

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. М.В. ЛОМОНОСОВА

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

На правах рукописи

Дмитриев Вадим Владимирович

ГРАВИТАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ В
МИРЕ НА БРАНЕ

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 им. М. В. Ломоносова.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
профессор Ю.В. Грац

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
И.П. Волобуев

кандидат физико-математических наук
доцент В.Г. Жотиков

Ведущая организация: Томский государственный университет

Защита диссертации состоится “ ____ ” _____ 2006 года в ____ часов на заседании диссертационного совета К 501.001.17 в МГУ им. М. В. Ломоносова по адресу: 119992, г. Москва, ГСП, Ленинские Горы, МГУ, физический факультет, ауд. _____.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова.

Автореферат разослан “ ____ ” _____ 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета К.501.001.17
доктор физико-математических наук

П.А. Поляков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Модели с дополнительными измерениями пространства-времени вызывают большой интерес уже на протяжении многих лет. В оригинальных теориях типа Калуцы-Клейна пространство-время представилось в виде прямого произведения четырехмерного физического пространства и компактного многообразия внутренних координат. При этом предполагалось, что размер дополнительных измерений имеет порядок планковского. Поэтому для энергий, доступных в наземных лабораториях и вблизи астрофизических объектов моды полей материи с импульсом в направлении дополнительных измерений не могли быть возбуждены, делая таким образом внутреннее пространство ненаблюдаемым, а гравитацию эффективно четырехмерной.

В последние годы все большей популярностью пользуются модели, которые основаны на гипотезе, что наш мир является гиперповерхностью с тремя пространственными измерениями (3-браной), вложенной в некоторое многомерное фундаментальное пространство. Число дополнительных измерений, а также наличие и состав материальных полей, которые живут в объеме, в различных моделях могут отличаться. Вместе с тем, как правило, предполагается, что размер дополнительного пространства достаточно велик, и дополнительные измерения могут, в принципе, быть обнаружены в планируемых в недалеком будущем экспериментах и (или) астрономических наблюдениях.

В работе рассматриваются наиболее популярные в настоящее время модели Рэндалл-Сундрума. Принятое в рамках этих моделей условие тонкого согласования между пятимерной космологической постоянной и натяжениями бран обеспечивает существование Пуанкаре-инвариантного решения для метрики на бранах, если материя отсутствует. Поэтому нетривиальные гравитационные эффекты возможны только, если браны искривлены присутствием материи. В качестве таковой в диссертации рассматриваются топологические конические дефекты – космическая струна или глобальный монополь. Выбор объектов исследования обусловлен тем, что эти два типа дефектов с наибольшей вероятностью могли образоваться в ранней Вселенной, сыграть заметную роль

в образовании ее крупномасштабной структуры и дожить до настоящего времени.

Целью диссертационной работы является исследование принципиальной возможности обнаружения дополнительных измерений в явлениях с различными характерными пространственно-временными масштабами.

Научная новизна работы.

1. Впервые подробно исследован эффект гравитационного линзирования на космической струне и глобальном монополе в моделях Рэндалл-Сундрума.
2. Впервые исследован эффект электростатического самодействия в моделях Рэндалл-Сундрума и модифицированной модели Двали-Габададзе-Поррати с коническим дефектом на бране.
3. Проведенные исследования подтверждают высказывавшееся ранее мнение, что более перспективным является поиск вклада от дополнительных измерений в микроскопических процессах.

Научная и практическая значимость работы.

Проведенные в диссертации исследования расширяют круг решенных проблем, связанных с исследованием влияния дополнительных измерений на динамику классических и квантованных полей. Полученные результаты могут быть использованы при теоретических и экспериментальных исследованиях более сложных и реалистичных моделей таких, как например, стабилизированная модель Рэндалл-Сундрума.

Апробация работы.

Полученные в работе результаты докладывались на международной конференции «XVIIIth International Workshop on High Energy Physics and Quantum Field Theory» (Санкт Петербург, 2004); международной конференции «12th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics» (Москва, МГУ, 2005); международной конференции по гравитации, космологии, астрофизике и нестационарной газодинамике, посвящ. 90-летию со дня рождения К.П.Станюковича (Москва, РУДН, 2006), а также на семинарах кафедры теоретической физики физического факультета МГУ.

Публикации.

Основные результаты диссертации изложены в 8 опубликованных работах, список которых приводится в конце автореферата.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, трех глав, двух приложений, заключения и списка цитируемой литературы, включающего 137 наименований. Общий объем работы составляет 95 страниц. Текст диссертации набран в издательской системе L^AT_EX.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении содержится обоснование выбора темы исследований, ее актуальности и формулируется цель работы. В нем определяется круг рассматриваемых вопросов, дается обзор основных публикаций, имеющих отношение к выбранному направлению исследований, и описана структура диссертации.

Первая глава носит обзорный характер. В ней рассмотрены основные модели многомерной гравитации: теория Калуцы-Клейна, модель Аркани-Хамеда-Димопулоса-Двали (ADD), сценарии Рэндалл-Сундрума с одной (RS2) и с двумя бранами (RS1), модели индуцированной на бране гравитации Двали-Габададзе-Поррати (DGP), обсуждается механизм стабилизации радиона (скалярной моды, соответствующей флуктуациям бран по отношению друг к другу). Обсуждаются их свойства и характерные особенности, а также представлен обзор литературы по исследуемой теме.

Вторая глава посвящена изучению эффектов гравитационного линзирования на бране.

В параграфе 1 приводится необходимая информация об эффекте гравитационного линзирования. Перечисляются основные типы изображений, даваемых гравитационными линзами, среди которых особое внимание уделено кратным (два или более) изображениям квазаров. Это связано с тем, что подобные изображения могут возникать в результате гравитационного линзирования на конических топологических дефектах – космических струнах и глобальных монополях, – которые представляют основной интерес для современной космологии, и для которых основные надежды на обнаружение связываются именно с эффектом линзирования.

В параграфе 2 приводятся необходимые для дальнейшего сведения

о конических дефектах в стандартной четырехмерной эйнштейновской теории. Приведены выражения для их тензоров энергии-импульса и метрики соответствующего пространства-времени.

В параграфе 3 исследуется гравитационное линзирование в поле топологических дефектов в модели RS2. Получены явные выражение для линейризованной метрики вложенных в брану космической струны и глобального монополя. Показано, что метрика дефекта на бране характеризуется зависящим от радиальной переменной дефицитом угла и неравным нулю гравитационным потенциалом. Решены уравнения геодезической и получено выражение для угла отклонения массивных частиц и света в гравитационном поле дефекта. В случае фотона получено выражение для углового размера наблюдаемого изображения

$$\psi_{\text{mon}} = 8\pi^2 G_4 \eta^2 \frac{l}{l+d} + \frac{l+d}{4\pi^2 G_4 \eta^2 k^2 d^2 l} \left[\ln \left(\frac{16\pi^2 G_4 \eta^2 k d l}{l+d} \right) - 1 \right],$$

$$\psi_{\text{str}} = 8\pi G_4 \mu \frac{l}{l+d} \sin \theta + \frac{l+d}{4l d^2 \pi \mu G_4 k^2 \sin \theta},$$

где d – расстояние между наблюдателем и дефектом, l – между дефектом и источником, G_4 – четырехмерная гравитационная постоянная, $k > 0$ – параметр модели, θ – угол наклона струны по отношению к линии источник-наблюдатель (предполагается, что $d\psi_{\text{str}} \sin \theta \gg 1/k$). В полученных выражениях первые члены полностью соответствуют четырехмерной эйнштейновской теории. Второй возникает благодаря наличию дополнительного измерения и для типичных для эффекта линзирования расстояний в случае глобального монополя может существенно превосходить соответствующий вклад для космической струны.

В параграфе 4 рассматривается эффект линзирования в модели Рэндалл–Сундрума с двумя бранами (RS1). В этой модели возможно четыре различных варианта взаимного расположения дефекта и наблюдателя, в том числе и достаточно интересный случай "теневого" материи, когда брана, на которой расположен наблюдатель, искривляется благодаря присутствию материи на другой бране. Получено выражение для углов рассеяния массивной частицы и света в гравитационных полях

топологических дефектов. Для космической струны:

$$\begin{aligned} \varphi_{r \rightarrow \infty}^{\text{str}} &= \pm \frac{\pi}{2} \pm \pi G_5 k \mu e^{-2\sigma_\beta} (-Q_{\alpha,\beta}) \mp \\ &\mp \frac{\pi}{3} G_5 k \mu e^{-2\sigma_\beta} (Q_{\alpha,\beta} + 2e^{2\sigma_\beta} s_{\alpha,\beta}) \frac{E}{1 - P_z^2 - E} , \end{aligned}$$

и соответственно для глобального монополя

$$\begin{aligned} \varphi_{r \rightarrow \infty}^{\text{mon}} &= \pm \frac{\pi}{2} \pm \pi^2 G_5 k \eta^2 e^{-2\sigma_\beta} (-Q_{\alpha,\beta}) \mp \\ &\mp \frac{\pi^2}{3} G_5 k \eta^2 e^{-2\sigma_\beta} (2Q_{\alpha,\beta} + 4e^{2\sigma_\beta} s_{\alpha,\beta}) \frac{E}{1 - E} . \end{aligned}$$

В приведенных выражениях G_5 – пятимерная гравитационная постоянная, $(1 - E)^{1/2}$ – скорость частицы, P_z – z -импульс на единицу энергии на бесконечности, первый α и второй β индексы соответствуют номерам бран, на которых локализованы материя и наблюдатель соответственно. Величины σ_β , $s_{\alpha,\beta}$ и $Q_{\alpha,\beta}$ определяются следующим образом

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= 0, \quad \sigma_2 = -kL, \quad s_{1.1} = 1, \quad s_{1.2} = s_{2.1} = 0, \quad s_{2.2} = -1 , \\ Q_{1.1} &= -2 + (1 - \coth(kL)), \quad Q_{2.2} = -2e^{-4kL} , \\ Q_{1.2} &= Q_{2.1} = 1 - \coth(kL) , \end{aligned}$$

где L – размер дополнительного измерения.

Поскольку в выражении для углов рассеяния безмассовых частиц не входит член, содержащий связанные с полем радиона величины $s_{\alpha,\beta}$, и соответствующее выражение зависит только от функций $Q_{\alpha,\beta}$, определяемых поперечно-бесследовой частью возмущения метрики, делается вывод, что полученные в диссертации формулы для эффекта линзирования будут применимы и в стабилизированной модели.

В параграфе 5 сформулированы основные полученные в главе результаты и проводится их обсуждение.

В третьей главе рассматривается явление электростатического самодействия заряженной частицы, находящейся в гравитационном поле локализованных на бранах дефектов.

В параграфе 1 представлен обзор основных работ, посвященных исследованию эффекта самодействию частиц во внешних гравитационных полях различной конфигурации.

В параграфе 2 рассматривается общая постановка задачи об электростатическом самодействии точечной заряженной частицы в произвольном внешнем статическом гравитационном поле и приводятся необходимые для дальнейшего формулы.

Параграф 3 посвящен исследованию эффекта электростатического самодействия вблизи конических дефектов в модели Рэндалл–Сундрума с однойбраной. Формальное выражение для энергии и силы самодействия содержит взятую в пределе совпадающих точек функцию Грина уравнения Пуассона, которая расходится. В качестве процедуры регуляризации выбран метод, предложенный ранее Гальцовым, Грацем и Лаврентьевым и основанный на совместном использовании методов теории возмущений и размерной регуляризации. В результате было показано, что сила самодействия имеет следующий вид

$$\vec{F}_{em}^{\text{str}}(x) = \frac{\pi e^2 G_4 \mu \vec{\rho}}{4\rho^2 \rho}, \quad \rho \ll k^{-1},$$

$$\vec{F}_{em}^{\text{str}}(x) = \frac{\pi e^2 G_4 \mu \vec{\rho}}{4\rho^2 \rho} - \frac{5\pi e^2 G_4 \mu (7 - 3 \ln(4k\rho)) \vec{\rho}}{24\rho^4 k^2 \rho}, \quad \rho \gg k^{-1},$$

$$\vec{F}_{em}^{\text{mon}}(x) = \frac{\pi^3 e^2 G_4 \eta^2 \vec{r}}{4r^2 r} - \frac{5\pi^2 e^2 G_4 \eta^2 \vec{r}}{6r^3 k r}, \quad r \ll k^{-1},$$

$$\vec{F}_{em}^{\text{mon}}(x) = \frac{\pi^3 e^2 G_4 \eta^2 \vec{r}}{4r^2 r} - \frac{5\pi^3 e^2 G_4 \eta^2 \vec{r}}{8r^4 k^2 r}, \quad r \gg k^{-1}.$$

Особенностью полученного результата является то, что вклад от дополнительного измерения (второе слагаемое) в случае глобального монополя становится доминирующим на масштабах меньших k^{-1} , и характерное для четырехмерной теории отталкивание заменяется на притяжение.

Параграф 4 посвящен более детальному изучению электростатики на бране с конической особенностью. Методами теории возмущений получено выражение для первой по константе гравитационного взаимодействия поправки к двухточечной функции Грина уравнения Пуассона и с принятой точностью получены первые поправки к потенциалу точечного заряда, помещенного вблизи локализованного на бране дефекта.

В параграфе 5 рассматривается эффект электростатического самодействия в модели Рэндалл–Сундрума с двумя бранами. В наиболее интересном случае расположения дефекта и заряда на бране с отрицатель-

ным натяжением выражение для силы самодействия заряда в гравитационном поле космической струны имеет следующий вид

$$\vec{F}_{em}^{\text{str}}(x) = -\frac{2\pi e^2 G_2 \mu}{3\rho^2} \left(\frac{5}{8} + e^{2kL} \right) \frac{\vec{\rho}}{\rho}, \quad \rho \gg k^{-1},$$

$$\vec{F}_{em}^{\text{str}}(x) = -\frac{2\pi e^2 G_2 \mu e^{2kL}}{3\rho^2} \frac{\vec{\rho}}{\rho}, \quad \rho \ll k^{-1}.$$

В случае монополя мы имеем

$$\vec{F}_{em}^{\text{mon}}(x) = -\frac{2\pi^3 e^2 G_2 \eta^2}{3r^2} \left(\frac{5}{8} + e^{2kL} \right) \frac{\vec{r}}{r}, \quad r \gg k^{-1},$$

$$\vec{F}_{em}^{\text{mon}}(x) = -\frac{2\pi^3 e^2 G_2 \eta^2 e^{2kL}}{3r^2} \left(\frac{5}{4\pi k r} + 1 \right) \frac{\vec{r}}{r}, \quad r \ll k^{-1},$$

где $G_2 = G_5 k / (e^{2kL} - 1)$ – гравитационная постоянная на второй бране. Показано, что в нестабилизированной модели на бране с отрицательным натяжением вклад скалярной моды (радиона) является доминирующим. В результате на этой бране, а также в случае "теневого" материи сила самодействия заряженной частицы вблизи конических дефектов всегда будет силой притяжения, что принципиально отличает рассматриваемый случай от RS2–модели и стандартной четырехмерной теории.

В параграфе 6 исследуются эффекты самодействия в модифицированной DGP–модели.

В параграфе 7 дан сравнительный анализ полученных результатов. Делается вывод, что более перспективным является поиск дополнительных измерений в явлениях с микроскопическими пространственно-временными масштабами.

В **приложении** вынесены некоторые вспомогательные вычисления.

В **заключении** сформулированы основные полученные в диссертации результаты.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. В линейном приближении теории гравитации получены выражения для метрики локализованных на бране в моделях Рэндалл-Сундрума конических дефектов – космической струны и глобаль-

ного монополя. Показано, что в отличие от четырехмерной эйнштейновской теории, гравитационное поле дефектов на бране характеризуется отличным от нуля гравитационным потенциалом и отличным от стандартного дефицитом угла.

2. Решены уравнения геодезических и рассчитаны величины углов отклонения массивных частиц и света. Получены формулы для эффекта линзы. Показано, что в RS2-модели, в отличие от модели от RS1 и стандартной четырехмерной теории, угловое расстояние между изображениями при линзировании на монополе может заметно превышать аналогичную величину для линзы, порождаемой космической струной.
3. Делается вывод, что в стабилизированной модели Рэндалл-Сундрума угловое расстояние между изображениями при линзировании на коническом дефекте не должно зависеть от механизма стабилизации Голдбергера-Вайза.
4. Получено выражение для энергии и силы самодействия точечной заряженной частицы вблизи помещенного на брану конического дефекта. Показано, что в модели RS1, если наблюдатель и дефект находятся на бране с отрицательным натяжением и в случае "теневой" материи, сила электростатического самодействия является силой притяжения, что принципиально отличает рассматриваемый случай от эффекта самодействия в модели с одной браной и в стандартной теории. Показано, что в RS2-модели в случае струны вклад от дополнительного измерения на малых расстояниях отсутствует, а для монополя является доминирующим, и сила самодействия также становится силой притяжения.
5. Делается вывод, что более перспективным является поиск дополнительных измерений в явлениях с микроскопическими пространственно-временными масштабами.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Грац Ю.В., Дмитриев В.В., Россихин А.А. Глобальный монополь в мире с одним дополнительным измерением // *Нелинейный мир* — 2005. — N 1-2. — С. 48–53.

- [2] Грац Ю.В., Дмитриев В.В. Гравитационное линзирование на бране // *Вестн. Моск. Ун-та. Физ. Астрон.* — 2005. — N 6. — С. 7.
- [3] Grats Y., Dmitriev V., Mikhailov A. Self-interaction in RS1 model // *Grav. and Cosmol.* — 2006. — Vol. 12, №2-3(46-47). — Pp. 155–158.
- [4] Grats Y., Dmitriev V. Gravitational field of topological defects in the Randall-Sundrum model // *Grav. and Cosmol.* — 2006. — Vol. 12, №1(45). — Pp. 21–28.
- [5] Grats Y., Dmitriev V. Conical defects in a brane world: gravitational lensing // *Proceedings of the XVIIIth International Workshop on High Energy Physics and Quantum Field Theory.* — St. Peterburg, Russia. — 2004. — Pp. 251–255.
- [6] Грац Ю.В., Дмитриев В.В., Михайлов А.С. Самодействие в модели RS1 // *Сб. тезисов международной конференции по гравитации, космологии, астрофизике и нестационарной газодинамике, посвящ. 90 - летию К.П. Станюковича.* — 2006. — Москва, Изд-во РУДН. — С. 14.
- [7] Грац Ю.В., Дмитриев В.В. Топологические дефекты в модели Рэндалл–Сундрума: Препринт Физ. Ф-та МГУ. — 2005. — N24/2005. — 16с.
- [8] Грац Ю.В., Дмитриев В.В., Михайлов А.С. Гравитационное линзирование в модели Рэндалл–Сундрума с двумя бранами: Препринт Физ. Ф-та МГУ. — 2006. — N9/2006. — 12с.