

K-562



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

C 324.18 + C 322.2

2-98-129

На правах рукописи
УДК 530.145.1; 539.12.01

14/40

КОВАЛЕНКО
Сергей Григорьевич

ФИЗИКА
ЗА ПРЕДЕЛАМИ СТАНДАРТНОЙ МОДЕЛИ
В НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ
И КОСМОЛОГИИ

Специальность: 01.04.02 — теоретическая физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Дубна 1998

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем
Объединенного института ядерных исследований.

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук,
профессор

Доктор физико-математических наук,
профессор

Доктор физико-математических наук,
профессор

Д.И.Казаков

В.А.Кузьмин

Л.В.Прохоров

Ведущая организация:

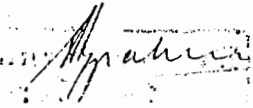
НИИЯФ МГУ им. Д.В.Скобельцына, г. Москва

Защита диссертации состоится "_____" _____ 1998 г. на заседании диссертационного совета Д047.01.01 при Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан "_____" _____ 1998 г.

Ученый секретарь совета
кандидат физико-математических наук


В.И.Журавлев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Стандартная модель сильных слабых и электромагнитных взаимодействий (СМ) является одной из наиболее успешных теоретических схем когда-либо созданных в физике элементарных частиц. До сих пор не выявлено ни одного противоречащего ей экспериментального факта. Открытия нейтральных токов, а затем переносчиков слабого взаимодействия, W- и Z-бозонов, предсказанных СМ, стали убедительным свидетельством в пользу этой модели. Последующая тщательная проверка предсказаний СМ в ускорительных и неускорительных экспериментах устранили всякие сомнения в её справедливости. Даже пока еще найденная частица Хиггса — необходимый ингредиент СМ — не меняет общей картины успеха теории. Примечательно, что недавнее открытие во FNAL тяжелого t-кварка, также необходимого для самосогласованности СМ, было воспринято физическим сообществом как само собой разумеющееся.

Между тем, теоретический базис СМ вызывает немалые сомнения. Уже давно было осознано, что в данной модели присутствуют проблемы, не позволяющие рассматривать ее как фундаментальную теорию. Кроме того, что в ней содержится большое количество свободных параметров, СМ сталкивается с проблемами внутренней самосогласованности. Хорошо известным примером является проблема иерархии энергетических масштабов и связанная с ней проблема квантовой стабильности массы Хиггса. СМ не может рассматриваться как окончательная теория, еще и потому, что она не включает гравитацию. Известны также и проблемы, которые встречает СМ в космологии и астрофизике. Так например, проблема холодной темной материи во Вселенной не находит реалистического объяснения в этой модели.

Все это стимулирует многочисленные попытки выхода за пределы СМ в поисках более фундаментальной теории, способной пролить свет на проблемы СМ и дать единую основу для описания всех взаимодействий, включая и гравитацию. За последнее время на этом пути достигнуты впечатляющие успехи, так что постепенно становится общепринятой точка зрения о том, что открытие экспериментальных проявлений новой физики — дело времени.

Наиболее перспективные модели физики за пределами СМ, которая возможно существует уже при сравнительно низких энергиях, основаны на идее "мягконарушенной" суперсимметрии. Будучи замечательной, как чисто теоретическая и математическая концепция, суперсимметрия дает элегантное объяснение многих неразрешимых в СМ проблем, в частности, упомянутой проблемы иерархии масштабов. В этих моделях присутствует также частица со свойствами, которые необходимы для решения космологической проблемы темной материи. Суперсимметрия оказалась тесно связанной и с идеей объединения взаимодействий. Выяснилось, что в СМ не происходит слияния констант связи сильного, слабого и электромагнитного взаимодействий, составляющего главный смысл объединения. Добавление же в СМ мягконарушенной суперсимметрии, предсказывающей для каждой обычной частицы ее суперпартнера, коренным образом меняет эту ситуацию. Исходя из значений констант связи, полученных в прецизионных измерениях последних лет, удается получить слияние всех трех констант в одной точке на масштабе порядка $\sim 10^{16}$ ГэВ. Эти и другие замечательные свойства суперсимметричных моделей привели в последние годы к тому обоснованному мнению, что модели данного класса являются прообразом будущей фундаментальной теории.

Научно-техническая
библиотека
ОИЯИ

Пока такая теория не создана и данная область переживает стадию поиска и создания пробных моделей, представляется актуальным изучение их внутренних свойств, феноменологических следствий, выяснение их непротиворечивости современным экспериментальным данным, поиск специфических проявлений, которые могли бы наблюдаться в будущем или быть выявленными при целенаправленном анализе существующих данных.

Цель диссертации состоит в изучении общих свойств суперсимметричных и лепто-кварковых расширений стандартной модели, их феноменологии и возможных проявлений новой физики такого типа в низкоэнергетических процессах, включая безнейтринный двойной бета-распад и рассеяние на ядрах гипотетических частиц холодной темной материи, представленных в данном подходе легчайшими суперсимметричными частицами — нейтралито.

Научная новизна и практическая ценность.

В диссертации получены новые результаты, касающиеся общих свойств суперсимметричных и лепто-кварковых расширений стандартной модели, их феноменологии и возможных проявлений в низкоэнергетических процессах. Рассмотрены также следствия минимального суперсимметричного расширения SM для проблемы холодной темной материи (CDM) во Вселенной.

Доказанная низкоэнергетическая теорема, справедливая для любой модели с мягконарушенной суперсимметрией связала Майорановскую массу нейтрино, (B-L) нарушающий массовый член нейтрино и амплитуду безнейтринного двойного бета ($0\nu\beta\beta$) распада. Было показано, что в присутствии массовых членов такого типа в спектре масс нейтрино возникает расщепление, как следствие устойчивости физического вакуума. Наличие такого расщепления приводит к ранее неизвестному явлению — осцилляциям нейтрино-антинейтрино. Эффекты расщепления масс и осцилляций нейтрино, возможность их экспериментального наблюдения широко обсуждаются в литературе, о чем свидетельствует включение данного вопроса в обзор современного состояния суперсимметричной феноменологии Particle Data Group (<http://pdg.lbl.gov/>) издания 1998 года.

Природа массы нейтрино остается одной из нерешенных проблем физики элементарных частиц. Это делает актуальным поиск возможных механизмов ее генерации. В диссертации предложен новый суперсимметричный механизм генерации массы нейтрино на квантовом уровне. Майорановская масса у нейтрино возникает в этом механизме за счет радиационных поправок к оператору собственной энергии нейтрино, отличных от нуля при наличии расщепления в спектре масс нейтрино.

В диссертации открыто новое направление, лежащее на стыке теории элементарных частиц и атомного ядра — феноменология суперсимметричных и лепто-кварковых моделей в безнейтринном двойном бета-распаде ядер. Развитый в диссертации микроскопический подход дал основу для последовательного учета эффектов структуры нуклонов и ядер при переходе от кваркового уровня описания, где формулируются предсказания указанных моделей, к уровню ядерному, непосредственно связанному с экспериментом. Доказанная в диссертации низкоэнергетическая теорема вскрыла тесную связь этого экзотического распада с суперсимметрией. Найденные в диссертации конкретные суперсимметричные механизмы $0\nu\beta\beta$ -распада позволили установить из экспериментальных данных жесткие ограничения на некоторые суперсимметричные расширения стандартной модели. Так, ограничения полученные для R-нечетной Юкавской

константы связи первого поколения стали общепринятыми при интерпретации данных и планировании экспериментов по поиску суперсимметрии. В частности, они положены в основу интерпретации так называемой HERA-аномалии: избытка событий в глубоко неупругом e^+p -рассеянии при больших значениях Бьёркеновской переменной x и переданного 4-импульса Q^2 .

В диссертации изучены новые возможности лабораторного наблюдения частиц CDM посредством регистрации их рассеяния на ядрах. Результаты этих исследований изменили стратегию экспериментального поиска этих частиц, поскольку было показано, что спин ядра мало влияет на величину потока событий. Ранее же считалось, что спин ядра играет определяющую роль в рассеянии Майорановских частиц темной материи и, поэтому, при планировании экспериментов предпочтительно отдавалось ядрам с ненулевым спином. Это неоправданно усложняло создание детекторов темной материи и методы ее поиска. Эксперимент коллаборации Гейдельберг-Москва, один из наиболее успешных в данной области, полностью базируется на результатах исследований, вошедших в диссертацию.

В диссертации рассмотрена также новая нетрадиционная модификация стандартной модели, основанная на введении нелокального взаимодействия в секторе Хиггсовых полей. Это позволило реализовать эти поля как виртонные, т.е. с пропагатором без полюсов, и исключить из наблюдаемого спектра частицу Хиггса. Такая, новая, реализация спонтанно нарушенной электрослабой симметрии представляется актуальной в виду того, что частица Хиггса пока не найдена. Построенная в диссертации модель дает пример подхода, согласующегося с фактом ненаблюдения этих частиц.

На защиту выдвигаются следующие результаты:

1. Теоретически предсказаны ранее неизвестные явления — расщепление в спектре масс нейтрино и осцилляции нейтрино-антинейтрино, возникающее в суперсимметричных теориях с Майорановскими нейтрино. (Нейтрино — это скалярный суперпартнер нейтрино).
2. Доказана общая теорема, связывающая параметр расщепления в спектре нейтрино с Майорановской массой нейтрино и матричным элементом безнейтринного двойного бета-распада.
3. Предложен суперсимметричный механизм генерации массы нейтрино. Майорановская масса нейтрино возникает как квантовый эффект за счет расщепления масс в спектре скалярных нейтрино.
4. Завершено построение минимального расширения стандартной модели, включающего скалярные и векторные лепто-кварки. Найден ранее неучтенные члены низкоэнергетического Лагранжиана, отвечающие взаимодействиям лепто-кварков с полями Хиггса. Их учет существенно изменяет феноменологию лепто-кварков. Найден новый механизм нарушения лептонного числа за счет смешивания лепто-кварков.
5. Построена новая версия стандартной модели слабых и электромагнитных взаимодействий, не содержащая наблюдаемых частиц Хиггса. Модель основана на введении нелокального взаимодействия в секторе скалярных полей. Изучены ее феноменологические следствия.
6. Дано количественное описание рассеяния гипотетических частиц суперсимметричной темной материи галактики на атомных ядрах. Полученные результаты изменили ранее принятую стратегию поиска этих частиц в лабораторных условиях посредством регистрации ядер отдачи.

7. Развита микроскопический подход в теории безнейтринного двойного бета-распада, позволяющий описать данный процесс в терминах микроскопического кваркового Лагранжиана с учетом нуклонной и ядерной структуры, включая мезонные степени свободы ядра.

8. Получена общая параметризация эффективного Лагранжиана, описывающего вклад физики за пределами стандартной модели в безнейтринный двойной бета-распад. На его основе проведена классификация возможных механизмов этого экзотического процесса, запрещенного в стандартной модели.

9. Найдены новые механизмы безнейтринного двойного бета-распада, а именно: суперсимметричные механизмы в моделях с нарушенной и ненарушенной R_p -четностью, а также лепто-кварковый механизм.

10. Предсказан эффект ядерного усиления вклада суперсимметрии и лепто-кварков в безнейтринный двойной бета-распад.

11. Получены новые ограничения на фундаментальные параметры новой физики, исходя из данных экспериментов по поиску безнейтринного двойного бета-распада и космической темной материи. Эти ограничения стали общепринятыми, на их основе планируются многие эксперименты по поиску суперсимметрии.

12. Предложен метод отделения эффектов новой физики от проявлений структуры нуклонов и ядер, участвующих в реакции. Метод основан на факторизации зависимости сечений реакций от нуклонных и ядерных матричных элементов и применении локализованных моментов в КХД-партоновой модели. На этой основе найдены новые соотношения типа Паскоса-Вольфенштейна для сечений (квази-)упругого лептон-нуклонного (ядерного) рассеяния, независимые от нуклонной (ядерной) структуры.

Апробация работы.

Результаты, представленные в диссертации докладывались на семинарах в Лаборатории теоретической физики и в Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований (Дубна), в Институте физики высоких энергий (Протвино), Институте теоретической физики неапольского университета, институте Макса Планка в Гейдельберге, университете Карлсруе, институте теоретической физики тюбингенского университета, техническом университете в Мюнхене, а также на международном симпозиуме по слабым и электромагнитным взаимодействиям в ядрах WEIN'92, Дубна, 1992; WEIN'95, Осака, Япония, 1995; конференции по двойному бета-распаду и смежным проблемам, Тренто, Италия, 1995; 28-й международной конференции Физике Высоких Энергий, Варшава, 1996; международной конференции по проблемам Темной Материи DARK'96, Гейдельберг, 1996; международной конференции по Суперсимметрии SUSY97, Мариланд, США, 1997; международной школе "Нейтрино в астрофизике, физике элементарных частиц и атомного ядра", Эриче, Италия, 1997; конференция по новой физике "Beyond the Desert", Castle Ringberg, Tegernsee, Германия, 1997.

Работы вошедшие в диссертацию цитируются в мировой литературе.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 40 работ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 9 глав и заключения. Она содержит 215 страниц машинописного текста, 26 рисунков, 12 таблиц и 2 приложения, расположенных в тексте. Список литературы включает 230 наименований.

Во введении дан обзор современного состояния Стандартной модели электрослабых и сильных взаимодействий, ее внутренних проблем. Обоснована принципиальная необходимость ее расширения. Сформулирована цель работы, обоснована актуальность проведенных в диссертации исследований и изложено ее краткое содержание.

Первая глава носит вводный характер. Основная цель главы — ввести определения и обозначения, используемые в последующих главах диссертации.

Дан обзор минимальной суперсимметричной модели с нарушенной R-четностью (R_p MSSM). Последняя определяется как мультипликативная Z_2 симметрия вида $R_p = (-1)^{3B+L+2S}$, где S , B и L есть спин, барионное и лептонное числа полей модели. R_p MSSM описывается перенормируемым суперпотенциалом:

$$W = W_{R_p} + W_{R_p}. \quad (1)$$

Сохраняющие R-четность члены записываются в форме:

$$W_{R_p} = h_L H_1 L E^c + h_D H_1 Q D^c + h_U H_2 Q U^c + \mu H_1 H_2. \quad (2)$$

Здесь L , Q — лептонный и кварковый дублеты лево-киральные суперполей, тогда как E^c , U^c , D^c соответствуют синглетным суперполям лептонов, а также u - d -кварков. H_1 and H_2 — дублеты Хиггсовых суперполей со слабым гиперзарядом $Y = -1, +1$ соответственно.

Члены суперпотенциала нарушающие R-четность имеют вид:

$$W_{R_p} = \lambda_{ijk} L_i L_j E_k^c + \lambda'_{ijk} L_i Q_j D_k^c + \mu_j L_j H_2 + \lambda''_{ijk} U_i^c D_j^c D_k^c, \quad (3)$$

Юкавские R_p -нечетные связи λ_{ijk} и λ'_{ijk} являются предметом исследования Глав 7 и 8.

Далее в Главе 1 дается сводка формул для массовых матриц полей модели, излагаются методы получения спектра масс частиц, а также приводится явный вид некоторых членов Лагранжиана взаимодействий R_p MSSM.

Во второй главе изучены некоторые новые аспекты проблемы массы нейтрино, возникающие в контексте суперсимметричных моделей.

Показано, что самосогласованная форма массового члена в секторе полей нейтрино-снейтрино имеет вид

$$L_{mass}^{\nu\bar{\nu}} = -\frac{1}{2}(m_M^\nu \bar{\nu}^c \nu + h.c.) - \frac{1}{2}(\tilde{m}_M^2 \bar{\nu}_L \tilde{\nu}_L + h.c.) - \tilde{m}_D^2 \bar{\nu}_L^* \tilde{\nu}_L. \quad (4)$$

где $\nu = \nu^c$ Майорановское поле. Первые два члена этого выражения нарушают глобальную (B-L) симметрию, тогда как последний ей удовлетворяет. Первый член представляет собой Майорановский массовый член нейтрино. По аналогии второе слагаемое, нарушающее (B-L) симметрию, названо Майорановским массовым членом снейтрино.

Доказана общая теорема, связывающая три (B-L) нарушающие величины: Майорановскую массу нейтрино m_M^ν , Майорановскую массу снейтрино \tilde{m}_M^2 и амплитуду безнейтринного двойного бета-распада $R_{0\nu\beta\beta}$. Теорема состоит из двух утверждений.

Утверждение 1: Если одна из трех величин m_M^ν , \tilde{m}_M^2 или $R_{0\nu\beta\beta}$ обращается в ноль, то равны нулю и две оставшиеся.

Утверждение 2 является обратным к предыдущему: Если, по крайней мере, одна из трех величин m_M^ν , \tilde{m}_M , или $R_{0\nu\beta\beta}$ отлична от нуля, то и две другие не равны нулю.

Последнее утверждение можно понимать так, что если одна из этих (B-L)-нарушающих величин не равна нулю, то две другие генерируются в высших порядках теории возмущений. Это продемонстрировано на конкретных примерах диаграмм. Доказательство первого утверждения строится на анализе допустимых симметрий низкоэнергетического Лагранжиана моделей с мягконарушенной суперсимметрией.

Показано, что в случае ненулевого значения \tilde{m}_M комплексное скалярное поле sneйтрино $\tilde{\nu}$ перестает быть состоянием с определенной массой и расщепляется на два действительных поля $\tilde{\nu}_{1,2}$.

$$\tilde{\nu} = \frac{\tilde{\nu}_1 + i\tilde{\nu}_2}{\sqrt{2}}, \quad (5)$$

с противоположными CP-четностями и массами $\tilde{m}_{1,2}^2 = \tilde{m}_D^2 \pm |\tilde{m}_M^2|$. Стабильность вакуума требует $\tilde{m}_D^2 \geq |\tilde{m}_M^2|$. Таким образом Майорановская масса sneйтрино имеет смысл параметра расщепления в sneйтринном спектре.

Как развитие этих представлений, предложен суперсимметричный механизм генерации Майорановской массы нейтрино, за счет 1-петлевого вклада sneйтрино и нейтрально в оператор собственной энергии нейтрино. Майорановская масса в этом механизме дается формулой

$$m_{\nu(i)} = 6.4 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{\tilde{m}_{M(i)}}{10 \text{ MeV}} \right)^2 \left(\frac{100 \text{ GeV}}{m_{SUSY}} \right)^2 \text{ eV}. \quad (6)$$

Изучены другие феноменологические следствия моделей с ненулевым значением \tilde{m}_M^2 и возможности их экспериментальной проверки. Одно из них — (B-L)-нарушающие осцилляции sneйтрино-антиснейтрино $\tilde{\nu} - \tilde{\nu}^c$. Этот феномен возникает вследствие того, что собственные состояния Гамильтониана взаимодействия $\tilde{\nu}$ и $\tilde{\nu}^c$ не являются собственными состояниями массового оператора. Поэтому начальное чистое состояние sneйтринного поля $|\tilde{\nu}\rangle$ эволюционирует с течением времени в смешанное $\tilde{\nu} - \tilde{\nu}^c$ состояние. Временная эволюция вектора состояния дается формулой:

$$\begin{aligned} |\tilde{\nu}(t)\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} (e^{-i(m_1+i\tilde{\Gamma}_1/2)t} |\tilde{\nu}_1\rangle + ie^{-i(m_2+i\tilde{\Gamma}_2/2)t} |\tilde{\nu}_2\rangle) \\ &= A(t)_{\tilde{\nu}-\tilde{\nu}} |\tilde{\nu}\rangle + A(t)_{\tilde{\nu}-\tilde{\nu}^c} |\tilde{\nu}^c\rangle, \end{aligned} \quad (7)$$

где $\tilde{\Gamma}_i$ — полная ширина распада состояний sneйтрино с определенной массой $|\tilde{\nu}_i\rangle$. Величины $A(t)_{\tilde{\nu}-\tilde{\nu}}$ и $A(t)_{\tilde{\nu}-\tilde{\nu}^c}$ — амплитуды $\tilde{\nu}-\tilde{\nu}$ и $\tilde{\nu}-\tilde{\nu}^c$ переходов соответственно. Отсюда найдена полная проинтегрированная по времени вероятность найти антиснейтрино $|\tilde{\nu}^c\rangle$ в суперпозиции (7).

В третьей главе рассматриваются лептокварковые расширения стандартной модели сильных и электрослабых взаимодействий, со стандартным составом полей, дополненным новыми скалярными и векторными полями — лептокварками. Они взаимодействуют перенормируемым образом с кварками и лептонами и несут одновременно и лептонный, и барионный заряды.

Симметрии и состав полей стандартной модели допускают всего 5 скалярных и 5 векторных лептокварков в следующих представлениях группы $SU(3)_c \times SU(2)_L \times U_{1Y}$:

$$\begin{aligned} S_0 &= (3_c, \mathbf{1}, -2/3), & \tilde{S}_0 &= (3_c, \mathbf{1}, -8/3), & S_{1/2} &= (3_c^*, \mathbf{2}, -7/3), \\ \tilde{S}_{1/2} &= (3_c^*, \mathbf{2}, -1/3), & S_1 &= (3_c, \mathbf{3}, -2/3), \\ V_0 &= (3_c^*, \mathbf{1}, -4/3), & \tilde{V}_0 &= (3_c^*, \mathbf{1}, -10/3), & V_{1/2} &= (3_c, \mathbf{2}, -5/3), \\ \tilde{V}_{1/2} &= (3_c, \mathbf{2}, 1/3), & V_1 &= (3_c^*, \mathbf{3}, -4/3). \end{aligned} \quad (8)$$

Исходя из требований калибровочной симметрии определяется общий вид перенормируемого Лагранжиана модели. Новым в диссертации является включение взаимодействий лептокварков с полями Хигса. Соответствующие члены Лагранжиана имеют вид:

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{LQ-II} &= h_{S_0}^{(i)} H i \tau_2 \tilde{S}_{1/2} \cdot S_0^i + h_{\tilde{V}_0}^{(i)} H i \tau_2 \tilde{V}_{1/2}^\mu \cdot V_{0\mu}^i + \\ &+ h_{S_1} H i \tau_2 \tilde{S}_1 \cdot \tilde{S}_{1/2} + h_{V_1} H i \tau_2 \tilde{V}_1^\mu \cdot \tilde{V}_{1/2\mu} + \\ &+ Y_{S_{1/2}}^{(i)} (H i \tau_2 S_{1/2}^i) \cdot (\tilde{S}_{1/2}^\dagger H) + Y_{V_{1/2}}^{(i)} (H i \tau_2 V_{1/2}^{\mu(i)}) \cdot (\tilde{V}_{1/2\mu}^\dagger H) + \\ &+ Y_{S_1} (H i \tau_2 \tilde{S}_1^\dagger H) \cdot \tilde{S}_0 + Y_{V_1} (H i \tau_2 \tilde{V}_1^\mu H) \cdot \tilde{V}_{0\mu} + \\ &+ \kappa_S^{(i)} (H^\dagger \tilde{S}_1 H) \cdot S_0^{\dagger i} + \kappa_V^{(i)} (H^\dagger \tilde{V}_1^\mu H) \cdot V_{0\mu}^{\dagger i} + h.c. - \\ &- (\eta_\Phi M_\Phi^2 - g_\Phi^{(i_1 i_2)} H^\dagger H) \Phi^{i_1 \dagger} \Phi^{i_2}. \end{aligned} \quad (9)$$

Здесь H — $SU(2)_L$ -дублет поля Хигса с гиперзарядом $Y = 1$.

Учет лептокварк-Хигсовских взаимодействий (9) изменяет феноменологию лептокварков, приводя новые взаимодействия, обусловленные смешиванием лептокварков разных представлений электрослабой группы. В частности, смешивание приводит к нарушению полного лептонного числа, оставляя при этом сохранение барионного числа незатронутым. Последнее важно с точки зрения стабильности протона.

В низкоэнергетическом пределе получены следующие нарушающие лептонное число эффективные взаимодействия в кварк-лептонном секторе:

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{LQ}^{eff} &= (\tilde{\nu} P_R c^c) \left[\frac{\epsilon_s}{M_S^2} (\bar{u} P_R d) + \frac{\epsilon_v}{M_V^2} (\bar{u} P_L d) \right] - \\ &- (\tilde{\nu} \gamma^\mu P_L c^c) \left[\left(\frac{\alpha_s^{(R)}}{M_S^2} + \frac{\alpha_v^{(R)}}{M_V^2} \right) (\bar{u} \gamma_\mu P_R d) - \left(\frac{\alpha_s^{(L)}}{M_S^2} + \frac{\alpha_v^{(L)}}{M_V^2} \right) (\bar{u} \gamma_\mu P_L d) \right]. \end{aligned} \quad (10)$$

где коэффициенты α, ϵ обращаются в ноль, если взаимодействия (9) лептокварков с полями Хигса отсутствуют.

Нарушение лептонного числа приводит, в частности, к нетривиальному вкладу лептокварков в безнейтринный двойной бета-распад. Причем, такие вклады оказываются усилёнными когерентным воздействием ядерной среды.

В заключении главы кратко рассматриваются ограничения на параметры модели, которые накладываются данными по распаду $\pi \rightarrow e\nu$, подавленному в стандартной модели законом сохранения углового момента.

В четвертой главе изучаются общие свойства безнейтринного двойного бета-распада ($0\nu\beta\beta$), мотивируется уникальность этого ядерного процесса для физики элементарных частиц. $0\nu\beta\beta$ -распад возможен лишь при наличии взаимодействий нарушающих

лептонное число, что запрещено в стандартной модели, а следовательно подразумевает выход за ее пределы. Дается общая параметризация возможных вкладов новой физики в $0\nu\beta\beta$ -распад в форме низкоэнергетического эффективного Лагранжиана

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{qe}(0\nu\beta\beta) = & -\frac{g_2}{\sqrt{2}} [W_\mu^+ (\bar{u}_L \gamma^\mu d_L + U_{1n}^* \bar{\nu}_{nL} \gamma^\mu e_L)] + \frac{\lambda_i^{(1)}}{m_{new}^{n_1}} j_i \cdot \bar{e} \Gamma_{i(1)} \nu_L^c + \dots \quad (11) \\ & + \frac{\lambda_i^{(2)}}{m_{new}^{n_2}} W_\mu^- \cdot \bar{e} \Gamma_{i(2)}^\mu \nu_L^c + \frac{\lambda_i^{(3)}}{m_{new}^{n_3}} W_\mu^- W_\nu^- \cdot \bar{e} \Gamma_{i(3)}^{\mu\nu} e^c + \\ & + \frac{\lambda_i^{(4)}}{m_{new}^{n_4}} j_i^\mu W_\mu^- \cdot \bar{e} \Gamma_{i(4)} e^c + \frac{\lambda_{ij}^{(5)}}{m_{new}^{n_5}} j_i j_j \cdot \bar{e} \Gamma_{ij(5)} e^c. \end{aligned}$$

Синглетные по цвету дикварковые операторы определены как $j_i = \bar{u}^\alpha \mathcal{O}_i d_\alpha$, где α — цветовой индекс. Объекты $\Gamma_{i(k)}$ и \mathcal{O}_i представляют собой некоторые конструкции из γ -матриц Дирака и производных, m_{new} — характерный масштаб новой физики.

Рассмотренные на основе Лагранжиана (11) общие свойства возможных вкладов новой физики в $0\nu\beta\beta$ -распад задают направления поисков конкретных механизмов в различных расширениях стандартной модели.

Далее развивается микроскопический подход к $0\nu\beta\beta$ -распаду, позволяющий вычислять его амплитуду, исходя их кваркового Лагранжиана. Излагается формализм перехода к нуклонным и мезонным степеням свободы ядра. Соответствующий адронный Лагранжиан записывается в виде

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{he}(0\nu\beta\beta) = & \bar{e}(1 + \gamma_5) e^c \left[a_k^{2N} J_k J_k + a^{1\pi} \pi^- J_P + a^{2\pi} (\pi^-)^2 \right] + \quad (12) \\ & + a_k^N \bar{e}(1 + \gamma_5) \nu_k^c \cdot (J_P + J_S) + a_n^\pi \bar{e}(1 + \gamma_5) \nu_n^c \cdot \pi^- + \\ & + \frac{G_F}{\sqrt{2}} U_{en} \bar{e} \gamma_\mu (1 - \gamma_5) \nu_n \cdot J_{AV}^\mu + g_s \bar{p} i \gamma_5 n \pi^+. \end{aligned}$$

Здесь $J_{P,S,T}$ — скалярный, псевдоскалярный и тензорный нуклонные токи, π — поле пи-мезона.

На основе этого Лагранжиана вычисляется амплитуда $0\nu\beta\beta$ -распада в терминах нерелятивистских операторов перехода Ω_i :

$$R_{0\nu\beta\beta}(0^+ \rightarrow 0^+) = C_{0\nu} [\bar{e}(1 + \gamma_5) e^c] \sum_i \eta_i (F|\Omega_i|I). \quad (13)$$

Дается явный вид всех базисных операторов Ω_i и вычисляются их ядерные матричные элементы для всех экспериментально интересных изотопов в рамках подхода, известного в литературе, как pn -RQRPA.

Пятая глава посвящена рассмотрению конкретных механизмов $0\nu\beta\beta$ -распада в суперсимметричных и лептокварковых расширениях стандартной модели. Рассматриваются дальнедействующий и короткодействующий механизмы. На Рис. 1 приводится простейший пример диаграммы, дающей вклад в данный процесс, в суперсимметричных моделях с нарушенной R-четностью. Промежуточное состояние диаграммы содержит два скварка \tilde{u} и глюино \tilde{g} . В низкоэнергетическом пределе диаграмма соответствует короткодействующему механизму. Эффективный Лагранжиан, описывающий вклад всех диаграмм такого типа, имеет вид:

$$\mathcal{L}_{qe}^{sd}(x) = \frac{G_F^2}{2m_p} \bar{e} P_R e^c \left[\eta^{PS} \bar{u} P_R d \cdot \bar{u} P_R d - \eta^T \bar{u} \sigma^{\mu\nu} P_R d \cdot \bar{u} \sigma_{\mu\nu} P_R d \right]. \quad (14)$$

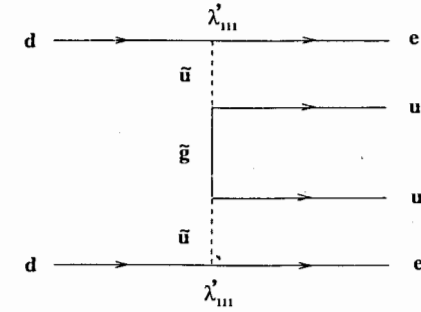


Рис. 1: Пример R-нечетного суперсимметричного вклада в $0\nu\beta\beta$ -распад.

Данный Лагранжиан описывает вклад короткодействующего механизма в первом порядке теории возмущений. Дальнедействующий механизм, включающий диаграммы с нейтринным обменом, описывается во втором порядке теории возмущений:

$$\mathcal{L}_{qe}^{ld}(x) = \frac{G_F}{4\sqrt{2}} (\eta_{(q)LR}^{nj} - 4\eta_{(l)LR}^{nj}) \cdot U_{ni}^* \cdot \bar{\nu}_i P_R e_j^c \cdot \bar{u} P_R d. \quad (15)$$

Матрица смешивания нейтрино U_{ij} определена стандартным образом. Эффективные параметры η , аккумулируют фундаментальные параметры \mathcal{R}_p MSSM и $\eta \sim \lambda'^2$.

Механизм, основанный на смешивании частиц с суперчастицами, использует тот факт, что билинейные члены в суперпотенциале (3) и в секторе мягкого нарушения суперсимметрии приводят к смешиванию нейтрино с нейтралينو и левого электрона с чарджино. Это в свою очередь порождает новые вклады в $0\nu\beta\beta$ -распад. Они описываются во втором порядке теории возмущений Лагранжианом

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{qe}^{LH}(x) = & \frac{G_F^2}{8m_p} \left[\eta_{\tilde{g}} (\bar{u} P_R d \cdot \bar{u} P_R d - \frac{1}{4} \bar{u} \sigma^{\mu\nu} P_R d \cdot \bar{u} \sigma_{\mu\nu} P_R d) + \quad (16) \right. \\ & + \eta_\chi \bar{u} \gamma^\mu P_L d \cdot \bar{u} \gamma_\mu P_L d (\bar{e} P_R e^c) - \\ & \left. - \frac{G_F}{\sqrt{2}} \lambda'_{i11} \cdot \eta_\lambda^{(ki)} \cdot (\bar{\nu}_k P_R e^c) \bar{u} P_R d + \frac{G_F}{\sqrt{2}} (\bar{e} \gamma_\mu P_L \nu_k) U_{1k}^{(\nu)} \bar{u} \gamma^\mu P_L d. \right. \end{aligned}$$

Параметры η зависят от вакуумного среднего sneйтринного поля $\langle 0|\tilde{\nu}|0\rangle$ и параметра смешивания μ_i (см.(3)).

Включение в теорию ненулевой Майорановской массы sneйтрино \tilde{m}_M , рассмотренной в Главе 3, приводит к появлению нетривиального вклада в $0\nu\beta\beta$ -распад в моделях с сохраняющейся R-четностью. В этом случае источником нарушения лептонного числа является массовый член sneйтрино. Эффективный Лагранжиан описывающий данный вклад в 4-порядке теории возмущений имеет вид:

$$\mathcal{L}_{qe}^{box} = \eta_{WV} \frac{W_\mu^- W^{-\mu}}{m_{SUSY}} \cdot \bar{e} P_R e^c + \frac{\eta_{\tilde{g}\tilde{q}}}{m_{SUSY}^5} \cdot \bar{e} P_R e^c \cdot \bar{u} \gamma^\mu P_L d \cdot \bar{u} \gamma_\mu P_L d. \quad (17)$$

В этом случае $\eta \sim \tilde{m}_M^2$.

Наконец, в лептокварковых моделях получен вклад в $0\nu\beta\beta$ -распад, обусловленный нарушением лептонного числа L за счет смешивания лептокварков (LQ) с различающимся значением L . Вклад LQ в $0\nu\beta\beta$ -распад описывается во 2-порядке теории возмущений эффективным Лагранжианом (10).

На основе формализма, разработанного в предыдущей главе, определяется вклад каждого механизма в амплитуду $0\nu\beta\beta$ -распада.

В шестой главе рассматриваются возможные проявления новой физики в безнейтринном двойном бета-распаде ядер. $0\nu\beta\beta$ -распад до сих пор не наблюдался. Однако из этого факта удастся получить очень жесткие ограничения на некоторые параметры новой физики. Исходя из результатов Главы 5, получены и проанализированы ограничения, которые накладываются экспериментами по поиску этого экзотического процесса на параметры суперсимметричных и лептокварковых расширений стандартной модели. Полученное в диссертации ограничение на R_p -нечетную Юкавскую константу связи

$$\lambda'_{111} \leq 1.8 \sqrt{\eta_{susv}^{sd}} \left(\frac{m_{\bar{q}}}{100\text{GeV}} \right)^2 \left(\frac{m_{\bar{q}}}{100\text{GeV}} \right)^{1/2}, \quad (18)$$

является наиболее сильным из известных в литературе ограничений такого типа.

Далее дана оценка перспектив поиска суперсимметрии и лептокварков в различных $0\nu\beta\beta$ -экспериментах и проведено сравнение с соответствующими перспективами некоторых ускорительных экспериментов.

Седьмая глава посвящена проблеме холодной темной материи (CDM) во Вселенной. В качестве частиц CDM рассматривается легчайшая суперсимметричная частица — нейтралينو. Изучаются возможности экспериментального наблюдения этих частиц в лабораторных условиях по процессу их упругого рассеяния на ядрах вещества детектора. Эффективный Лагранжиан нейтрально-кваркового $\chi - q$ взаимодействия в общем виде может быть представлен в форме:

$$L_{eff} = \sum_q \left(\mathcal{A}_q \cdot \bar{\chi} \gamma_\mu \gamma_5 \chi \cdot \bar{q} \gamma^\mu \gamma_5 q + \frac{m_q}{M_W} \cdot C_q \cdot \bar{\chi} \chi \cdot \bar{q} q \right). \quad (19)$$

Коэффициенты \mathcal{A}_q и C_q , соответствующие спин-зависимой R_{sd} и когерентной спин-независимой R_{si} частям амплитуды нейтралино-ядерного упругого рассеяния, вычислены в рамках минимальной суперсимметричной модели (MSSM). Ядерная структура учтена на основе odd-gouor оболочечной модели. Величина R_{sd} , R_{si} проанализирована с учетом известных экспериментальных ограничений на параметрическое пространство MSSM. Установлено, что $R_{sd} \lesssim R_{si}$ т.е. спин ядра не играет существенной роли в рассеянии нейтралино, вопреки широко распространенному мнению о его доминантности. Это послужило основанием для переориентации некоторых планируемых экспериментов по поиску CDM нейтралино со спиновых ядер мишени на бесспиновые. Изучены перспективы будущих экспериментов такого типа и возможные ограничения на параметры MSSM, которые могут быть ими получены.

В восьмой главе предложена нелокальная версия стандартной модели без частиц Хиггса. Подобные теоретические схемы представляются актуальными в виду того, что частицы Хиггса до сих пор не наблюдались экспериментально.

Модель основана на так называемой виртонной реализации полей Хиггса. В такой реализации после спонтанного нарушения электрослабой симметрии пропагатор поля

Хиггса теряет полюс, что означает отсутствие в спектре асимптотических состояний частиц Хиггса. Вместе с тем механизм Хиггса остается в силе и воспроизводит все массовые члены обычной СМ. Нелокальность вводится в самодействие скалярного Хиггсова поля следующим образом:

$$-\mathcal{L} = \phi^\dagger(x) (\partial^2 + m^2) \phi(x) + \lambda \left(\Phi(x)^\dagger * \Phi(x) \right)^2 \quad (20)$$

где $m^2 < 0$, а нелокальное поле $\Phi(x)$ получено из локального $\phi(x)$ путем "размазки" по некоторой области с характерным масштабом ℓ_0 . Природа нелокальности не рассматривается. Ей сопоставляется некоторый феноменологический формфактор \mathcal{K} , с помощью которого нелокальное поле записывается в виде:

$$\Phi(x) = \int dy \mathcal{K}(x-y) \phi(y) = \mathcal{K}(\ell_0^2 \partial^2) \phi(x). \quad (21)$$

Нелокальный оператор $\mathcal{K}(\ell_0^2 \partial^2)$ может быть представлен в форме:

$$\mathcal{K}(\ell_0^2 \partial^2) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{c_n}{(2n)!} (\ell_0^2 \partial^2)^n. \quad (22)$$

Обобщенная функция $\mathcal{K}(x-y) \doteq \mathcal{K}(\ell_0^2 \partial^2) \delta(x-y)$ принадлежит к одному из пространств нелокальных обобщенных функций введенных и исследованных в работах Г.В.Ефимова. Включая взаимодействия (20) в Лагранжиан СМ и используя методы квантования развитые в этих работах, получаем следующее выражение для Лагранжиана модели после спонтанного нарушения симметрии:

$$\begin{aligned} -\mathcal{L}^\delta &= \frac{1}{2} \eta(x) \mathcal{E}(\partial^2) \eta(x) + \lambda v (\eta)^3 + \frac{\lambda}{4} (\eta)^4 - \\ &- \frac{g^2}{4} [(\bar{\eta})^2 + 2\bar{\eta}v_j] \left(W_\mu^+ W^{-\mu} + \frac{1}{2 \cos^2 \theta_W} Z_\mu Z^\mu \right) - \\ &- M_W^2 W_\mu^+ W^{-\mu} - \frac{1}{2} M_Z^2 Z_\mu Z^\mu - \sum_f \bar{\psi}_f \left(i \gamma_\mu D^\mu - m_f \left(1 + \frac{\eta}{v} \right) \right) \psi_f \end{aligned} \quad (23)$$

Здесь η поле Хиггса в виртонной реализации с пропагатором \mathcal{E}^{-1} , не обладающим полюсами, поскольку по построению \mathcal{E} — целая функция.

Показано, что феноменология данной модели при энергиях, достигнутых в современных экспериментах неотличима от феноменологии стандартной модели.

В девятой главе предложены некоторые методы анализа сечений упругого и глубоко-неупругого рассеяния лептонов на нуклонах и ядрах, позволяющие снизить зависимость некоторых измеряемых величин от нуклонной и ядерной структуры и явно выделить их зависимость от фундаментальных параметров стандартной модели и новой физики. Примером является полученное в диссертации соотношение типа Паскоса-Вольфенштейна для квазиупругого νN -рассеяния:

$$\begin{aligned} \frac{\frac{d\sigma}{dQ^2}(\nu, p(n) \rightarrow \nu, p(n)) - \frac{d\sigma}{dQ^2}(\bar{\nu}, p(n) \rightarrow \bar{\nu}, p(n))}{\frac{d\sigma}{dQ^2}(\nu n \rightarrow e_l^+ p) - \frac{d\sigma}{dQ^2}(\bar{\nu} p \rightarrow e_l^+ n)} &= \\ &= \frac{\rho^2}{4 \cos^2 \theta_c} \left\{ 1 - 2 \sin^2 \theta_w (1 \pm \frac{\mu_p + \mu_n}{\mu_p - \mu_n}) \right\}, \end{aligned} \quad (24)$$

где $\mu_{p,n}$ — магнитные моменты протона и нейтрона.

В заключении дана сводка основных результатов, полученных в диссертации.

1. V.A. Bednyakov, S.G. Kovalenko, "Extra Z' -boson in elastic and diffractive νN -scattering", JINR prepr., E2-88-395, Dubna, 1988.
2. V.A. Bednyakov, S.G. Kovalenko, "Extra Z' -boson in νN -elastic and some quasielastic processes", Phys. Lett., 214B (1988) 640.
3. В.А. Бедняков, С.Г. Коваленко, "Суперструнный Z' -бозон при энергиях УНК". ЯФ, 49 (1989) 866.
4. В.А. Бедняков, С.Г. Коваленко, "Суперструнный Z' -бозон в экспериментах на фиксированной мишени", препр. ОИЯИ, P2-89-356, Дубна, 1989.
5. V.A. Bednyakov, S.G. Kovalenko, "New relations in lepton-nucleon scattering, independent of the nucleon structure", JINR prepr., E2-89-295, Dubna, 1989.
6. V.A. Bednyakov, S.G. Kovalenko, "Paschos-Wolfenstein relation in elastic νN -scattering." Phys. Lett., 219B (1989) 96.
7. V.A. Bednyakov, S.G. Kovalenko, "New relations between lN -scattering cross sections and neutral current parameters", Z.Phys.C. 45 (1990) 515.
8. V.A. Bednyakov, Yu.P. Ivanov, S.G. Kovalenko, "Nucleon Structure as a Background for Determination of Fundamental Parameters." Phys. Rev., D48 (1993) 129.
9. S.G. Kovalenko, "Hidden Higgs Particle" Mod. Phys. Lett. A9 (1994) 1933.
10. S.G. Kovalenko, "Standard model without Higgs particles" in Proc. the Int. Symposium on Weak and Electromagnetic Interactions in Nuclei (WEIN'92), Dubna, 1992, p. 505.
11. V.A. Bednyakov, H.V. Klapdor-Kleingrothaus, S.G. Kovalenko, "Possible Constraints on SUSY-model Parameters from Direct Dark Matter Search", Phys. Lett. B329 (1994) 5.
12. V.A. Bednyakov, H.V. Klapdor-Kleingrothaus, S.G. Kovalenko, "On Direct Detection of Supersymmetric Dark Matter and the Role of the Target Nucleus Spin". Phys.Rev. D50 (1994) 7128.
13. M. Hirsch, H.V. Klapdor-Kleingrothaus, S.G. Kovalenko, "New Supersymmetric Contribution to Neutrinoless Double Beta Decay", Phys.Lett. B352 (1995) 1.
14. M. Hirsch, H.V. Klapdor-Kleingrothaus, S.G. Kovalenko, "New Constraints on Supersymmetry from Neutrinoless Double Beta Decay", Phys.Rev.Lett., 75 (1995) 17.
15. M. Hirsch, H.V. Klapdor-Kleingrothaus and S.G. Kovalenko, "Test of Supersymmetry: double beta decay and particle accelerators", Phys.Bl. 51 (1995) 418. (in German)
16. M. Hirsch, H.V. Klapdor-Kleingrothaus and S.G. Kovalenko, "Supersymmetry and Neutrinoless Double Beta Decay", Phys. Rev. D53 (1996) 1329.
17. M. Hirsch, H.V. Klapdor-Kleingrothaus and S.G. Kovalenko, "Supersymmetry and Neutrinoless Double Beta Decay", In the Proc. of the Int. Symposium on Weak and Electromagnetic Interactions in Nuclei (WEIN'95), Osaka, 1995, p.204.
18. M. Hirsch, H.V. Klapdor-Kleingrothaus and S.G. Kovalenko, "On the SUSY Accompanied Neutrino Exchange Mechanism of Neutrinoless Double Beta Decay", Phys.Lett. B372 (1996) 181.
19. M. Hirsch, H.V. Klapdor-Kleingrothaus, S.G. Kovalenko, H.Paes "On the observability of Majoron emitting double beta decays" Phys.Lett. B372 (1996) 8.
20. V.A. Bednyakov, H.V. Klapdor-Kleingrothaus, S.G. Kovalenko, "Expectations for Supersymmetric Dark Matter Searches Underground", in Proc. of the Workshop on Double Beta Decay and Related Topics, Trento, Italy, 1995, ed. by H.V. Klapdor-Kleingrothaus and S. Stoica (World Scientific, Singapore, 1996), p. 304.
21. M. Hirsch, H.V. Klapdor-Kleingrothaus, S.G. Kovalenko, "The R-parity violating supersymmetric mechanism of neutrinoless double beta decay". in Proc. the Workshop on Double Beta Decay and Related Topics, Trento, Italy, 1995, ed. by H.V. Klapdor-Kleingrothaus and S. Stoica (World Scientific, Singapore, 1996), p. 91.
22. M. Hirsch, H.V. Klapdor-Kleingrothaus, S.G. Kovalenko, "New Low-energy Leptoquark Interactions". Phys.Lett. B 378 (1996) 17.
23. M. Hirsch, H.V. Klapdor-Kleingrothaus, S.G. Kovalenko, "New Leptoquark Mechanism for Neutrinoless Double Beta Decay". Phys.Rev. D54 (1996) R4207.
24. M. Hirsch, H.V. Klapdor-Kleingrothaus, S.G. Kovalenko, "Probing physics beyond the standard model with neutrinoless double beta decay". Proc. 28th Inter. Conference on High energy physics, 25 - 31 July 1996, Warsaw, Poland, World Scientific, Singapore, eds. Z. Ajduk and A.K.Wroblewski, p. 1426.
25. S.G. Kovalenko, "Low-energy theorem in softly-broken supersymmetry", JINR Rapid Communications 81 (1997) 103.
26. A. Faessler, S. Kovalenko, F. Simkovic and J. Schwieger, "Pion-exchange Supersymmetric Mechanism of Neutrinoless Double Beta Decay." Phys.Rev.Lett. 78 (1997) 183.
27. V.A. Bednyakov, V.B. Brudanin, S.G. Kovalenko and Ts.D. Vylov, "On Prospects for Exploration of Supersymmetry in Double Beta Decay Experiments." Mod.Phys.Lett. A12 (1997) 233.
28. M. Hirsch, H.V. Klapdor-Kleingrothaus and S.G. Kovalenko, "(B-L)-violating Masses in Softly Broken Supersymmetry." Phys.Lett. B 398 (1997) 311.
29. M. Hirsch, H.V. Klapdor-Kleingrothaus and S.G. Kovalenko, "Sneutrino Oscillations and Neutrinoless Double Beta Decay", Phys. Lett. B 403 (1997) 291.
30. V.A. Bednyakov, H.V. Klapdor-Kleingrothaus and S.G. Kovalenko, "On the lower limit for the mass of the dark matter neutralino" In the Proc. of the Int. Workshop DARK'96, Heidelberg, 1996, p. 151.
31. M. Hirsch, H.V. Klapdor-Kleingrothaus and S.G. Kovalenko, "R-parity Conserving Supersymmetry, Neutrino Mass and Neutrinoless Double Beta Decay", Phys.Rev.D 57 (1998) 1947.
32. M. Hirsch, H.V. Klapdor-Kleingrothaus, St. Kolb and S.G. Kovalenko, "Phenomenological implications of "Majorana" sneutrinos at future accelerators", Phys.Rev. D 57 (1998) 2020.
33. M. Hirsch, H.V. Klapdor-Kleingrothaus and S.G. Kovalenko, "Double beta decay, supersymmetry and lepton number violation", in Proc. Int. Conf. SUSY97, University of Maryland, 1997, p. 126.
34. A. Faessler, S.Kovalenko, F. Simkovic and J. Schwieger, "Pion Exchange Currents in Neutrinoless Double Beta Decay and Limits on Supersymmetry", ЯФ, 61, вып. 7 (1998) 537.

35. A. Faessler, S. Kovalenko, F. Simkovic and J. Schwieger, "The Pauli Principle, Nuclear Structure and Double Beta Decay", in Proc. Int. School on Nuclear Physics "Neutrinos in Astro, Particle and Nuclear Physics" Erice, Italy; September 16 - 24, 1997, p. 237.
36. M. Hirsch, H.V. Klapdor-Kleingrothaus, St. Kolb and S.G. Kovalenko, "Supersymmetry and Majorana (S)neutrino", ЯФ, 61, вып. 7 (1998) 770.
37. M. Hirsch, H.V. Klapdor-Kleingrothaus, S.G. Kovalenko, H.Paes "A general parametrization for the long-range part of neutrinoless double beta decay" in Proc. of the Erice School on Nuclear Physics, 19th course "Neutrinos in Astro, Particle and Nuclear Physics", Erice, Italy, 16-24 September 1997, p. 221.
38. M. Hirsch, H.V. Klapdor-Kleingrothaus, S.G. Kovalenko, H.Paes "Towards a superformula for neutrinoless double beta decay", in Proc. of the workshop "Beyond the Desert", Castle Ringberg, Tegernsee, Germany, June 8-14 1997 (ed. by H.V. Klapdor-Kleingrothaus and H.Paes), p. 145; hep-ph/9804374.
39. A. Faessler, S. Kovalenko, F. Simkovic, "Bilinear R-parity Violation in Neutrinoless Double Beta Decay", accepted for publication in Phys.Rev. D; hep-ph/9712535, препр. ОИЯИ Е4-98-124.
40. A. Faessler, S. Kovalenko, F. Simkovic, "Pions in Nuclei and Manifestations of Supersymmetry in Neutrinoless Double Beta Decay", submitted to Phys. Rev. D (1998); hep-ph/9803253, препр. ОИЯИ Е4-98-123.

Рукопись поступила в издательский отдел
15 мая 1998 года.