ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

2003–15
На правах рукописи

Зенин Олег Валентинович

ДВУХПЕТЛЕВЫЕ РЕНОРМГРУППОВЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ НА СТАНДАРТНУЮ МОДЕЛЬ И ТЯЖЕЛЫЕ ПОКОЛЕНИЯ

01.04.23 — физика высоких энергий

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико–математических наук

Протвино 2003

М–24

УДК 539.1.01

Работа выполнена в Московском физико-техническом институте (г. Долгопрудный) и Отделе теоретической физики ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий (г. Протвино).

Научный руководитель – доктор физико-математических наук Ю.Ф. Пирогов (ГНЦ ИФВЭ, Протвино).

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук Н.В. Красников (ИЯИ РАН, Москва), кандидат физико-математических наук С.Р. Слабоспицкий (ГНЦ ИФВЭ, Протвино).

Ведущая организация – НИИЯФ МГУ (г. Москва).

Защита диссертации состоится "_____" _____ 2003 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 034.02.01 при Институте физики высоких энергий по адресу: 142281, Протвино Московской обл.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФВЭ.

Автореферат разослан "_____" _____ 2003 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 034.02.01 Ю.Г. Рябов

© Государственный научный центр
Российской Федерации
Институт физики высоких энергий, 2003

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Стандартная модель (СМ), включающая в себя квантовую хромодинамику и теорию электрослабых взаимодействий Глэшоу-Вайнберга-Салама, является перенормируемой квантовой теорией поля, описывающей все известные на настоящий момент элементарные частицы и взаимодействия. Вычисления в рамках СМ с точностью до однопетлевых (и более высоких) радиационных поправок удовлетворительно описывают современные экспериментальные данные. Ожидаемое в ближайшем будущем открытие бозона Хиггса с массой, лежащей в указываемом прецизионными экспериментальными данными интервале, будет окончательным подтверждением СМ как теории, описывающей взаимодействия частиц при энергиях до нескольких сотен ГэВ. Однако, несмотря на несомненные успехи СМ, ряд косвенных экспериментальных указаний и теоретических несовершенств заставляют считать ее лишь низкоэнергетическим пределом более фундаментальной теории (ФТ), характеризующейся энергетическим масштабом $\Lambda \gg 100$ ГэВ.

Наиболее распространена точка зрения, согласно которой ФТ является теорией "великого объединения" калибровочных взаимодействий с масштабом $\Lambda = M_{GUT} \sim 10^{15}$ ГэВ. Данный сценарий требует суперсимметричного расширения СМ с характерным массовым масштабом $M_{SUSY} = 1$ ТэВ без каких-либо принципиально новых

физических эффектов на масштабах от M_{SUSY} до M_{GUT} (суперсимметричная "пустыня"). Другая возможность – ФТ с энергетическим масштабом $\Lambda < M_{GUT}$ и отсутствие пертурбативного объединения калибровочных взаимодействий. Сигналом этого является нарушение самосогласованности СМ на масштабе $\Lambda < M_{GUT}$. Определение масштаба Λ, а также поиск возможных расширений СМ на относительно низких масштабах $\sim$1 ТэВ являются важнейшими задачами физики высоких энергий.

Цель диссертационной работы состояла в исследовании глубоко-ультрафиолетовой асимптотики СМ (и СМ, расширенной дополнительным тяжелым поколением) методом ренормализационной группы (РГ) в двухпетлевом приближении. Данный метод позволяет:

1) получить ограничения на единственный неопределенный до сих пор параметр СМ – массу бозона Хиггса M_H, в предположении сохранения пертурбативной самосогласованности СМ вплоть до масштаба великого объединения $M_{GUT} = 10^{15}$ ГэВ;
2) при экспериментально предпочтительных значениях M_H найти масштаб Λ нарушения самосогласованности СМ, возможно, являющийся масштабом более фундаментальной теории;
3) получить ограничения на возможные расширения СМ тяжелыми поколениями.

Научная новизна. Работы, лежащие в основе диссертации, либо содержат новые, не появившиеся еще в литературе результаты, либо углубляют и расширяют уже существующие. При этом, хотя отдельные фрагменты двухпетлевого РГ-анализа СМ имеются в литературе[1], полное двухпетлевое РГ-исследование СМ представлено в данной работе впервые. Также впервые оценена неопределенность верхнего РГ-ограничения на массу бозона Хиггса; для этого впервые применен вариант метода аналитической РГ. Обнаружено, что требование пертурбативной самосогласованности СМ вплоть до масштаба

[1] См., например, обзор: P. Frampton, P.Q. Hung and M. Sher, Phys. Reports **330** (2000) 263, hep-ph/9903387.

великого объединения, возможно, не налагает никакого существенного ограничения сверху на физическую массу бозона Хиггса и, таким образом, легкий бозон Хиггса может быть предпочтителен по причинам, не связанным с пертурбативностью СМ, т.е. по причинам, лежащим вне СМ.

Впервые проведенное в данной работе полное двухпетлевое РГ-исследование СМ, расширенной четвертым последовательным поколением с тяжелым нейтрино (СМ4), показало, что возможное открытие четвертого последовательного поколения укажет на существование более фундаментальной теории с характерным масштабом $\Lambda < 10^8$ ГэВ $\ll M_{GUT}$, а открытие четвертого поколения с массовым масштабом $M_4 > 400$ ГэВ снижает Λ до $\mathcal{O}(1$ ТэВ$)$ — энергий, непосредственно доступных для строящегося pp-коллайдера LHC ($\sqrt{s}=$ 14 ТэВ), а также для проектируемых e^+e^--коллайдеров CLIC ($\sqrt{s}=$ 3 ТэВ), NLC ($\sqrt{s}=$ 1 ТэВ) и т.д.

Рассмотрено расширение СМ тяжелыми вектороподобными поколениями (ВПП). Для СМ с одной дополнительной парой ВПП впервые получены в явном виде матрицы смешивания аномальных левых и правых заряженных и нарушающих аромат нейтральных кварковых токов. Отмечено, что пертурбативная самосогласованность СМ совместима с существованием тяжелых ВПП.

Научная и практическая ценность работы. Ожидаемое в ближайшие годы открытие бозона Хиггса придает особую практическую ценность полученной в работе зависимости энергетического масштаба возможной фундаментальной теории (ФТ) от массы бозона Хиггса M_H. При предпочтительном для СМ значении $M_H \simeq 115$ ГэВ масштаб ФТ оказывается очень низким, $\Lambda \simeq 100$ ТэВ, что фактически запрещает "каноническое" объединение калибровочных констант на масштабе $M_{GUT} \sim 10^{15}$ ГэВ. Кроме того, в этом случае становится возможным исследование остаточных взаимодействий ФТ на строящемся мультитэвном pp-коллайдере LHC. Восстановление самой ФТ по ее остаточным взаимодействиям может стать первоочередной задачей физики высоких энергий следующего десятилетия.

С другой стороны, открытие бозона Хиггса с массой $M_H \gtrsim$ 160 ГэВ будет веским доводом в пользу существования четвертого кирального поколения с характерным массовым масштабом $M_4 \sim 200$ ГэВ[2]. Полученный в работе вывод о нарушении в этом случае пертурбативной самосогласованности СМ на масштабе $\Lambda \simeq 10^8$ ГэВ$\ll M_{GUT}$ поставит под вопрос возможность "канонического" великого объединения, и это также заставит искать фундаментальную теорию с низким энергетическим масштабом.

Полученные в работе выражения для аномальных токов в СМ с ВПП могут быть непосредственно использованы для получения ограничений на вектороподобные фермионы при поиске отклонений от СМ.

Автор защищает:

1. Возможность существования фундаментальной теории с энергетическим масштабом $\Lambda < M_{GUT}$.
   Двухпетлевые ренормгрупповые ограничения на массу бозона Хиггса, зависящие от масштаба Λ, а также налагаемые требованием пертурбативной самосогласованности СМ вплоть до масштабов $M_{GUT} \div M_{Pl}$.
2. Оценку неопределенности верхнего ренормгруппового ограничения на массу бозона Хиггса.
   Вывод о возможной легкости бозона Хиггса в силу причин, лежащих вне СМ.
3. Невозможность пертурбативного "великого объединения" калибровочных взаимодействий в случае существования четвертого последовательного поколения с массами, не противоречащими экспериментальным ограничениям.
4. Возможность существования тяжелых вектороподобных поколений; отсутствие ренормгрупповых ограничений на них.

[2]При $M_H \gtrsim 160$ ГэВ введение четвертого поколения позволяет получить удовлетворительное описание прецизионных данных (см., например: V.A. Novikov *et al.*, hep-ph/0203132; Phys. Lett. **529B** (2002) 111, hep-ph/0111028).

Апробации и публикации. Основные результаты, вошедшие в диссертационную работу, опубликованы в журналах "European Physical Journal C", "Ядерная физика" и в виде препринтов ИФВЭ [1]–[5]. Результаты также доложены на 10-м Международном семинаре по физике высоких энергий QUARKS '98 (Суздаль, Россия, 18-24 мая 1998 г.); 14-м Международном семинаре по физике высоких энергий и квантовой теории поля QFTHEP '99 (Москва, Россия, 27 мая – 2 июня 1999 г.); 12-м Международном семинаре по физике высоких энергий QUARKS 2002 (Новгород, Россия, 1-7 июня 2002 г.); на семинарах ИФВЭ и НИИЯФ МГУ, 1998–2002 гг.

Структура диссертации. Работа состоит из введения, трех глав основного текста, заключения и трех приложений. Объем диссертации составляет 90 страниц, включая 4 таблицы, 19 рисунков и список цитируемой литературы из 66 наименований.

Содержание работы

В первой главе в рамках двухпетлевой РГ исследован глобальный профиль минимальной стандартной модели (СМ), а также стандартной модели, расширенной четвертым последовательным поколением (СМ4). Эволюция СМ (СМ4) рассматривается в зависимости от характерного энергетического масштаба μ, пробегающего значения от электрослабого масштаба $\mu = v_H \simeq 246$ ГэВ до масштаба сингулярности калибровочной константы $U(1)_Y$, $\Lambda_{U(1)_Y} \simeq 10^{41}$ ГэВ. Это позволяет выявить качественные черты эволюции СМ (СМ4) в зависимости от массы бозона Хиггса M_H (и массового масштаба M_4 четвертого поколения в случае СМ4), а также получить ограничения на M_H (и M_4) из требования самосогласованности СМ (СМ4) при $\mu < \Lambda_{cut}$, где Λ_{cut} — заданный масштаб ультрафиолетового обрезания.

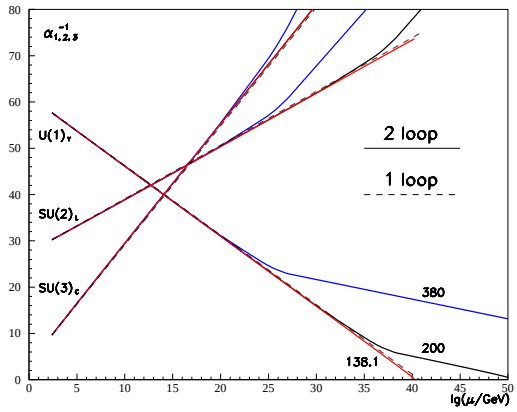

Рис. 1а. Эволюция обратных квадратов калибровочных констант α_i^{-1}, $i = 1, 2, 3$. $M_H = 200$ ГэВ соответствует нарушению пертурбативности на планковском масштабе $M_{Pl} = 10^{19}$ ГэВ, $M_H = 138.1$ ГэВ — нарушению стабильности электрослабого вакуума (см. соответствующие кривые на рис. 2).

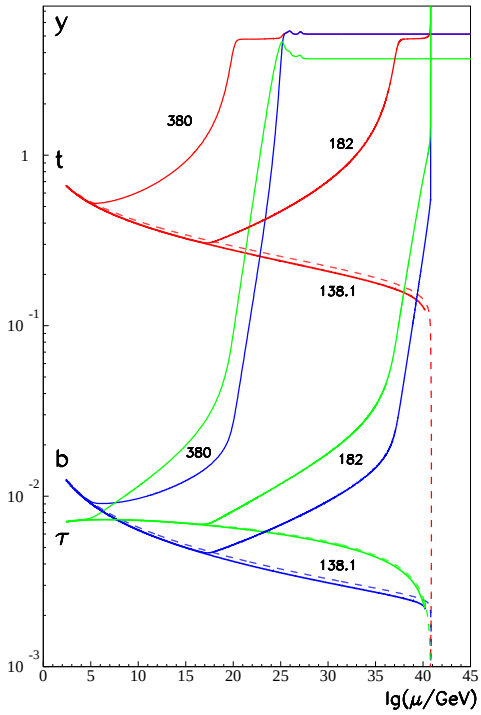

Рис. 1б. Двухпетлевая эволюция юкавских констант фермионов третьего поколения. Спадающие вниз жирные кривые соответствуют нижней критической массе бозона Хиггса. Близкие к ним пунктирные кривые соответствуют однопетлевому приближению.

Как видно из рис. 1а, б, на физически осмысленных энергетических масштабах $\mu < M_{Pl} = 10^{19}$ ГэВ калибровочный и юкавский секторы СМ остаются в пертурбативном режиме при всех экспериментально допустимых значениях массы бозона Хиггса (114 ГэВ $< M_H <$ 196 ГэВ, CL=95%). Основная проблема лежит в хиггсовском секторе. Из рис. 2 видно, что при значениях $M_H < 138.1$ ГэВ бегущая константа самодействия бозона Хиггса $\lambda(\mu)$ в процессе эволюции становится отрицательной на некотором масштабе Λ_{cut}, что соответствует отсутствию глобального минимума потенциала СМ и говорит о неприменимости СМ на энергетических масштабах $\mu > \Lambda_{cut}$. Следует отметить, что при этом СМ остается в режиме слабой связи. При $M_H > 179$ ГэВ СМ, наоборот, попадает в режим сильной связи до планковского масштаба: $\left.\frac{\lambda(\mu)}{\pi^2}\right|_{\mu<M_{Pl}} \sim 1$. Сохранить СМ как пертурбативную эффективную теорию, применимую вплоть до некоторого масштаба обрезания Λ_{cut}, можно путем наложения соответствующего ограничения на массу бозона Хиггса M_H (рис. 3). Обрезанию на масштабе $\Lambda_{cut} = M_{GUT} = 10^{15}$ ГэВ соответствует ограничение M_H интервалом

$$\left[132^{+8}_{-10(\text{эксп.}\Delta M_t)}\ ,\ 195 \pm 3_{(\text{эксп.}\Delta M_t)}\right]\ \text{ГэВ}\ ,$$

где ошибки соответствуют экспериментальной неопределенности массы t-кварка $\Delta M_t = \pm 5.1$ ГэВ. Сохранение только требования стабильности вакуума СМ приводит к ограничению $M_H \geq 132^{+8}_{-10(\text{эксп.}\Delta M_t)}$ ГэВ. Из рис. 3 также видно, что экспериментально предпочтительному значению $M_H \simeq 115$ ГэВ соответствует обрезание на масштабе $\Lambda_{cut} \simeq 100$ ТэВ — возможном масштабе фундаментальной теории.

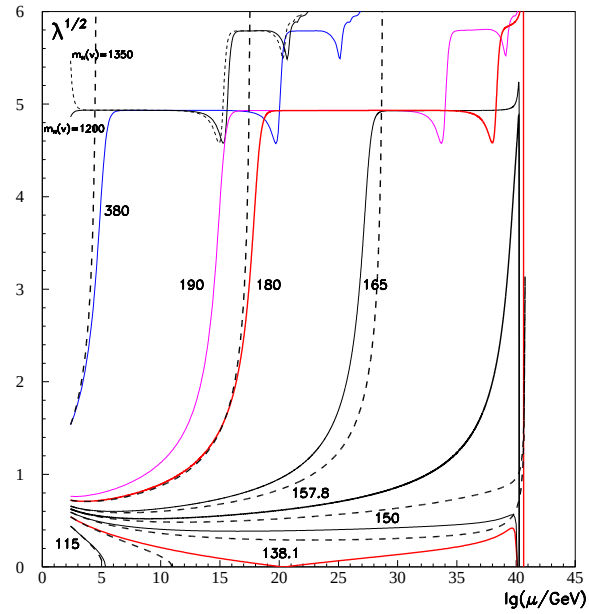

Рис. 2. Двухпетлевая эволюция четверной константы самодействия бозона Хиггса. Критические кривые выделены жирным. Однопетлевая эволюция показана пунктирными линиями.

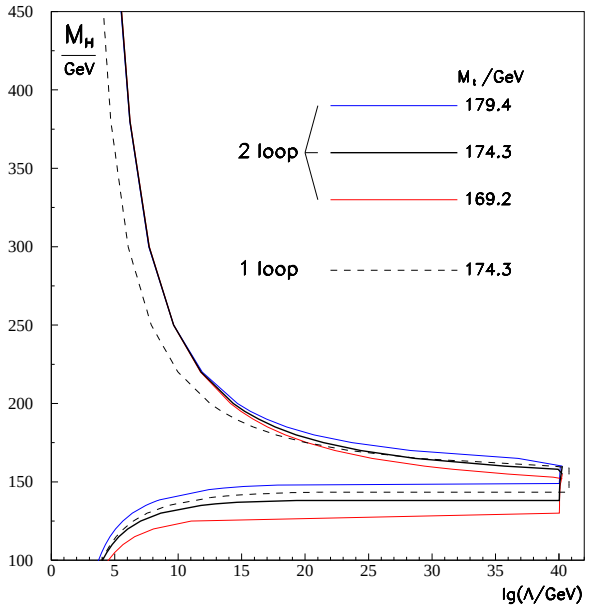

Рис. 3. Самосогласованность СМ в одно- и двухпетлевом приближениях: зависимость допустимого интервала M_H от масштаба обрезания Λ.

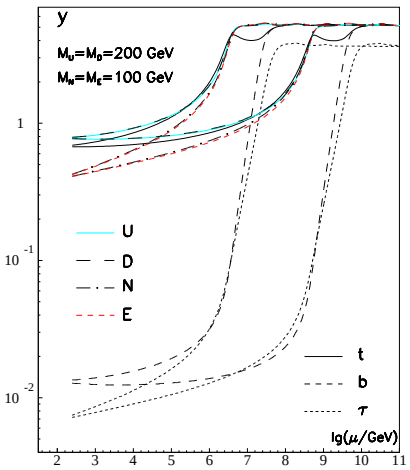

Рис. 4а. Двухпетлевая эволюция юкавских констант ($n_g = 4$) фермионов 3- и 4-го поколений при $M_4 = 200$ ГэВ и $M_L/M_Q = 1/2$.

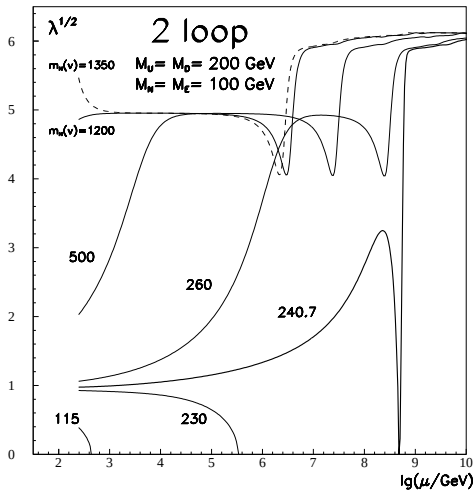

Рис. 4б. То же для константы самодействия бозона Хиггса.

Введение четвертого тяжелого последовательного поколения качественно меняет характер реализации СМ. Сильная связь в юкавском и хиггсовском секторах развивается параллельно на достаточно низких энергетических масштабах $\mu < M_{GUT}$ (рис. 4а, б). В результате, требование сохранения пертурбативной самосогласованности СМ4 вплоть до масштаба великого объединения запрещает

существование четвертого кирального поколения с массами, не противоречащими экспериментальным ограничениям $M_Q \gtrsim 200$ ГэВ, $M_{L^\pm} \gtrsim 100$ ГэВ, $M_N > 50$ ГэВ (рис. 5).

Как низкоэнергетическая эффективная теория, СМ4 допускает существование четвертого последовательного поколения с массовым масштабом до ~ 400 ГэВ, в зависимости от масштаба ультрафиолетового обрезания Λ_{cut} и массы бозона Хиггса. В любом случае $\Lambda_{cut} < 10^8$ ГэВ, что в случае открытия четвертого последовательного поколения может быть указанием на существование фундаментальной теории с энергетическим масштабом много ниже масштаба великого объединения $M_{GUT} = 10^{15}$ ГэВ.

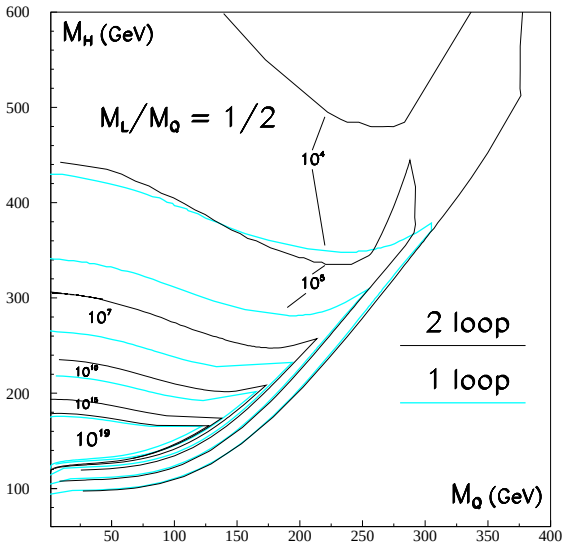

Рис. 5. Одно- и двухпетлевые области самосогласованности СМ4 на плоскости $M_Q - M_H$ в зависимости от масштаба ультрафиолетового обрезания Λ [ГэВ] при $M_L/M_Q = 1/2$, $M_t = 175$ ГэВ.

Вторая глава посвящена оценке неопределенности полученных в первой главе ренормгрупповых ограничений на массу бозона Хиггса и массовый масштаб возможного четвертого поколения. В этих целях был применен вариант метода аналитической РГ — РГ с вычитанием нефизической сингулярной части β-функции (РГВ). Данный метод использует аналитические свойства бегущих констант, формально рассматриваемых как функции комплексной переменной μ^2.

Достаточным условием неприменимости N-петлевого приближения на масштабе Λ считается появление нефизических, лежащих вне разреза $\{\mathrm{Re}\ \mu^2 \geq 0, \mathrm{Im}\ \mu^2 = 0\}$ сингулярностей N-петлевых бегущих констант при $|\mu^2| = \Lambda^2$.

Для минимальной СМ показано, что при массе бозона Хиггса $M_H < 380$ ГэВ масштаб двухпетлевой комплексной сингулярности Λ_s превышает планковский масштаб $M_{Pl} = 10^{19}$ ГэВ. Это означает, что $M_H = 180 \div 380$ ГэВ не обязательно приводит к установлению режима сильной связи на масштабах ниже планковского. При снижении Λ_s до масштаба великого объединения $M_{GUT} = 10^{15}$ ГэВ требование пертурбативной самосогласованности СМ, возможно, не налагает никакого существенного ограничения сверху на физическую массу бозона Хиггса. Таким образом, легкий бозон Хиггса может быть предпочтителен по причинам, не связанным с пертурбативностью СМ, т.е. по причинам, лежащим вне СМ. Для прояснения этого вопроса требуется знание трех- и четырехпетлевых вкладов в β-функций СМ. С другой стороны, предложенный метод не может решить проблему нестабильности вакуума СМ, возникающую при $M_H < 138.1$ ГэВ (в двухпетлевом приближении).

Таким образом, из всего экспериментально допустимого в рамках СМ интервала масс бозона Хиггса, 114.1 ГэВ $< M_H <$ 194 ГэВ, только наиболее низкие значения 114.1 ГэВ $< M_H <$ 138.1 ГэВ *определенно* приводят к внутренней противоречивости минимальной СМ на масштабах ниже планковского и требуют существования более фундаментальной теории. Ограничения на M_H, полученные с помощью использованного в данной главе условия применимости двухпетлевого РГ приближения, показаны на рис. 6.

Для СМ4 показано, что неопределенность двухпетлевых РГ ограничений велика только для массы бозона Хиггса. Абсолютные, не зависящие от M_H ограничения на массы фермионов четвертого поколения имеют неопределенность от 10% при $\Lambda_{cut} = 10^{19}$ ГэВ до 15% при $\Lambda_{cut} = 10^4$ ГэВ (рис. 7). Следовательно, вывод главы 1 о возможном существовании фундаментальной теории с масштабом ниже масштаба великого объединения (в случае обнаружения четвертого поколения) остается в силе.

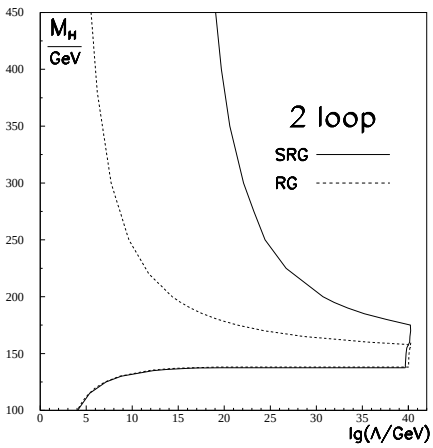

Рис. 6. Двухпетлевое РГВ-ограничение на M_H в зависимости от масштаба скрытой сингулярности Λ. Для сравнения показано двухпетлевое РГ-ограничение на M_H.

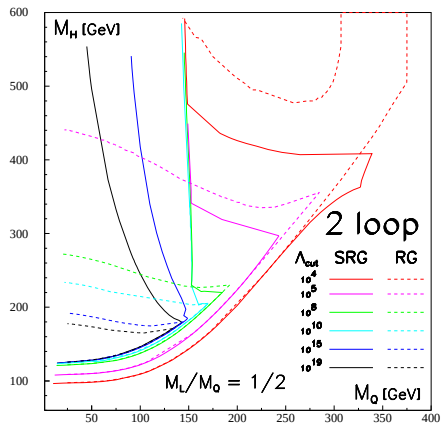

Рис. 7. РГВ и РГ — области самосогласованности СМ4 на плоскости $M_Q - M_H$ в зависимости от масштаба ультрафиолетового обрезания Λ [ГэВ]. $M_L/M_Q = 1/2$, $M_t = 174.3$ ГэВ.

В третьей главе рассматривается расширение СМ тяжелыми вектороподобными поколениями (ВПП). Вектороподобным называется фермион, кирально-симметрично взаимодействующий с калибровочными бозонами. На электрослабом масштабе ~ 100 ГэВ взаимодействия известных фундаментальных фермионов нарушают киральную симметрию. Поэтому возникает вопрос: не восстанавливается ли она на более высоком масштабе, скажем, $\mathcal{O}(1$ ТэВ$)$? Расширение СМ вектороподобными фермионами имеет еще одно преимущество. Вектороподобный фермион может иметь большую прямую дираковскую массу нехиггсовского происхождения, не нарушающую калибровочную симметрию. Соответственно, юкавские взаимодействия вектороподобных фермионов могут быть малы и не создавать угрозы для самосогласованности СМ. При этом, масса вектороподобных фермионов может быть достаточно велика для обеспечения согласия с существующими экспериментальными данными.

Случай расширения СМ одной парой ВПП реализован в данной главе явно. Матрицы смешивания левых и правых заряженных, а также нарушающих аромат нейтральных кварковых токов в массовом базисе выражены через кварковые массовые матрицы токового базиса. Показано, что включение даже одной пары ВПП кардинально меняет характеристики минимальной СМ.

Во-первых, обобщенная матрица Кабиббо–Кобаяши–Маскавы левых заряженных токов становится неунитарной во всем пространстве ароматов, а не только в секторе легких кварков, как это имеет место при расширении СМ только последовательными поколениями. Во-вторых, возникают правые заряженные токи, векторные и скалярные нейтральные токи с нарушением аромата. Все они имеют неунитарные матрицы смешивания, содержащие дополнительные CP-нарушающие фазы.

Для легких кварков все аномальные недиагональные токи, независимо от конкретного вида массовых матриц. подавлены множителем v_H^2/M^2, где M — массовый масштаб ВПП. Это обеспечивает их исчезновение в пределе отщепления $M \gg v$. Из всех недиагональных взаимодействий в пределе отщепления не исчезают только взаимодействия с бозоном Хиггса. Следовательно, тяжелые вектороподобные кварки должны распадаться в основном на легкий кварк и бозон Хиггса с естественной шириной $\Gamma \sim (|Y|^2/4\pi)\ M$, где Y – соответствующая юкавская константа. В результате, в процессах с легкими кварками ведущие петлевые поправки, включающие тяжелый вектороподобный кварк, одновременно включают обмен бозоном Хиггса. Таким образом, за современной физикой легких фермионов и калибровочных бозонов может последовать физика тяжелых вектороподобных фермионов и бозона Хиггса.

Вследствие отщепления больших прямых дираковских массовых членов M в пределе $M \gg v_H$ СМ с ВПП не противоречит эксперименту. При умеренных $M > v_H$ включение пары ВПП делает феноменологию СМ, особенно в вопросах несохранения ароматов и CP-четности, чрезвычайно богатой. Таким образом, тяжелые вектороподобные поколения могут быть, в принципе, обнаружены в экспериментах при поиске отклонений от минимальной СМ.

В заключении сформулированы выносимые на защиту **основные результаты диссертации:**

1. Получено ограничение на массу бозона Хиггса M_H в зависимости от масштаба ультрафиолетового обрезания СМ Λ_{cut}. Найдено, что требование сохранения пертурбативной самосогласованности СМ до планковского масштаба $\Lambda_{cut} = M_{Pl} = 10^{19}$ ГэВ накладывает следующие ограничения на массу бозона Хиггса:

$$138.1 \pm 10.0_{(\text{эксп. } \Delta M_t)} \text{ ГэВ } < M_H < 179.0 \pm 2.5_{(\text{эксп. } \Delta M_t)} \text{ ГэВ } ,$$

$$M_H \geq 138.1 \pm 10_{(\text{эксп.} \Delta M_t)} \text{ ГэВ } .$$

   При более низких масштабах ультрафиолетового обрезания допустимый диапазон масс бозона Хиггса расширяется. При $\Lambda_{cut} = M_{GUT} = 10^{15}$ ГэВ

$$132^{+8}_{-10(\text{эксп.} \Delta M_t)} \text{ ГэВ } < M_H < 195 \pm 3_{(\text{эксп.} \Delta M_t)} \text{ ГэВ } ,$$

$$M_H \geq 132^{+8}_{-10(\text{эксп.} \Delta M_t)} \text{ ГэВ } .$$

2. Получены совместные ограничения на M_H и массы фермионов четвертого поколения в зависимости от Λ_{cut}. Показано, что требование сохранения пертурбативной самосогласованности СМ4 как фундаментальной теории вплоть до масштаба великого объединения запрещает существование четвертого кирального поколения с массами, не противоречащими экспериментальным ограничениям.
3. Найдено, что, с учетом экспериментальных ограничений на массы фермионов четвертого поколения $M_Q \gtrsim 200$ ГэВ, $M_E \gtrsim 100$ ГэВ, $M_N > 50$ ГэВ, возможное открытие четвертого последовательного поколения укажет на существование фундаментальной теории на масштабе $\Lambda_{cut} < 10^8$ ГэВ, т.е. много ниже масштаба великого объединения $M_{GUT} = 10^{15}$ ГэВ.
4. Неопределенности двухпетлевых РГ-ограничений на M_H в минимальной СМ и совместных ограничений на M_H и массы фермионов четвертого поколения в СМ4 оценены с помощью метода РГ с вычитанием нефизической сингулярной части β-функции (РГВ).

5. Для минимальной СМ показано, что $M_H = 180 \div 380$ ГэВ не обязательно приводит к установлению режима сильной связи на масштабах ниже планковского, а требование пертурбативной самосогласованности СМ вплоть до масштаба великого объединения, возможно, не налагает никакого разумного ограничения на физическую массу бозона Хиггса. Таким образом, легкий бозон Хиггса может быть предпочтителен по причинам, не связанным с пертурбативностью СМ, т.е. по причинам, лежащим вне СМ.
6. Показано, что только наиболее низкие значения массы бозона Хиггса 114.1 ГэВ $< M_H <$ 138.1 ГэВ определенно приводят к внутренней противоречивости минимальной СМ на масштабах ниже планковского и требуют существования "новой физики".
7. Для СМ4 показано, что неопределенность двухпетлевых РГ ограничений велика только для массы бозона Хиггса. Абсолютные, не зависящие от M_H ограничения на массы фермионов четвертого поколения имеют неопределенность от 10% при $\Lambda_{cut} = 10^{19}$ ГэВ до 15% при $\Lambda_{cut} = 10^4$ ГэВ. Этим подтверждается вывод о возможном существовании в случае обнаружения четвертого поколения фундаментальной теории с масштабом ниже масштаба великого объединения $M_{GUT} = 10^{15}$ ГэВ.
8. Получены в явном виде матрицы смешивания аномальных левых и правых заряженных, а также нарушающих аромат нейтральных кварковых токов в СМ с двумя вектороподобными поколениями (ВПП). Отмечено, что включение даже одной пары ВПП кардинально меняет характеристики минимальной СМ. Обобщенная матрица Кабиббо–Кобаяши–Маскавы левых заряженных токов становится неунитарной во всем пространстве ароматов, а не только в секторе легких кварков, как это имеет место при расширении СМ только последовательными поколениями. Возникают правые заряженные токи, векторные и скалярные нейтральные токи с нарушением аромата. Все они имеют неунитарные матрицы смешивания, содержащие дополнительные CP-нарушающие фазы.

9. Отмечено, что при умеренных массовых масштабах ВПП $M \sim 1$ ТэВ включение пары ВПП делает феноменологию СМ, особенно в вопросах несохранения ароматов и CP-четности, чрезвычайно богатой. Таким образом, тяжелые вектороподобные поколения могут быть, в принципе, обнаружены в экспериментах при поиске отклонений от минимальной СМ.

В приложении 1 приведены в явном виде двухпетлевые β-функции СМ и СМ, расширенной четвертым последовательным поколением с тяжелым нейтрино.

В приложении 2 изложены детали численной реализации метода РГ с вычитанием сингулярной части β-функции.

В приложении 3 приведен явный вид матриц смешивания кварковых токов в СМ, расширенной одним вектороподобным поколением.

Список литературы

[1] Yu.F. Pirogov and O.V. Zenin. Eur. Phys. J., **C10** (1999) 629, hep-ph/9808396.

[2] Yu.F. Pirogov and O.V. Zenin. *"Two-loop renormalization group profile of the Standard Model and a new generation". In:* Proc. of 10th Int. Seminar on High Energy Physics (QUARKS '98), Suzdal, Russia, 17-24 May 1998, ИЯИ, v. 1, p. 249, hep-ph/9808414.

[3] Ю.Ф. Пирогов, О.В. Зенин. – Препринт ИФВЭ 99-12, Протвино, 1999, hep-ph/9903344.

[4] Ю.Ф. Пирогов, О.В. Зенин. Препринт ИФВЭ 99-15, Протвино, 1999, hep-ph/9904364.

[5] Ю.Ф. Пирогов, О.В. Зенин. ЯФ **66** (2003), N°3, 623; Препринт ИФВЭ 2002-21, Протвино,2002), hep-ph/0207057.

Рукопись поступила 5 июня 2003 года.

Приложение

О.В. Зенин.
Двухпетлевые ренормгрупповые ограничения на стандартную модель и тяжелые поколения.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы **LaTeX.**
Редактор Н.В. Ежела. Технический редактор Н.В. Орлова.

Подписано к печати 24.06.2003. Формат $60 \times 84/16$. Офсетная печать.
Печ.л. 1,48. Уч.-изд.л. 0,57. Тираж 100. Заказ 77. Индекс 3649.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий
142284, Протвино Московской обл.

Индекс 3649

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т 2003–15, И Ф В Э, 2003