

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертацию на соискание ученой степени кандидата

физико-математических наук Кейзерова Сергея Ивановича на тему:

«Самодействие и взаимодействие радиона с полями Стандартной модели»

по специальности 1.3.15 – «Физика атомных ядер и элементарных частиц,

физика высоких энергий»

Одной из фундаментальных задач современной теоретической физики является объединение всех известных взаимодействий в одно универсальное. И серьезное препятствие для решения этой задачи представляет проблема иерархии взаимодействий, то есть огромное различие между электрослабым и гравитационным энергетическими масштабами.

Возможный подход к решению этой проблемы связан с гипотезой Калуцы-Клейна о существовании дополнительных измерений пространства-времени. И в последние десятилетия было выяснено, что если дополнительные измерения имеют большой размер (объем), то энергетический масштаб гравитационного взаимодействия в пространстве-времени с дополнительными измерениями может быть порядка электрослабого энергетического масштаба. При этом для того, чтобы объяснить ненаблюдаемость больших дополнительных измерений при низких энергиях, предполагается, что поля Стандартной модели (СМ) локализованы на трехмерных гиперповерхностях, получивших название бран.

Наиболее известной моделью «мира на бране» является модель Рэндалл-Сундрума с двумя бранами в пятимерном пространстве-времени. Эта модель дает решение проблемы иерархии взаимодействий на бране с отрицательным натяжением. Однако в первоначальном варианте этой модели расстояние между бранами не определяется ее параметрами, а является произвольным, что приводит к появлению в эффективной четырехмерной теории на бранах безмассового скалярного поля – так называемого поля радиона. Константа

связи этого поля с материей на бране с отрицательным натяжением, где предположительно локализованы поля СМ, оказывается очень большой, что противоречит экспериментальным данным даже на уровне классической гравитации. Поэтому для того, чтобы модель Рэндалл-Сундрума была феноменологически приемлема, необходимо стабилизировать расстояние между бранами, что эквивалентно появлению массы у радиона. Известно, что модель Рэндалл-Сундрума может быть стабилизирована с помощью пятимерного скалярного поля с потенциалами во всем пространстве и на бранах.

Диссертационная работа С.И. Кейзера посвящена последовательному изучению варианта стабилизированной модели Рэндалл-Сундрума, основанному на точном решении для гравитации, взаимодействующей с системой двух бран и скалярным полем в пятимерном пространстве-времени. При определенном выборе параметров такой модели вид решения для пятимерной метрики оказывается близким к виду решения Рэндалл-Сундрума, что позволяет рассматривать самосогласованную модель с массивным радионом. В диссертации рассматривается взаимодействие радиона с полями СМ, в частности, детально изучены самодействие радиона и процессы ассоциативного рождения радиона и бозона Хиггса, в которых четко проявляется сходство этих двух скалярных частиц. В ней также обсуждается влияние на фоновое решение модели низших квантовых поправок, приводящих к эффекту Казимира, и показано, что модель относительно таких поправок устойчива.

Актуальность темы диссертации несомненна.

Научная и практическая ценность диссертации также не вызывает сомнений. В ней детально изучены физические следствия стабилизированной модели Рэндалл-Сундрума и продемонстрирована возможность их экспериментальной проверки в экспериментах по поиску новой скалярной частицы радиона, а также в экспериментах по изучению свойств бозона Хиггса.

Новизна результатов диссертации подтверждается их публикацией в рецензируемых, в том числе высокорейтинговых, журналах и их цитируемостью.

Обоснованность полученных в диссертации результатов и положений, выносимых на защиту, является следствием использования современных и хорошо апробированных методов исследования.

Достоверность результатов подтверждается их публикацией в рецензируемых журналах и согласованностью с результатами других исследователей в ряде предельных случаев.

Диссертация состоит из Введения, четырех глав основного содержания, Заключения, трех приложений и списка литературы, содержащего 80 библиографических ссылок. Полный объем диссертации составляет 122 страницы, включая 11 рисунков.

Во **Введении** приводится исторический обзор исследований по теориям типа Калуцы-Клейна, обосновывается актуальность темы диссертации, научная новизна, практическая значимость, достоверность полученных результатов, включая информацию об их апробации, формулируются основные положения, выносимые на защиту. Здесь также представлен обзор литературы по тематике диссертации, включая публикации автора.

В **первой главе** подробно разобраны достоинства и недостатки двух известных моделей мира на бране: нестабилизированной модели Рэндалл-Сундрума и модели Рэндалл-Сундрума, стабилизированной с помощью поля Гольдбергера-Вайза. Автор обращает особое внимание на феноменологию обеих моделей. При этом с точки зрения эксперимента одним из основных феноменологических следствий является возникновение калуца-клейновских башен массивных тензорных и скалярных мод. Легчайшая скалярная мода, радион, может иметь достаточно малую массу и сравнительно большую константу связи с полями СМ, что дает надежду обнаружить эту частицу на современных коллайдерах или ускорителях следующего поколения.

Вторая глава посвящена изучению скалярного сектора SM , расширенного за счет радиона. При этом особое внимание уделяется сравнению свойств радиона и бозона Хиггса. Автором рассмотрены процессы одиночного и ассоциативного рождения радиона и бозона Хиггса в сопровождении произвольного количества калибровочных бозонов. Основным результатом может быть сформулирован следующим образом: несмотря на различие в структуре взаимодействий обоих скаляров с полями SM , амплитуды рассмотренных процессов оказываются практически идентичными с точностью до замены масс скаляров и констант взаимодействия. Этот результат сначала демонстрируется автором на простых частных примерах в древесном приближении, а потом доказывается в общем случае как на древесном, так и на петлевом уровне (для фермионных петель). Показано, что структурное сходство амплитуд процессов с участием обоих скалярных бозонов возникает вследствие нетривиального сокращения вкладов некоторых диаграмм в процессах с участием радиона. В результате такого сокращения для процессов с участием радиона «выживают» только диаграммы, структурно идентичные диаграммам аналогичных процессов с участием бозона Хиггса. Автор отмечает, что, если массы обоих скаляров достаточно близки, то для будущих экспериментов по изучению свойств обоих бозонов может возникнуть проблема выделения сигнала радиона из фона сигнала бозона Хиггса. Интересно, что полученный результат фактически является модельно независимым и справедлив для любого скалярного бозона, который линейно взаимодействует с тензором энергии-импульса SM .

В третьей главе рассматриваются самодействие радиона и квадратичные по полю радиона взаимодействия с тензором энергии-импульса SM . Впервые построен лагранжиан самодействия радиона вплоть до четвертой степени и продемонстрировано, что потенциал поля радиона по-прежнему имеет устойчивый минимум в нуле, то есть радион не приобретает ненулевого вакуумного среднего и не возникает ничего похожего на ситуацию со спонтанным нарушением симметрии. Также впервые продемонстрировано,

что взаимодействие радиона с бозонами СМ имеет полиномиальный вид, причем для векторного поля возникает только линейное по полю радиона слагаемое. Для фермионов СМ взаимодействие с радионом имеет неполиномиальную (по полю радиона) структуру. Полученное выражение разлагается в ряд до второго порядка по константе связи радиона включительно и таким образом приводится явный вид членов взаимодействия радиона с фермионами СМ в соответствующем порядке теории возмущений. Автор отмечает, что описанное во второй главе сходство бозона Хиггса и радиона, основанное на линейном взаимодействии последнего с тензором энергии-импульса СМ, скорее всего будет нарушено за счет наличия в лагранжиане модели нелинейных членов взаимодействия радиона с тензором энергии-импульса СМ. Что, по-видимому, приведет к тому, что для радиона и бозона Хиггса амплитуды процессов более высоких порядков по константе связи радиона будут структурно различаться. Этот вопрос требует дополнительного изучения.

В четвертой главе изучается эффект Казимира, обусловленный топологией стабилизированной модели Рэндалл-Сундрума: скалярное поле Гольдбергера-Вайза и пятимерная гравитация распространяются в пятимерном балке, границами которого являются две четырехмерные браны, разделенные некоторым фиксированным расстоянием.

Следует отметить, что существует немного работ, в которых при рассмотрении эффекта Казимира была необходимость учитывать эффекты кривизны. И появление еще одной, даже безотносительно к полученным результатам, само по себе заслуживает внимания. Однако и полученные результаты достаточно интересны.

Показано, что эффект Казимира в рассматриваемой модели Рэндалл-Сундрума приводит к взаимному притяжению двух бран, получено аналитическое выражение для силы Казимира, приходящейся на единицу объема браны. Определен вклад энергии Казимира в полную энергию системы и продемонстрировано, что такие квантовые вакуумные поправки не меняют

классических уравнений движения стабилизированной RS-модели, поэтому вид фонового решения модели остается тем же самым, а параметры модели получают незначительные поправки. Несмотря на малость таких поправок, их вряд ли возможно оценить с помощью какого-либо альтернативного метода, поскольку полученные результаты основаны на процедуре перенормировки тензора энергии-импульса (ТЭИ) модели. Для регуляризации ТЭИ используется размерная регуляризация и формула Абеля-Плана. Автором предложена оригинальная и интуитивно понятная схема перенормировки ТЭИ, позволяющая свести перенормировку вклада калупе-клейновской башни радиона к хорошо известной процедуре перенормировки пары четырехмерных мод. Предложенная схема перенормировки удовлетворяет аксиомам Уолда и поэтому позволяет однозначно определить перенормированный ТЭИ.

В **Заключении** автор перечисляет основные результаты диссертации. Приведенные формулировки соответствуют положениям, выносимым на защиту.

В целом диссертация представляет собой законченное исследование, являющееся заметным вкладом в физику элементарных частиц и физику высоких энергий. Однако, по содержанию диссертации имеются следующие замечания.

1) К сожалению, в тексте диссертации встречаются некоторые недочеты при оформлении формул. Так, в Главе 1 для параметров потенциалов на бранах автор использует обозначения β_0 и β_L , однако затем в формулах (1.60) и (1.61) они обозначены как β_1 и β_2 . Аналогично в формуле (1.69) вместо β_2^2 должно быть β_L^2 . Далее, в Главе 3 в формулах (3.37) и (3.38) также вместо β_1 и β_2 следует записать β_0 и β_L соответственно, а в Главе 4 на странице 88 между формулами (4.23) и (4.24) при выборе параметров модели вместо β_2^2 опять должно быть β_L^2 .

2) В Главе 3 одно и то же обозначение β_0 используется для параметра потенциала на первой бране и для одного из параметров разложения

потенциала взаимодействия радиона с полями СМ (см. формулу 3.18). И хотя из контекста можно понять, что именно имеет в виду автор в каждом конкретном случае, такой неудачный выбор обозначений затрудняет чтение текста диссертации.

3) В Главе 4 при проведении процедуры перенормировки ТЭИ, возможно, целесообразно было бы вместо формулы Абеля-Плана воспользоваться методом обобщенной дзета-функции, поскольку пришлось бы иметь дело с более компактными выражениями.

Вместе с тем указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.15 Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, а также оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель Кейзеров Сергей Иванович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15 Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий.

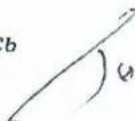
Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,
профессор кафедры теоретической физики
физического факультета

«ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
"МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ
М.В.ЛОМОНОСОВА»

ГРАЦ Юрий Владимирович

подпись



07.09.2024

Дата подписания

Контактные данные:

тел.: 7(903)5119688, e-mail: grats@phys.msu.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:

01.04.02 – теоретическая физика

Адрес места работы:

119991, г. Москва, Ленинские горы, МГУ имени М.В.Ломоносова

Дом 1, строение 2, Физический факультет, кафедра теоретической физики

Тел.: +7 9035119688; e-mail: agrats@phys/msu.ru

Подпись сотрудника

Физического факультета МГУ Ю.В. Граца удостоверяю:

дата