

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА  
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ ИМЕНИ Д.В. СКОБЕЛЬЦЫНА

---

На правах рукописи

ФИЛИППОВ Юрий Петрович

ПЕТЛЕВЫЕ ЭФФЕКТЫ  
ВО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ БОЗОНОВ ХИГГСА  
В МИНИМАЛЬНОЙ СУПЕРСИММЕТРИЧНОЙ  
СТАНДАРТНОЙ МОДЕЛИ

Специальность 01.04.02 – теоретическая физика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2007

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Самарский государственный университет» на кафедре общей и теоретической физики.

**Научный руководитель** кандидат физико-математических наук,  
профессор  
Бирюков Александр Александрович  
(СамГУ, г. Самара).

**Официальные оппоненты:** доктор физико-математических наук,  
ведущий научный сотрудник  
Волобуев Игорь Павлович  
(НИИЯФ МГУ, г. Москва),  
  
доктор физико-математических наук,  
главный научный сотрудник  
Казаков Дмитрий Игоревич  
(ОИЯИ, г. Дубна).

**Ведущая организация** Государственный научный центр  
Российской Федерации  
«Институт физики высоких энергий»  
(г. Протвино).

Защита состоится "15" февраля 2007 года в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета К.501.001.03 по теоретической физике при Московском государственном университете им. М. В. Ломоносова по адресу: 119992, г. Москва, Ленинские горы, НИИЯФ МГУ, 19 корпус, аудитория 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИИЯФ МГУ.

Автореферат разослан "11" января 2007 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
К.501.001.03,  
кандидат физ.-мат. наук

Манагадзе А.К.

# ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. *Механизм генерации масс фундаментальных частиц* (МГМ) – один из ключевых элементов в построении большого класса калибровочных моделей квантовой теории поля (КТП), например, Стандартной модели (СМ), Минимальной суперсимметричной стандартной модели (МССМ) и их модификаций. Благодаря этому механизму в таких калибровочных моделях удается непротиворечивым образом получить массовые члены для полей материи и полей промежуточных калибровочных бозонов. При этом модели сохраняют ряд важных свойств, таких как калибровочная инвариантность и перенормируемость. МГМ основан на введении калибровочно инвариантного юкавского взаимодействия скалярных полей с фермионами [1] и механизме Хиггса спонтанного нарушения калибровочной симметрии. Последний, в свою очередь, состоит в том, что потенциал самодействия скалярных полей достигает минимума при их ненулевых значениях, т.е. у нейтральных компонент скалярных полей появляются ненулевые вакуумные средние [2–10].

Такой механизм абсолютно необходим в калибровочных теориях слабых взаимодействий, однако на сегодняшний день он не получил еще прямого экспериментального подтверждения. Последнее должно быть достигнуто путем выполнения программы, сформулированной в работе [11] в рамках СМ и МССМ.

1. Бозоны Хиггса (БХ) должны быть открыты. Их массы должны быть измерены.

2. Необходимо доказать прямо пропорциональную зависимость констант взаимодействия бозонов Хиггса с лептонами и кварками от масс последних, т. е.  $\lambda_f \sim m_f$ .

3. Константы взаимодействия бозонов Хиггса, предсказанные в рамках модели, должны быть идентифицированы на эксперименте. Задача становится еще более актуальной в суперсимметричных модификациях СМ, где структура констант определяется также принципами суперсим-

метрии и механизмом ее мягкого нарушения (последний в настоящее время также не имеет прямого экспериментального подтверждения).

В программах предстоящих исследований на будущих линейных коллайдерах (TESLA, NLC, ILC), а также на коллайдере LHC одной из главных задач является определение констант взаимодействия бозонов Хиггса.

Для решения проблемы определения констант взаимодействия БХ необходимо, *во-первых*, выполнить в низшем приближении анализ сечений элементарных процессов, предсказываемых в рамках модели, аналитические выражения для которых определяются указанными константами. Выявить среди прочих те процессы, которые характеризуются максимальными значениями сечений и чувствительности последних к вариации констант. *Во-вторых*, необходимо выполнить высокоточные теоретические расчеты констант взаимодействия БХ, их масс и сечений избранных процессов, сопровождающиеся учетом петлевых поправок высших порядков теории возмущений к указанным параметрам. Расчет последних уже в первом порядке теории возмущений в рамках указанных моделей сопряжен с огромными математическими вычислениями. Последние обусловлены большим числом возможных типов взаимодействий, дающих вклад в соответствующий процесс. И все же учет радиационных поправок принципиально необходим, поскольку: а) неоднократно было показано, что однопетлевые поправки к параметрам хиггсовского сектора в указанных КТП - моделях могут быть существенными и, следовательно, значительно изменять древесные значения параметров [12–15]; б) прецизионные теоретические предсказания для физических наблюдаемых дадут рецепты их оптимального экспериментального поиска. При положительном исходе последнего они позволят определить природу бозонов Хиггса и, следовательно, модель, адекватно описывающую их свойства. *В-третьих*, выполнить серию экспериментов по измерению сечений избранных процессов данной модели и провести сравнительный анализ результатов теории и эксперимента. Согласование данных экспериментов с

результатами теоретических расчетов сечений (для конкретного выбора модели) позволит однозначно зафиксировать константы взаимодействия и, следовательно, определить структуру хиггсовского потенциала.

В связи со сказанным **целью работы** является прецизионный теоретический расчет вершинных функций (констант) трехчастичных взаимодействий бозонов Хиггса в рамках Минимальной суперсимметричной стандартной модели (МССМ) и соответствующих физических наблюдаемых – ширины распада  $H \rightarrow hh$  и сечений процессов  $e^+e^- \rightarrow hh$ ,  $e^+e^- \rightarrow hH$ ,  $e^+e^- \rightarrow HH$ ,  $e^+e^- \rightarrow AA$ , включающих указанные взаимодействия и могущих быть протестированными данными соответствующих экспериментов на будущих коллайдерах с высокой светимостью. Расчет проводится в однопетлевом приближении в рамках фейнмановского диаграммного подхода (ФДП).

В соответствии со сформулированной целью в рамках настоящей работы решены следующие **основные задачи, результаты решений которых выносятся на защиту**:

1. Расчет однопетлевых вкладов (допустимых в МССМ) в одно-, двух-, трех- и четырехточечные вершинные функции (ВФ). Представление однопетлевых вкладов в аналитической форме.

2. Построение алгоритмов алгебраической редукции скалярных функций  $B_0$ ,  $C_0$  для представления их в форме, наиболее удобной для использования процедуры перенормировки и численного расчета.

3. Расчет системы контрчленов (в рамках On-shell-схемы перенормировки электрослабого и хиггсовского секторов МССМ [16]) для следующих объектов: а) одноточечных ВФ бозонов Хиггса  $h$ ,  $H$ ; б) собственных энергий  $\gamma$ ,  $W$ ,  $Z$ -калибровочных бозонов,  $h$ ,  $A$ ,  $H$ -бозонов Хиггса; в) энергий смешивания  $\gamma - Z$ ,  $h - H$ ,  $A - Z$ ; г) шести констант трехчастичного взаимодействия нейтральных БХ МССМ. Представление их в терминах как исходных контрчленных параметров и констант перенормировки поля  $(\delta m_1^2, \delta m_2^2, \delta m_{12}^2, \delta v_1, \delta v_2, Z_{H_1}, Z_{H_2}, Z_1^B, Z_2^B, Z_1^W, Z_2^W)$ , так и неперенормированных собственных энергий, энергий смешивания

и одноточечных ВФ для БХ.

4. Расчет шести констант трехчастичного взаимодействия нейтральных БХ ( $\lambda_{hhh}$ ,  $\lambda_{hhH}$ ,  $\lambda_{hHH}$ ,  $\lambda_{HHH}$ ,  $\lambda_{hAA}$ ,  $\lambda_{HAA}$ ) в однопетлевом приближении с учетом  $t\tilde{t}$ -,  $b\tilde{b}$ -,  $c\tilde{c}$ -,  $\tau\tilde{\tau}$ -петель в ФДП.

5. Расчет ширины распада  $\Gamma(H \rightarrow hh)$  с учетом  $t\tilde{t}$ -,  $b\tilde{b}$ -,  $c\tilde{c}$ -,  $\tau\tilde{\tau}$ -петель в ФДП.

6. Расчет амплитуд и полных сечений процессов  $e^+e^- \rightarrow hh$ ,  $e^+e^- \rightarrow hH$ ,  $e^+e^- \rightarrow HH$ ,  $e^+e^- \rightarrow AA$  в полном однопетлевом приближении в ФДП.

**Общая методика исследований.** В данной работе при решении поставленных задач используются следующие традиционные методы квантово-полевых вычислений:

1. Основным методом решения поставленных задач является метод квантово-полевой теории возмущений с использованием фейнмановского диаграммного подхода.

2. В петлевых вычислениях используется калибровка т'Хоофта-Фейнмана.

3. Приемы тензорной [17, 18] и размерной [19, 20] редукции последовательно используются при вычислении аналитических выражений соответствующих фейнмановских диаграмм.

4. *On-shell* - схема [16] процедуры перенормировки применена для получения конечных физических результатов.

5. Результаты петлевых вычислений, как правило, представляются линейными комбинациями скалярных интегралов Велтмана-Пассарино [21, 22].

6. Для численного анализа результатов используются как традиционные [21], так и новые алгоритмы расчета указанных интегралов.

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается (1) строгостью используемых автором общепринятых методов квантовой теории поля, органически сочетающих в себе как традиционные теоретико-полевые методы, так и новейшие алгоритмы символьных и численных

компьютерных расчетов; (2) согласием данных результатов, полученных в рамках фейнмановского диаграммного подхода с результатами предшественников, полученных в рамках других пертурбативных подходов; (3) согласием теоретических предсказаний (полученных в настоящей работе) для областей допустимых значений исследуемых величин с имеющимися для них экспериментальными ограничениями.

**Научная новизна диссертации** состоит в следующем.

1. В рамках фейнмановского диаграммного подхода с использованием калибровки т'Хоофта-Фейнмана сформулирован новый *подход базисных диаграмм Фейнмана* (БДФ), основанный на обобщении стандартных правил Фейнмана СМ и МССМ. Выполнена систематизация всех фейнмановских сильносвязных однопетлевых диаграмм по указанным БДФ. Результаты для однопетлевых вкладов в одно-, двух-, трех-, четырехточечные ВФ представлены в виде суперпозиции дираковских матричных структур. При этом коэффициентами разложения являются линейные комбинации минимального набора стандартных скалярных интегралов. Преимуществами подхода являются компактность аналитических результатов и удобство в практическом использовании последних для построения компьютерных программ. Скорость машинных вычислений петлевых поправок согласно данному алгоритму много больше, чем у программ-аналогов (FeynCalc, Form), поскольку затяжные операции тензорной и алгебраической редукций изначально выполнены.

2. В работе дано новое представление результатов алгебраической редукции скалярных функций  $B_0$ ,  $C_0$ . Предложенное представление является оптимальным при использовании процедуры перенормировки и численного расчета.

3. При реализации программы перенормировки [16] аналитически решена система 11 линеаризованных уравнений, определяемых условиями перенормировки, относительно переменных  $\delta m_1^2$ ,  $\delta m_2^2$ ,  $\delta m_{12}^2$ ,  $\delta v_1$ ,  $\delta v_2$ ,  $Z_{H_1}$ ,  $Z_{H_2}$ ,  $Z_1^B$ ,  $Z_2^B$ ,  $Z_1^W$ ,  $Z_2^W$ . Полное решение системы впервые представлено в редуцированном явном виде. Контрчлены для констант взаимодействия,

собственных энергий и энергий смешивания БХ получены в аналитической форме, в наиболее общем виде.

4. В данной работе впервые построены аналитические выражения для шести констант трехчастичного взаимодействия нейтральных бозонов Хиггса МССМ в первом порядке теории возмущений, с учетом  $t\tilde{t}$ -,  $b\tilde{b}$ -,  $c\tilde{c}$ -,  $\tau\tilde{\tau}$ -петель, в рамках ФДП.

5. Получены новые аналитические выражения для ширины  $\Gamma(H \rightarrow hh)$  с учетом  $t\tilde{t}$ -,  $b\tilde{b}$ -,  $c\tilde{c}$ -,  $\tau\tilde{\tau}$ -петель в рамках ФДП.

6. Впервые построены и представлены в явном виде аналитические выражения для амплитуд и полных сечений процессов  $e^+e^- \rightarrow hh$ ,  $e^+e^- \rightarrow hH$ ,  $e^+e^- \rightarrow HH$ ,  $e^+e^- \rightarrow AA$  в рамках модели МССМ с учетом полного набора однопетлевых диаграмм. Проведена оценка роли петлевых вкладов суперсимметричных частиц в определении итогового результата.

**Личный вклад автора.** Все результаты, составившие основу диссертации, получены лично автором или при его определяющем участии. Ряд работ выполнен с М.Н. Дубининым (Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, МГУ), В.М. Долгополовым, М.В. Долгополовым, И.А. Смирновым, А.В. Бачуриной, А.Н. Ивушкиным (Самарский государственный университет).

### **Практическая значимость работы.**

Полученные результаты и методы могут быть использованы для интерпретации результатов экспериментов по изучению природы и свойств БХ, для определения значений свободных параметров моделей или области их допустимых значений.

Разработанные алгоритмы и подходы удобны для составления компьютерных программ, что и было использовано при создании комплекса компьютерных программ VertexLoopCalc-2, предназначенного для петлевых вычислений вершинных функций.

**Апробация работы.** Основные результаты настоящей работы докладывались и обсуждались автором на следующих научных семинарах



и конференциях:

XVII, XVIII Международных семинарах по физике высоких энергий и квантовой теории поля (QFTHEP) (Самара, 2003; Санкт-Петербург, 2004);

научной конференции секции ядерной физики ОФН РАН "Физика фундаментальных взаимодействий" (Москва, ИТЭФ, 2002, 2005);

международном семинаре "Selected Problems of Modern Physics" (Саратов, 2003);

шестой международной школе, посвященной вопросам физики высоких энергий ИТЭФ (Москва, ИТЭФ, 2003);

учебно-методической конференции "Межсессионная работа со студентами: традиционные и новые формы" (Самара, СамГУ, 2001);

научно-практической конференции посвященной памяти профессора Л.И. Кудряшева "Прикладные математические задачи в машиностроении и экономике" (Самара, СГАУ, СамГУ, СГЭА, 2001).

конференции "100 лет квантовой теории" (Самара, СамГУ, 2001);

научном семинаре "Проблемы связанных состояний в квантовой теории поля" (Самара, МГУ, СамГУ, 2004);

конференции "Концепции симметрии и фундаментальных полей в квантовой физике XXI века" (Самара, СамГУ, 2005);

конференции "Проблемы фундаментальной физики XXI века" (Самара, СамГУ, 2005);

третьей всероссийской школе "Физика фундаментальных взаимодействий посвященной вопросам физики высоких энергий (Протвино, фонд "Династия 2006);

научных конференциях преподавателей и сотрудников Самарского государственного университета (Самара, СамГУ, 2002-2006);

научных семинарах кафедры общей и теоретической физики (Самара, СамГУ, 2001-2006).

Исследования были поддержаны грантами 02-02-26561-зм, 03-02-26501-зм российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), гран-

том 294Е2.4К Самарского областного конкурса 2006 года, стипендиальной программой для аспирантов фонда "Династия".

По теме диссертации имеется 18 публикаций, среди них 9 журнальных статей (5 в реферируемых журналах, внесенных в списки ВАКа), 2 тезисов в трудах международных конференций, 2 статьи в трудах региональных конференций.

**Объем и структура диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы (170 наименований), приложений. Работа содержит 34 рисунка и 6 таблиц. Общий объем диссертации – 163 страницы машинописного текста.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **первой главе** представлен краткий обзор МССМ: базисные принципы, на которых основана модель, состав полей (суперполей), полный лагранжиан. Особое внимание уделяется хиггсовскому сектору МССМ и, в частности, теоретическим аспектам построения вершинных функций взаимодействий бозонов Хиггса в низшем приближении. Представлен полный спектр физических полей МССМ.

**Вторая глава** посвящена детальному анализу сечений процессов парного и трехчастичного рождения БХ в низшем приближении, допускаемых МССМ, которые могут быть исследованы как на линейных  $e^+e^-$ -коллайдерах, так и на ЛНС. Среди прочих определяются процессы, имеющие максимальные сечения и чувствительности к вариации констант. Определяются оптимальные условия для идентификации констант взаимодействия.

В **третьей главе** представлен краткий обзор основных пертурбативных подходов, используемых в настоящее время при вычислении параметров МССМ в высших порядках теории возмущений. Отдельный параграф посвящен определению ВФ и ее роли в расчете наблюдаемых. Сформулирован новый подход базисных диаграмм Фейнмана. Представлен полный набор одно-, двух-, трех-, четырехточечных БДФ. Проведена

систематизация однопетлевых фейнмановских диаграмм по представленным БДФ. Выполнен расчет однопетлевых вкладов в одно-, двух-, трех-, четырехточечную ВФ. Итоговые результаты представлены в аналитической форме.

**В четвертой главе** рассмотрена On-shell-схема перенормировки электрослабого и хиггсовского секторов, предложенная в работе [16]. Построена линеаризованная система 11 уравнений, определяемых условиями перенормировки. Получены аналитическое решение системы уравнений, а также явный аналитический вид контрчленов для шести констант взаимодействия, собственных энергий и энергий смешивания нейтральных БХ МССМ. Здесь также представлен новый алгоритм алгебраической редукции скалярных интегралов  $B_0$ ,  $C_0$ . Итоговые результаты для интегралов представлены в форме, адаптированной к процедуре перенормировки и численным расчетам.

**Пятая глава** посвящена расчету шести констант взаимодействия  $\lambda_{hhh}$ ,  $\lambda_{hhH}$ ,  $\lambda_{hHH}$ ,  $\lambda_{HHH}$ ,  $\lambda_{hAA}$ ,  $\lambda_{HAA}$  и ширины распада  $\Gamma(H \rightarrow hh)$  в однопетлевом приближении с учетом  $t\tilde{t}$ -,  $b\tilde{b}$ -,  $c\tilde{c}$ -,  $\tau\tilde{\tau}$ -петель. Результаты расчетов представлены в аналитическом виде. Сравнительный анализ новых результатов с результатами предшественников (полученными в рамках ренормгруппового подхода и метода эффективного потенциала) показал, что в определенной области пространства параметров данные поправки значительны, поэтому их учет необходим для высокоточного определения констант взаимодействия. На примере констант  $\lambda_{hHH}$ ,  $\lambda_{HAA}$  при больших  $\text{tg } \beta$  продемонстрировано следующее: а) вклады от  $b\tilde{b}$ -,  $c\tilde{c}$ -,  $\tau\tilde{\tau}$ -петель могут существенно изменить итоговый результат, поэтому их необходимо учитывать; б) использование ФДП позволяет учесть пороговые эффекты. Наилучшее согласование предсказаний для  $\Gamma(H \rightarrow hh)$  различных подходов достигается при малых  $\text{tg } \beta$  и массе  $M_A = 250$  ГэВ. Здесь ширина достигает максимального значения 0.17 ГэВ и превосходит результат, полученный в древесном приближении, в 3 раза. Полученное значение ширины распада увеличивает вероятность детектирования сиг-

налов соответствующих процессов и, следовательно, вероятность высокоточного определения констант взаимодействия.

**Шестая глава** посвящена расчету амплитуд и полных сечений процессов  $e^+e^- \rightarrow hh$ ,  $e^+e^- \rightarrow hH$ ,  $e^+e^- \rightarrow HH$ ,  $e^+e^- \rightarrow AA$  в рамках МССМ в первом порядке теории возмущений с учетом полного набора однопетлевых диаграмм в приближении  $m_e \rightarrow 0$ . Получены аналитические выражения для указанных величин, численные результаты представлены в графической форме. Показано, что сечение процесса  $e^+e^- \rightarrow hh$  достигает максимального значения среди прочих процессов (и одного порядка с сечением, вычисленным в рамках СМ). При энергии  $\sqrt{s} = 500$  ГэВ, интегральной светимости  $\int \mathcal{L} \geq 500$  фбн<sup>-1</sup> и продольной поляризации  $e^+e^-$ -пучков возможно рождение 520 событий для процесса  $e^+e^- \rightarrow hh$  (при  $M_h = 115$  ГэВ), 320 событий для  $e^+e^- \rightarrow HH$ , 300 событий для  $e^+e^- \rightarrow AA$  (при  $M_{H,A} = 120$  ГэВ). Указанные количества событий близки к значениям, полученным в работе [23], согласно которым при тех же значениях масс бозонов Хиггса ожидается появление 380 событий, отвечающих каналу  $e^+e^- \rightarrow hh$ , 400 событий канала  $e^+e^- \rightarrow HH$  и 200 событий для канала  $e^+e^- \rightarrow AA$ . Даже при  $M_{H,A} \approx 500$  ГэВ и  $\sqrt{s} = 1.5$  ТэВ возможно накопление не менее 200 событий для каждого из процессов. Таким образом есть основания полагать, что сигналы, соответствующие указанным процессам, будут детектированы. Процесс  $e^+e^- \rightarrow hH$  имеет малое сечение ( $\mathcal{O} \sim 10^{-2}$  фбн), что существенно затрудняет детектирование искомого сигнала.

В **заключении** диссертации приведена общая характеристика работы и сделаны основные выводы из полученных результатов.

Основные результаты для двух-, трехточечных скалярных интегралов, а также вершинные факторы базисных древесных ВФ, используемых в работе, вынесены в **приложения**.

Все используемые и цитируемые источники представлены в заключении работы в разделе "**Литература**".

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проблема высокоточного определения констант трехчастичного взаимодействия нейтральных бозонов Хиггса МССМ принципиально не может быть решена без прецизионного расчета (с учетом однопетлевых вкладов) как самих констант взаимодействия, так и сечений процессов рождения пары БХ. В связи с чем представлены следующие результаты:

1. В рамках фейнмановского диаграммного подхода с использованием калибровки т'Хоофта-Фейнмана был развит *подход базисных диаграмм Фейнмана*. В рамках МССМ с использованием нового подхода выполнена систематизация всевозможных одно-четырёхточечных однопетлевых диаграмм Фейнмана по базисным диаграммам Фейнмана. Данным диаграммам сопоставлены аналитические выражения, определяющие однопетлевые вклады в одно-, двух-, трех-, четырёхточечные вершинные функции. Данные аналитические выражения с использованием стандартной техники тензорной, размерной и алгебраической редукции представлены в виде суперпозиции дираковских матричных структур, где коэффициентами разложения являются линейные комбинации минимального набора стандартных скалярных интегралов.

2. Дано новое представление результатов алгебраической редукции скалярных интегралов  $B_0, C_0$ , которое является удобным для использования процедуры перенормировки и численного расчета.

3. В рамках предложенной А. Дабелштейном On-shell - схемы перенормировки в настоящей работе получены аналитические выражения контрчленов для следующих объектов: а) одноточечных ВФ бозонов Хиггса  $h, H$ ; б) собственных энергий  $\gamma, W, Z$ -калибровочных бозонов,  $h, A, H$ -бозонов Хиггса; в) энергий смешивания  $\gamma - Z, h - H, A - Z$ ; г) шести констант трехчастичного взаимодействия нейтральных БХ МССМ. Выражения для контрчленов использованы при построении перенормированной амплитуды распада  $H \rightarrow hh$ . Они также могут быть использованы при построении перенормированных амплитуд других элементарных процессов.

4. В рамках ФДП выполнен расчет шести констант трехчастичного взаимодействия нейтральных БХ ( $\lambda_{hhh}$ ,  $\lambda_{hhH}$ ,  $\lambda_{hHH}$ ,  $\lambda_{HHH}$ ,  $\lambda_{hAA}$ ,  $\lambda_{HAA}$ ) в однопетлевом приближении с учетом  $t\tilde{t}$ -,  $b\tilde{b}$ -,  $c\tilde{c}$ -,  $\tau\tilde{\tau}$ -петель. Сравнительный анализ новых результатов с результатами предшественников показал, что в определенной области пространства параметров данные поправки значительны, поэтому их учет необходим для высокоточного определения констант взаимодействия. На примере констант  $\lambda_{hHH}$ ,  $\lambda_{hAA}$  при больших  $\text{tg } \beta$  продемонстрировано следующее: а) вклады от  $b\tilde{b}$ -,  $c\tilde{c}$ -,  $\tau\tilde{\tau}$ -петель могут существенно изменить итоговый результат, поэтому их необходимо учитывать; б) использование ФДП позволяет учесть пороговые эффекты.

5. В рамках ФДП выполнен расчет ширины распада  $\Gamma(H \rightarrow hh)$  с учетом  $t\tilde{t}$ -,  $b\tilde{b}$ -,  $c\tilde{c}$ -,  $\tau\tilde{\tau}$ -петель. Сравнительный анализ новых результатов с результатами предшественников показал, что наилучшее согласование предсказаний различных подходов достигается при малых  $\text{tg } \beta$  и массе  $M_A = 250$  ГэВ. Здесь ширина достигает максимального значения 0.17 ГэВ и превосходит древесный результат в 3 раза. Полученное значение ширины распада увеличивает вероятность детектирования сигналов соответствующих процессов и, следовательно, вероятность высокоточного определения констант взаимодействия.

6. Проведен расчет амплитуд и полных сечений процессов  $e^+e^- \rightarrow hh$ ,  $e^+e^- \rightarrow hH$ ,  $e^+e^- \rightarrow HH$ ,  $e^+e^- \rightarrow AA$  для неполяризованных  $e^+e^-$ -пучков в полном однопетлевом приближении в рамках ФДП. Показано, что сечение процесса  $e^+e^- \rightarrow hh$  достигает максимального значения среди прочих процессов (и одного порядка с СМ-аналогом). При энергии  $\sqrt{s} = 500$  ГэВ, интегральной светимости  $\int \mathcal{L} \geq 500$  фбн<sup>-1</sup> и условии продольной поляризации  $e^+e^-$ -пучков возможно рождение 520 событий для процесса  $e^+e^- \rightarrow hh$  (при  $M_h = 115$  ГэВ), 320(300) событий для  $e^+e^- \rightarrow HH(AA)$  (при  $M_{H,A} = 120$  ГэВ). При  $M_{H,A} \approx 500$  ГэВ и  $\sqrt{s} = 1.5$  ТэВ возможно накопление не менее 200 событий для каждого из процессов. Указанные количества событий близки к значениям, по-

лученным в работе [23] (380 событий для  $e^+e^- \rightarrow hh$ , 400 событий для  $e^+e^- \rightarrow HH$ , 200 событий для  $e^+e^- \rightarrow AA$  при тех же значениях масс бозонов Хиггса). Таким образом есть основания полагать, что сигналы, соответствующие указанным процессам, будут детектированы. Процесс  $e^+e^- \rightarrow hH$  имеет малое сечение ( $\mathcal{O} \sim 10^{-2}$  фбн), что существенно затрудняет детектирование искомого сигнала.

Полученные выражения для сечений данных процессов позволят более точно определить сечения процессов  $WW$ -аннигиляции (альтернативного класса процессов по шкале энергии, значения сечений которых того же порядка, что и у рассмотренных процессов) на основе экспериментальных данных о количестве наблюдавшихся событий, а следовательно, и сделать более точное предсказание значений констант взаимодействия.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах.

### I. Статьи в журналах.

1. Долгополов, М.В. Вершинные функции взаимодействия нейтральных бозонов Хиггса  $h^0$ ,  $H^0$  в МССМ: однопетлевой анализ / М.В. Долгополов, Ю.П. Филиппов // ЯФ. – 2004. – Т.67. – № 3. – С. 609–613.
2. Филиппов, Ю.П. Юкавские радиационные поправки к каплингам трехчастичного взаимодействия нейтральных  $CP$ -четных бозонов Хиггса и ширине распада  $H \rightarrow hh$  в МССМ / Ю.П. Филиппов // ЯФ. – 2007. – Т. 70 – № 6. Принята в печать; Philippov, Yu. Yukawa radiative corrections to the trilinear self-couplings of neutral  $CP$ -even Higgs bosons and decay width  $\Gamma(H \rightarrow hh)$  in the MSSM / Yu. Philippov // eprint: hep-ph/0611260. 12p.
3. Долгополов, М.В. Суперсимметричная модель с нарушением  $CP$ -инвариантности. 2 Парное рождение нейтральных бозонов Хиг-

гса на ЛНС/ М.В. Долгополов, М.Н. Дубинин, И.А. Смирнов, Ю.П. Филиппов // Вестн. Самарск. гос. ун-та. Спец. выпуск. – 2003. – С. 131–148.

4. Dolgopolo, M.V. The trilinear neutral Higgs self-couplings in the MSSM. Complete one-loop analysis / M.V. Dolgopolo, Yu. P. Philippov // Вестн. Самарск. гос. ун-та. 2-й спец. выпуск. – 2003. – С. 87–95; eprint: hep-ph/0310263. 6p.

5. Филиппов, Ю.П. Исследование трехчастичного взаимодействия нейтральных бозонов Хиггса МССМ с учетом юкавских однопетлевых поправок / Ю.П. Филиппов // Вестн. Самарск. гос. ун-та. – 2006. – № 3(43). – С. 167–178.

6. Филиппов, Ю.П. Вершинные функции самодействия CP-четных нейтральных бозонов Хиггса ( $h^0$ ,  $H^0$ ) в модели МССМ: однопетлевой анализ / Ю.П. Филиппов // Аспирант. вестн. Поволжья. – 2002. – № 2. – С. 64–66.

7. Филиппов, Ю.П. Метод ветвления в вычислении скалярных  $N$ -точечных интегралов / Ю.П. Филиппов // Теор. физика. – 2004. – № 5. – С. 66–80.

8. Филиппов, Ю.П. Новое представление результатов алгебраической редукции  $B_0$ ,  $C_0$  скалярных интегралов // Теор. физика. – 2005. – № 6. – С. 86–97.

9. Филиппов, Ю.П. Ширина распада  $H \rightarrow hh$  в МССМ с учетом юкавских радиационных поправок / Ю.П. Филиппов // Теор. физика. – 2006. – № 7. Принята в печать.

## II. В трудах международных и всероссийских конференций.

1. Dolgopolo, M.V. The trilinear neutral Higgs self-couplings in the MSSM. Complete one-loop analysis / M.V. Dolgopolo, Yu.P. Philippov // Proceedings of the XVII International Workshop QFTHEP'2003. – MSU, SINP. – P. 170–175.



2. Philippov, Yu.P. The decay  $H \rightarrow hh$  in the MSSM. Complete one-loop analysis / Yu.P. Philippov // Proceedings of the XVIII International Workshop QFTHEP'2004. – MSU, SINP. – P. 172–177.
3. Филиппов, Ю.П. Однопетлевые фермионные и сфермионные вклады в двух-, трех- и четырехточечные функции Грина / Ю.П. Филиппов // V научная конференция молодых ученых и специалистов ОИЯИ: тез. докл. Дубна: ОИЯИ, 2001. – С.144–146.
4. Филиппов, Ю.П. Вершинные функции трехчастичного взаимодействия нейтральных бозонов Хигга в модели МССМ: однопетлевой анализ / Ю.П. Филиппов // VII научная конференция молодых ученых и специалистов ОИЯИ: тез. докл. Дубна: ОИЯИ, 2003. – С.191–194.
- 5 Бачурина, А.В. Квантовые поправки к массам калибровочных бозонов и оценка на массу хиггсовского бозона / А.В. Бачурина, М.В. Долгополов, А.Н. Ивушкин, Ю.П. Филиппов // Науч.-практич. конф., посвящ. памяти проф. Л.И. Кудряшева: сб. докл., ч. 1. Самара: Изд-во СГАУ, СамГУ, СГЭА, 2001. – С. 15–17.
6. Долгополов, В.М. Однопетлевые интегралы для фермионных вкладов / В.М. Долгополов, М.В. Долгополов, Ю.П. Филиппов // Науч.-практич. конф., посвящ. памяти проф. Л.И. Кудряшева: сб. докл., ч. 1. Самара: Изд-во СГАУ, СамГУ, СГЭА, 2001. – С.17–18.
7. Филиппов, Ю.П. Новое представление результатов алгебраической редукции однопетлевых скалярных интегралов / Ю.П. Филиппов // Науч. конф. "Концепции симметрии и фундаментальных полей в квантовой физике XXI века": тез. докл. Самара: Изд-во "Универс-групп 2005. – С. 73–75.
8. Филиппов, Ю.П. Перспективы экспериментального исследования каплингов трехчастичного взаимодействия нейтральных бозонов Хиггса МССМ на будущих коллайдерах / Ю.П. Филиппов // Науч. конф. "Проблемы фундаментальной физики XXI века": тез. докл. Самара: Изд-во "Универс-групп 2005. – С. 94–95.

## Список литературы

- [1] Аберс, Е. Калибровочные теории / Е. Аберс, Б. Ли. – Новосибирск: ИО НФМИ, 1998. – 200 с.
- [2] Goldstone, J. Field theories with "superconductor" solutions / J. Goldstone // Nuovo Cimento. – 1961. – V.19. – P. 154–164.
- [3] Nambu, Y. Dynamical model of elementary particles based on an analogy with superconductivity. I / Y. Nambu, G. Jona-Lasinio // Phys. Rev. – 1961. – V.122. – P. 345–358.
- [4] Goldstone, J. Broken symmetries / J. Goldstone, A. Salam, S. Weinberg // Phys. Rev. – 1962. – V.127. – P. 965–970.
- [5] Higgs, P.W. Broken symmetries, massless particles and gauge fields / P.W. Higgs // Phys. Lett. – 1964. – V.12. – P. 132–133.
- [6] Brout, R. Broken symmetry and the mass of gauge vector mesons / R. Brout, E. Englert // Phys. Rev. Lett. – 1964. – V.13. – P. 321–322.
- [7] Higgs, P.W. Broken symmetries and the masses of gauge bosons / P.W. Higgs // Phys. Rev. Lett. – 1964. – V.13. – P. 508–509.
- [8] Guralnik, G.S. Global conservation laws and massless particles / G.S. Guralnik, C.R. Hagen, T.W.B. Kibble // Phys. Rev. Lett. – 1964. – V.13. – P. 585–587.
- [9] Higgs, P.W. Spontaneous symmetry breakdown without massless bosons / P.W. Higgs // Phys. Rev. – 1966. – V.145. – P. 1156–1163.
- [10] Kibble, T.W.B. Symmetry breaking in nonabelian gauge theories / T.W.B. Kibble // Phys. Rev. – 1967. – V.155. – P. 1554–1561.
- [11] Zerwas, P.M. Physics with an  $e^+ e^-$  linear collider at high luminosity / P.M. Zerwas // Eprint:hep-ph/0003221.
- [12] Haber, H.E. Can the mass of the lightest Higgs boson of the minimal supersymmetric model be larger than  $M_Z$ ? / H.E. Haber, R. Hempfling // Phys. Rev. Lett. – 1991. – V.66. – P. 1815–1818.
- [13] Haber, H.E. The decay  $h_0 \rightarrow A_0 A_0$  in the minimal supersymmetric model / H.E. Haber, R. Hempfling, Y. Nir // Phys. Rev. D. – 1992. – V.46. – P. 3015–3024.

- [14] Ellis, J. Radiative corrections to the masses of supersymmetric Higgs bosons / J. Ellis, G. Ridolfi, F. Zwirner // Phys. Lett. B. – 1991. – V. 257. – P. 83–91.
- [15] Okada, Y. Upper bound of the lightest Higgs boson mass in the minimal supersymmetric standard model / Y. Okada, M. Yamaguchi, T. Yanagida // Prog. Theor. Phys. – 1991. – V. 85. – P. 1–6.
- [16] Dabelstein, A. The one loop renormalization of the MSSM higgs sector and its application to the neutral scalar higgs masses / A. Dabelstein // Z. Phys. – 1995. – C 67. – P. 495–512.
- [17] Tarasov, O.V. Reduction of Feynman graph amplitudes to a minimal set of basic integrals / O.V. Tarasov // Acta Phys. Polon. B. – 1998. – V. 29. – P. 2655.
- [18] Devaraj, G. Reduction of one loop tensor form-factors to scalar integrals: A General scheme / G. Devaraj, R.G. Stuart // Nucl. Phys. B. – 1998. – V. 519. – P. 483–513.
- [19] Gates, S.J. Superspace. Frontiers in Physics / S.J. Gates, M.T. Grisaru, M. Rocek, W. Siegel. – New York: Benjamin Cummings, 1983.
- [20] Dragon, N. Supersymmetry and supergravity / N. Dragon, U. Ellwanger, M.G. Schmidt // Prg. Part. Nucl. Phys. – 1987. – V. 18. – P. 1.
- [21] 't Hooft, G. Scalar one loop integrals / G. 't Hooft, M. Veltman // Nucl. Phys. B. – 1979. – V. 153. – P. 365–401.
- [22] Passarino, G. One loop corrections for  $e^+e^-$  annihilation into  $\mu^+\mu^-$  in the weinberg model / G. Passarino, M. Veltman // Nucl. Phys. B. – 1979. – V. 160. – P. 151.
- [23] Djouadi, A. Loop induced Higgs boson pair production at  $e^+e^-$  Colliders / A. Djouadi, V. Driesen, C. Jünger // Phys. Rev. D. – 1996. – V. 54. – P. 759–769.

**ФИЛИПШОВ Юрий Петрович**

**ПЕТЛЕВЫЕ ЭФФЕКТЫ  
ВО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ БОЗОНОВ ХИГГСА  
В МИНИМАЛЬНОЙ СУПЕРСИММЕТРИЧНОЙ  
СТАНДАРТНОЙ МОДЕЛИ**

Специальность 01.04.02 – теоретическая физика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Подписано в печать 23 ноября 2006 г.

Формат 60 × 84/16. Бумага офсетная. Печать оперативная.

Объем 1 п.л. Тираж 100 экз. Заказ № 1330

443011 г. Самара, ул. Академика Павлова, 1

Отпечатано УОП СамГУ