

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации

Савиной Марии Вячеславовны

на тему: «Поиск дополнительных пространственных измерений в столкновениях протонов на энергетическом масштабе порядка ТэВ», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика

Чуть менее века назад, вскоре после создания общей теории относительности, Т. Калуца (1921) и О. Клейн (1926) с целью синтеза электромагнитных и гравитационных взаимодействий выдвинули гипотезу о существовании дополнительного пространственного измерения. На протяжении последующих 70 лет (до 1998 г.) интерес к этому предположению то угасал, то возникал вновь. Повышение интереса в первую очередь связано с тем, что наличие дополнительных измерений позволяет осуществить геометрический синтез не только электромагнетизма и гравитации, но и других типов взаимодействий. Более того, теории (супер)струн и М-теория, допускающие последовательное описание квантовой гравитации, могут быть сформулированы самосогласованным образом только в пространстве-времени с числом измерений, большим четырёх. Угасание интереса связано с тем, что наблюдаемый нами мир существенно четырёхмерный. Поэтому основной задачей многомерных теорий являлось то, как скрыть дополнительные измерения (ДИ). Обычно, в духе модели Калуцы-Клейна, считалось, что ДИ должны быть компактифицированы, причём их размер, определяемый гравитационным взаимодействием, очень мал – порядка планковской длины 10^{-33} см. Конечно, такой малый размер ДИ делает многомерные теории малопривлекательными с точки зрения феноменологических проявлений.

Революционным стало наблюдение, сделанное в 1998 г. Аркаши-Хамелом, Димополоусом и Двали (АДД-модель). Авторы этой модели предположили, что масса Планка многомерной «фундаментальной» теории может отличаться от «эффективной» четырёхмерной массы Планка и быть порядка нескольких ТэВ. Выбор точного масштаба гравитации неслучаен и продиктован попыткой решить проблему калибровочной иерархии, т.е. объяснить, почему столь сильно различаются гравитационный энергетический масштаб (10^{16} ТэВ) и электрослабый (10^2 ТэВ). Слабость четырёхмерной гравитации (большое значение четырёхмерной массы Планка) в сценарии АДД объясняется большим, вплоть до 1 мм, размером ДИ. Гравитационное взаимодействие «чувствует» наличие ДИ, что, в частности, приводит к видоизменению закона Ньютона на масштабах, меньших размера ДИ (до 1998 г. закон Ньютона был проверен лишь вплоть до масштаба нескольких миллиметров). В то же время, для согласия с тем фактом, что наш мир четырёхмерен, все взаимодействия Стандартной модели (СМ) и наблюдаемые частицы не должны проникать в ДИ дальше, чем 10^{-16} см (\sim ТэВ $^{-1}$). Это может быть достигнуто путём локализации полей СМ на различного рода топологических дефектах, которые в контексте моделей с большими ДИ получили название браны. Стоит отметить, что ни в сценарии АДД, ни в его различных модификациях, включая сценарии РС1, РС2 (модели Рэнделл и Сандрум), проблема иерархии не решается, а лишь переформулируется на новом (геометрическом) языке: необходимо объяснить, почему толщина браны (масштаб локализации полей СМ) и размер ДИ отличаются столь сильно. Тем не менее, модели с большими ДИ привлекли (и привлекают до сих пор) огромное внимание научного сообщества. Это связано, во-первых, с тем, что переформулировка проблемы

иерархии может помочь в её решении. А во-вторых, гипотеза о существовании больших ДИ дала надежду проверить её в текущих и планируемых экспериментах, в первую очередь, в экспериментах на Большом адронном коллайдере (БАК). В связи с этим возникают вопросы, в каких именно процессах на БАК ДИ (если они существуют) проявят себя наиболее ярким образом, какие вероятности этих процессов, и как отличить проявление ДИ от других проявлений новой физики. Стоит отметить, что перед исследователями, занимающимися этими вопросами, стоит очень сложная задача. Действительно, им приходится проникать в своего рода terra incognita, где, по сути, неизвестно ничего: ни количество ДИ, ни фундаментальный планковский масштаб, ни размер(ы) ДИ, ни их геометрия, ни природа бран(ы) (и их количество), ни способ(ы) локализации поляей СМ, ни многомерные эффекты квантовой гравитации, возникающие на фундаментальном масштабе, и т.д. Этим вопросам, а именно, получению по возможности модельно независимых предсказаний проявления больших ДИ на БАК, посвящена диссертация М.В. Савиной. Без сомнения, выбранная тема является актуальнейшей, так как результаты, полученные в диссертации, необходимы для проведения научной программы по поиску ДИ на БАК.

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, приложения и списка литературы.

Во **введении** дан краткий обзор современного состояния проблемы, обосновывается её актуальность, сформулирована цель исследования. Также во введении перечислены используемые методы и подходы, описана структура диссертации и дано краткое содержание её глав.

В **первой главе** исследованы процессы рождения калуца-клейновских (КК) мод гравитона в АДД-сценарии. В этом сценарии энергетическая щель между КК-модами гравитона очень мала, порядка обратного размера ДИ. Это приводит к необходимости учета большого числа мод для описания процессов при энергиях, достижимых на БАК, что в свою очередь обуславливает аккуратный учет неопределенностей и использование различных параметризаций. В диссертации обсуждаются различные параметризации матричного элемента для процесса Дрелла-Яна, включающего вклад от обмена виртуальными КК-гравитонами, связь между параметризациями и переходы между ними. Вычислены сечения процесса Дрелла-Яна, описано моделирование для условий БАК и сделаны предсказания в зависимости от модельных параметров и условий работы БАК. Обсуждается влияние различных неопределенностей при вычислении сечений, транслирующееся в неопределенности для установленных пределов по наблюдаемости КК-гравитонов. Также обсуждаются проблемы, связанные с извлечением из данных величины фундаментального планковского масштаба, и приведено сравнение сделанных предсказаний с реальными данными первого цикла работы БАК и с полученными из эксперимента ограничениями на пространство параметров модели.

Во **второй главе** аналогичный анализ для процессов Дрелла-Яна приведен для случая РС1-сценария. С точки зрения феноменологических проявлений ДИ основное отличие РС1-сценария от АДД заключается в том, что благодаря нетривиальной геометрии ДИ КК-моды гравитонов разделены широкой энергетической щелью (порядка фундаментального масштаба). Это приводит к тому, что КК-моды гравитонов проявляются как узкие тяжелые резонансы. В диссертации приводятся результаты вычисления сечений рождения 1-ой КК-моды в зависимости от координаты связи гравитона с полями материи. Также приводятся пределы по наблюдаемости КК-гравитонов на БАК в зависимости от параметров модели и

набранной интегральной светимости. Обсуждается возможность отделения сигнала от КК-гравитона и сигнала от возникающего в различных моделях с расширенным калибровочным сектором и дающего похожую экспериментальную сигнатуру Z' векторного бозона. Приведены сравнения выполненных предсказаний с реальными данными первого цикла работы БАК и с полученными из эксперимента ограничениями на фундаментальный масштаб для КК-гравитонов и массы Z' в разных моделях с расширенным калибровочным сектором, в зависимости от констант связи этих частиц с материей.

Третья глава посвящена анализу возможности рождения на ускорителе микроскопических черных дыр (ЧД) и альтернативных объектов сильнодействующей гравитации — квантовых ЧД (КЧД) и сильновозбужденных струнных состояний — струнных шаров (СШ). Детально описана схема моделирования событий рождения ЧД, КЧД и СШ, реализуемого с помощью предварительно настроенных и протестированных специализированных генераторов событий. Также приводятся результаты, полученные коллаборацией CMS по поиску ЧД, КЧД и СШ, а именно, установленные пределы на минимальную массу объектов, в зависимости от числа дополнительных измерений в различных сценариях. Обсуждаются согласованность полученных результатов по КК-модам гравитонов и по микроскопическим ЧД, а также дальнейшие перспективы поиска подобных объектов на БАК и в будущих ускорительных экспериментах.

В заключении автор формулирует основные результаты, выносимые на защиту.

В приложении приводятся примеры карт генерации событий рождения черных дыр, квантовых черных дыр и струнных шаров, описывающих реализации различных сценариев.

Достоверность результатов и выводов автора обеспечена выбранным подходом к вычислению сечений рассматриваемых процессов в рамках квантовой теории поля, учётом поправок высших порядков теории возмущений для процесса Дрелля-Яна и корректным учётом различной систематики. Сделанные автором предсказания во всех случаях носят консервативный характер. Кроме того, представленные автором результаты прошли многостороннюю проверку в рамках работы коллаборации CMS.

Результаты М.В.Савиной имеют несомненную **новизну и научно-практическую ценность**. Полученные результаты и развитые методы и подходы легли в основу научной программы БАК по поиску больших ДИ и Z' -бозона. Они могут найти применение в планируемых ускорительных экспериментах по поиску новой физики.

Материалы диссертации **полностью изложены** в 25 опубликованных научных работах автора, 11 из которых опубликованы в ведущих реферируемых журналах, рекомендованных ВАК. Также результаты доложены на многочисленных международных и российских конференциях. Это также подтверждает новизну и достоверность полученных результатов. **Автореферат полностью отражает содержание диссертации.**

У меня нет замечаний по существу диссертации, что, по-видимому, объясняется всесторонней проверкой методов, подходов и результатов, проведенной на уровне коллаборации. Есть несколько замечаний формального характера:

- 1) В тексте встречается достаточно много опечаток.
- 2) В русскоязычной научной литературе принято написание Клейн (а не Кляйн, как в тексте диссертации).

- 3) Подпись к рисунку 1.15 не соответствует тому, что изображено на графике: на графике по оси ординат отложены значения M_{13} , в подписи говорится об ограничениях на M_5 . Также не сказано, что отложено по оси абсцисс.
- 4) На стр. 148 не вполне корректно изложена ситуация с ограничениями, получаемыми из поиска процессов рождения ЧД в результате взаимодействия космических нейтрино (сверх)высоких энергий с атмосферой. В частности, утверждается, что «спектр самых космических нейтрино хорошо изучен», что не соответствует действительности.

Однако указанные недостатки ни в какой мере не снижают качество работы. Диссертация М.В. Савиной является **законченным научным исследованием**, в котором содержится ряд важных результатов, существенно развивающих современную физику высоких энергий и элементарных частиц.

Таким образом, диссертация **Марии Вячеславовны Савиной** на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук является **научно-квалификационной работой**, в которой содержится решение задачи, имеющей несомненное значение для развития физики высоких энергий и элементарных частиц, что соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. №842, а её автор без сомнений заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Официальный оппонент,
заместитель директора ИЯИ РАН,
доктор физ.-мат. наук



М.В.Либанов

20 декабря 2016 г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований
Российской академии наук (ИЯИ РАН)
117312 Москва, проспект 60-летия Октября, 7а, ИЯИ РАН
Тел. 8(495)851-00-61, e-mail: ml@ms2.inr.ac.ru