

ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
“ИНСТИТУТ ФИЗИКИ им. Б.И. СТЕПАНОВА
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ”

УДК 539.12

СЕРЕНКОВА
ИННА АЛЕКСАНДРОВНА

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПРЯМЫХ И КОСВЕННЫХ
ЭФФЕКТОВ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ
ИЗМЕРЕНИЙ НА БОЛЬШОМ АДРОННОМ КОЛЛАЙДЕРЕ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.02 – теоретическая физика

Минск, 2012

Работа выполнена в учреждении образования “Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины”.

Введение

Научный руководитель: **Панков Александр Альбертович**
доктор физико-математических наук,
профессор; профессор кафедры физики
УО “Гомельский государственный
технический университет
имени П.О. Сухого”

Официальные оппоненты: **Курочкин Юрий Андреевич**
доктор физико-математических наук,
доцент; заведующий лабораторией
теоретической физики ИФ НАН Беларуси

Бояркин Олег Михайлович
доктор физико-математических наук,
профессор; профессор кафедры
экспериментальной физики УО
“Белорусский государственный
педагогический университет
имени М. Танка”

Оппонирующая организация: ГНУ “Объединенный институт
энергетических и ядерных
исследований – Сосны НАН Беларуси”

Защита состоится “15” мая 2012 года в 14:30 на заседании совета по защите диссертаций Д 01.05.02 при Институте физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси по адресу: 220072, Республика Беларусь, Минск, пр. Независимости, 68; тел. ученого секретаря 284-15-59.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси.

Автореферат разослан “ 10 ” 04 2012 г.

Учёный секретарь
совета по защите диссертаций
кандидат физ.-мат. наук



Ю.П. Выблуй

На протяжении последних десятилетий мы являемся свидетелями истине грандиозного триумфа Стандартной модели сильных, электромагнитных и слабых взаимодействий элементарных частиц (СМ), основанной на калибровочной группе $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$, теоретические основы которой были разработаны во второй половине XX-го столетия. Была доказана перенормируемость и унитарность $SU(2)_L \times U(1)_Y$ янг-миллсовского лагранжиана, включающего хиггсовский механизм нарушения электро-слабой симметрии. Примерно в это же время открыто свойство асимптотической свободы КХД - квантовой хромодинамики, описывающей сильные взаимодействия элементарных частиц.

Вместе с тем, СМ, несмотря на свою внутреннюю самосогласованность (перенормируемость, отсутствие аномалий) и безусловный успех в описании существующих экспериментальных данных, оставляет открытыми достаточно много вопросов и имеет целый ряд принципиальных проблем теоретического характера. В частности, лагранжиан СМ для числа поколений лептонов, равном 3, содержит восемнадцать свободных параметров. До сих пор отсутствуют экспериментальные доказательства существования хиггсовского бозона. Упомянем также проблему калибровочной иерархии, связанную с сильно отличающимися энергетическими масштабами, планковским и электрослабым. В силу этих (и ряда других) причин естественно предположить, что СМ является скорее низкоэнергетическим пределом некоторого более фундаментального построения, нежели окончательной теоретической базой в описании микромира вплоть до планковского масштаба. Было предложено много различных способов расширения СМ: теории великого объединения, распространяющие идеи Максвелла на калибровочные взаимодействия; суперсимметрия – новый тип пространственно-временных симметрий; “see-saw” механизм, обеспечивающий динамическое объяснение малости масс нейтрино; техницвет, как динамическая основа электрослабого нарушения; суперструны – кандидат в теорию квантовой гравитации; идея дополнительных пространственных измерений, позволяющая объяснить огромную разницу между интенсивностями калибровочных и гравитационных взаимодействий.

Для решения проблем, связанных с иерархией энергетических масштабов, привлекается “новая” физика. Сравнительно недавно появились попытки объяснить иерархию при помощи дополнительных пространственных измерений. Необходимость дополнительных измерений мотивируется теорией суперструн и M-теориями. Сокращение конформных аномалий в

них возможно, если только полное число измерений равно $D = 10$ (для М-теорий, $D = 11$). Поскольку наш мир имеет $(1+3)$ измерения, оставшиеся шесть измерений должны быть “свернуты” (компактифицированы) и при этом иметь малые размеры, не противоречащие современным экспериментам, в том числе, гравитационным.

В современных моделях Калуцы – Клейна (КК) с дополнительными измерениями возникают массивные гравитонные состояния, которые могут рождаться в виде реальных и виртуальных частиц. Это касается, главным образом, двух специфических моделей, а именно, модели, предложенной Аркани-Хамедом, Димопулосом и Двали (ADD модель), а также Рэндалл и Сандрумом (RS модель).

Феноменология RS модели с искаженным дополнительным измерением значительно отличается от феноменологии ADD модели. Во-первых, спектр возбужденных КК гравитационных состояний дискретен и неоднороден в отличие от ADD модели, где он наоборот – непрерывен и равномерно распределен. Во-вторых, для каждого резонанса в RS модели интенсивность взаимодействия одинаковая, порядка $\sim T\text{ЭВ}^{-1}$, в то время как в ADD модели все КК гравитонные состояния коллективно имеют такую интенсивность. RS модель предсказывает появление гравитонных резонансов на масштабе нескольких ТэВ, которые могут рождаться во многих каналах, в том числе в дилептонном и дифотонном каналах. Как и в ADD модели природа промежуточных состояний гравитонных резонансов со спином 2 может быть определена по форме характерного углового распределения лептонных и фотонных пар на коллайдере LHC.

В диссертации разработаны эффективные методы поиска и идентификации косвенных (пропагаторных) и прямых (резонансных) эффектов, выходящих за рамки SM, на Большом адронном коллайдере в условиях эксперимента ATLAS. Представленные методы дают возможность не только решить задачу поиска эффектов “новой” физики в самом общем виде, но и идентифицировать конкретные модели. Полученные на их основе оценки порогов идентификации на динамические параметры моделей с дополнительными пространственными измерениями существенно превышают известные экспериментальные ограничения для этих параметров.

Связь работы с крупными научными программами и темами

Диссертационная работа связана с тематикой НИР, выполняемых в филиале Международного центра теоретической физики имени Абдуса Салама (МЦТФ), действующем на базе лаборатории физических исследований Гомельского государственного технического университета имени П.О.Сухого. Тема диссертации соответствует приоритетным направлениям фундаментальных исследований в Республике Беларусь. Диссертационная работа выполнена в период с 2006 по 2010 годы в рамках: международного научного проекта “Searching for and discriminating signals for extra dimensions from other new physics scenarios in di-lepton and di-photon production processes at the Large Hadron Collider and International Linear Collider”; отдельных заданий Госпрограммы фундаментальных исследований “Поля и частицы” (номера госрегистрации 20061669, 20061670); НИР финансируемых БРФФИ (номер госрегистрации 20072044, 20091369) и в рамках гранта Министерства образования Республики Беларусь (номер госрегистрации 20090452). С 2007 по 2009 год соискатель являлась участником совместных научных исследований в рамках международной программы ICTP/IAEA Sandwich Training Educational Programme (STEP) для аспирантов стран Центральной Европы, реализованной под руководством профессора Н. Павера в МЦТФ (г. Триест, Италия).

Цель и задачи исследования

Целью диссертации является разработка методов поиска и идентификации прямых и косвенных эффектов дополнительных пространственных измерений в теориях Калуцы – Клейна на Большом адронном коллайдере, оценка порогов обнаружения и идентификации гравитонов, а также исследование перспектив определения спина тяжелых гравитонных резонансов в их распадах в электрон-позитронную и фотонную пары в условиях экспериментов на Большом адронном коллайдере. Объектом исследования являются модели гравитационных взаимодействий Калуцы – Клейна с дополнительными пространственными измерениями. Предметом исследования являются процессы адронного рождения лептонных и фотонных пар, для которых модели Калуцы – Клейна с дополнительными пространственными измерениями предсказывают специфическую феноменологию в коллайдерных экспериментах, а также физические наблюдаемые величины к ним (полные сечения рассеяния, угловые распределения вылета лепто-

нов и фотонов, распределения по инвариантным массам лептонных и фотонных пар, распределение по поперечным импульсам, асимметрия центр-край). Выбор предмета исследования обусловлен возможностью выполнения прецизионных измерений процессов инклюзивного рождения лептонных и фотонных пар на действующих адронных коллайдерах TEVATRON и LHC и получения, в недалеком будущем, на их основе доказательств существования новых объектов и явлений, предсказываемых моделями с дополнительными пространственными измерениями. Или, альтернативно, в случае, если эти новые экспериментальные данные будут согласовываться с предсказаниями СМ, можно будет получить более строгие ограничения на динамические параметры моделей. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- рассчитать физические наблюдаемые величины (полное сечение, распределение по инвариантной массе лептонных пар, распределение по углу и поперечному импульсу вылета лептонов) для процесса инклюзивного рождения лептонных пар в адрон-адронных столкновениях в рамках модели Калуцы – Клейна с большими пространственными измерениями ADD;

- определить пороги обнаружения и идентификации для динамических параметров модели Калуцы – Клейна с большими дополнительными пространственными измерениями ADD в процессе рождения лептонных пар на Большом адронном коллайдере LHC в условиях эксперимента ATLAS;

- рассчитать дифференциальные и интегральные наблюдаемые величины для процессов адронного рождения тяжелых резонансов с разными спинами – тензорных гравитонов в модели Рэндалл – Сандрума с искаженным дополнительным пространственным измерением, новых нейтральных калибровочных (векторных) Z' – бозонов и скалярных резонансов в суперсимметричных теориях с нарушенной R -четностью, с их последующим распадом в электрон – позитронную и фотонную пары;

- на основе сравнительного анализа полных резонансных сечений и интегральных асимметрий центр-край для резонансов с разными спинами определить пороги обнаружения и идентификации для массы первого возбужденного состояния гравитонов в рамках модели с дополнительным искаженным измерением Рэндалл – Сандрума в процессах рождения лептонных и фотонных пар в условиях эксперимента ATLAS на LHC.

Положения, выносимые на защиту

На защиту выносятся следующие положения диссертации:

1. Метод идентификации эффектов больших дополнительных пространственных измерений, основанный, в отличие от известных методов, на использовании асимметрии центр-край и позволяющий однозначно выделять эффекты гравитонного обмена из всего многообразия вкладов “новой” физики в процессах инклюзивного рождения лептонных пар на адронных коллайдерах;

2. Расчет порогов обнаружения и идентификации для масштабных параметров модели Калуцы – Клейна с большими дополнительными пространственными измерениями в процессе рождения лептонных пар на Большом адронном коллайдере в условиях эксперимента ATLAS;

3. Метод идентификации спина тяжелых гравитонных резонансов в модели с искаженным пространственным измерением Рэндалл – Сандрума в процессах инклюзивного рождения лептонных и фотонных пар в адрон-адронных столкновениях;

4. Расчет порогов обнаружения и идентификации для массы и констант связи гравитонов в рамках модели с дополнительным пространственным измерением Рэндалл – Сандрума в процессах рождения электрон-позитронных и фотонных пар в условиях эксперимента ATLAS на LHC, выполненный с использованием полного резонансного сечения и асимметрии центр-край.

Личный вклад соискателя

Автор внес определяющий вклад в получение всех представленных в диссертации результатов. Научным руководителем А.А. Панковым сформулирована тема работы и поставлены задачи, решенные в совместных с ним публикациях [1–А, 2–А, 3–А, 6–А]. Работа [7–А] выполнена в соавторстве с научным руководителем А.А. Панковым и профессорами Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ) В.А. Бедняковым и Н.А. Русаковичем. Работа [5–А] выполнена автором в соавторстве с профессором А.А. Панковым, профессором ОИЯИ В.А. Бедняковым и кандидатом физ.-матем. наук А.В. Цитриновым. Работы [4–А, 8–А, 9–А] выполнены автором в соавторстве с научным руководителем А.А. Панковым и кандидатом физ.-матем. наук А.В. Цитриновым. Профессора В.А. Бедняков, Н.А. Русакович и кандидат физ.-матем. наук А.В. Цитриновым участвовали в постановке задач и обсуждении результатов. Все аналитические и численные вычисления выполнены автором самостоятельно, причем часть

из них с использованием созданных им генераторов, где применяются полученные формулы для наблюдаемых физических величин, а также специализированных пакетов программ (PYTHON, HERWIG, ROOT, ATLFAT и т.д.).

Апробация результатов диссертации

Включенные в диссертацию результаты были доложены на международных научных конференциях: “5-th International Conference Boyai – Gauss – Lobachevsky: Methods of Non-Euclidean Geometry in Modern Physics” (2006 г. – Минск, Беларусь); Международная научная конференция “Нелинейные явления в сложных системах” (2008, 2010 гг. – Минск, Беларусь); International School-Seminar “The actual problems of microworld physics” (2007, 2009 гг. – Гомель, Беларусь); Международная межвузовская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов УО “ГГ-ТУ им. П.О. Сухого” (2008 г. – Гомель, Беларусь); Конференция молодых ученых и специалистов “Современные проблемы физики” (2008 г. – Минск, Беларусь); “Workshop on Signaling the Arrival of the LHC Era” (2008 г. – Триест, Италия); Международная конференция молодых ученых “Молодежь в науке – 2009” (2009 г. – Минск, Беларусь); International School-seminar “New Physics and Quantum Chromodynamics at external Conditions” (2009 г. – Днепрпетровск, Украина); The 3-rd international conference “Current problems in nuclear physics and atomic energy” (2010 г. – Киев, Украина); 15th International School-Conference “Foundations Advances in Nonlinear Science” (2010 г. – Минск, Беларусь), а также на рабочих совещаниях российского отделения группы АТЛАС с 2006 по 2010 гг. в Объединенном институте ядерных исследований (ОИЯИ, Дубна, Россия).

Опубликованность результатов диссертации

Основные положения диссертации отражены в 9 научных публикациях, из которых 5 рецензируемых научных статей общим объемом 2,5 авторских листа соответствуют пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и ученых званий в Республике Беларусь; 4 работы в сборниках трудов международных научных конференций.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из перечня используемых обозначений, введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения и списка использованных источников. Полный объем работы составляет 97 страниц. В ра-

боте содержится 35 иллюстраций и 5 таблиц, занимающих 17 страниц. Библиографический список содержит 122 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении содержится краткий обзор литературы по различным моделям “новой” физики, выходящей за рамки СМ, описаны феноменологических следствий этих моделей и обсуждены возможности их проверки на современных коллайдерах. Обоснована актуальность задачи обнаружения прямых и косвенных эффектов дополнительных пространственных измерений в теориях Калуцы – Клейна на Большом адронном коллайдере и их выделения из всего возможного многообразия вкладов “новой” физики.

В первой главе диссертации приведен обзор моделей Калуцы – Клейна с дополнительными пространственными измерениями. В частности, дано описание основных особенностей модели с большими дополнительными измерениями ADD, модели RS с одним искаженным дополнительным измерением, а также модели TeV^{-1} . Приведены современные экспериментальные ограничения на параметры этих моделей. Перечислены основные феноменологические следствия и особенности моделей с дополнительными пространственными измерениями, а также указаны возможности их экспериментальной проверки на коллайдере LHC. Кроме того, дано краткое описание моделей за рамками СМ, предсказывающих существование новых векторных и скалярных тяжелых резонансов, Z' -бозонов и снейтрино, которые могли бы имитировать прямые эффекты гравитонов КК в экспериментах на коллайдере LHC. Очерчены перспективы разделения прямых эффектов, индуцируемых резонансным рождением новых промежуточных бозонов с разными спинами – гравитонов, Z' -бозонов и снейтрино.

Во второй главе описан метод идентификации косвенных (пропагаторных) эффектов гравитонных башен КК в рамках ADD модели с дополнительными пространственными измерениями в процессе инклюзивного рождения электрон-позитронных пар в адрон-адронных столкновениях. Кроме того, здесь выполнена компьютерная апробация потенциальных возможностей коллайдера LHC по обнаружению и идентификации исследуемых эффектов посредством Монте – Карло моделирования процесса Дрелла – Яна с рождением электрон-позитронных пар с учетом виртуального обмена гравитонными башнями КК, а также на основе моделирования процессов отбора и регистрации соответствующих событий на детекторе ATLAS [1–А, 6–А, 7–А].

В разделе 2.1 приведены выражения для дифференциальных и интегральных сечений процессов инклюзивного рождения электрон-позитронных пар на коллайдере LHC. В разделе 2.2 описана процедура

компьютерного моделирования процессов инклюзивного рождения лептонных и фотонных пар в условиях эксперимента ATLAS. В разделе 2.3 выполнен расчет порогов обнаружения гравитонных башен в ADD модели. Для оценки порога обнаружения гравитонных башен в ADD модели использовались спектры по инвариантной массе электрон-позитронной пары, которые имеют существенно различное поведение в SM и ADD модели. На рисунке 1 показано распределение по инвариантной массе M_{ee} в SM и ADD модели для разных значений параметров обрезания $M_H = 3$ ТэВ, 4 ТэВ и 5 ТэВ и фиксированного числа дополнительных пространственных измерений $d = 5$.

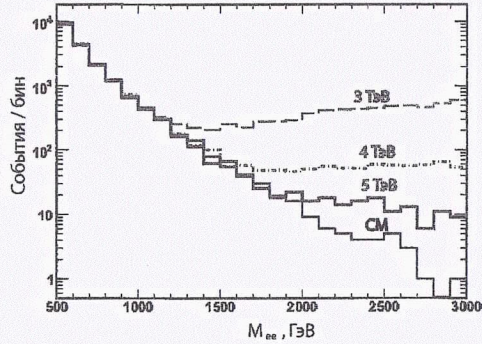


Рисунок 1 – Распределение числа событий лептонных пар по инвариантной массе M_{ee} на LHC в SM и модели ADD для $M_H = 3$ ТэВ, 4 ТэВ, 5 ТэВ, $d = 5$ и интегральной светимости 100 фбн^{-1}

Порог обнаружения гравитонных башен в модели ADD определялся с помощью стандартной процедуры с использованием функции χ^2 .

В разделе 2.4 приведено описание метода выделения и идентификации косвенных эффектов гравитонных башен в модели с большими пространственными измерениями ADD, основанного на использовании асимметрии центр-край в процессе дрелл-яновского рождения лептонных пар. На основе этого метода выполнен расчет порога идентификации гравитонных башен, определяемого как максимальное значение масштабного параметра обрезания M_H , ниже которого эффекты обмена гравитонных башен КК со спином 2 могут быть однозначно идентифицированы, т.е. статистически отделены от эффектов “новой” физики, имеющих другую физическую природу, с наперед заданным уровнем достоверности. В качестве последних эффектов мы подразумеваем “обычные” четырехфермионные контактные взаимодействия, описываемые операторами размерности 6 и представляющими собой универсальную параметризацию для широкого класса моделей

“новой” физики в кинематическом пределе, когда масса новых промежуточных состояний значительно превышает энергию сталкивающихся партонов.

Кратко поясним суть метода идентификации гравитонных башен в модели ADD, основанного на использовании асимметрии центр-край. Статистическое разделение эффектов, индуцируемых обменом гравитонными башнями и контактными взаимодействиями, может быть осуществлено путем сравнения угловых распределений вылета лептонов. Угловое распределение лептонов на адронном уровне в ADD модели можно представить как:

$$\frac{d\sigma^{\text{ADD}}}{dz} = \frac{3}{8}(1+z^2)\sigma_{q\bar{q}}^{\text{CM}} + \frac{5}{8}(1-3z^2+4z^4)\sigma_{q\bar{q}}^G + \frac{5}{8}(1-z^4)\sigma_{g\bar{g}}^G + \frac{1}{4}(1-3z^2)\sigma^{GZ}. \quad (1)$$

Полное сечение процесса для ADD модели имеет вид: $\sigma^{\text{ADD}} = \sigma_{q\bar{q}}^{\text{CM}} + \sigma_{q\bar{q}}^G + \sigma_{g\bar{g}}^G$. Дифференциальные сечения процесса кварк-антикварковой аннигиляции в SM и в случае CI выражаются через соответствующие полные сечения $\sigma_{q\bar{q}}^{\text{CM}}$ и $\sigma_{q\bar{q}}^{\text{CI}}$ следующим образом:

$$\frac{d\sigma_{q\bar{q}}^{\text{CM}}}{dz} = \frac{3}{8}(1+z^2) \cdot \sigma_{q\bar{q}}^{\text{CM}}, \quad \frac{d\sigma_{q\bar{q}}^{\text{CI}}}{dz} = \frac{3}{8}(1+z^2) \cdot \sigma_{q\bar{q}}^{\text{CI}}. \quad (2)$$

На рисунке 2,а для иллюстрации представлено угловое распределение e^+e^- пар в SM и ADD модели, содержащихся внутри массового бина: $500 \text{ ГэВ} \leq M_{ee} \leq 2200 \text{ ГэВ}$.

Асимметрия центр-край A_{CE} определяется как отношение сечений:

$$A_{\text{CE}} = \frac{\sigma_{\text{CE}}}{\sigma}, \quad (3)$$

где

$$\sigma_{\text{CE}} \equiv \left[\int_{-z^*}^{z^*} - \left(\int_{-z_{\text{cut}}}^{-z^*} + \int_{z^*}^{z_{\text{cut}}} \right) \right] \frac{d\sigma}{dz} dz, \quad \sigma \equiv \int_{-z_{\text{cut}}}^{z_{\text{cut}}} \frac{d\sigma}{dz} dz. \quad (4)$$

σ_{CE} – разность сечений в центральной и крайней областях, а σ – полное сечение при $z_{\text{cut}} = 1$. Здесь z_{cut} определяет кинематическое ограничение на угол вылета лептонов в c.m. лептонной пары, а z^* есть кинематический параметр, который делит область изменения $-z_{\text{cut}} \leq z \leq z_{\text{cut}}$ на центральную и крайнюю, причем $0 < z^* < z_{\text{cut}}$.

Из угловых распределений (2) получаем выражения для A_{CE} в SM и для CI:

$$A_{\text{CE}}^{\text{CM}} = A_{\text{CE}}^{\text{CI}} = \frac{1}{2}z^*(z^{*2} + 3) - 1. \quad (5)$$

Из выражений (1) и (4) для ADD модели получаем:

$$A_{\text{CE}}^{\text{ADD}} = \frac{\sigma_{\text{CE}}^{\text{ADD}}}{\sigma^{\text{ADD}}}, \quad (6)$$

где

$$\sigma_{CE}^{ADD} = \sigma_{q\bar{q}}^{CM} \left[\frac{1}{2} z^* (z^{*2} + 3) - 1 \right] + \sigma_{g\bar{g}}^G \left[\frac{1}{2} z^* (5 - z^{*4}) - 1 \right] + \sigma_{q\bar{q}}^G [2z^{*5} + \frac{5}{2} z^* (1 - z^{*2}) - 1] + \sigma^{GZ} [z^* (1 - z^{*2})]. \quad (7)$$

В отличие от случая СИ, в ADD модели в общем случае $A_{CE}^{ADD} \neq A_{CE}^{CM}$.

Четырехфермионные контактные взаимодействия, имеющие структуру типа вектор–вектор, определяют асимметрию центр–край, совпадающую с асимметрией в СМ, что демонстрирует формула (5). Однако если возможен обмен КК гравитонами, то угловые распределения лептонов существенно отличаются от распределений в СМ, а значит приводят к другой зависимости A_{CE} от z^* (см. формулы (6) и (7)). В случае отсутствия каких-либо угловых ограничений ($z_{cut} = 1$) существует единственное значение z_0^* углового параметра z^* , для которого A_{CE}^{CM} обращается в ноль $z_0^* = (\sqrt{2} + 1)^{1/3} - (\sqrt{2} - 1)^{1/3} \simeq 0,596$, что соответствует углу рассеяния $\theta_{cm} = 53,4^\circ$. Однако, A_{CE}^{ADD} , в отличие от предыдущего случая, уже не будет исчезать в точке $z^* = z_0^*$, и, более того, будет иметь нетривиальную зависимость z^* от M_{ee} . Таким образом, отклонение A_{CE}^{ADD} от A_{CE}^{CM} будет указывать на обмен промежуточными состояниями невекторного типа, а, например, тензорными бозонами, как это имеет место в модели ADD. На рисунке 2,б представлена зависимость асимметрии A_{CE} от кинематического параметра z^* в СМ и ADD модели.

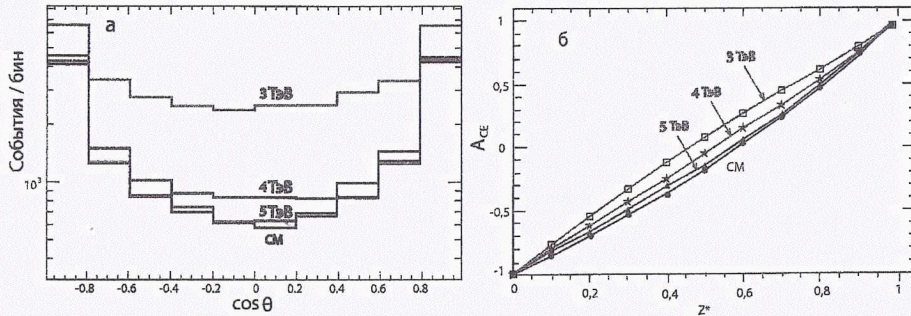


Рисунок 2 – а) угловое распределение электронных пар в СМ и ADD модели для $M_H = 3$ ТэВ, 4 ТэВ, 5 ТэВ, $d = 5$ и интегральной светимости 100 фбн^{-1} на ЛНС; б) зависимость асимметрии A_{CE} от кинематического параметра z^*

Области изменения порогов обнаружения и идентификации для масштабного параметра обрезания M_H как функции интегральной светимости коллайдера ЛНС, полученные из процесса $p + p \rightarrow e^+ e^- + X$ при варьировании числа пространственных измерений d от 3 до 6, приведены на рисунке 3

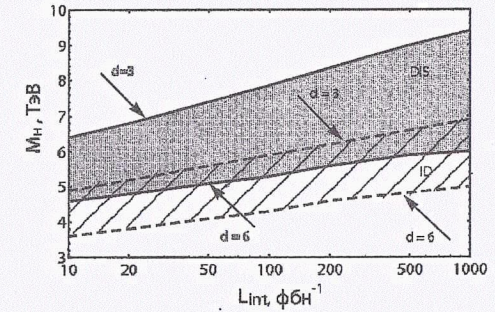


Рисунок 3 – Пороги обнаружения (DIS) и идентификации (ID) гравитонных башен КК в модели ADD на параметр M_H (уровень достоверности 95%) как функции интегральной светимости L_{int} для числа дополнительных пространственных измерений $d = 3$ и $d = 6$

[1–А, 6–А, 7–А]. Более детальная информация о порогах обнаружения M_H^{DIS} и идентификации M_H^{ID} содержится в таблице 1.

Таблица 1 – Пороги обнаружения (DIS) и идентификации (ID) для масштабного параметра обрезания M_H (уровень достоверности 95%)

d	$d = 3$	$d = 4$	$d = 5$	$d = 6$
M_H^{DIS} , ТэВ	7,8	6,4	5,5	4,7
M_H^{ID} , ТэВ	5,3	4,8	4,3	3,8

В третьей главе рассмотрены эффекты рождения новых тяжелых резонансов с разными спинами, существование которых предсказывается многими теоретическими моделями, выходящими за рамки СМ. К ним относятся, например, скалярные (S) резонансы в суперсимметричных теориях с нарушенной R – четностью, новые нейтральные векторные Z' – бозоны (V), гравитонные резонансы ($G^{(n)}$) в теориях Калуцы – Клейна и др. Все три резонанса, со спинами 0, 1 и 2, при равных массах и определенных модельных параметрах могут давать одинаковое число резонансных событий, т.е. быть статистически неотличимыми друг от друга при измерении полных резонансных сечений. Асимметрия центр–край обладает уникальной возможностью разделять эффекты, индуцируемые резонансами с разными спинами и относящиеся к различным классам моделей, и тем самым, идентифицировать модели в рамках одного класса. Именно использование этих универсальных свойств асимметрии центр–край положено в основу разработанного здесь метода идентификации спина тяжелых гравитонных резонансов в модели с искаженным пространственным измерением Рэндалл – Сандрума в процессах инклюзивного рождения лептонных пар в

адрон-адронных столкновениях.

В разделе 3.1 дано описание процесса адронного рождения гравитона и его последующего распада в e^+e^- -пару, который на партонном уровне описывается двумя подпроцессами – аннигиляцией кварков и слиянием глюонов, а также приведены дифференциальные сечения для рождения векторных (Z' – бозонов) и скалярных резонансов (снейтрино). В разделе 3.2 выполнен расчет порогов обнаружения гравитонных резонансов КК в эксперименте ATLAS на коллайдере LHC. Резонансное рождение гравитона может быть обнаружено в распределении инвариантных масс e^+e^- -пар как превышение сечения над дрелл – яновским фоном, имеющее вид пика или “плеча”. В разделе 3.3 описан метод определения спина гравитонных резонансов Рэндалл – Сандрума в процессе инклюзивного рождения e^+e^- – пар с использованием асимметрии центр-край, а в 3.4 – представлена его компьютерная апробация. В количественном анализе по идентификации спина гравитонов использовалась, как и в случае ADD модели, интегральная наблюдаемая – четная интегральная асимметрия центр-край, требующая для статистического анализа значительно меньшего числа событий по сравнению со статистикой, необходимой для анализа дифференциальных распределений. Последовательность этапов анализа по идентификации спина гравитона соответствует очередности приведенных рисунков 4 и 5. Угловые распределения e^+e^- -пар – продуктов распада скалярных, век-

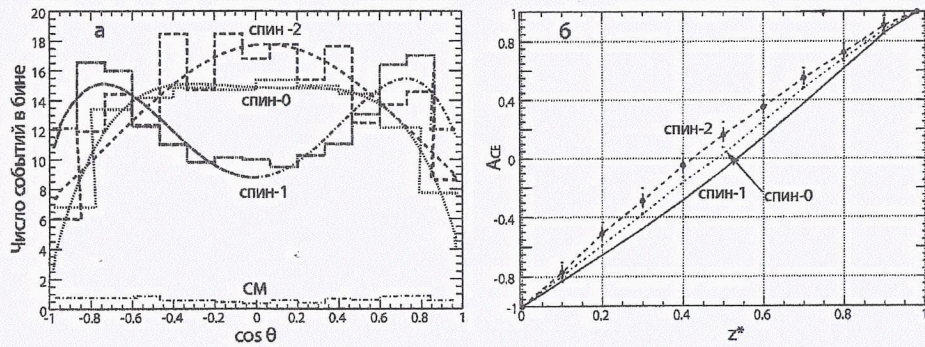


Рисунок 4 – а) угловое распределение e^+e^- пар для скалярных, векторных и тензорных ($\epsilon=0,01$) резонансов с массами $M_G = M_{Z'} = M_{\tilde{\nu}} = 1,5$ ТэВ; б) асимметрия центр-край как функция z^* для этих резонансов

торных и тензорных резонансов, полученные в результате моделирования эксперимента ATLAS на адронном уровне, представлены на рисунке 4,а; соответствующая асимметрия центр-край – на рисунке 4,б

На рисунке 5,а приведены области на плоскости параметров и масс ($M_G, k/\overline{M}_{PI}$), для которых гипотезы о существовании резонансов со спином 0 и 1 исключены на уровне достоверности 95%. Эти области лежат слева от линий, обозначенных надписями с исключением той или иной гипотезы. В частности, на рисунке 5,а показаны пороги обнаружения гравитонов, составляющие 2,1 ТэВ и 3,9 ТэВ при уровне достоверности 5σ , и пороги

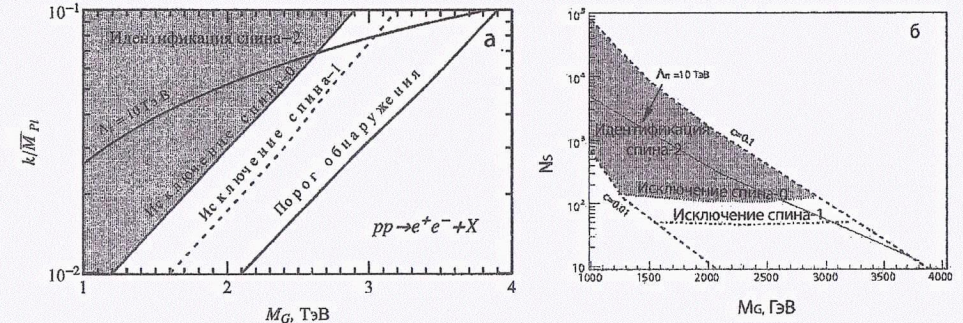


Рисунок 5 – а) пороги обнаружения и идентификации для гравитонного резонанса, полученные из процесса $p + p \rightarrow e^+e^- + X$ на LHC при $\mathcal{L}_{int} = 100$ фбн $^{-1}$; б) зависимость резонансных событий N_S от массы гравитона M_G

идентификации, равные 1,2 ТэВ и 2,9 ТэВ (уровень достоверности 95%), без учета теоретического ограничения на параметр Λ_π [2–А, 3–А, 5–А, 8–А]. Из рисунка 5,б следует, что для исключения гипотезы векторных резонансов на уровне достоверности 95% необходимо набрать статистику, превышающую ~ 50 событий, в то время как для исключения гипотезы скалярных резонансов с тем же уровнем достоверности или, альтернативно, для идентификации гравитона со спином 2, требуется более 150 событий.

В четвертой главе исследованы перспективы экспериментального обнаружения и идентификации спина тяжелых гравитонных резонансов в модели с дополнительными пространственными измерениями Рэндалл – Сандрума в двухфотонном канале на LHC. Уникальная особенность процесса рождения фотонных пар по сравнению с лептонным каналом Дрелла – Яна состоит в том, что промежуточными состояниями в этой реакции могут быть лишь бозоны двух типов, скалярные и тензорные, в то время как в дилептонном рождении не исключена возможность существования также векторного состояния. Уменьшение числа гипотетических промежуточных состояний в процессе двухфотонного рождения ведет к усилению чувствительности наблюдаемых величин к динамическим параметрам резонансов и, тем самым, к увеличению масштаба порога идентификации для возбужденных состояний гравитонных резонансов.

В разделе 4.1 приведены наблюдаемые физические величины и выполнен расчет порогов обнаружения гравитонных резонансов в процессе рождения пар фотонов. Дифференциальное сечение подпроцесса $q + \bar{q} \rightarrow \gamma + \gamma$, определяемое t - и u -канальными диаграммами в СМ и обменом гравитонными состояниями в s -канале, в приближении безмассовых фермионов можно представить в виде:

$$\frac{d\sigma(q\bar{q} \rightarrow \gamma\gamma)}{dz} = \frac{1}{192\pi\hat{s}} \left[64\alpha^2\pi^2 Q_q^4 \frac{1+z^2}{1-z^2} + \frac{\hat{s}^4}{16} |S(\hat{s})|^2 (1-z^4) + 4\pi\alpha Q_q^2 \hat{s}^2 \operatorname{Re}[S(\hat{s})] (1+z^2) \right], \quad (8)$$

а для подпроцесса $g + g \rightarrow \gamma + \gamma$ имеет вид:

$$\frac{d\sigma(gg \rightarrow \gamma\gamma)}{dz} = \frac{\hat{s}^3}{8192\pi} |S(\hat{s})|^2 (1+6z^2+z^4). \quad (9)$$

Здесь $\sqrt{\hat{s}} \equiv M_{\gamma\gamma}$ есть инвариантная масса фотонных пар, α – электромагнитная константа связи, $z \equiv \cos\theta_{\text{cm}}$, θ_{cm} – угол рассеяния в системе центра-масс фотонов, Q_q – электрический заряд кварка q . Вклад гравитонов в подпроцессы $q + \bar{q} \rightarrow \gamma + \gamma$ и $g + g \rightarrow \gamma + \gamma$ определяется величиной S :

$$S(\hat{s}) = \frac{1}{\Lambda^2} \sum_n \frac{1}{\hat{s} - M_n^2 + iM_n\Gamma_n}, \quad (10)$$

где $S(\hat{s})$ есть сумма пропагаторов возбужденных состояний гравитонов с массами M_n и полными ширинами распада Γ_n .

Расчет резонансных и фоновых событий в процессе $pp \rightarrow G \rightarrow \gamma\gamma + X$ был выполнен с учетом отклика детектора.

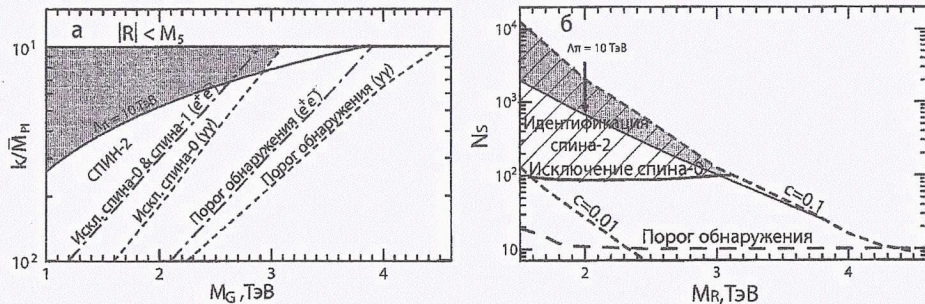


Рисунок 6 – а) пороги обнаружения и идентификации для гравитона на плоскости (M_G, c) , полученные из процессов рождения $\gamma\gamma$ и e^+e^- пар на ЛHC при $\mathcal{L}_{\text{int}} = 100 \text{ фбн}^{-1}$; б) зависимость числа резонансных дифотонных событий N_S от массы гравитона M_G ($R = G$)

На рисунке 6 (фрагмент а) представлены результаты количественного анализа процессов рождения фотонных пар по определению порога обнаружения (из полного числа событий) и порога идентификации (из асимметрии A_{CFE}) гравитонного резонанса со спином-2 [4–А, 9–А], которые, для сравнения, дополнены информацией, полученной в главе 3 из анализа e^+e^- пар.

Затонированная область на плоскости гравитонных масс и констант связи (рисунок 6,а) указывает на область параметров где гравитоны со спином-2 могут быть идентифицированы с уровнем достоверности 95%. Из рисунка 6,б видно, что для идентификации спина гравитонного резонанса в дифотонном канале требуется всего около сотни событий, в то время как в электрон-позитронной моде для этого необходимо 150 – 200 событий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

Основные научные результаты и выводы представленного диссертационного исследования заключаются в следующем:

- Разработан новый метод поиска и идентификации эффектов гравитонных состояний Калуцы – Клейна, предсказываемых теориями с большими дополнительными пространственными измерениями на Большом адронном коллайдере ЛHC, позволяющий однозначно выделять эффекты гравитонного обмена из всего многообразия вкладов “новой” физики в процессе адронного рождения лептонных пар [1–А];

- На основе разработанного метода впервые определены пороги обнаружения и идентификации на масштабный параметр обрезания M_H в зависимости от числа дополнительных пространственных измерений d в условиях эксперимента ATLAS, превышающие известные экспериментальные ограничения. Установлено, что порог обнаружения M_H^{DIS} меняется в интервале от 4,7 ТэВ до 7,8 ТэВ, а порог идентификации M_H^{ID} – от 3,8 ТэВ до 5,3 ТэВ при изменении d от 6 до 3 [1–А];

- Предложен новый метод идентификации спина тяжелых гравитонных резонансов в модели Рэндалл – Сандрума с дополнительным пространственным измерением в процессе рождения электрон-позитронных пар, основанный на комбинированном анализе двух интегральных наблюдаемых величин – полного резонансного сечения и асимметрии центр-край. Показано, что полное резонансное сечение способно лишь частично осуществить идентификацию гравитона со спином 2, так как существует область в параметрическом пространстве резонансов с разными спинами, где они дают

одно и тоже число резонансных событий и, тем самым, являются неразличимыми. Установлено, что в противоположность полному резонансному сечению, асимметрия центр-край позволит разделять эффекты от резонансов с разными спинами во всей разрешенной области пространства параметров [2-А, 3-А, 5-А];

• На основе предложенного метода впервые определены пороги обнаружения (уровень достоверности 5σ) и идентификации (уровень достоверности 95%) гравитонов в эксперименте ATLAS на LHC, составляющие 2,1 ТэВ и 1,2 ТэВ (3,9 ТэВ и 2,9 ТэВ) для константы связи гравитонов равной $k/\overline{M}_{Pl} = 0,01$ (0,1), которые существенно превышают современные экспериментальные ограничения [2-А, 3-А, 5-А];

• На основе разработанного метода исследованы перспективы экспериментального обнаружения гравитонных резонансов Рэндалл – Сандрума и идентификации их спина в распадах в фотонную пару в эксперименте ATLAS на LHC. Определены пороги обнаружения и идентификации гравитонов в дифотонном канале в эксперименте ATLAS на LHC, составляющие 2,25 ТэВ и 1,6 ТэВ (4,4 ТэВ и 3,1 ТэВ) для константы связи гравитонов равной $k/\overline{M}_{Pl} = 0,01$ (0,1). Показано, что исследование фотонной моды распада гравитонного резонанса позволит получить более точную информацию о его спине и константах связи благодаря более высокой чувствительности процесса дифотонного рождения в сравнении с процессом Дрелла-Яна [4-А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Разработанные в диссертации новые методы поиска и идентификации эффектов, выходящих за рамки Стандартной Модели, включены в физическую программу эксперимента ATLAS на Большом адронном коллайдере. Разработанные в диссертации методы поиска и идентификации эффектов дополнительных пространственных измерений на коллайдере LHC могут быть использованы на протон-антипротонном коллайдере TEVATRON, а также на электрон-позитронном коллайдере ILC.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи в научных изданиях, согласно перечню ВАК:

- 1-А. Serenkova, I.A. Identifying Large Extra Dimensions at the LHC with Center-Edge Asymmetry / I.A. Serenkova and A.A. Pankov // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. – 2007. – Vol. 10, № 4. – P. 401 – 406.
- 2-А. Serenkova, I.A. Searching for and Identifying Narrow Graviton Resonances with Center-Edge Asymmetry at the Large Hadron Collider / I.A. Serenkova and A.A. Pankov // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. – 2008. – Vol. 11, № 3. – P. 379 – 384.
- 3-А. Серенкова, И.А. Определение спина узких гравитонных резонансов Калуцы – Клейна в процессе рождения лептонных пар на Большом адронном коллайдере LHC в эксперименте АТЛАС / И.А. Серенкова, А.А. Панков // Известия вузов. Физика – 2010. – № 2. – С. 62 – 70.
- 4-А. Serenkova, I.A. Spin Determination of Randall – Sundrum Graviton Excitations Decaying Into Two Photons at the LHC with ATLAS / I.A. Serenkova, A.A. Pankov and A.V. Tsytrinov // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. – 2010. – Vol. 13, № 1. – P. 85 – 92.
- 5-А. Серенкова, И.А. Идентификация спина гравитонных резонансов в процессе $pp \rightarrow e^+e^- + X$ на Большом адронном коллайдере / И.А. Серенкова, А.А. Панков, А.В. Цитринов, В.А. Бедняков // Ядерная физика. – 2010. – Т. 73, №7. – С. 1307 – 1323.

Материалы конференций

- 6-А. Serenkova, I.A. Identifying large extra dimensions in dilepton production at LHC / I.A. Serenkova, A.A. Pankov // Non-Euclidean geometry in modern physics : Proceedings of the 5-th Int. Conference BGL-5, Minsk, October 10 – 13, 2006. / ed. Yu. Kurochkin and V. Red'kov; – Минск: ИФ НАН Беларуси, 2006. – Вып. 5. – С. 384 – 391.
- 7-А. Serenkova, I.A. Search for large Extra Dimensions at the LHC with Center-edge asymmetry / I.A. Serenkova, A.A. Pankov, V. Bednyakov, N. Rusakovich // The actual problems of microworld

physics: Proceedings of Int. School-Seminar HEP'07, Gomel, July 23 – August 3, 2007. / JINR; ed. A. Ilychev, N. Rusakovich, S. Shulga, N. Shumeyko. – Dubna, 2008. – Vol. 1, – P. 64 – 70.

- 8–A. Serenkova, I.A. Spin identification of the heavy resonances at the LHC/ I.A. Serenkova, A.A. Pankov, A.V. Tsytrinov // New Physics and Quantum Chromodynamics at external Conditions : Proceedings of the Int. School-Seminar NPQC'09, May 3 – 6, 2009, Dnipropetrovsk. / DNU. – Dnipropetrovsk, 2009. – P. 127 – 132.
- 9–A. Serenkova, I.A. Spin-Identification of Randall – Sundrum Resonances in Dilepton and Diphoton Production Processes at The Large Hadron Collider with Atlas Experiment / I.A. Serenkova, A.A. Pankov, A.V. Tsytrinov // Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy : Proceedings of the 3rd Int. Conference NPAE-Kiev, June 7 – 12, 2010, Kiev, Ukraine. / KINR. – Kiev, 2010. – P. 651 – 654.

Серенкова

РЕЗЮМЕ

Серенкова Инна Александровна

Идентификация прямых и косвенных эффектов дополнительных пространственных измерений на Большом адронном коллайдере

Ключевые слова: Стандартная Модель, модели с дополнительными пространственными измерениями, Большой адронный коллайдер, асимметрия центр-край, порог обнаружения, порог идентификации.

Объект исследования: модели гравитационных взаимодействий Калуцы – Клейна (КК) с дополнительными пространственными измерениями.

Предмет исследования: процессы адронного рождения лептонных и фотонных пар и физические наблюдаемые величины к ним – интегральные и дифференциальные сечения, асимметрия центр-край.

Цель работы: разработка методов поиска и идентификации прямых и косвенных эффектов дополнительных пространственных измерений в процессах инклюзивного рождения лептонных и фотонных пар на коллайдере LHC и их компьютерная апробация применительно к эксперименту ATLAS.

Разработан метод идентификации эффектов больших дополнительных пространственных измерений, основанный на использовании дифференциального распределения по инвариантным лептонным массам и асимметрии центр-край в процессе инклюзивного рождения лептонных пар, который позволяет однозначно выделять эффекты гравитонного обмена из всего многообразия вкладов “новой” физики на адронных коллайдерах. Выполнен расчет порогов обнаружения и идентификации для масштабных параметров модели КК с большими дополнительными пространственными измерениями в процессе рождения лептонных пар в условиях эксперимента ATLAS на LHC. Разработан метод идентификации спина тяжелых гравитонных резонансов в модели с искаженным дополнительным пространственным измерением Рэндалл – Сандрума в процессах инклюзивного рождения лептонных и фотонных пар в адрон-адронных столкновениях. Выполнен расчет порогов обнаружения и идентификации для массы и констант связи гравитонов в процессах рождения лептонных и фотонных пар в условиях эксперимента ATLAS на LHC.

Результаты, полученные в диссертации, были использованы при создании физической программы экспериментов по поиску новых частиц в эксперименте ATLAS на LHC.

Область применения: физика элементарных частиц и высоких энергий.

РЭЗЮМЭ

Серанкова Ина Аляксандраўна

Ідэнтыфікацыя прамых і ўскосных ефектаў дадатковых прасторавых вымярэнняў на Вялікім адронным калайдары

Ключавыя словы: Стандартная Мадэль, мадэлі з дадатковымі прасторавымі вымярэннямі, Вялікі адронны калайдар, асіметрыя цэнтр-край, парог выяўлення, парог ідэнтыфікацыі.

Аб'ект даследавання: мадэлі гравітацыйных узаемадзеянняў Калупы-Клейна (КК) з дадатковымі прасторавымі вымярэннямі.

Прадмет даследавання: працэсы адроннага нараджэння лептонных і фатонных пар і фізічныя назіральныя велічыні да іх – інтэгральныя дыферэнцыяльныя сячэнні, асіметрыя цэнтр-край.

Мэта работы: распрацоўка метадаў пошуку і ідэнтыфікацыі прамых і ўскосных ефектаў дадатковых прасторавых вымярэнняў у працэсах інклюзіўнага нараджэння лептонных і фатонных пар на калайдары LHC і іх камп'ютарная апрацацыя прымяняльна да эксперыменту ATLAS.

Выпрацаваны метады ідэнтыфікацыі ефектаў вялікіх дадатковых прасторавых вымярэнняў, які заснаваны на выкарыстанні дыферэнцыяльнага размеркавання па інварыянтных лептонных масах і асіметрыі цэнтр-край у працэсах інклюзіўнага нараджэння лептонных пар, які дазваляе адназначна выдзяляць эфекты гравітоннага абмену з усеіх разнастайнасці ўкладаў “новай” фізікі на адронных калайдары. Выкананы разлік парогаў выяўлення і ідэнтыфікацыі для маштабных параметраў мадэлі КК з вялікімі дадатковымі прасторавымі вымярэннямі ў працэсе нараджэння лептонных пар ва ўмовах эксперыменту ATLAS на LHC. Выпрацаваны метады ідэнтыфікацыі спіна цяжкіх гравітонных рэзанансаў у мадэлі са скажонным прасторавым вымярэннем Рэндал – Сандрума ў працэсах нараджэння лептонных і фатонных пар ў адрон-адронных сутыкненнях. Выкананы разлік парогаў выяўлення і ідэнтыфікацыі для масы і канстанты сувязі гравітонаў у працэсах нараджэння лептонных і фатонных пар ва ўмовах эксперыменту ATLAS на LHC.

Вынікі, якія атрыманы ў дысертацыі, выкарыстаны пры стварэнні фізічнай праграмы эксперыментаў па пошуку новых часцінак у эксперыменце ATLAS на LHC.

Галіна выкарыстання: фізіка часцінак і высокіх энэргій.

SUMMARY

Serenkova Inna Aleksandrovna

Identification of direct and indirect effects of extra spatial dimensions at the Large Hadron Collider

Key words: Standard Model, models with extra spatial dimensions, Large Hadron Collider, center-edge asymmetry, discovery reach, identification reach.

Research object: models of gravitational interactions Kaluza – Klein (KK) with additional spatial dimensions.

Research subject: processes of hadron production of lepton and photon pairs and also physical observables to them – integral and differential cross sections, center-edge asymmetry.

Research objective: development of the methods of search for and identification of direct and indirect effects of extra spatial dimensions in the processes of hadron inclusive production of lepton and photon pairs and their computer testing with regard to the experiment ATLAS.

The method of identification of the effects of large extra spatial dimensions is developed. This method is based on differential distributions by invariant lepton masses and center-edge asymmetry which allows to separate unambiguously of graviton exchange from all variety of contributions of new physics in the processes of inclusive production of lepton pairs on hadron colliders. Calculation of discovery and identification reach values are executed for scale parameters of model KK with large additional spatial dimensions in the processes of production of lepton pairs at the LHC in ATLAS experimental conditions. The method of identification of the spin heavy graviton resonances in model with the wrapped spatial dimensions of Randall – Sundrum in the processes of inclusive lepton and photon pairs production in hadron-hadron collisions is developed. Calculation of discovery and identification reach values are executed for mass and coupling constants of gravitons in the processes of lepton and photon pairs production in ATLAS experimental conditions at the LHC.

The data obtained has been used in the creation of the physical program of experiments on the search of new particles in the ATLAS experiment at the LHC.

Application area: particle and high energy physics.