нейтралино*. Заряженные хиггсино и *вино* смешиваются в два заряженных массовых состояния, называемых *чарджино*. Кандидатом на роль частицы темной материи может служить легчайшая суперсимметричная частица (ЛСЧ), которая может быть, в частности, нейтралино. Забегая вперед отметим, что в классе суперсимметричных моделей, рассмотренных в диссертации, ЛСЧ является гравитино.

Из двух хиггсовских дублетов после спонтанного нарушения калибровочной симметрии формируется целых 5 массивных полей со спином 0, из них два нейтральных скалярных, одно псевдоскалярное и два заряженных скалярных. Легчайший нейтральный скаляр можно трактовать как обнаруженный в эксперименте бозон с массой 125 ГэВ. Однако известно, что на древесном уровне масса легчайшего хиггсовского скаляра не превышает массы Z^0 бозона. Согласие с экспериментом может быть достигнуто за счет исключительно больших петлевых поправок обусловленных тяжелыми стоп кварками. Это является проявлением так называемой малой проблемы иерархий. Эта проблема наряду с отсутствием положительных результатов поисков суперпартнеров в экспериментах на ЛНС делает актуальной задачу изучения альтернативных суперсимметричных сценариев.

Если суперсимметрия является точной симметрией, то массы частиц одного супермультиплета должны быть одинаковыми. Суперпартнеры частиц СМ с теми же массами в настоящее время экспериментально исключены. Поэтому в реалистичной суперсим-

метричной модели суперсимметрия должна быть нарушена спонтанно. Это позволяет сделать массы суперпартнеров достаточно большими, чтобы избежать экспериментальных ограничений. Вводится понятие «мягкого» нарушения суперсимметрии, когда нарушающие суперсимметрию части лагранжиана содержат только взаимодействие с константами положительной массовой размерности. Оказывается, что такой тип нарушения гарантируют сокращение квадратичных расходимостей в поправках ко всем массам скаляров с точностью до масштаба масс суперпартнеров.

При рассмотрении суперсимметричных расширений Стандартной модели таких как МССМ, неявно предполагается, что масштаб нарушения суперсимметрии E_{SUSY} много больше электрослабого масштаба энергий и в этом случае взаимодействием с сектором, ответственным за нарушение суперсимметрии, можно пренебречь. Однако феноменологически приемлемой является другая ситуация — когда масштаб E_{SUSY} находится недалеко от электрослабой шкалы энергий и имеет величину порядка нескольких ТэВ. В описанном сценарии естественно ожидать, что массы гголдстино будут несколько меньше масштаба нарушения суперсимметрии, а значит сравнимы с массами суперпартнеров. В этом случае частицы из сектора, ответственного за нарушение суперсимметрии могут быть достаточно легкими, чтобы появиться в ускорительных экспериментах. Низкоэнергетическая теория такого сценария может быть построена путем добавления к МССМ кирального супермультиплетта, ответственного за спонтанное нарушение суперсимметрии. Этот супермультиплет содержит гголдстоуновский фермион — гголдстино, и его скалярный суперпартнер — гголдстино. Взаимодействия этих частиц с остальными полями МССМ практически однозначно фиксируется требованием корректного воспроизведения констант, мягко нарушающих суперсимметрию.

В главе 1 настоящей диссертации будет предложено изящное решение малой проблемы иерархий в контексте суперсимметричной модели с низким масштабом нарушения суперсимметрии. Будет показано, что взаимодействие сголдстино с массой около 100 ГэВ с хиггсовским сектором МССМ ведет к интересным следствиям, которые могут быть проверены путем прямых поисков на ускорителях, например на ЛНС. Так например, можно ожидать, что сголдстино будут образовываться при энергиях, которые доступны для ЛНС.

Нельзя исключить возможность того, что сголдстино могут быть достаточно легкими, с массами около 1 ГэВ, и при этом достаточно слабо взаимодействовать с полями СМ. Сценарий в котором сголдстино являются достаточно легкими с массой в несколько ГэВ представляет большой интерес с точки зрения проверки этого класса моделей в экспериментах высокой интенсивности. Примером такого эксперимента является предложенный недавно в ЦЕРН эксперимент с фиксированной мишенью SHiP [7,8]. В этом эксперименте планируется направить пучок протонов с энергией 400 ГэВ на неподвижную мишень. В процессе взаимодействия протонов с мишенью (а также в распадах вторичных частиц) могут рождаться новые легкие частицы новой физики, например сголдстино. За время сбора данных планируется направить на мишень $2 \cdot 10^{20}$ протонов, что обеспечит статистику, достаточную для рождения очень слабо взаимодействующих частиц. Изучению феноменологии легкого сголдстино в эксперименте SHiP посвящена 2-я глава настоящей диссертации.

В то же время для полноты картины исследования легкого слабо взаимодействующего сголдстино представляет большой интерес анализ возможности его детектирования также в экспериментах высокой интенсивности с фиксированной мишенью, но, в отличии

от SHiP, с электронным пучком. Тогда можно будет опробировать электромагнитный канал образования сголдстино.

Цель и задачи диссертационной работы

Основной целью данной работы является выяснение перспектив поиска легких сголдстино в экспериментах высокой интенсивности и изучение влияния смешивания сголдстино с хиггсовским бозоном на вероятности рождения и распадов последнего в контексте проверки данной модели на LHC.

Для достижения поставленной цели в требуется решить следующие задачи:

1. В рамках данной диссертации требуется изучить возможные взаимодействия сголдстино с хиггсовским сектором МССМ и их следствия для феноменологии: смешивание, влияние на картину относительных вероятностей распадов и сечений образования хиггсовских бозонов и сголдстино.
2. Также стоит задача оценить потенциальную возможность детектирования событий распада сголдстино в распадном объеме экспериментальной установки SHiP. Для решения поставленной задачи необходимо рассчитать ширины распадов сголдстино в легкие мезоны, фотоны, электроны и мюоны. Также необходимо вычислить сечения рождений сголдстино как в прямых столкновениях протонов пучка и мишени так и в распадах вторичных тяжелых B и D мезонов. Требуется особого внимания и учет смешивания сголдстино с бозоном Хиггса. Необходимо рассмотреть случай как скалярного так и псевдоскалярного сголдстино. Также требуется изучить случаи с нарушением аромата в скварковом секторе МССМ. Необходимо найти область пространства параметров сголдстино, к которой будет чувствителен данный эксперимент. Также провести анализ опублико-

ванных данных по поиску стерильных нейтрино, который проводился в эксперименте с фиксированной мишенью CHARM, нужно получить аналогичную область и сравнить возможности двух экспериментов.

3. В рамках экспериментов высокой интенсивности с протонным пучком трудно установить ограничения на константу взаимодействия сголдстино с фотонами поскольку в его рождении задействованы сильные процессы. Однако в случае электронного пучка мы имеем возможность изучить рождение сголдстино за счет взаимодействия с фотонами. Поэтому для полноты исследования различных каналов взаимодействия сголдстино с частицами SM в рамках диссертации стоит задача оценки чувствительности эксперимента высокой интенсивности и электронным пучком NA64 к детектированию сголдстино. В этой задаче также требуется определить область пространства параметров сголдстино (масса — константа взаимодействия), в которой ожидается наблюдение искомого экспериментального сигнала.

Научная новизна и практическая значимость. В представленной диссертационной работе впервые изучено пространство параметров МССМ и сектора сголдстино, которое удовлетворяет экспериментальным ограничениям на параметры Стандартной модели и поиски новой физики. Как было упомянуто выше, для согласования измеренного значения массы бозона Хиггса с предсказаниями МССМ требуются большие петлевые поправки. В данной работе показано как смешивание сголдстино и легчайшего хиггсовского скаляра МССМ позволяет увеличить предсказываемое значение массы хиггсовского бозона. Впервые получены предсказания для модификаций сечений рождения бозона Хиггса в разных каналах в сценарии с легким сголдстино.

В работе впервые получены теоретические предсказания для чувствительности планирующегося в ЦЕРН эксперимента SHiP к моделям со скалярным и псевдоскалярным сголдстино массой до 2 ГэВ. Вычислены сечения рождения скалярного и псевдоскалярного сголдстино в распадах тяжелых B - и D - мезонов с учетом смешивания сголдстино с бозоном Хиггса. Также вычислены ширины распада псевдоскалярного сголдстино в 3 легких псевдоскалярных мезона (π и η). Для значений масс и масштаба нарушения суперсимметрии, играющего здесь роль размерной константы связи, при которых модель успешно вписывается в актуальные на сегодняшний момент ограничения на параметры МССМ впервые получены теоретические предсказания интенсивностей этих процессов. Ценность полученных результатов заключается в возможности сделать вывод, какая область пространства параметров модели исключается, если в эксперименте не будет зафиксирован описанный в работе сигнал. Также впервые получены ограничения на параметры модели со сголдстино, основанные на анализе данных эксперимента CHARM.

В диссертации исследован процесс рождения сголдстино в эксперименте с электронным пучком бьющим по фиксированной мишени. В частности, получены предсказания чувствительности эксперимента NA64 к скалярному сголдстино массой до 1 ГэВ. В этой задаче использовался подход аналогичный тому, что был разработан в контексте проверки модели на эксперименте SHiP, однако значимость данного исследования заключается в возможности ограничить константу взаимодействия сголдстино с фотонами и исследовать интервал с меньшими массами нежели в рамках эксперимента SHiP.

Положения, выносимые на защиту

1. Показано, что в суперсимметричной модели со сголдстино имеется область пространства параметров, в которой масса легчайшего бозона Хиггса получает значительный вклад за счёт смешивания со сголдстино. Это позволяет получить массу легчайшего хиггсовского бозона порядка 125 ГэВ без привлечения значительных петлевых поправок от суперпартнёров.

2. В суперсимметричной модели со сголдстино получены предсказания для уровня сигнала образования бозона Хиггса и сголдстино в случае их смешивания по отношению к ожидаемому сигналу для бозона Хиггса Стандартной модели для различных каналов их распада. Показано, что сголдстино с массой около 98 ГэВ в таком сценарии может объяснить избыток событий, полученный на уровне 2σ в реакции $e^+e^- \rightarrow Z\tilde{s}, \tilde{s} \rightarrow b\bar{b}$.

3. В рамках суперсимметричной модели с лёгким сголдстино найдены области в пространстве параметров, к которой чувствителен планируемый в ЦЕРН эксперимент с фиксированной мишенью SHIP. Показано, что данный эксперимент обладает возможностью проверки данного класса моделей со сголдстино до 5 ГэВ вплоть до масштаба нарушения суперсимметрии порядка 10^3 ТэВ в случае без нарушения аромата и до 10^5 ТэВ в случае с максимально разрешенным экспериментально нарушением аромата.

4. Используя результаты эксперимента CHARM получены ограничения на пространство параметров суперсимметричной модели с лёгким сголдстино.

5. В рамках суперсимметричной модели с лёгким сголдстино получены области в пространстве параметров, к которой чувствителен эксперимент NA64. Показано, что в случае доминирования рождения сголдстино за счёт взаимодействия с электромагнитным сектором, эксперимент NA64 обладает возможностью ограничения

вещин масштаба нарушения суперсимметрии вплоть до 10 ТэВ при массе сголдстино до 50 МэВ.

Апробация результатов

Основные результаты диссертации доложены на двух научных семинарах ИЯИ РАН (февраль и октябрь 2017 г.), на научном семинаре отдела теоретической физики ФИАН им. Лебедева (май 2017 г.), на научном семинаре группы Физики частиц и космологии Факультета наук в университете Тохоку (г. Сендай, Япония, октябрь 2014 г.), а также международных конференциях: «Ломоносов» (МГУ, 2013), «QFTHEP» (Санкт-Петербург, июнь 2013г.) «Кварки-2014» (Суздаль, июнь 2014), «Кварки-2016» (Пушкин, июнь 2016), «ICNFP-2017» (Колумбари, о. Крит, Греция, август 2017) и на международных школах: «TRR Winter school in cosmology» (Тонале, Италия, декабрь 2013), «International School for Subnuclear Physics» (Эриче, Италия, июль 2013), «International School for Subnuclear Physics» (Эриче, Италия, июль 2016).

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 3-х глав основного текста, заключения и библиографии. Общий объем диссертации 95 страниц, включая 29 рисунков. Библиография включает 109 наименований на 11 страницах.

Содержание работы

Введение содержит краткий обзор проблем возникающих в Стандартной модели и пути их решения путем суперсимметричного расширения СМ. Описан механизм нарушения суперсимметрии обусловленный присутствием сектора ответственного за нарушение суперсимметрии. Сформулирована проблема ненату-

ральности МССМ, а также возможный путь ее решения. Сформулированы цели работы и положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена изучению влияния сголдстино на хиггсовский сектор МССМ.

В разделе **1.1** приводятся обсуждения феноменологических особенностей суперсимметричных моделей с низким масштабам нарушения суперсимметрии. Если суперсимметрия действительно существует в природе, то она должна быть спонтанно нарушена. Согласно суперсимметричному аналогу теоремы Голдстоуна [9] при спонтанном нарушении суперсимметрии появляется безмассовый фермион — голдстино. В моделях супергравитации голдстино является продольной компонентой гравитино. В простейшем случае голдстино является фермионной компонентой кирального супермультиплета и взаимодействия полей этого супермультиплета с полями МССМ подавлены степенями масштаба \sqrt{F} . Существуют феноменологически приемлемые сценарии (см. работы [10, 11]), в которых величина \sqrt{F} не сильно больше электрослабого масштаба, т.е. порядка нескольких ТэВ. Главной особенностью такого класса моделей является присутствие сектора ответственного за нарушение суперсимметрии, т.е. голдстино и его скалярного суперпартнера — сголдстино, в низкоэнергетическом спектре.

В разделе **1.2** приведено описание суперсимметричной модели с киральным суперполем голдстино. Предполагается, что благодаря некоторой динамике в скрытом секторе вспомогательное поля супермультиплета голдстино приобретает ненулевое вакуумное значение, равное F , и за счет этого возникают мягкие нарушающие члены, а также члены взаимодействия сголдстино и остальных полей МССМ.

Показано, что благодаря таким взаимодействиям между полями сголдстино и хиггсовскими бозонами МССМ возникает смешивание

вание. Величины параметров этого смешивания имеют вид

$$X = 2\mu^3 v \sin 2\beta + \frac{1}{2}v^3 (g_1^2 M_1 + g_2^2 M_2) \cos^2 2\beta, \quad (1)$$

$$Y = \mu v (m_A^2 - 2\mu^2) + \frac{1}{4}(g_1^2 M_1 + g_2^2 M_2) \sin 4\beta \quad (2)$$

$$Z = -\mu v (m_A^2 - 2\mu^2) \cos 2\beta. \quad (3)$$

Предполагая режим отщепления, когда массы всех хиггсовских бозонов МССМ лежат на масштабе выше 1 ТэВ и не оказывают существенного влияния на физику рассматриваемых процессов, квадраты масс (в случае когда $m_h > m_s$) Хиггс-подобного \tilde{h} и сголдстино-подобного \tilde{s} резонансов возникающих в результате смешивания имеют вид

$$m_{\tilde{h}}^2 = \frac{1}{2} \left(m_s^2 + m_h^2 + \sqrt{(m_s^2 - m_h^2)^2 + \left(2\frac{X}{F}\right)^2} \right) \quad (4)$$

$$m_{\tilde{s}}^2 = \frac{1}{2} \left(m_s^2 + m_h^2 - \sqrt{(m_s^2 - m_h^2)^2 + \left(2\frac{X}{F}\right)^2} \right) \quad (5)$$

Как видно смешивание скалярного сголдстино с легчайшим хиггсовским бозоном привносит дополнительный положительный вклад в массу последнего.

Также в этом разделе получены взаимодействия новых массовых состояний \tilde{h} и \tilde{s} с частицами СМ. Оказывается, что взаимодействия легчайшего хиггсовского бозона h и скалярного сголдстино s с кварками и лептонами имеют схожую структуру. Константы взаимодействий хиггсподобного массового состояния \tilde{h} имеют вид

$$g_{\tilde{h}tt} = \frac{m_t}{v\sqrt{2}} C_t \cos \theta - \frac{A_{33}^U v \sin \beta}{\sqrt{2}F} \sin \theta \quad (6)$$

$$g_{\tilde{h}\bar{b}b} = \frac{m_b}{v\sqrt{2}} C_b \cos\theta - \frac{A_{33}^D v \cos\beta}{\sqrt{2}F} \sin\theta \quad (7)$$

$$g_{\tilde{h}\bar{\tau}\tau} = \frac{m_\tau}{v\sqrt{2}} C_\tau \cos\theta - \frac{A_{33}^L v \cos\beta}{\sqrt{2}F} \sin\theta \quad (8)$$

Масштабные факторы C_t , C_b и C_τ определяются смешиваниями h и H и в режиме отщепления $m_H \gg m_h$ близки к единице.

Эффективные взаимодействия бозона Хиггса СМ с глюонами и фотонами возникает за счет петлевых вкладов от кварков и W -бозонов. Для скалярного сголдстино взаимодействия с фотонами и глюонами имеют место уже на древесном уровне, и собирая вместе легко получить следующие константы взаимодействий

$$g_{\tilde{h}\gamma\gamma} = g_{h^{SM}\gamma\gamma}^{1-loop} C_{\gamma\gamma} = \cos\theta + \frac{M_{\gamma\gamma}}{2\sqrt{2}F} \sin\theta \quad (9)$$

$$g_{\tilde{h}gg} = g_{h^{SM}gg}^{1-loop} C_{gg} = \cos\theta + \frac{M_3}{2\sqrt{2}F} \sin\theta \quad (10)$$

где $g_{h^{SM}\gamma\gamma}^{1-loop} C_{\gamma\gamma}$ и $g_{h^{SM}gg}^{1-loop} C_{gg}$ — константы взаимодействий бозона Хиггса СМ с фотонами и глюонами обусловленные петлевыми диаграммами. Также в **приложении** к первой главе получены константы взаимодействий хиггсовского бозона и сголдстино с W и Z бозонами. Эффективные константы взаимодействия сголдстино-подобного состояния \tilde{s} могут быть получены из аналогичных выражений для \tilde{h} , приведенных выше, путем замены $\cos\theta \rightarrow \sin\theta$ и $\sin\theta \rightarrow -\cos\theta$.

В разделе **1.3** обсуждаются феноменологические следствия смешивания сголдстино и легчайшего бозона Хиггса. Для заданной точки пространства параметров модели, которая характеризуется параметрами МССМ, массовым параметром скалярного сголдстино m_s^2 и масштабом нарушения суперсимметрии \sqrt{F} можно задать-

ся вопросом согласуется ли эта точка с имеющимися экспериментальными данными, в частности, с результатами полученными из экспериментов на ЛНС. Чтобы исследовать данный сценарий было проведено сканирование по пространству параметров МССМ.

Также для определенности было выбрано фиксированное значение для масштаба нарушения суперсимметрии $\sqrt{F} = 10$ ТэВ. Для определения спектра масс и величин констант связи легчайшего хиггсовского бозона без вклада получаемого от сектора сголдстино использовался вычислительный пакет NMSSMTools [12] в режиме приближения к МССМ. Путем сканирования по выбранному пространству параметров были исключены нефизические модели посредством проверки на отсутствие нефизических глобальных минимумов скалярного потенциала в хиггсовском секторе. Результатом сканирования является спектр суперпартнеров, значение квадрата массы легчайшего хиггсовского бозона m_h^2 с учетом квантовых поправок МССМ и значение для констант взаимодействия h с фотонами, глюонами, кварками и лептонами, которые используются для дальнейшего анализа.

Далее в анализ включается смешивание со сголдстино следующим образом. Проводится сканирование в случайном режиме по массовому параметру сголдстино m_s в интервале $(m_h - x, m_h)$, где $x = 35$ ГэВ. Столь узкий интервал выбран для увеличения угла смешивания. Получившаяся в результате точка — модель принимается к рассмотрению если итоговая масса хиггс-подобного резонанса \tilde{h} попадает в промежуток $123 \text{ ГэВ} < m_{\tilde{h}} < 127 \text{ ГэВ}$.

Для каждой выбранной модели рассчитывается величина $R = \sigma/\sigma_{SM}(m_{h^{SM}} = m_{\tilde{h}^S})$ т.е. отношение сечений рождения нового хиггс-подобного или сголдстино-подобного резонанса к сечению аналогичного процесса для бозона Хиггса с той же массой в СМ. При малой ширине резонанса f величина R может быть приближенно

вычислена как

$$R_f = \frac{\sigma(pp \rightarrow \tilde{h}(\tilde{s}) Br(\tilde{h}(\tilde{s}) \rightarrow f))}{\sigma(pp \rightarrow \tilde{h}^{SM}) Br(\tilde{h}^{SM} \rightarrow f)}, \quad (11)$$

где $\sigma(pp \rightarrow \tilde{h}(\tilde{s}))$ — полное сечение рождения Хиггс-подобного (сголдстино-подобного) состояния, получающееся путем суммирования сечений различных каналов рождения, $Br(\tilde{h}(\tilde{s}) \rightarrow f)$ — относительная парциальная ширина распада $\tilde{h}(\tilde{s})$ в конечное состояние f , также $\sigma(pp \rightarrow \tilde{h}^{SM})$ и $Br(\tilde{h}^{SM} \rightarrow f)$ — аналогичные величины для бозона Хиггса СМ с такой же массой. Далее рассматриваются следующие, наиболее интересные для текущих поисков на ЛНС конечные состояния $\gamma\gamma$, ZZ , WW , $b\bar{b}$ и $\tau^+\tau^-$. Учитываются различные механизмы рождения бозона Хиггса, а именно рождение в слиянии глюонов (ggF) и слиянии векторных бозонов (VBF), а также ассоциативное рождение с W и Z (VH), поскольку они приводят к конечным состояниям с различными сигнатурами.

Слияние глюонов — наиболее важный механизм рождения для таких каналов распада как $\gamma\gamma$, ZZ и WW . В то же время, константы взаимодействия бозона Хиггса \tilde{h} с глюонами получают древесный вклад (10) из-за смешивания со сголдстино. Мы требуем чтобы этот вклад не был доминирующим по сравнению со стандартным вкладом. Этого можно добиться либо за счет малого угла смешивания либо за счет достаточно большого \sqrt{F} . В случае значительного смешивания константа взаимодействия сголдстино меньше чем 1-петлевой стандартный вклад, если $\sqrt{F} \gtrsim \left(\frac{3\pi M_3 v}{\alpha_s}\right)^{1/2}$. Для выбранного ограничения $M_3 \gtrsim 1.5$ ТэВ из прямых поисков глюино на ЛНС мы находим $\sqrt{F} \gtrsim 7$ ТэВ. Это объясняет наш выбор достаточно большого значения масштаба нарушения суперсимметрии $\sqrt{F} = 10$ ТэВ.

Известно, что небольшой, на уровне 2σ пик был обнаружен на LEP в канале $e^+e^- \rightarrow Zh$ с $h \rightarrow b\bar{b}$, $\tau^+\tau^-$ и $\gamma\gamma$ в области инвариантных

масс около 98 ГэВ пары $b\bar{b}$. В этом разделе проведено исследование интересного сценария, в котором сголдстино-подобное состояние с массой около 98 ГэВ является возможной причиной обнаруженного пика. Для таких моделей также дополнительно было потребовано, чтобы масса \tilde{s} лежала в диапазоне 95–101 ГэВ и чтобы $0.1 < R_{bb}^{VBF/VH}(\tilde{s}) < 0.25$ [13]. Проведен сравнительный анализ полученных в результате сканирования результатов и получены предсказания для величин R_f с разными конечными состояниями.

В разделе 1.4 приводятся заключительные замечания главы. Сканирование по пространству параметров с выбранным $\sqrt{F}=10$ TeV и отбор феноменологически приемлемых моделей смешивание со сголдстино выявило характерные особенности в сигнале Хиггс-подобного резонанса в разных каналах. В случае рождения в слиянии глюонов сигнал R_f для фермионных и $Z^0Z^0-(W^+W^-)$ каналов несколько больше единицы со значениями около 1.0–1.5. В случае образования бозона Хиггса в слиянии векторных бозонов или в ассоциативном рождении с массивным векторным бозоном величина сигнала R_f напротив ожидается в пределах интервала 0.7–1.0.

Также сказано, что смешивание скалярного сголдстино \tilde{s} с легчайшим бозоном Хиггса МССМ \tilde{h} может приводить к дополнительному увеличению массы последнего. Привлекательная особенность данного сценария состоит в том, что сголдстино-подобное скалярное состояние \tilde{s} , которое немногим легче, чем Хиггс-подобный бозон присутствует в низкоэнергетическом спектре. В частности, существует область пространства параметров модели, где такое состояние может объяснить избыток событий найденный на уровне 2σ на LEP в канале $e^+e^- \rightarrow Z\tilde{s}$ с $\tilde{s} \rightarrow b\bar{b}$ массой примерно 98 ГэВ.

Во второй главе изучается сценарий модели МССМ со сголдстино, в котором сголдстино достаточно легкое $m_s < 5$ ГэВ. Поскольку константы его взаимодействий с частицами СМ довольно

малы для проверки модели посредством рождения новых частиц необходим пучек высокой интенсивности.

В разделе **2.1** обсуждаются широкие возможности для решения поставленной задачи с помощью протонного пучка высокой интенсивности с энергией 400 ГэВ предоставляемый Супер Протонным Синхротроном (СПС) в ЦЕРН, а также предложенного недавно эксперимента с фиксированной мишенью по поиску скрытых частиц – Search for Hidden Particles (SHiP) [8] (см. также работы [7,14]) на базе данного пучка.

Сголдстино могут одиночно рождаться в столкновениях частиц SM и распадаться в частицы SM. Особый интерес представляют собой распады сголдстино в пары электрически заряженных частиц SM. Такие распады приводят к хорошо распознаваемым конечным состояниям в случае эксперимента SHiP [8]: два заряженных трека выходящих из одной вершины и выделяющийся пик в инвариантной массе разлетающихся частиц. Константы взаимодействий сголдстино с частицами SM обратно пропорциональны квадрату масштаба нарушения суперсимметрии \sqrt{F} . Эта уникальная особенность супермультиплетта гольдстино позволяет поставить ограничение на \sqrt{F} из поиска легких сголдстино.

В разделе **2.2** приводится лагранжиан взаимодействия сголдстино с частицами SM, а также приведен набор значений мягких параметров МССМ, для которого будет проводиться дальнейший анализ.

В разделе **2.3** обсуждается скалярное сголдстино и рассматриваются два различных механизма рождения в эксперименте SHiP. Первый из них — это прямое рождение в слиянии жестких глюонов обусловленное столкновениями протонов пучка и мишени. Второй — это рождение в распадах тяжелых мезонов возникающих из рассеяния протонов. Оказывается, что мезонный канал

рождения доминирует над прямым везде, где это кинематически разрешено. В частности, в контексте эксперимента SHiP главным источником сголдстино оказываются распады B мезонов. Рождение в распадах «очарованных» мезонов подавлено по сравнению с «красивыми» мезонами благодаря малости матричного элемента матрицы ККМ (Кабиббо–Кобаяши–Маскава) в соответствующей амплитуде. Относительная вероятность распада B мезонов в скалярное сголдстино имеет вид

$$\text{Br}(B \rightarrow X_s S) = 0.3 \times \left(\frac{m_t}{m_W}\right)^4 \times \left(1 - \frac{m_S^2}{m_b^2}\right)^2 \times (A_{QV} + F\theta)^2 \times \left(\frac{100 \text{ TeV}}{\sqrt{F}}\right)^4 \quad (12)$$

где X_s обозначает канал странных мезонов насыщенный преимущественно суммой псевдоскалярных и векторных каонов; m_b, m_t и m_W — массы b, t кварков и W^\pm бозонов соответственно. Сечение рождения скалярного сголдстино является произведением приведенного выше брэнчинга и полного сечения рождения B -мезонов вычисленное на масштабе энергий SHiP равно $1.6 \times 10^{-7} \times \sigma_{pp, \text{total}}$ [8].

Далее в этом разделе обсуждаются каналы распада скалярного сголдстино. Оно может распадаться пары частиц СМ, поскольку оно R -четно, там, где это кинематически разрешено. Для сголдстино с массой в (суб-)ГэВном диапазоне основные каналы распада — $\gamma\gamma$, e^+e^- , $\mu^+\mu^-$, $\pi^0\pi^0$, $\pi^+\pi^-$, K^+K^- , $K^0\bar{K}^0$. Если скаляр легкий ($m_s < 1.2$ ГэВ), то его распад в легкие мезоны хорошо описывается в рамках киральной теории эффективным взаимодействием, включающим в себя глюонный оператор на низком масштабе энергий [15]. Для масс сголдстино существенно превышающих масштаб КХД ($m_s \gg 1$ ГэВ) распад в адроны может быть описан как распад в пару глюонов, которые затем адронизируются.

Далее в данном разделе приведено описание схемы эксперимента SHiP, который представляет из себя мишень из вольфрама

и расположенную в 60 м от нее вакуумную емкость длиной около 60 м. Эта вакуумная емкость называется распадным доверительным объемом, распады искомой частицы в котором далее регистрируются детектором. В конце раздела произведена численная оценка числа распадов скалярного сголдстино в эксперименте SHiP и найдены области пространства параметров $(m_S - 1/\sqrt{F})$, которые будут исключены в случае, если ни одного события не будет зарегистрировано.

В разделе 2.4 произведен аналогичный анализ для псевдоскалярного сголдстино P . В том, что касается механизмов рождения, то оно также как для случая со скаляром насыщается распадами тяжелых мезонов. Однако распад P имеет другую структуру. P может смешиваться с псевдоскалярными мезонами π и η , как показано в статье [15]. Как следствие этого смешивания, псевдоскалярное сголдстино может распадаться на три мезона через виртуальное мезонное состояние, $P \rightarrow \pi^{0*}/\eta^* \rightarrow 3$ мезона. Эти распады могут происходить за счет четырех-мезонного взаимодействия описываемого в рамках киральной теории возмущений.

Далее в разделе была получена оценка чувствительности SHiP к параметрам модели в случае поисков псевдоскалярного сголдстино.

Отдельно в данной главе изучен случай, когда в модели присутствуют недиагональные элементы сфермионной массовой матрицы $\tilde{m}_{D_{ij}}^{LR2} \propto \delta_{ij}$ и т. д. В этом случае константы взаимодействий сголдстино нарушают симметрию аромата. Эти нарушающие аромат взаимодействия могут являться дополнительными источниками рождения сголдстино в эксперименте высокой интенсивности с фиксированной мишенью. Чтобы проиллюстрировать эту идею, рассмотрены происходящие с нарушением аромата распады B и D_s мезонов, рожденных в прямых столкновениях протонов, в каоны и легкое скалярное сголдстино. Вероятности этих процессов зави-

сят от мягких параметров $\tilde{m}_{D_{23}}^{LR2}$ и $\tilde{m}_{U_{12}}^{LR2}$. Наблюдение осцилляций в системах $B^0-\bar{B}^0$ и $D^0-\bar{D}^0$, а также поиски редких (для СМ) распадов типа $B \rightarrow \mu^+\mu^-$ ограничивают [16, 17] возможное нарушение аромата в скварковом секторе, которое для выбранной точки пространства параметров МССМ налагает следующие верхние границы на недиагональные элементы

$$\tilde{m}_{D_{23}}^{LR2} < 0.02 \text{ TeV}^2, \quad \tilde{m}_{U_{12}}^{LR2} < 0.016 \text{ TeV}^2. \quad (13)$$

Оказывается, что введение данных параметров в рассмотрение с приведенными выше ограничениями приводит в более интенсивному процессу рождения сголдстино. Для указанного случая также проведено оценка чувствительности эксперимента SHiP.

В разделе **2.5** приведены заключительные замечания.

В третьей главе диссертации обсуждаются перспективы поисков легкого ($m_S < 1$ ГэВ) скалярного сголдстино в эксперименте высокой интенсивности с электронным пучком с энергией 100 ГэВ NA64. В контексте этой задачи исследован сектор электромагнитного взаимодействия сголдстино со СМ. В NA64 образование сголдстино обусловлено процессами прямого рождения в столкновении электронов с ядрами мишени (в качестве материала мишени выбирается свинец). Основное содержание главы посвящено вычислению вероятностей рождения и распада скалярного сголдстино в NA64, а также анализу чувствительности этого эксперимента к сголдстино проведенному аналогично тому, как это было проделано в предыдущей главе в контексте эксперимента SHiP.

В Заключении диссертации сформулированы основные результаты работы.

Список публикаций

1. K. O. Astapov and S.V. Demidov. Sgoldstino-Higgs mixing in models with low-scale supersymmetry breaking // JHEP **1501**, 136 (2015) arXiv:hep-ph/1411.6222
2. K.O. Astapov and D.S. Gorbunov. Decaying light particles in the SHiP experiment. III. Signal rate estimates for scalar and pseudoscalar sgoldstinos // Phys. Rev. D **93**, no. 3, 035008 (2016) arXiv:hep-ph/1511.05403
3. K. O. Astapov and D.V. Kirpichnikov Prospects of models with light sgoldstino in electron beam dump experiment at CERN SPS // arXiv:hep-ph/1612.02813

Цитированная литература

1. Aad G. et al. Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC // Phys. Lett. 2012. Vol. B716. P. 1–29. arXiv:hep-ex/1207.7214.
2. Chatrchyan S. et al. Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC // Phys. Lett. 2012. Vol. B716. P.30–61. arXiv:hep-ex/1207.7235.
3. Spira M. QCD effects in Higgs physics // Fortsch. Phys. 1998. Vol. 46. P.203–284. arXiv:hep-ph/hep-ph/9705337.
4. Djouadi A. The Anatomy of electro-weak symmetry breaking. I: The Higgs boson in the standard model // Phys. Rept. 2008. Vol. 457. P. 1–216. arXiv:hep-ph/hep-ph/0503172.
5. Haber H. E., Kane G. L. The Search for Supersymmetry: Probing Physics Beyond the Standard Model // Phys. Rept. 1985. Vol. 117. P. 75–263.
6. Martin S. P. A Supersymmetry primer. 1997. [Adv. Ser. Direct. High Energy Phys.18,1(1998)]. arXiv:hep-ph/hep-ph/9709356.
7. Bonivento W. et al. Proposal to Search for Heavy Neutral Leptons at the SPS. 2013. arXiv:hep-ex/1310.1762.
8. Anelli M. et al. A facility to Search for Hidden Particles (SHiP) at the CERN SPS. 2015. arXiv:physics.ins-det/1504.04956.

9. Volkov D. V., Akulov V. P. Possible universal neutrino interaction // JETP Lett. 1972. Vol. 16. P. 438–440. [Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz.16,621(1972)].
10. Ellis J. R., Enqvist K., Nanopoulos D. V. A Very Light Gravitino in a No Scale Model // Phys. Lett. 1984. Vol. B147. P. 99–102.
11. Gherghetta T., Pomarol A. Bulk fields and supersymmetry in a slice of AdS // Nucl. Phys. 2000. Vol. B586. P. 141–162. arXiv:hep-ph/hep-ph/0003129.
12. Ellwanger U., Gunion J. F., Hugonie C. NMHDECAY: A Fortran code for the Higgs masses, couplings and decay widths in the NMSSM // JHEP. 2005. Vol. 02. P. 066. arXiv:hep-ph/hep-ph/0406215.
13. Barate R. et al. Search for the standard model Higgs boson at LEP // Phys. Lett. 2003. Vol. B565. P. 61–75. arXiv:hep-ex/hep-ex/0306033.
14. Gninenko S. N., Gorbunov D. S., Shaposhnikov M. E. Search for GeV-scale sterile neutrinos responsible for active neutrino oscillations and baryon asymmetry of the Universe // Adv. High Energy Phys. 2012. Vol. 2012. P. 718259. arXiv:hep-ph/1301.5516.
15. Gorbunov D. S. Light sgoldstino: Precision measurements versus collider searches // Nucl. Phys. 2001. Vol. B602. P. 213–237. arXiv:hep-ph/hep-ph/0007325.
16. Ciuchini M., Franco E., Guadagnoli D. et al. $D-\bar{D}$ mixing and new physics: General considerations and constraints on the MSSM // Phys. Lett. 2007. Vol. B655. P. 162–166. arXiv:hep-ph/hep-ph/0703204.
17. Arana-Catania M. The flavour of supersymmetry: Phenomenological implications of sfermion mixing: Ph. D. thesis / Madrid, IFT. 2013. arXiv:hep-ph/1312.4888. URL: <https://inspirehep.net/record/1269751/files/arXiv:1312.4888.pdf>.

Научное издание

Астапов Константин Олегович

Феноменология
суперсимметричных моделей со спонтанно
в ускорительных экспериментах

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук на тему

Ф-т 60x84/16 Уч.-изд.л. 0,95 Зак. № 22420 Тираж 80 экз. Бесплатно

Печать цифровая

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований Российской академии наук

Издательский отдел
117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а