

**Отзыв официального оппонента
на диссертацию Танйылдызы Шюкрю Ханифа
«Редкие распады и бозоны Хиггса в рамках
суперсимметричных расширений Стандартной модели»,
представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.02 – теоретическая физика**

Диссертационная работа посвящена изучению широкого круга феноменогических аспектов различных вариантов суперсимметричных расширений Стандартной модели. Данное исследование затрагивает процессы образования тяжелых бозонов Хиггса на Большом адронном коллайдере, редкие распады мезонов, модификацию предсказаний для спектра суперпартнеров за счет добавления неголоморфных параметров, а также предсказания для свойств легчайшего нейтралино как кандидата на роль темной материи. Актуальность темы диссертации не вызывает сомнений в связи с активными поисками проявлений суперсимметрии в различных экспериментах и, в частности, на Большом адронном коллайдере.

Диссертация состоит из Введения, пяти глав основного текста и Заключения. Она содержит 31 рисунок, 7 таблиц и список литературы из 270 ссылок. Результаты диссертации были изложены в шести публикациях, четыре из которых опубликованы в рецензируемых зарубежных изданиях.

В кратком введении дано обсуждение актуальности выбранной темы диссертации, поставлены цели и задачи работы, перечислены основные положения, выносимые на защиту, а также приведены сведения о публикациях и докладах автора по теме диссертационной работы.

В первой главе, носящей также вводный характер, дается обзор проблематики современной физики частиц, описываются основные принципы, на которых базируется Стандартная модель, дается краткое описание взаимодействий элементарных частиц. Также в этой главе обсуждаются основные проблемы Стандартной модели, имеющие как теоретический так и экспериментальный характер, которые лежат в основе построения различных расширений этой теории. Далее в этой главе дается краткое описание суперсимметричных обобщений Стандартной модели – основной темы, которой и посвящена диссертация; обсуждается мотивация для введения суперсимметричных теорий, описываются наиболее важные свойства таких моделей, проблемы и современные направления исследований в этой области.

Вторая глава диссертации посвящена изучению процессов образования бозонов Хиггса в рамках Минимальной Суперсимметричной Стандартной Модели (МССМ) в протон-протонных столкновениях на Большом адронном коллайдере. Основной задачей исследования в этой главе является поиск возможностей усиления сечения образования новых бозонов Хиггса, предсказываемых суперсимметричными обобщениями Стандартной модели. Такая проблема представляет большой интерес в связи с тем, что поиск новых частиц ведется с самого начала работы экспериментов на Большом адронном коллайдере и суперсимметричными модели являются одними из наиболее тщательно тестируемых в этих экспериментах. Поиски нейтральных частиц, таких как новые бозоны Хиггса, осложняются тем, что их константа связи с глюонами, играющая основную роль для их образования, возникает лишь за счет петлевых эффектов, причем вклад в эти петлевые поправки дают как частицы Стандартной модели так и суперпартнеры. Поскольку такой сигнал довольно слаб, интерес представляют области в пространстве параметров моделей, в которых сечение рождения но-

вых частиц усилен – такие модели оказываются более доступными для экспериментального изучения. В этой главе диссертации обсуждается механизм усиления сечения образования тяжелого бозона Хиггса за счет вкладов виртуальных суперпартнеров топ-кварков. Полученная в работе область пространства параметров со значительным усилением на момент проведения исследования была довольно сильно ограниченной, а к настоящему времени является уже закрытой экспериментально. Тем не менее, сам механизм усиления, который носит довольно общий хотя и технический характер, может быть интересным для других моделей новой физики.

Во третьей главе приведено описание программного пакета «Peng4BSM@LO», разработанного автором и предназначенного для автоматизированных расчетов коэффициентов Вильсона для определенного класса эффективных операторов, меняющих аромат кварка в нейтральных токах. Эффективные операторы, учитываемые данным программным пакетом, возникают как однопетлевые поправки диаграмм типа «пингвин» в различных моделях новой физики, в том числе в МССМ и ее расширениях. В данной главе подробно описывается структура пакета, его использование и описание соответствующих процедур. Пакет успешно протестирован на эффективных операторах для вершин взаимодействия $d\bar{s}Z$, $d\bar{s}\gamma$ и $b\bar{s}H$ в Стандартной модели, а также для вершины $b\bar{s}\gamma$ в МССМ.

Четвертая глава диссертации посвящена феноменологическому исследованию неголоморфного обобщения МССМ. В частности, изучено влияние добавленных неголоморфных мягких слагаемых на спектр суперпартнеров. Для анализа в этой главе были выбраны два примера конкретных моделей МССМ, в которых электрослабая симметрия нарушается за счет радиационных поправок, однако являются экспериментально исключенными из-за ограничений на массу суперпартнера топ-кварка а также из редкого распада $B \rightarrow X_s \gamma$. Далее в этой главе подробно обсуждается, как изменяется спектр суперпартнеров после введения неголоморфных параметров и как это влияет на возможность удовлетворения экспериментальным ограничениям. Обнаружено, что включение параметра μ' , дающего дополнительный вклад в массы хиггсино и чарджино, может сделать выбранные модели феноменологически приемлемыми с точки зрения ограничений из распада $B \rightarrow X_s \gamma$. С другой стороны, включение неголоморфных трilinearных констант взаимодействия дает возможность получить массу легчайшего бозона Хиггса в наблюдаемом интервале даже с легким суперпартнером топ-кварка с массой порядка 180 ГэВ. Отметим, что в стандартной МССМ с объединением мягких параметров на масштабе Великого Объединения и нейтрально как легчайшей суперсимметричной частицей, такой сценарий экспериментально закрыт.

Пятая глава диссертации посвящена исследованию отдельных аспектов феноменологии МССМ в режиме, когда имеет место отклонения от универсальности юкавских констант третьего поколения на больших масштабах энергий. Такие сценарии возникают в ряде теорий Великого Объединения. В данной главе автор интересовался вопросом о реалистичности гипотезы о том, что легчайшее нейтрально в данной модели является кандидатом на роль частицы темной материи. Было проведено сканирование по широкому пространству параметров, отобраны феноменологически приемлемые наборы параметров и выполнено сравнение теоретических предсказаний, полученных с использованием известных программных пакетов ISAJET с одной стороны и SoftSUSY и SuperIso Relic с другой. Такой сравнительный анализ интересен сам по себе, поскольку существенные различия в предсказаниях, полученных с помощью этих пакетов, свидетельствуют о недостаточной теоретической точности и необходимости осторожного отношения к результатам. В работе

автор описывает феноменологически разрешенные области пространства параметров, полученные с помощью разных программных пакетов, отбирает модели интересные с точки зрения объяснения наблюдаемого количества темной материи и выявляет основные каналы (ко)аннигиляции. Также получены предсказания для спин-зависимого и спин-независимого сечения рассеяния нейтралино на нуклоне, которые сравниваются с экспериментальными ограничениями.

Следует отметить, что в работе продемонстрировано профессиональное знание теоретической физики и умение применять и разрабатывать современные программные пакеты для исследований в физике частиц. Тем не менее, данная диссертационная работа не лишена недостатков. Среди наиболее существенных хотелось бы отметить следующие:

- В тексте диссертации имеется довольно значительное количество орфографических ошибок и опечаток;
- В главе 1 диссертации имеются стилистические повторы, например, дважды описываются механизм Хиггса и теории Великого Объединения.
- В главе 2 на стр. 39 говорится, что «Результаты представлены в плоскости $m_0, m_{1/2}$ при фиксированных значениях A_0 и $\tan \beta$ », однако, далее в тексте результаты приведены, наоборот, в плоскости $A_0, \tan \beta$ при фиксированных значениях $m_0, m_{1/2}$.
- В главе 4 при обсуждении неголоморфного расширения МССМ вводятся дополнительные слагаемые (4.1) в лагранжиан теории. Во-первых, в диссертации не отмечается, могут ли эти дополнительные взаимодействия возникать в какой-нибудь реалистичной модели со спонтанным нарушением суперсимметрии. Во-вторых, не совсем ясно, почему первое слагаемое в (4.1) также называется неголоморфным, хотя оно вполне может возникнуть из вклада в суперпотенциал вида

$$W = \alpha X H_u \cdot H_d,$$

где скалярная компонента шпурионного суперполя $X = x + \sqrt{2}\theta\psi_X + \theta^2 F_X$ приобретает ненулевое вакуумное среднее $\langle x \rangle = \frac{\mu'}{\alpha}$.

- В главе 4 при описании влияния неголоморфных констант на спектр масс скварков и слептонов отмечается, что при увеличении константы A'_t масса соответствующих скварков увеличивается, а при увеличении A'_b и A'_τ массы суперпартнеров b -кварка и тау-лептона уменьшаются. Причины этого эффекта не очень понятны, учитывая, что эти неголоморфные константы входят в массовые матрицы слептонов и скварков с одинаковым знаком, как видно из формул (4.3).
- В разделе 4.4 обсуждается тонкая подстройка параметров в неголоморфной МССМ и отмечается, что введение неголоморфных слагаемых может ослабить проблему натуральности. Однако, обсуждение этого вопроса вне контекста реалистичной модели, в которой генерируются эти неголоморфные параметры, кажется преждевременным, поскольку само введение этих параметров с масштабом порядка электрослабого масштаба может породить свою проблему натуральности, аналогичную упомянутой в диссертации μ -проблеме в МССМ.
- В главе 5 делается сканирование по пространству параметров суперсимметричной модели с неуниверсальностью юкавских констант. При этом не приводятся объяснения

природы ряда параметров, таких как m_{16} и m_{10} , и их связи со стандартными мягкими параметрами.

- В главе 5 при обсуждении темной материи в МССМ с квазиюкавским объединением автор применяет экспериментальные ограничения на спин-зависимое сечение упругого рассеяния частиц темной материи, полученное в экспериментах Super-Kamiokande и IceCube к предсказаниям в рамках изучаемой модели. Однако, эти ограничения получены из поисков нейтринного сигнала от аннигиляции частиц темной материи в Солнце и зависят от канала аннигиляции частиц темной материи а также от выполнения условия равновесия между процессами захвата Солнцем частиц темной материи и их аннигиляцией. Поэтому данные ограничения, возможно, применимы не ко всем моделям, представленным на Рис. 5.7. Отметим, что в этом месте, видимо по невнимательности, цитируются не те работы коллаборации Super-Kamiokande, в которых были получены упомянутые ограничения. Кроме того, из текста неясно, применялись ли при анализе ускорительные ограничения на такую темную материю, например, из поисков событий с адронным джетом и несохранением поперечной энергии.

Несмотря на отмеченные замечания они не умаляют многочисленные достоинства диссертационной работы. Результаты, полученные в диссертации, являются новыми и вполне обоснованными. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне, представляет собой законченную научно-квалификационную работу и удовлетворяет всем требованиям "Положения о присуждении ученых степеней", утверждённого постановлением правительства РФ от 24 сентября 2013 года №842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а её автор, Таныйлдызы Шюкрю Ханиф, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Официальный оппонент:

Демидов Сергей Владимирович,
кандидат физико-математических наук,
научный сотрудник отдела теоретической физики ИЯИ РАН,
e-mail: demidov@ms2.inr.ac.ru
тел: +7(903)534-51-94
адрес: 117312 Москва, пр-т 60-летия Октября, 7а
дата составления отзыва: 24 ноября 2015 года

Подпись С. В. Демидова заверяю:
ученый секретарь ИЯИ РАН,
к.ф.-м.н., А. Д. Селидовкин

