

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. М. В. ЛОМОНОСОВА

Физический факультет

На правах рукописи

Сидорова Мария Викторовна

РЕДКИЕ РАСПАДЫ МЕЗОНОВ
С НЕСОХРАНЕНИЕМ ЛЕПТОННОГО ЧИСЛА

Специальность 01.04.02 — теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2007

Работа выполнена на кафедре теоретической физики физического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
профессор А. В. Борисов

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
профессор П. А. Эминов,
кандидат физико-математических наук
доцент П. Е. Сизин

Ведущая организация: Томский государственный университет

Защита состоится “ 17 ” мая 2007 г. в ____ ч. на заседании Диссертационного совета К 501.001.17 при Московском государственном университете имени М. В. Ломоносова (119992, г. Москва, Ленинские горы, физический факультет МГУ, ауд. _____).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ.

Автореферат разослан “ ____ ” _____ 2007 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета К 501.001.17
доктор физико-математических наук
профессор

П. А. Поляков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена изучению редких распадов мезонов типа

$$M^+ \rightarrow M'^- \ell^+ \ell'^+ \quad (1)$$

с рождением пары лептонов одного знака заряда ($\ell, \ell' = e, \mu$), что означает несохранение лептонного числа. Эти процессы исследованы в рамках расширения стандартной модели (СМ), включающего майорановские нейтрино (СММН), со стандартной структурой слабых заряженных токов и в суперсимметричном расширении СМ с несохранением R -четности ($\mathcal{R}MSSM$), обусловленным трилинейными и билинейными юкавскими взаимодействиями.

В рамках СММН были рассмотрены два характерных предельных случая легких и тяжелых майорановских нейтрино и получены выражения для относительных вероятностей указанных распадов через так называемые эффективные майорановские массы (для легких нейтрино)

$$\langle m_{\ell\ell'} \rangle = \left| \sum_N U_{\ell N} U_{\ell' N} \eta_N m_N \right| \quad (2)$$

и обратные массы (для тяжелых)

$$\langle m_{\ell\ell'}^{-1} \rangle = \left| \sum_N U_{\ell N} U_{\ell' N} \eta_N \frac{1}{m_N} \right|, \quad (3)$$

где $U_{\ell N}$ — элементы матрицы лептонного смешивания, η_N — фазовый фактор зарядового сопряжения поля майорановских нейтрино массы m_N : $N = \eta_N N^c$ ($|\eta_N| = 1$).

На основе экспериментальных данных для относительных вероятностей изученных распадов были получены верхние границы значений эффективных масс майорановских нейтрино, которые оказались вне пределов применимости наших формул для ширин распадов. Поэтому требуются более жесткие экспериментальные ограничения для вероятностей данных процессов. Используя полученные к настоящему времени ограничения на параметры лептонного смешивания и массы нейтрино, мы нашли косвенные ограничения на относительные вероятности редких мезонных распадов.

Получены выражения для относительных вероятностей распадов мезонов в $\mathcal{R}MSSM$ с несохранением R -четности, обусловленным

трилинейными и билинейными юкавскими взаимодействиями. Показано, что существующие экспериментальные ограничения на вероятности распадов слишком слабы, чтобы дать реальные ограничения на комбинации констант указанных трилинейных и билинейных юкавских взаимодействий. С использованием известных ограничений на юкавские константы вычислены верхние границы относительных вероятностей рассмотренных нами распадов. Для случая билинейных юкавских взаимодействий также представлены зависимости ширины распада K -мезона от одного из суперсимметричных параметров при фиксированных других параметрах.

Проведено сравнение эффективности майорановского, билинейного и трилинейного механизмов редких распадов мезонов и показано, что доминирующим на данный момент механизмом является трилинейный.

Актуальность темы

Актуальность работы обусловлена тем, что существующая сейчас стандартная модель электрослабых и сильных взаимодействий, несмотря на то, что получила множество экспериментальных подтверждений и с высокой точностью описывает явления микромира на малых расстояниях, все-таки не может считаться окончательной теорией, поскольку она имеет ряд нерешенных проблем. Основным экспериментальным аргументом в пользу необходимости расширения СМ является обнаружение в последнее время в ряде экспериментов (SNO, Super-Kamiokande, KamLAND и др.) осцилляций солнечных, атмосферных, реакторных и ускорительных нейтрино, что означает несохранение электронного, мюонного и тауонного чисел (при сохранении полного лептонного числа). Поэтому исследование реакций, в которых нарушается закон сохранения лептонного числа, открывает возможность проверки различных теорий, расширяющих СМ.

Цель работы

Целью настоящей диссертационной работы является изучение ред-

ких распадов мезонов с несохранением лептонного числа в рамках расширения СМ, включающем массивные майорановские нейтрино, и в суперсимметричном расширении СМ с несохранением R -четности, обусловленным трилинейными и билинейными юкавскими взаимодействиями.

Научная новизна работы состоит в том, что в ней впервые:

1. В рамках расширения СМ, включающем майорановские нейтрино (СММН), с использованием гауссовой модели для мезонных амплитуд Бете–Солпитера получены выражения для относительных вероятностей распадов K - и D -мезонов типа (1).
2. Показано, что существующие прямые экспериментальные ограничения на относительные вероятности изученных в рамках СММН распадов слишком слабы и не позволяют установить верхние границы значений эффективных масс майорановских нейтрино (2) и (3).
3. В рамках СММН найдены косвенные ограничения на относительные вероятности редких мезонных распадов с использованием полученных к настоящему времени экспериментальных ограничений на параметры лептонного смешивания и массы нейтрино.
4. Получены выражения для относительных вероятностей распадов мезонов в суперсимметричном расширении СМ с несохранением R -четности ($\mathcal{R}MSSM$), обусловленным трилинейными юкавскими взаимодействиями.
5. На основе указанной теории найдены верхние границы относительных вероятностей распадов K - и D -мезонов с учетом существующих ограничений на суперсимметричные параметры.
6. Получены выражения для относительных вероятностей распадов мезонов в $\mathcal{R}MSSM$ с несохранением R -четности, обусловленным билинейными юкавскими взаимодействиями.
7. Найдены верхние границы относительных вероятностей распадов K - и D -мезонов в той же теории с использованием известных

ограничений на суперсимметричные параметры.

Практическая ценность

Полученные в данной работе результаты можно использовать для исследования теорий, расширяющих СМ. Ограничения на относительные вероятности редких распадов мезонов, полученные в рамках расширения СМ, включающем майорановские нейтрино, а также в суперсимметричном расширении СМ с несохранением R -четности, обусловленным трилинейными и билинейными юкавскими взаимодействиями, отражают эффективность различных механизмов распадов.

Апробация диссертации

Основные результаты, вошедшие в диссертацию, докладывались и обсуждались на следующих конференциях: 12th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics (Москва, 2005); 2nd Vienna Central European Seminar on Particle Physics and Quantum Field Theory “Frontiers in Astroparticle Physics” (Vienna, 2005); Научной сессии-конференции секции ЯФ ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий» (Москва, 2005); Международной летней школе им. Гельмгольца «Физика тяжелых кварков» (Дубна, 2005); Научной конференции «Ломоносовские чтения» (Москва, 2005); Научной конференции «Ломоносовские чтения» (Москва, 2006); 14th International Seminar on High Energy Physics “Quarks–2006” (Санкт-Петербург, 2006); XIII международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов–2006» (Москва, 2006).

Публикации

Основные результаты диссертации изложены в 7 опубликованных работах, список которых приводится в конце автореферата.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из четырех глав, первая из которых является вводной, заключения, двух приложений и списка цитированной литературы, который насчитывает 102 наименования. Общий объем 100 страниц, в работе содержится 6 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Глава 1. Введение

В разделе 1.1 дается описание основных свойств нейтрино, как дираковских, так и майорановских, а также механизмов генерации их масс.

В разделе 1.2 излагается формализм Бете–Солпитера (БС), который используется для описания мезона как релятивистского связанного состояния кварка и антикварка. В импульсном представлении БС–амплитуда псевдоскалярного мезона M с 4–импульсом P имеет вид:

$$\chi^P(q) = \gamma^5(1 - \delta_M \hat{P})\varphi_P(q), \quad (4)$$

здесь $\varphi_P(q)$ — скалярная функция, зависящая от выбора модели; $\delta_M = (m_1 + m_2)/m_M^2$, m_M — масса мезона, состоящего из кварка и антикварка с токовыми массами m_1 и m_2 и относительным 4–импульсом q ; $\hat{P} = \gamma^\mu P_\mu$.

Глава 2. Майорановский механизм

Данная глава посвящена изучению редких распадов K - и D -мезонов с рождением пары лептонов одного знака заряда, обусловленных обменом массивными майорановскими нейтрино.

В разделе 2.1 рассмотрена постановка задачи.

Существование нейтринных осцилляций, надежно подтвержденное экспериментально несколькими независимыми группами, означает, что нейтрино являются массивными частицами и при этом сме-

шиваются: нейтрино определенных ароматов ν_ℓ , входящие в слабый ток вместе с соответствующими заряженными лептонами $\ell = e, \mu, \tau$, представляют собой когерентные суперпозиции состояний ν_i с определенными массами m_i :

$$\nu_\ell = \sum_i U_{\ell i} \nu_i. \quad (5)$$

Однако природа массы нейтрино (дираковская или майорановская) остается пока неизвестной, так как наблюдаемые осцилляции, т. е. нейтринные переходы с изменением аромата, не зависят от типа массы, но означают несохранение отдельных лептонных чисел.

Наблюдение же распада мезона, в котором рождается пара одинаково заряженных лептонов, свидетельствовало бы в пользу майорановской массы нейтрино. В разделе 2.2 показано, что в главном порядке теории возмущений по константе связи амплитуда такого процесса описывается двумя фейнмановскими диаграммами, одну из которых принято называть «древесной» (t), а другую — «ящичной» (b). Обе диаграммы включают обмен виртуальными майорановскими нейтрино. При этом вклад t -диаграммы в амплитуду процесса выражается через известные константы распада начального и конечного мезонов и является модельно независимым, а b -вклад определяется в общем случае адронной динамикой, и для его расчета необходима определенная модель взаимодействия кварков в мезоне. В этом разделе также приведены явные выражения для лептонного и адронного тензоров, свертка которых определяет амплитуду процесса.

В разделах 2.3 и 2.4 рассмотрены два предельных случая тяжелых и легких майорановских нейтрино. В разделе 2.3 показано, что в случае тяжелых нейтрино не только вклад t -диаграммы, но и даже вклад b -диаграммы можно выразить через известные константы распада мезонов:

$$f_M = 4\sqrt{N_c} \delta_M \int \frac{d^4q}{(2\pi)^4} \varphi_P(q), \quad (6)$$

где $N_c = 3$ — число цветов.

В амплитуде распада обычно доминирует вклад t -диаграммы, например, в распаде K -мезона (b -вклад содержит фактор цветового подавления $1/N_c$). В диссертации показано, что в случае сильного

кабиббовского подавления t -вклада, например, в распаде D -мезона, уже нельзя не учитывать b -диаграмму. В разделе 2.4, используя гауссову модель БС-амплитуды (релятивистское обобщение нерелятивистской кварковой модели с осцилляторным потенциалом):

$$\varphi_P(q) = \frac{4\pi}{\alpha^2} [1 - (m_M \delta_M)^2]^{-1/2} \exp \left\{ -\frac{1}{2\alpha^2} \left[2 \left(\frac{P \cdot q}{m_M} \right)^2 - q^2 \right] \right\}, \quad (7)$$

где $\alpha^2 = \frac{\pi}{4\sqrt{N_c}} \sqrt{1 - (m_M \delta_M)^2} \frac{f_M}{\delta_M}$ — параметр модели, мы получили формулы для ширины редких распадов мезонов. Было также отмечено, что эффект интерференции t - и b -диаграмм для одних распадов имеет конструктивный характер, для других же — деструктивный.

В разделе 2.5 приведены результаты вычислений относительных вероятностей распадов K - и D -мезонов. Численный расчет шести- и пятикратных фазовых интегралов, входящих в формулы для ширины распадов, был выполнен с использованием программы VEGAS, основанной на алгоритме Монте-Карло. Показано, что современные экспериментальные ограничения на относительные вероятности изученных распадов слишком слабые: полученные на их основе верхние границы значений эффективных масс майорановских нейтрино (2) и (3) оказались вне пределов применимости наших формул. Поэтому требуется значительное повышение точности экспериментов.

Используя полученные к настоящему времени ограничения на параметры лептонного смешивания и массы нейтрино, следующие из прецизионных измерений электрослабых процессов, экспериментов по нейтринным осцилляциям, поискам безнейтринного двойного бета-распада ядер и космологических данных, мы нашли косвенные ограничения сверху на относительные вероятности редких мезонных распадов. Эти ограничения на много порядков жестче прямых экспериментальных, что свидетельствует о чрезвычайной трудности поиска рассмотренных распадов.

Глава 3. Суперсимметричные теории с несохранением R -четности

В этой главе даны общие сведения о другой теории, обобщающей стандартную модель, — минимальной суперсимметричной стандарт-

ной модели (МССМ) и её расширению \mathcal{R} МССМ, основанном на подходе, в котором сохраняют состав частиц МССМ и отказываются от сохранения R -четности.

Наиболее общий вид части суперпотенциала, несохраняющей R -четность и лептонное число, таков:

$$W_{\mathcal{R}} = \varepsilon_{\alpha\beta} \left(\frac{1}{2} \lambda_{ijk} L_i^\alpha L_j^\beta \bar{E}_k + \lambda'_{ijk} L_i^\alpha Q_j^\beta \bar{D}_k + \epsilon_i L_i^\alpha H_2^\beta \right).$$

Здесь $i, j, k = 1, 2, 3$ — индексы поколений, L, Q — $SU(2)$ -дублеты левых лептонных и кварковых суперполей ($\alpha, \beta = 1, 2$ — изоспинорные индексы), \bar{E} и \bar{D} — синглеты правых суперполей лептонов и нижних кварков, H_2 — дублетное хиггсовское суперполе (с гиперзарядом $Y = 1$); $\lambda_{ijk} (= -\lambda_{jik})$, λ'_{ijk} , ϵ_i — константы.

В суперпотенциале присутствуют трилинейные ($\sim \lambda, \lambda'$) и билинейные члены ($\sim \epsilon$). Ранее основное внимание уделялось феноменологии трилинейных юкавских констант. Было широко распространено мнение, что билинейные слагаемые можно исключить из теории соответствующим переопределением полей. Однако это утверждение неверно, если в теории присутствуют члены, нарушающие суперсимметрию мягко. Билинейное нарушение R -четности обеспечивает ненулевое вакуумное ожидание суперпартнерам нейтринных полей, приводит к смешиванию лептонов с суперпартнерами калибровочных и хиггсовских бозонов, а также суперпартнеров лептонов с хиггсовскими бозонами. В частности, это смешивание дает вклад в рассматриваемый нами распад мезонов.

Глава 4. Редкие распады мезонов в суперсимметричной теории с нарушением R -четности

В этой главе рассмотрены редкие распады мезонов в суперсимметричной теории с несохранением R -четности.

В разделе 4.1 сформулирована постановка задачи.

В разделах 4.2 и 4.3 исследованы два случая нарушения R -четности — трилинейными и билинейными юкавскими взаимодействиями. Показано, что на данный момент нет необходимости рассматривать теорию, в которой присутствовали бы оба взаимодействия. Это объясняется тем, что существенно доминирующим механизмом

является трилинейный: современные ограничения сверху на билинейные юкавские константы гораздо жестче ограничений на трилинейные константы.

В разделе 4.4 приведены численные расчеты косвенных ограничений на относительные вероятности редких мезонных распадов, а также явный вид зависимости ширины распада от параметров моделей; построены графики зависимости ширины распада K -мезона от одного из суперсимметричных параметров при фиксированных других параметрах в модели с билинейными юкавскими взаимодействиями. С использованием известных ограничений на суперсимметричные параметры найдены оценки относительных вероятностей рассмотренных распадов.

В **заключении** перечислены полученные результаты и кратко сформулированы основные выводы диссертационной работы.

В **приложениях А и В** приведены некоторые детали вычислений.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

Основные результаты диссертации можно сформулировать следующим образом.

1. В рамках расширения СМ, включающего майорановские нейтрино, были рассмотрены два характерных предельных случая легких и тяжелых майорановских нейтрино и получены выражения для относительных вероятностей редких полулептонных распадов псевдоскалярных мезонов K и D типа $M^+ \rightarrow M'^- \ell^+ \ell'^+$ с несохранением лептонного числа через так называемые эффективные майорановские массы (для легких нейтрино) (2) и обратные массы (для тяжелых) (3).
2. В главном порядке теории возмущений по константе связи амплитуда такого процесса описывается двумя фейнмановскими диаграммами — «древесной» (t) и «ящичной» (b). Обе диаграм-

мы включают обмен виртуальными майорановскими нейтрино. При этом вклад t -диаграммы в амплитуду процесса выражается через известные константы распада мезонов M и M' и является модельно независимым, а b -вклад определяется в общем случае адронной динамикой, и для его расчета необходима определенная модель взаимодействия кварков в мезоне. В работе подтверждены уже известные результаты: в случае тяжелых нейтрино не только вклад t -диаграммы, но и вклад b -диаграммы можно выразить через известные константы распада мезонов. Обычно доминирует вклад t -диаграммы, например, в распаде K -мезона. В диссертации показано, что в случае сильного кабиббовского подавления t -вклада, например, в распаде D -мезона, уже нельзя не учитывать b -диаграмму. С использованием гауссовой модели амплитуды Бете–Солпитера для мезона как релятивистского связанного состояния кварка и антикварка получены выражения для ширин распадов мезонов. Также отмечено, что эффект интерференции t - и b -диаграмм для одних распадов имеет конструктивный характер, для других же — деструктивный.

3. Показано, что современные прямые экспериментальные ограничения на относительные вероятности изученных распадов слишком слабы и не позволяют установить реальные верхние границы значений эффективных масс майорановских нейтрино.
4. На основе ограничений на параметры лептонного смешивания и массы нейтрино, полученных к настоящему времени из прецизионных измерений электрослабых процессов, экспериментов по нейтринным осцилляциям, поиску безнейтринного двойного бета-распада ядер и космологических данных, найдены косвенные ограничения на относительные вероятности редких распадов мезонов. Эти ограничения на много порядков жестче прямых экспериментальных, что свидетельствует о чрезвычайной трудности поиска рассмотренных распадов.
5. Проведено сравнение результатов с работой других авторов, в которой изучен распад $K^+ \rightarrow \pi^- \mu^+ \mu^+$ на основе более сложной модели мезонных БС-амплитуд. Полученные нами численные результаты в широкой области значений нейтринных масс хоро-

шо согласуются с аналогичными результатами этой работы.

6. Получены выражения для относительных вероятностей распадов мезонов в суперсимметричном расширении СМ с несохранением R -четности, обусловленным трилинейными юкавскими взаимодействиями. С использованием ограничений на квадратичные комбинации юкавских констант, полученных ранее другими авторами из анализа двухлептонных распадов псевдоскалярных мезонов, найдены верхние границы относительных вероятностей рассмотренных нами полуплептонных распадов.
7. Получены выражения для относительных вероятностей распадов мезонов в рамках суперсимметричного расширения стандартной модели с несохранением R -четности, обусловленным билинейными юкавскими взаимодействиями. С использованием известных ограничений на эти константы найдены оценки вероятностей распадов. Представлены графики зависимости ширины распада K -мезона от одного из суперсимметричных параметров при фиксированных других параметрах.
8. Проведено сравнение майорановского, билинейного и трилинейного механизмов редких распадов мезонов и с учетом существующих экспериментальных ограничений показано, что доминирующим на данный момент механизмом является трилинейный.

ПУБЛИКАЦИИ

1. *А. Али, А.В. Борисов, М. В. Сидорова.* Майорановские нейтрино в редких распадах мезонов. // ЯФ. — 2006. — Т. 69, №3. — С. 497–506.
2. *А. Али, А. В. Борисов, М. В. Сидорова.* Редкие распады мезонов в суперсимметричной теории с несохранением R -четности. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. — 2007. — Т. 62, №1. — С. 8–13 [hep-ph/0603173].
3. *A. Ali, A. V. Borisov, M. V. Sidorova.* Rare semileptonic meson decays in R -parity violating MSSM. // Proceedings of the Twelfth Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics “Particle Physics at the Year of 250th Anniversary of Moscow University”, Moscow, 25–31 August 2005. /Ed. by A. I. Studenikin. — Singapore: World Scientific, 2006. — P. 215–218.
4. *M. V. Sidorova.* Rare meson decays in R -parity-violating SUSY theories. // Proceedings of the Fourteenth International Seminar “Quarks–2006”, St. Petersburg, 19–25 May 2006. — Moscow: INR RAS, 2007. — P. 63–67.
5. *А. Али, А. В. Борисов, М. В. Сидорова.* Редкие распады мезонов с несохранением лептонного числа. // Ломоносовские чтения–2005. Секция физики. Сборник тезисов докладов. М.: Физический факультет МГУ, 2005. — С. 71–73.
6. *М. В. Сидорова.* Распады псевдоскалярных мезонов, нарушающие лептонное число, в суперсимметричной теории с несохранением R -четности. // XIII Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов–2006». Секция «Физика». Сборник тезисов докладов. М.: Физический факультет МГУ. — С. 80–81.
7. *А. Али, А. В. Борисов, М. В. Сидорова.* Распады псевдоскалярных мезонов в суперсимметричной теории с несохранением R -четности. // Ломоносовские чтения–2006. Секция физики. Сборник тезисов докладов. М.: Физический факультет МГУ, 2006. — С. 141–144.