

На правах рукописи

Либанов Максим Валентинович

**Физика частиц и космология
в моделях с дополнительными
пространственными
измерениями и с нарушением
Лоренц-инвариантности**

01.04.02 – теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ

*диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук*

Москва 2009

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институт ядерных исследований РАН.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук *И. П. Волобуев*

доктор физико-математических наук *А. С. Горский*

доктор физико-математических наук *В. Н. Лукаш*

Ведущая организация:

Учреждение Российской академии наук Математический институт
им. В. А. Стеклова РАН

Защита диссертации состоится _____

в _____ часов _____ мин. на заседании диссертационного совета Д 002.119.01
Учреждения Российской академии наук Институт ядерных исследований
РАН по адресу: 117312 Москва, проспект 60-летия Октября, дом 7а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения Российской академии наук Институт ядерных исследований РАН.

Автореферат разослан _____

Учёный секретарь

диссертационного совета Д 002.119.01

кандидат физико-математических наук

Б. А. Тулунов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В последние несколько десятилетий достигнут значительный прогресс в понимании физики микромира, а также эволюции Вселенной. Этот прогресс в первую очередь связан с созданием объединённой теории электрослабых взаимодействий, а также теории сильных взаимодействий. Объединение этих двух теорий приводит к Стандартной модели (СМ) – теории, основанной на калибровочной группе $SU_C(3) \otimes SU_W(2) \otimes U_Y(1)$ и на сегодняшний день прекрасно описывающей все известные явления в физике микромира (для описания физики нейтрино Стандартную модель в её буквальной трактовке необходимо расширить, чтобы по крайней мере два из трёх сортов нейтрино получили массу). С другой стороны, успехи в понимании эволюции Вселенной связаны с созданием теории инфляции, а также с применением СМ к описанию процессов, происходящих на ранней стадии развития Вселенной.

Несмотря на то, что СМ с успехом справляется с описанием физики микромира при энергиях $\lesssim 1$ ТэВ, а возможно, и бóльших, эту теорию нельзя рассматривать как фундаментальную. Даже если не принимать во внимание того, что по всей видимости электрослабые и сильные взаимодействия объединяются в рамках моделей Великого объединения, СМ в любом случае нельзя использовать для описания явлений при энергиях, сравнимых с массой Планка $M_{PL} = 1.2 \cdot 10^{19}$ ГэВ. При таких энергиях сила гравитационного взаимодействия становится сравнимой с силами других взаимодействий, и необходимо учитывать эффекты квантовой гравитации. Таким образом, СМ можно рассматривать только как эффективную низкоэнергетическую теорию, в лучшем случае справедливую до

масштаба M_{PL} (либо до масштаба Великого объединения $\sim 10^{16}$ ГэВ). СМ сама по себе, будучи перенормируемой теорией, не содержит внутренних противоречий. Однако рассмотрение СМ как эффективной теории с масштабом обрезания, скажем M_{PL} , приводит к проблеме, называемой *проблемой калибровочной иерархии*: почему в теории присутствует два столь отличающихся энергетических масштаба — M_{PL} и масштаб нарушения электрослабой симметрии $V_{SM} \simeq 250$ ГэВ?

Другой проблемой, присутствующей в СМ, является загадка *удвоения* или *дублирования фермионных поколений* и тесно связанная с ней *проблема иерархии масс фермионов*. Как известно, в состав полей СМ входят три поколения фермионов, не отличающихся никакими квантовыми числами, но имеющих существенно различную массу. Так, например, наблюдаемое отношение между массой t -кварка, $m_t \simeq 175$ ГэВ, и массой электрона, $m_e \simeq 0.5$ МэВ, превышает 10^5 . Включение в рассмотрение нейтринного сектора приводит к увеличению значения отношения массовых параметров ещё на шесть порядков. Если мы ставим задачу построить теорию, низкоэнергетическим пределом которой является СМ, то получение вышеуказанной большой величины можно сформулировать как отдельную проблему иерархии фермионных поколений. Помимо механизма получения иерархии фермионных масс в теории должна восстанавливаться иерархическая структура матрицы смешивания Кабиббо-Кобаяси-Маскавы.

Ещё одной загадкой, имеющей иерархический характер и возникающей при включении в рассмотрение гравитации, является *проблема космологической постоянной*, или *проблема тёмной энергии*, и наблюдаемое ускоренное расширение Вселенной. Причиной ускоренного расшире-

ния Вселенной могут являться ненулевая космологическая постоянная, т.е. плотность энергии вакуума, новые слабо взаимодействующие поля, модифицированная гравитация или какой-нибудь иной вид тёмной энергии. Проблема заключается в том, что величина плотности тёмной энергии очень мала:

$$\rho_\Lambda \simeq 0.73\rho_c \simeq 4 \cdot 10^{-6} \frac{\text{ГэВ}}{\text{см}^3} \simeq 3.1 \cdot 10^{-12} \text{эВ}^4,$$

где ρ_c – полная плотность энергии во Вселенной. Она на много порядков меньше величин той же размерности, которые могли бы появиться в результате сильного, слабого и гравитационного взаимодействий,

$$\rho_\Lambda \sim 10^{-45} \Lambda_{\text{КХД}}^4 \sim 10^{-57} V_{SM}^4 \sim 10^{-124} M_{PL}^4,$$

здесь $\Lambda_{\text{КХД}} \simeq 200 \text{ МэВ}$ – энергетический масштаб сильных взаимодействий. Такое различие в масштабах и есть проблема космологической постоянной.

Совершенно очевидно, что для решения указанных выше проблем необходимо привлечь новые физические концепции и идеи. Так, например, проблема калибровочной иерархии может быть переформулирована на новом геометрическом языке в рамках моделей с дополнительными пространственными измерениями большого размера. Включение в рассмотрение больших дополнительных измерений позволяет также решить проблему фермионных поколений (что представляет собой один из важнейших результатов представленной диссертации), а также пролить свет на загадку тёмной энергии. Проблема ускоренного расширения Вселенной также может быть прояснена и в рамках четырёхмерных моделей. Особый интерес здесь представляют модели с новыми слабо взаимодействующими полями и с нарушением Лоренц-инвариантности. В таких

моделях удаётся добиться того (это также один из важнейших результатов диссертации), что на ранних стадиях развития Вселенной уравнение состояния $p = w\rho$ (p – давление, ρ – плотность энергии) тёмной энергии является нормальным, $w > -1$; затем в эпоху, близкую к современной, происходит переход в фантомную стадию, $w < -1$; и при поздних временах Вселенная входит в стадию деситтеровского расширения, $w \rightarrow -1$. Такой сценарий развития Вселенной является интересным и привлекательным с феноменологической точки зрения.

Ясно, что привлечение таких гипотез, как существование дополнительных измерений или нарушение Лоренц-инвариантности, приводит к предсказанию нового круга явлений, исследование которых представляет собой отдельную актуальную задачу. Так, например, модель, объясняющая происхождение трёх фермионных поколений и иерархию фермионных массовых матриц, предсказывает процессы с участием нейтральных токов и нарушением лептонных чисел и номера поколений. Такие процессы либо запрещены в СМ, либо сильно подавлены. Поэтому известные экспериментальные пределы на вероятности таких процессов дают ограничения на энергетический масштаб, связанный с наличием дополнительных измерений.

С другой стороны, модель с фантомной тёмной энергией предсказывает наличие в спектре возмущений при малых импульсах различных нестабильностей (тахеонов и дүхов), которые могут повлиять на анизотропию микроволнового реликтового излучения. Кроме того, эта модель предсказывает зависимость от времени эффективной гравитационной постоянной, что также может быть экспериментально подтверждено или опровергнуто.

Особой интерес здесь представляет так называемая «транспланковская проблема», суть которой можно сформулировать следующим образом: «Принимая во внимание, что характерные, наблюдаемые нами сегодня, длины волн в космологических спектрах изначально были много короче длины Планка, можем ли мы что-либо сказать о транспланковской физике, в частности, о нарушении Лоренц-инвариантности при планковских или даже более низких энергиях?» В настоящее время мы не имеем представления, каким образом происходит (и происходит ли вообще) нарушение Лоренц-инвариантности при планковских энергиях. Поэтому построение самосогласованных моделей, позволяющих пролить свет на транспланковскую проблему, представляет собой особую актуальную задачу. В этой связи особый интерес представляют собой модели с большими дополнительными измерениями (построение таких моделей является одним из важных результатов диссертации). Действительно, в таких моделях нарушение Лоренц-инвариантности представляется достаточно «натуральным»: наличие материи в дополнительном пространстве приводит в общем случае к существованию выделенной системы отсчёта, связанной с ней, что в конечном итоге приводит к нарушению Лоренц-инвариантности в нашем четырёхмерном мире. Такие модели в отличие от обычных подходов к транспланковской проблеме (Лоренц-неинвариантные дисперсионные соотношения, рождение мод и т.п.) с одной стороны, не страдают от неопределённостей, связанных с выбором начального состояния, а, с другой стороны, при определённых условиях предсказывают значительное влияние транспланковской физики на спектр космологических возмущений.

Таким образом можно заключить, что построение непротиворечивых

моделей, способных пролить свет на вышеуказанные проблемы, является важной и актуальной задачей, решение которой в любом случае расширит наше понимание окружающего нас мира.

Цель диссертации состоит в разработке новых подходов к решению таких проблем современной физики, как проблема происхождения фермионных поколений Стандартной модели, проблема ускоренного расширения Вселенной и транспланковская проблема; в построении соответствующих теоретико-полевых моделей, расширяющих Стандартную модель физики частиц, а также в изучении феноменологических следствий этих моделей.

Научная новизна и практическая ценность.

- Впервые предложена модель с двумя дополнительными пространственными измерениями большого размера, в которой три фермионных поколения Стандартной модели возникают из одного шестимерного пропоколения. Номер поколения при этом соответствует проекции обобщенного углового момента и, таким образом, имеет геометрическую природу. В модели воспроизводится экспериментально наблюдаемый иерархический характер отношения масс фермионов и углов смешивания. В этой модели также продемонстрирована принципиальная возможность объяснения малой массы нейтрино.
- Впервые показано, что на компактном многообразии – сфере – существует устойчивая солитоноподобная конфигурация – калибровочный вихрь. Проанализирован спектр фермионов, взаимодействующих с полями, формирующими вихрь, и показано, что в спектре присутствуют нулевые моды. Этот результат может быть инте-

решен не только с точки зрения моделей с большими дополнительными измерениями, но и в других областях, например, в сверхпроводимости.

- В рамках предложенной модели найдены вероятности редких процессов с нейтральными токами и с нарушением лептонных чисел или номера поколения. Показано, что характерной чертой модели является предсказание наблюдения распада каона $K_L^0 \rightarrow \mu e$ без наблюдений других эффектов, связанных с нейтральными токами и нарушением аромата. Этот результат интересен с точки зрения экспериментов по исследованию редких процессов.
- Получены предсказания модели для ускорительных экспериментов. Показано, что для протон-протонных ускорителей есть возможность обнаружить первые калуца-клейновские возбуждения нейтральных бозонов в канале распада на $\mu^+ e^-$.
- Продемонстрировано, что в представленной модели масса бозона Хиггса не должна значительно превышать 100 ГэВ.
- Впервые показано, что даже если энергетический масштаб нарушения Лоренц-инвариантности значительно превосходит инфляционный параметр Хаббла, эффекты, связанные с нарушением Лоренц-инвариантности в моделях с большими дополнительными измерениями, могут быть значительными и потенциально измеримыми.
- Впервые сформулирована и доказана теорема о том, что материя, приводящая к нарушению Лоренц-инвариантности в статических моделях с одним бесконечно большим дополнительным измерением, должна нарушать слабые энергетические условия.

- Представлена четырёхмерная модель с векторным и скалярным полем и нарушенной Лоренц-инвариантностью. Показано, что в рамках этой модели эволюция Вселенной имеет промежуточную фантомную эпоху, соответствующую современному ускоренному расширению.
- В рамках модели показано, что эффективная ньютоновская гравитационная постоянная становится зависящей от времени. Эта зависимость является потенциально наблюдаемой, что может быть интересно с точки зрения гравиметрических экспериментов.
- Как в Лоренц-неинвариантном, так и в релятивистски инвариантном случае впервые проанализировано влияние тахиона на спектр анизотропии реликтового излучения. Получены ограничения на параметры тахионного дисперсионного соотношения.
- Методы и подходы, разработанные в диссертации, используются в организациях, занимающихся фундаментальными исследованиями по теоретической физике и физике высоких энергий, в том числе в ИЯИ РАН, ФИАН, ИТЭФ, НИИЯФ МГУ, ОИЯИ, МИАН, МГУ им. М.В.Ломоносова, ГАИШ МГУ, а также за рубежом.

На защиту выносятся следующие основные результаты:

1. Предложена модель с двумя дополнительными пространственными измерениями большого размера, в которой три фермионных поколения Стандартной модели возникают из одного шестимерного пропоколения. Номер поколения при этом соответствует проекции обобщенного углового момента и, таким образом, имеет геометрическую природу. В этой модели также продемонстрирована принципиальная возможность объяснения малой массы нейтрино.

2. Проанализирован спектр масс фермионов. Показано, что отношение масс фермионов разных поколений имеет иерархический характер и описывается малым параметром σ :

$$\sigma^4 : \sigma^2 : 1.$$

Кроме того, найдены элементы матрицы смешивания Кабиббо-Кобаяси-Маскавы. Показано, что матрица КKM также имеет правильную иерархическую структуру.

3. Результаты обобщены на модель с компактными дополнительными измерениями, что позволяет описать взаимодействие фермионов с калибровочными полями Стандартной модели. Показано, что несмотря на компактность дополнительного пространства, по-прежнему существует устойчивая солитоноподобная конфигурация — калибровочный вихрь, — представляющая собой топологический дефект, на котором локализуются фермионные нулевые моды. продемонстрировано, что иерархия масс фермионных поколений по-прежнему соответствует наблюдаемой. Построен эффективный четырёхмерный лагранжиан взаимодействий нулевых мод фермионов с калуца-клейновскими модами калибровочных бозонов Стандартной модели.
4. Показано, что в эффективной четырёхмерной теории возможны процессы с нарушением аромата, связанные с нейтральными токами. При этом, однако, в силу соответствия номера поколения проекции углового момента, процессы, нарушающие номер поколения, имеют дополнительные факторы подавления. Поэтому основное ограничение на массу старших мод калибровочных бозонов и

размер локализации,

$$R \lesssim (60 \cdot \text{ТэВ})^{-1},$$

определяется верхним пределом для парциальной ширины распада $K_L \rightarrow \mu e$. Остальные редкие процессы, разрешённые в моделях с нарушающими аромат нейтральными токами, приводят к более слабым экспериментальным ограничениям.

5. Получены предсказания модели для ускорительных экспериментов. Показано, что для протон-протонных ускорителей есть возможность обнаружить первые калуца-клейновские возбуждения нейтральных бозонов в канале распада на $\mu^+ e^-$.
6. Рассмотрен хиггсовский сектор модели. Показано, что свойства бозона Хиггса практически не отличаются от свойств хиггсовской частицы в Стандартной модели. Продемонстрировано, что в представленной модели масса бозона Хиггса не должна значительно превышать 100 ГэВ.
7. Предложено две модели с одним бесконечно большим дополнительным измерением и нарушением Лоренц-инвариантности в дополнительном пространстве. В этих моделях вычислен спектр первичных космологических возмущений, генерируемый во время инфляции. Показано, что даже если энергетический масштаб нарушения Лоренц-инвариантности значительно превосходит инфляционный параметр Хаббла, эффекты, связанные с нарушением Лоренц-инвариантности, могут быть значительными и потенциально измеримыми.
8. Сформулирована и доказана теорема о том, что материя, приводящая к нарушению Лоренц-инвариантности в статических моделях

с одним бесконечно большим дополнительным измерением, должна нарушать слабые энергетические условия.

9. Предложена четырёхмерная модель, в которой спонтанное нарушение Лоренц-инвариантности происходит за счёт образования конденсата векторных полей. Показано, что несмотря на ряд интересных свойств модели, она не способна объяснить современное ускоренное расширение Вселенной. Приведены общие аргументы, что подобные модели с векторным и, в общем случае, тензорным конденсатом не могут объяснить ускоренное расширение Вселенной.
10. Представлена четырёхмерная модель с векторным и скалярным полем и нарушенной Лоренц-инвариантностью. Показано, что в рамках этой модели эволюция Вселенной имеет промежуточную фантомную эпоху, соответствующую современному ускоренному расширению. Проанализирован спектр возмущений полей. Показано, что в спектре присутствуют неустойчивости (тахиион и дух), однако, из-за нарушенной релятивистской инвариантности, эти неустойчивости являются феноменологически приемлемыми при условии, что время развития тахиона сравнимо с возрастом Вселенной.
11. В рамках модели показано, что эффективная ньютоновская гравитационная постоянная становится зависящей от времени. Эта зависимость достаточно слаба, но может быть сравнима с современными экспериментальными ограничениями. Более того, зависимость эффективной гравитационной постоянной от времени коррелирует с отклонением параметра уравнения состояния фантома от границы космологической постоянной. Таким образом предсказания модели являются потенциально наблюдаемыми.

12. Как в Лоренц-неинвариантном, так и в релятивистски-инвариантном случае проанализировано влияние тахиона на спектр анизотропии реликтового излучения. Получены ограничения на параметры тахионного дисперсионного соотношения.

Апробация диссертации. Основные результаты, полученные в диссертации, доложены автором на научных семинарах ИЯИ РАН, Свободного университета Брюсселя, Института теоретической физики Лозаннского университета, ЦЕРНа, ФИАНа, ГАИШ МГУ; на международном семинаре “Кварки–2008” (Сергиев Посад), на международной конференции “SUSY-2001” (Дубна), XXXVII-й Морионской конференции “Электрослабые взаимодействия и единые теории” (Лез-Арк, Франция, 2001); использованы в курсе лекций, прочитанном автором на международной Школе современной физики (Дубна, 2005), а также в различных научно-популярных лекциях. Кроме того, отдельные результаты докладывались соавторами на различных семинарах в ведущих научных центрах, на российских и международных конференциях.

Публикации и личный вклад автора. По результатам диссертации опубликовано 18 работ. Список работ приведён в конце автореферата. Вклад автора в полученные результаты является определяющим.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из Введения, трёх глав основного текста, Заключения и пяти приложений. Общий объём диссертации 342 страницы. Диссертация содержит 25 рисунков, 4 таблицы и список литературы из 370 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во Введении обосновывается актуальность темы, объясняются задачи и описываются методы, использованные в работе, отмечается научная

новизна и практическая значимость результатов, дается краткое изложение содержания диссертации, указывается, где диссертация прошла апробацию.

В Главе 1 предложена модель с двумя большими дополнительными измерениями, в которой три фермионных поколения SM возникают из одного шестимерного поколения. Также в этой Главе проанализированы вероятности процессов, протекающих за счёт калуца-клейновских мод нейтральных калибровочных бозонов, и приведены ограничения на размер локализации калибровочных полей и на массу хиггсовской частицы.

Первый параграф посвящён общему описанию модели. В разделе 1.1 приводится описание топологического дефекта – вихря, на котором локализуются фермионные нулевые моды, и который по существу представляет наш четырёхмерный мир (брану). В разделе 1.2 даётся анализ спектра фермионов во внешнем поля вихря. Показано, что в поле вихря имеются фермионные нулевые моды, которые с четырёхмерной точки зрения можно рассматривать как безмассовые фермионы SM. Кроме того, доказывается (см. также Приложение Б), что число фермионных нулевых мод определяется топологическим зарядом вихря и зарядом фермиона по группе вихря. Таким образом, при подходящем выборе зарядов число нулевых мод может быть равно трём, причём эти моды имеют с четырёхмерной точки зрения определённую киральность и отличаются проекцией (обобщённого) углового момента на брану, так что номер поколения имеет геометрическое происхождение. В разделе 1.3 описывается механизм, позволяющий дать нулевым модам массы. Также описываются свойства, которыми должны обладать фоновые поля, чтобы, во-первых, отношения масс имели иерархическую структуру, а во-вторых, чтобы

возникали недиагональные массовые члены. Раздел 1.4 посвящён описанию реалистической модели, в которой роль топологического дефекта играет калибровочный вихрь, а также ещё два дополнительных скалярных поля, введение которых необходимо для получения нетривиальной массовой матрицы. Представлен состав полей, их заряды и лагранжиан взаимодействия. Кроме того, приводятся выражения для массовых матриц и матрицы смешивания. В разделе 1.5 демонстрируется принципиальная возможность включения в модель нейтрино, обсуждаются нейтринная массовая матрица и модельная зависимость результатов от способа компактификации. Раздел 1.6 посвящён включению в рассмотрение калибровочных полей SM . Обсуждаются трудности, возникающие при попытках локализации калибровочных полей в моделях с большими дополнительными измерениями, а также пути их обхода. Описывается, каким образом калибровочные поля включаются в рассмотрение в нашей модели, и намечается дальнейшая стратегия исследования.

В § 2 проводится детальный численный и аналитический анализ модели, представленной в разделах 1.1–1.4. В разделе 2.1 приводится численное решение для внешнего поля вихря (как глобального, так и калибровочного) в присутствии дополнительных скалярных полей, необходимых для получения масс фермионными модами. Раздел 2.2 посвящён численному нахождению фермионных нулевых мод во внешнем поле вихря. Подробно исследованы случаи глобального и калибровочного вихря. Показано (численно и аналитически), что в случае глобального вихря возникающая иерархия масс имеет неправильную структуру, в то время как в случае калибровочного вихря получающаяся иерархия соответствует наблюдаемой. В разделе 2.3 численно найдены массы и углы смешива-

ния фермионов в модели раздела 1.4. Показано, что семь параметров модели хорошо фитируют девять (шесть масс и три угла смешивания) известных параметров кваркового сектора.

В соответствии со стратегией, намеченной в разделе 1.6, для того чтобы включить в рассмотрение калибровочные поля СМ, можно рассмотреть представленную модель на компактном дополнительном пространстве. В § 3 в качестве дополнительного пространства выбрана сфера S^2 . В разделе 3.1 показано, что несмотря на то, что пространство компактно, по-прежнему существует калибровочный вихрь, локализованный вблизи некоторой точки сферы. При этом, однако, в отличие от плоского случая заряды полей, взаимодействующих с калибровочным полем вихря, не могут быть произвольными, а должны подчиняться условию квантования Дирака. В разделе 3.2 исследован вопрос о существовании нулевых мод оператора Дирака в поле вихря на сфере. Показано, что при правильном (удовлетворяющем условию квантования) выборе зарядов спиноров по-прежнему существует определённое число киральных нулевых мод, локализованных вблизи кола вихря. В разделе 3.3 проанализирована получающаяся в сферическом случае иерархия масс фермионов. Показано, что иерархия соответствует наблюдаемой, хотя зависимость отношения масс от параметров модели отличается (за счёт другого выбора зарядов фермионов) от плоского случая. Далее, в разделе 3.4 приведено калуца-клейновское разложение калибровочных полей на сфере. В разделе 3.5 изучены взаимодействия нулевых мод фермионов с модами калибровочных бозонов как в калибровочном, так и в массовом базисе.

Параграф 4 посвящён изучению феноменологических следствий построенной модели, в частности, поиску проявлений дополнительных из-

мерений в редких процессах и в ускорительных экспериментах. Так в разделе 4.1 рассмотрены распады каонов $K_L^0 \rightarrow \mu e$ и $K^+ \rightarrow \pi^+ e^- \mu^+$, запрещённые в СМ законом сохранения лептонного числа. В разделе 4.2 изучены редкие процессы с нарушением номера поколения G на единицу: распад $\mu \rightarrow ee\bar{e}$ и μe -конверсия. В разделе 4.3 изучены процессы с $\Delta G = 2$: разность масс каонов $K_L - K_S$ и СР-нарушения в физике каонов. Показано, что наибольшее ограничение на размер локализации калибровочных полей

$$R \lesssim (60 \cdot \text{ТэВ})^{-1} \quad (1)$$

возникает из распада каонов $K_L^0 \rightarrow \mu e$. Этот факт объясняется тем, что в отсутствие смешивания процессы с нарушением номера поколения запрещены в представленной модели в силу закона сохранения проекции (шестимерного) момента импульса. Поэтому вероятности процессов с нарушением номера поколения имеют дополнительный фактор подавления, связанный со смешиванием, что в конечном счёте приводит к более слабым ограничениям на размер локализации. Таким образом можно заключить, что характерной чертой предложенной модели является предсказание наблюдения распада каона $K_L^0 \rightarrow \mu e$ без наблюдений других эффектов, связанных с нейтральными токами и нарушением аромата.

В разделе 4.4 рассмотрены обобщения модели, появляющиеся при изменении расположения и профилей фермионных волновых функций в дополнительных измерениях. Тогда ограничения из редких процессов можно представить в виде условий на массы старших калуца-клейновских мод обычных калибровочных бозонов и константы связи этих частиц с фермионами. При небольших массах дополнительные взаимодействия можно искать в ускорительных экспериментах. Получен-

ные предсказания для протон-протонных коллайдеров приведены в разделе 4.4.

В § 5 изучен хиггсовский сектор модели. Исходя из полученного в § 4 ограничения на размер локализации калибровочных полей (1), в разделе 5.1 приведена оценка амплитуды хиггсовского поля. Показано, что эта амплитуда должна быть мала по сравнению с характерным энергетическим масштабом модели, что требует некоторой тонкой подстройки параметров модели. Способ такой подстройки, необходимый в том числе и для численного анализа системы, описан в разделе 5.2. В разделе 5.3 построен четырёхмерный эффективный лагранжиан для частицы Хиггса. Показано, что свойства бозона Хиггса практически не отличаются от свойств хиггсовской частицы SM, однако масса бозона не должна сильно превышать 100 ГэВ.

Глава 2 диссертации посвящена изучению эффектов нарушения Лоренц-инвариантности, связанного с существованием дополнительных измерений, в контексте транспланковской проблемы.

В § 1 и § 2 представлено две модели, в которых нарушение Лоренц-инвариантности происходит в одном дополнительном измерении. Это нарушение приводит к тому, что локализованные на бране моды скалярного поля, во-первых, имеют не Лоренц-инвариантный закон дисперсии, а во-вторых, в зависимости от трёхмерного импульса могут становиться дelokализованными. Это последнее свойство интересно в космологическом контексте, так как по мере расширения Вселенной трёхмерные импульсы краснеют, и всё больше и больше мод появляется на бране, что эффективно с четырёхмерной точки зрения соответствует рождению мод. Модели, представленные в § 1 и § 2 (описание моделей приведено в разделах 1.1 и

2.1 соответственно), отличаются различным поведением эффективного потенциала для мод скалярного поля, что приводит к тому, что в первой модели существует массовая щель между нулевой локализованной модой и высшими нелокализованными модами (описание спектра в статическом случае приведено в разделе 1.2, а также в Приложении Г), а во второй – такая щель отсутствует. Такое отличие в характере спектра возбуждений скалярного поля оказывает сильное влияние на спектр первичных космологических возмущений, анализ которого для первой модели приведён в разделах 1.3 (случай инфляции с не зависящими от времени параметрами), 1.4 (случай инфляции с медленно изменяющимся во времени параметром) и 1.5 (в котором приведены явные вычисления при определённом выборе метрических коэффициентов); для второй модели анализ спектра приведён в разделе 2.2.

Оказалось, что в первой модели в случае инфляции с не зависящими от времени параметрами (раздел 1.3) первичный спектр остаётся плоским (что соответствует стандартным четырёхмерным предсказаниям), однако его амплитуда может быть значительно усилена по сравнению со стандартными предсказаниями, если энергетический масштаб нарушения Лоренц-инвариантности k меньше инфляционного параметра Хаббла H . Если же энергетический масштаб нарушения Лоренц-инвариантности больше инфляционного параметра Хаббла, то поправки к стандартному предсказанию оказываются экспоненциально подавленными. В случае с медленно изменяющимся во времени параметром k (раздел 1.4) спектр первичных возмущений может достаточно сильно зависеть от импульса (см. рис. 1), что может быть интересно с феноменологической точки зрения. Действительно, в случае с падающим во

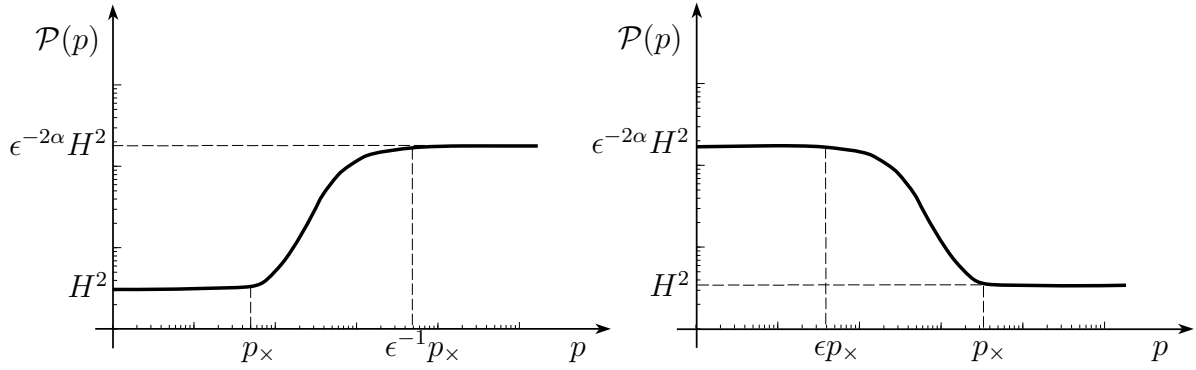


Рис. 1. **Слева:** Спектр возмущений как функция трёхмерного конформного импульса p , генерируемый в модели § 1 Главы 2 с падающим во времени параметром k . p_x является свободным параметром, $\epsilon \ll 1$ – другой свободный параметр модели. Показатель степени α является модельнозависимым и изменяется в интервале $0 < \alpha \leq 3/2$. **Справа:** То же самое, но с растущим k .

времени параметром k , (k изменяется от $k \gg H$ до $k \lesssim H$), если рассматриваемое скалярное поле интерпретировать как тензорные возмущения, то получаемый спектр соответствует большим (может быть очень большим) первичным амплитудам гравитационных волн при малых длинах волн. Если это так, то возможное отсутствие влияния тензорных возмущений на спектр реликтового микроволнового излучения не исключает возможность обнаружения коротковолновых первичных гравитационных волн с помощью таких методов, как тайминг пульсаров или наземных интерферометров. Более того, так как интерферометры работают в достаточно широкой области длин волн, то при удачном стечении обстоятельств будет возможно наблюдение очень необычного и интересного спектра реликтовых стохастических гравитационных волн в нашей Вселенной. С другой стороны, случай с растущим k (k изменяется от $k \lesssim H$ до $k \gg H$) соответствует относительному усилению спектра в длинноволновом диапазоне, возможно измеряемом через спектр микро-

волнового излучения. При этом отклонение от плоского спектра может быть потенциально измеримо с помощью экспериментов по поиску гравитационных волн в коротковолновой области.

В модели § 2 был исследован только случай (как наиболее консервативный), в котором масштаб нарушения Лоренц-инвариантности много больше параметра Хаббла (раздел 2.2). Оказалось, что вклад от «тяжёлой» физики подавлен отношением масштабов, однако степень подавления может быть даже меньше, чем единица. Кроме того, этот вклад может быть усилен за счёт другого параметра модели, так что стандартный вклад и вклад, связанный с нарушением Лоренц-инвариантности, могут даже конкурировать. Этот факт становится особо интересным с феноменологической точки зрения в случае не чисто деситтеровской инфляции, так как наклоны вкладов в спектр могут быть различными.

Несмотря на очевидные преимущества моделей § 1, § 2 по сравнению с другими подходами к транспланковской проблеме (хорошо определённое начальное состояние и отсутствие обратного влияния) у них есть и один недостаток. А именно, выбор метрики в этих моделях был сделан «руками». Поэтому возникает вопрос, какими свойствами должна обладать материя, приводящая к нарушению Лоренц-инвариантности в дополнительном измерении. Этот вопрос в статическом случае прояснен в § 3. В разделе 3.1 обсуждается постановка задачи. В разделе 3.2 сформулирована и доказана теорема, утверждающая, что материя, приводящая к нарушению Лоренц-инвариантности, должна нарушать слабые условия энергодоминантности. В разделе 3.3 обсуждаются возможные пути обхода теоремы.

Глава 3 посвящена построению и исследованию четырёхмерных мо-

делей с нарушением Лоренц-инвариантности, способных объяснить наблюдаемое современное ускоренное расширение Вселенной.

В § 1 представлена модель, в которой нарушение Лоренц-инвариантности происходит за счёт возникновения конденсата векторных полей. В разделе 1.1 обсуждаются свойства модели: описывается, каким образом происходит спонтанное нарушение Лоренц-инвариантности, и какие возникают в теории энергетические масштабы. В разделе 1.2 представлен состав полей и лагранжиан модели. Спектр модели без учёта гравитации рассмотрен в разделе 1.3. Показано, что в векторном секторе присутствует дух, и может присутствовать (без тонкой подстройки параметров) тахион. В разделе 1.4 анализируется спектр лёгких полей в общековариантной теории. Показано, что в тензорном секторе при малых трёхмерных импульсах присутствует тахион, и дух, имеющийся в векторном секторе, также становится тахионом. В скалярном секторе патологии отсутствуют, но скорость распространения некоторых скалярных мод изменяется при малых импульсах. В разделе 1.5 найден ньютоновский гравитационный потенциал, и показано, что он видоизменяется на больших расстояниях. Раздел 1.6 посвящён изучению космологической эволюции модели. Оказалось, что несмотря на все особенности представленной модели космологическая эволюция Вселенной не изменяется. В этом разделе приведены аргументы в пользу того, что это достаточно общая ситуация, если в рассмотрение включены только векторные или тензорные поля. Таким образом, для изменения уравнений эволюции необходимо также включать в рассмотрение и скалярные поля.

В § 2 представлена модель со спонтанным нарушением Лоренц-инвариантности, содержащая помимо одного векторного поля ещё и ска-

лярное. Лагранжиан модели, представленный в разделе 2.1, включает помимо прочего член взаимодействия векторного и скалярного полей, содержащий только одну производную. В разделе 2.2 изучается эволюция тёмной энергии в режиме медленного скатывания. Найдена область параметров, при которой существует промежуточная фантомная эпоха. В разделе 2.3 приведён численный анализ системы. Показано, что промежуточная фантомная эпоха действительно возможна в рассматриваемой модели. Кроме того, показано, что эффективная гравитационная постоянная изменяется во времени, и её вариация близка к современному экспериментальному пределу, что делает модель потенциально подтверждаемой (или опровергаемой) в будущих наблюдениях и экспериментах. В разделе 2.4 изучается вопрос, какие нестабильности возникают в рассматриваемой модели. Оказалось, что наиболее интересным (и «опасным») свойством спектра является присутствие в нём тахионной моды при достаточно больших, но сравнимых с современным хаббловским радиусом, длинах волн. По-видимому, присутствие в спектре такого тахиона является достаточно общим свойством подобного рода моделей. Такая тахионная мода, взаимодействуя с гравитационным потенциалом, может вызвать заметный рост последнего. Это в свою очередь за счёт интегрального эффекта Сакса-Волфе может повлиять на спектр анизотропии реликтового излучения. Такая возможность была исследована в разделе 2.5 как для Лоренц-неинвариантного дисперсионного соотношения тахионного типа, так и для релятивистски-инвариантного. В обоих случаях были получены ограничения на параметры тахиона.

В Заключении представлены выводы и сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

Некоторые технические детали, относящиеся к различным главам диссертации, собраны в приложениях. Обозначения и соглашения, используемые в диссертации, приведены в Приложении А. В Приложении Б приведён анализ нулевых мод оператора Дирака в случае плоского пространства в поле глобального вихря (§ 1) и в поле калибровочного вихря (§ 2). Приложение В посвящено выводу четырёхфермионного эффективного взаимодействия нулевых фермионных мод с калуца-клейновскими модами калибровочных бозонов СМ в модели Главы 1. В Приложении Г описываются свойства собственных функций модели Главы 2. В Приложении Д приведён вывод эффективной ньютоновской массы Планка в модели Главы 3.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. M. V. Libanov and S. V. Troitsky. Three fermionic generations on a topological defect in extra dimensions. // –Nucl. Phys. –2001. –B599. –p.319–333.
2. J. M. Frere, M. V. Libanov and S. V. Troitsky. Three generations on a local vortex in extra dimensions. // –Phys. Lett. –2001. –B512. –p.169–173.
3. M. V. Libanov and E. Y. Nougæev. Towards the realistic fermion masses with a single family in extra dimensions. // –JHEP. –2002. –0204. –p.055.
4. M. V. Libanov and E. Y. Nugaev. Hierarchical fermionic mass pattern and large extra dimensions. // –Surveys High Energ. Phys. –2002. –17. –p.165-171.
5. J. M. Frere, M. V. Libanov and S. V. Troitsky. Neutrino masses with a single generation in the bulk. // –JHEP. –2001. –0111. –p.025.

6. J. M. Frere, M. V. Libanov, E. Y. Nugaev and S. V. Troitsky. Flavour violation with a single generation. // –JHEP. –2004. –03. –p.001.
7. J. M. Frere, M. V. Libanov, E. Y. Nugaev and S. V. Troitsky. Fermions in the vortex background on a sphere. // –JHEP. –2003. –0306. –p.009.
8. J. M. Frere, M. V. Libanov, E. Y. Nugaev and S. V. Troitsky. Searching for family-number conserving neutral gauge bosons from extra dimensions. // –JETP Lett. –2004. –79. –p.598-601.
9. М. В. Либанов и Э. Я. Нугаев. Свойства хиггсовской частицы в модели с объединенными поколениями фермионов. // –Яд. Физ. –2007. –70. –с.898-904.
10. M.V. Libanov and E.Y. Nugaev. Features of Higgs boson in a model with single generation in the bulk. // –In: Proc. of the XL1st Recontres de Moriond. –2006. –p.210.
11. M. V. Libanov and V. A. Rubakov. Lorentz-violation and cosmological perturbations: A toy brane-world model. // –JCAP. –2005. –0509. –p.005.
12. M. V. Libanov and V. A. Rubakov. Lorentz-violating brane worlds and cosmological perturbations. // –Phys. Rev. –2005. –D72. –p.123503.
13. P. Koroteev and M. Libanov. On Existence of Self-Tuning Solutions in Static Braneworlds without Singularities. // –JHEP. –2008. –02. –p.104.
14. P. Koroteev and M. Libanov. On existence of nonsingular solutions in static braneworlds. // –In: Proc. 15th International Seminar on High Energy Physics “Quarks-2008”. –2008.
15. M. V. Libanov and V. A. Rubakov. More about spontaneous Lorentz-violation and infrared modification of gravity. // –JHEP. –2005. –08.

–p.001.

16. M. Libanov, V. Rubakov, E. Papantonopoulos, M. Sami and S. Tsujikawa. UV stable, Lorentz-violating dark energy with transient phantom era. // –JCAP. –2007. –0708. –p.010.
17. Либанов М. В., Рубаков В. А., Сажина О. С. и Сажин М. В. Анизотропия реликтового излучения, индуцированная тахионными флуктуациями тёмной энергии. // –ЖЭТФ. –2009. –135 –с.253.
18. M. V. Libanov, V. A. Rubakov, O. S. Sazhina and M. V. Sazhin. CMB anisotropy induced by tachyonic perturbations of dark energy. –Preprint astro-ph. 0812.1459. –2008.