

На правах рукописи

Журидов Дмитрий Владимирович

МАЙОРАНОВСКИЕ НЕЙТРИНО И ПРОЦЕССЫ
С НЕСОХРАНЕНИЕМ ЛЕПТОННОГО ЧИСЛА

Специальность 01.04.02 — теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2006

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 А.И. Тернов

Ведущая организация: Томский государственный университет

Защита состоится “___” _____ 2006 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 “___” _____ 2006.

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

П.А. Поляков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Обнаруженные на рубеже XX и XXI веков осцилляции солнечных, атмосферных, реакторных и ускорительных нейтрино, означают наличие масс у этих частиц и смешивания в лептонном секторе. Тем не менее, остаются неизвестными природа и абсолютный масштаб масс нейтрино. По типу масс нейтрино могут быть майорановскими или дираковскими. Свойства тех и других существенно различны. Например, майорановские фермионы, в отличие от дираковских, должны приводить к процессам с изменением полного лептонного числа на величину, кратную двум. Последнее влечет за собой существенные эффекты, такие как лептогенезис, объясняющий барионную асимметрию Вселенной. Что касается абсолютного масштаба масс нейтрино, то осцилляционные эксперименты к нему не чувствительны, а по неосцилляционным данным (космология; прецизионные измерения спектров заряженных частиц, испускаемых вместе с нейтрино в слабых распадах) массы нейтрино на пять или более порядков величины меньше масс заряженных лептонов, что требует дополнительного объяснения. Многие модели, естественно объясняющие столь малые массы нейтрино, утверждают необходимое существование помимо легких, очень тяжелых нейтрино, чьи массы могут возникнуть далеко за пределами Стандартной модели. Причем, в этих моделях все нейтрино, в результате смешивания, оказываются майорановскими. Ответить на вопросы о природе и абсолютном масштабе масс нейтрино позволит наблюдение обусловленных промежуточными майорановскими нейтрино процессов рождения пар одинаково заряженных лептонов в глубоконеупругих лептон–протонных столкновениях или в безнейтринном двойном бета-распаде. Кроме того, данные процессы чувствительны к физике за пределами Стандартной модели, в частности, к параметрам: суперсимметричных теорий, моделей со скалярными частицами, взаимодействующими с парами кварков и лептонов, и теорий с правыми токами, связанными с лептокварками или правыми заряженными калибровочными бозонами.

Целью диссертационного исследования является изучение возможных процессов с несохранением числа лептонов, обусловленным промежуточными легкими и тяжелыми майорановскими нейтрино, позволяющих определить тип и абсолютный масштаб масс нейтрино и чувствительных к параметрам различных расширений Стандартной модели.

Научная новизна. В диссертационной работе впервые:

- исследованы обусловленные тяжелыми майорановскими нейтрино процессы рождения дилептонов в лептон-протонных столкновениях: изучен эффект интерференции нескольких тяжелых нейтрино, определены возможности наблюдения процессов, проанализированы способы определения характеристик тяжелых майорановских нейтрино;
- для общего лоренц-инвариантного лагранжиана получено распределение по углу разлета электронов в безнейтринном двойном бета-распаде, обусловленном легкими майорановскими нейтрино; расширения Стандартной модели классифицированы по характерному для них виду полученного распределения; определено ограничение на массу правого заряженного калибровочного бозона в зависимости от эффективной массы нейтрино и коэффициента угловой корреляции электронов.

Научная и практическая ценность работы. Полученные результаты могут быть использованы в более обширных и детальных теоретических исследованиях процессов с несохранением лептонного числа, обусловленным промежуточными майорановскими нейтрино, и в экспериментальных исследованиях: в работе на действующих и при проектировании будущих лептон-протонных коллайдеров и установок по поиску безнейтринного двойного бета-распада.

Результаты могут быть использованы на физическом факультете МГУ, в НИИЯФ МГУ, ИТЭФ, ИЯИ, ОИЯИ, ФИАН.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на: 11-й и 12-й международных Ломоносовских

конференциях по физике элементарных частиц (Москва), научных конференциях «Ломоносовские чтения» (Москва — 2003, 2005), конференции «Ломоносов-2003» (Москва), научных сессиях-конференциях секций ЯФ ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий» (Москва — 2002, 2004 и 2005 (два доклада)), международной летней школе им. Гельмгольца «Физика тяжелых кварков» (Дубна — 2005), а также на семинарах кафедры теоретической физики физического факультета МГУ.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 работ.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав основного текста, включая шесть приложений, заключения и списка цитируемой литературы. Объем диссертации составляет 102 страницу текста, набранного в издательской системе LATEX. Список цитируемой литературы включает 113 работ.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** (глава 1) обоснована актуальность исследуемой проблемы, сформулированы цели исследования и описано построение диссертационной работы.

В **главе 2** изложены основные сведения о нейтрино. Проведено сопоставление свойств майорановских и дираковских нейтрино, в частности, различие в их свойствах по отношению к симметрии, связанной с сохранением лептонного числа.

В параграфе 1 дана краткая история предсказания и экспериментального открытия нейтрино, описаны основные черты Стандартной модели, обосновано отсутствие масс у нейтрино и смешивания лептонов в ее минимальном варианте. Здесь же обрисованы способы генерации малых масс нейтрино в расширениях Стандартной модели.

Параграф 2 посвящен сравнительному описанию кинематики, квантования, электромагнитной структуры майорановских и дираковских нейтрино. Здесь также описано фазовое преобразование,

инвариантность по отношению к которому лагранжиана дираковских нейтрино, в отличие от майорановских, приводит к сохранению числа лептонов.

В параграфе 3 основные механизмы генерации масс нейтрино разобраны для одного поколения легких лептонов. Внимание акцентировано на механизмах, дающих малые, по сравнению с массами заряженных лептонов, массы, по крайней мере, части нейтрино.

Для наблюдаемой картины трех поколений легких лептонов в параграфе 4 рассмотрен переход от флейверного базиса нейтрино к их массовому базису, подробно описан широкий класс из рассмотренных в предыдущем параграфе механизмов — качельный, записан лагранжиан слабого взаимодействия лептонов с левыми и правыми заряженными W -бозонами, произведен подсчет параметров смешивания для легких и тяжелых майорановских нейтрино.

Осцилляции нейтрино в вакууме рассмотрены в параграфе 5.

В параграфе 6 объяснены причины нечувствительности современных нейтринных экспериментов к типу масс нейтрино, приведены возможные классы процессов, чувствительных к нему, а также представлены современные данные о массах нейтрино и совместимые с ними спектры масс легких нейтрино.

Глава 3 посвящена исследованию процессов рождения дилептонов в глубоконеупругих позитрон-протонных и нейтрино-протонных столкновениях при участии промежуточных майорановских нейтрино.

В параграфе 1 описана суть рассматриваемых процессов, поставлены цели и дана структура главы.

В параграфе 2 рассказано об использованных в данной главе ограничениях на параметры смешивания тяжелых майорановских нейтрино (ТМН) и основных приближениях, также о рассматриваемой области параметров (включая массы нейтрино и полную энергию процесса), для которой эффекты легких нейтрино в исследуемых процессах малы, по сравнению с эффектами ТМН.

Основные типы фоновых процессов описаны в параграфе 3.

Параграф 4 посвящен расчету сечений исследуемых столкновений

для простейшего спектра масс ТМН, такого что основной вклад в амплитуды дает одно нейтрино. В расчете учтены эффекты W -бозонов продольной и поперечной поляризации и показано, что в рассматриваемой области больших масс нейтрино и полных энергий эффекты поперечно поляризованных W -бозонов малы. Кроме того, в данном параграфе показана невозможность наблюдения рассматриваемых процессов на действующем (HERA) и проектируемом (VЛНС) лептон-протонных коллайдерах для критерия наблюдаемости — не менее одного события в год. Найдены полная энергия и светимость установки, при которых регистрация возможна, и определены пределы чувствительности установки с заданными параметрами.

В параграфе 5 дано обобщение результатов на случай более сложного эффективно дублетного спектра масс ТМН, при котором существенны эффекты двух нейтрино в амплитудах процессов. Изучен эффект интерференции нейтринных массовых состояний. Построена область в плоскости возможных значений масс двух ТМН, доступная для наблюдения на установке с ранее заданными параметрами.

В параграфе 6 описаны обобщения на варианты более сложных спектров масс ТМН и показано, что в любом случае сечения не будут превосходить сечений, учитывающих вклад только одного, наиболее легкого ТМН.

Исследование возможности определения масс, а также CP -нарушающих фаз и углов матрицы смешивания ТМН представлено в параграфе 7. Здесь получено дифференциальное распределение по наблюдаемым продольным быстротам конечных лептонов и их поперечному импульсу. Выяснено, что знание всех девяти независимых нейтринных параметров (случай эффективно дублетного спектра), входящих в дифференциальные распределения шести возможных процессов с различными парами конечных лептонов, позволит определить шесть норм элементов первых двух столбцов и три разности CP -нарушающих фаз матрицы смешивания.

В параграфе 8 обсуждены основные результаты главы.

В приложения к главе 3 вынесены технические детали вычислений.

В **главе 4** исследовано распределение по углу разлета электронов в безнейтринном двойном бета-распаде.

В параграфе 1 после исторической справки разъяснены основные задачи главы.

Параграф 2 посвящен описанию используемого в расчетах наиболее общего лоренц-инвариантного эффективного лагранжиана, а также сопоставлению его параметров с параметрами менее общих моделей, рассматриваемых в литературе.

Использованные в данной главе приближения пояснены в параграфе 3.

В параграфе 4 распределение по углу разлета электронов в исследуемом распаде записано сначала для векторной части лагранжиана и проведено сопоставление с результатами других авторов, затем записаны остальные вклады в распределение с учетом скалярной и тензорной частей лагранжиана.

Эффекты нестандартных взаимодействий, имеющих место в различных расширениях Стандартной модели, классифицированы в параграфе 5 по характерному для них виду исследуемого распределения. Во второй части параграфа дано ограничение снизу на массу правого заряженного калибровочного бозона лево-право-симметричной модели в зависимости от эффективной массы нейтрино и коэффициента угловой корреляции электронов.

Наконец, в параграфе 6 обсуждены основные результаты главы.

В **приложения** к главе 4 вынесены технические детали вычислений.

В **заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертации, и приведена апробация работы.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Исследованы обусловленные промежуточными тяжелыми майорановскими нейтрино процессы рождения дилептонов в лептон-протонных столкновениях высоких энергий с учетом интерференции нескольких нейтринных массовых состояний.

Определены возможности наблюдения исследуемых процессов на лептон-протонных коллайдерах.

2. Предложен метод определения масс тяжелых майорановских нейтрино, а также соответствующих углов смешивания и CP-нарушающих фаз по дифференциальным распределениям лептон-протонных процессов по наблюдаемым продольным быстрой конечных лептонов и их поперечному импульсу.
3. Получено выражение дифференциальной ширины по углу разлета электронов в безнейтринном двойном бета-распаде, обусловленном обменом легкими майорановскими нейтрино, для общего лоренц-инвариантного эффективного лагранжиана, учитывающего возможные эффекты майорановских суперпартнеров, скалярных билинеаров, правых токов и др.
4. Различные расширения Стандартной модели классифицированы по характерному для них виду углового распределения в безнейтринном двойном бета-распаде. Получено ограничение снизу на массу правого заряженного калибровочного бозона в зависимости от эффективной массы нейтрино и коэффициента угловой корреляции электронов.

Основные публикации по теме диссертации

1. А. Али, А.В. Борисов, Д.В. Журидов. Тяжелые майорановские нейтрино в рождении дилептонов на лептон-протонных коллайдерах. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. — 2004. — №1. — С. 15—18.
2. А. Али, А.В. Борисов, Д.В. Журидов. Рождение дилептонов в глубоконеупругом лептон-адронном рассеянии: эффект интерференции тяжелых майорановских нейтрино. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. — 2005. — №2. — С. 3—6.
3. А. Али, А. В. Борисов, Д. В. Журидов. Тяжелые майорановские нейтрино в рождении дилептонов в глубоконеупругом лептон-

протонном рассеянии. // ЯФ. — 2005. — Т.68, №12. — С. 2123—2129.

4. *A. Ali, A.V. Borisov, D.V. Zhuridov.* Effects of Heavy Majorana Neutrinos at Lepton-Proton Colliders // Particle Physics in Laboratory, Space and Universe. Proc. 11th. Lomonosov Conf. on Elementary Particle Physics (Moscow, 21—27 August 2003). / Ed. A. I. Studenikin. — Singapore: World Scientific, 2005. — P. 66—70.
5. *А. Али, А.В. Борисов, Д.В. Журидов.* Майорановские нейтрино в лептон-протонных процессах. // Ломоносовские чтения — 2003. Секция физики. Сборник тезисов докладов. М.: Физический факультет МГУ, 2003. — С. 32—34.
6. *Д.В. Журидов.* Перспективы поиска тяжелых майорановских нейтрино на коллайдерах высоких энергий. // X Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов — 2003». Секция «Физика». Сборник тезисов докладов. М.: Физический факультет МГУ, 2003. — С. 179—181.
7. *А. Али, А.В. Борисов, Д.В. Журидов.* Безнейтринный двойной бета-распад в теориях, обобщающих стандартную модель. // Ломоносовские чтения — 2005. Секция физики. Сборник тезисов докладов. М.: Физический факультет МГУ, 2005. — С. 69—71.