

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ИНСТИТУТ ФИЗИКИ им. Б.И. СТЕПАНОВА
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ»**

УДК 52-43::524.882;531.51

ЦЕЛКОВ
Юрий Александрович

**АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ И КОСМОЛОГИЧЕСКИЕ
ПРОЯВЛЕНИЯ МНОГОМЕРНЫХ ПЕРВИЧНЫХ ЧЕРНЫХ
ДЫР В МОДЕЛЯХ МИРА НА БРАНЕ**

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

Минск, 2013

Работа выполнена в научно-исследовательском учреждении «Институт ядерных проблем» Белорусского государственного университета.

Научный руководитель:

Тихомиров Виктор Васильевич

доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией ядерной оптики и космофизики, НИУ «Институт ядерных проблем» Белорусского государственного университета

Официальные оппоненты:

Курочкин Юрий Андреевич

доктор физико-математических наук, доцент, заведующий лабораторией теоретической физики ГНУ «Институт физики им. Б.И. Степанова Национальной академии наук Беларуси»

Гаркун Александр Сергеевич

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теоретической физики, физический факультет Белорусского государственного университета

Оппонирующая организация:

Институт ядерных исследований Российской академии наук

Защита состоится **24 мая 2013 г.** в 15⁰⁰ на заседании совета по защите диссертаций Д 01.05.02 при ГНУ «Институт физики им. Б.И. Степанова Национальной академии наук Беларуси» по адресу: 220072, Республика Беларусь, г. Минск, пр. Независимости 68; тел. ученого секретаря 284-15-59.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГНУ «Институт физики им. Б.И. Степанова Национальной академии наук Беларуси».

Автореферат разослан «23» апреля 2013 г.

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

Выблый Ю.П.

ВВЕДЕНИЕ

Ранняя Вселенная представляет собой уникальную лабораторию, в которой могли реализоваться совершенно недостижимые в земных условиях конфигурации физических полей, определяющие собой характер протекания всех последующих процессов. Самые начальные стадии космологической эволюции требуют решения фундаментальной проблемы – построения теории квантовой гравитации, принципиальная особенность которой заключается в наделении пространственно-временного многообразия более сложной внутренней структурой. В лидирующем суперструнном подходе и связанных с ним феноменологических моделях пространство наделяется высшей размерностью и нетривиальной топологией. При этом, оказалось возможным описать четырехмерное пространство-время нашей Вселенной как брану – гиперповерхность в объемлющем многомерном пространстве.

Определение взаимосвязей между космологией и микромиром является предметом исследования бурно развивающегося направления – космомикрорифизики, перед которым, т.о., стоит проблема всестороннего исследования процессов ранней Вселенной, модифицированных возможным влиянием дополнительных пространственных измерений. К настоящему времени установлено, что такая модификация не сводится к незначительным поправкам, а приводит к радикальной перестройке различных процессов в ранней Вселенной.

Это с особой остротой поднимает вопрос о поиске проявлений тех процессов, которые могли происходить в ранней Вселенной и следствия которых находятся в экспериментально проверяемой области. Такие процессы могли отразиться на объектах достаточно стабильных, чтобы просуществовать вплоть до современной стадии космологической эволюции, и способных, т.о. донести до нас информацию о физике при энергии их формирования. Среди таких объектов первичные черные дыры (ПЧД) занимают особое место в силу своего разностороннего влияния, которое они оказывают на свое окружение.

На данный момент в концепциях мира на бране доказано существование новой высокоэнергетической стадии в радиационно-доминированную эпоху с нестандартной зависимостью параметра Хаббла от плотности энергии материи. Это привело к пониманию значительного изменения масштабов аккреции на ПЧД. При этом, модель аккреции ультрарелятивистской плазмы на многомерную черную дыру не была разработана, а выводы предшествующих работ, поэтому, носили качественный характер.

Задача построения модели гидродинамической сферически симметричной

стационарной аккреции на многомерную черную дыру впервые решается в данной диссертационной работе. Также приводятся новые астрофизические ограничения как на распространенность многомерных ПЧД, так и на радиус кривизны дополнительного пространственного измерения в космологических сценариях мира на бране.

Для ПЧД, как объектов, способных сохраниться до сих пор, закономерен вопрос о взаимодействии с другими небесными телами, и, в целом, о тенденции к кластеризации. В частности, как метод поиска ПЧД давно рассматривается поглощение ими различных астрофизических объектов. Актуален, поэтому, вопрос об исследовании взаимодействия ПЧД с непосредственно наблюдаемыми объектами при учете многомерной природы ПЧД. В данной диссертационной работе проводится исследование захвата многомерной ПЧД белым карликом, доказывається его большая эффективность по сравнению с четырехмерным случаем и получаются новые, более жесткие ограничения на вклад многомерных ПЧД в среднюю плотность материи Вселенной.

В современных моделях многомерной гравитации предсказывается возможность экспериментального получения микро черных дыр уже в ближайших ускорительных экспериментах. Изучение взаимодействия многомерных ПЧД с другими небесными телами, более плотными, чем наша планета, позволяет получить дополнительные аргументы, подрывающие основания критики коллайдерных экспериментов, допускающей катастрофическое поглощение Земли микро черной дырой и базирующейся, с одной стороны на современной научной парадигме, а с другой, на недостаточном исследовании астрофизических проявлений соответствующих процессов. В данной работе приводятся необходимые по этой проблеме аргументы в рамках исследования процесса поглощения многомерной ПЧД белых карликов в Галактике.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами, темами

Исследования, результаты которых вошли в диссертацию, проводились в Научно-исследовательском учреждении «Институт ядерных проблем» Белорусского Государственного Университета в рамках следующих НИР:

«Исследование формирования, эволюции, физических свойств сингулярных астрофизических объектов и описание особенностей спиновой динамики в гравитационных полях с целью моделирования темной энергии и темной

материи » (ГПНИ «Конвергенция», подпрограмма «Физика фундаментальных взаимодействий и плазма», задание 2.1.02.2, № гос. рег. 20111384, срок выполнения 2011-2015).

«Проблемы поиска первичных черных дыр и дополнительных пространственных измерений» (задание № 31 ГПФНИ «Поля и частицы», № гос. рег. 20062615, сроки выполнения 2006 – 2010, утвержденное постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 28.11.2005 №1339).

«Исследование влияния макроскопических квантовых эффектов на процессы в звездном и межзвездном веществе» в рамках ГПФНИ «Электрослабые, сильные и гравитационные взаимодействия в широком интервале энергий» («Физика взаимодействий», № гос. рег. 20015199, сроки выполнения 2001-2005).

«Теоретические и экспериментальные исследования новых коллективных явлений при взаимодействиях элементарных частиц в земных условиях и звездном веществе» в рамках «Микромир и вещество» («Ядерная оптика», № гос. рег. 20015202, сроки выполнения 2001-2005).

Тема диссертации соответствует пункту 12.2 «физика фундаментальных взаимодействий, высоких энергий и экстремальных состояний вещества, плазма и ее применение, плазменно-пучковые технологии» перечня приоритетных направлений фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2011 – 2015 годы, утвержденного постановлением Совета Министров Республики Беларусь 19.04.2010 №585.

Цель и задачи исследования

Цель диссертационной работы. Целью диссертационной работы является:

Ограничение распространенности первичных черных дыр в космологических сценариях мира на бране, следующее из теории аккреции, модифицированной влиянием дополнительных пространственных измерений.

Для реализации поставленной цели решаются следующие основные *задачи*:

1) Построение модели сферически симметричной стационарной гидродинамической аккреции ультрарелятивистской плазмы на многомерную черную дыру.

2) Расчет масс ПЧД на момент перехода космологической эволюции из многомерного режима в четырехмерный фридмановский режим.

3) Расчет параметров хокинговского излучения ПЧД в космологии мира на бране.

4) Исследование процесса захвата многомерной первичной черной дыры

и поглощения ею плотных небесных тел.

5) Расчет времени поглощения многомерной ПЧД белого карлика.

Объектом исследования является многомерная первичная черная дыра.

Предметом исследования являются процессы взаимодействия многомерной первичной черной дыры с ультрарелятивистской плазмой ранней Вселенной, а также с веществом плотных небесных тел. Выбор данных объекта и предмета исследования обусловлен связью между процессами, происходящими в ранней Вселенной в условиях влияния дополнительных пространственных измерений на астрофизически значимые наблюдательные следствия.

Положения, выносимые на защиту

1. Построение модели релятивистской сферически симметричной стационарной гидродинамической аккреции ультрарелятивистской плазмы на черную дыру в космологических сценариях мира на бране с дополнительными пространственными измерениями, позволившее предсказать значительный, по сравнению с режимом бесстолкновительной аккреции, рост массы первичных черных дыр на ранних стадиях космологического расширения и выяснить его зависимость от параметров многомерной гравитации.
2. Нахождение из уравнений движения численного значения безразмерного параметра ($F = 8/3\sqrt{3}$), определяющего темп аккреции релятивистской плазмы на многомерную черную дыру, что позволило существенно уточнить расчеты характеристик процесса аккреции в присутствии дополнительных пространственных измерений и без пренебрежения взаимодействием частиц.
3. Снижение более чем на 10 порядков вероятности существования первичных черных дыр в космологических сценариях мира на бране по сравнению с предсказаниями стандартной четырехмерной космологии, на основе анализа данных по диффузному гамма-спектру, полной плотности материи, антипротонному избытку, распространенности гелия, фоторасщеплению дейтерия, возмущению реликтового фона, ионизации водорода, что открывает возможность установления новых ограничений на спектр первичных возмущений.
4. Оценка вклада первичных черных дыр в полную плотность темной материи на основании рассчитанной эффективности захвата и поглощения многомерной первичной черной дырой белого карлика и с учетом наблюдаемой стабильности существования и распространенности белых карликов в Галактике.

Личный вклад соискателя

Исследования по тематике диссертации проводились совместно с научным руководителем, заведующим лабораторией ядерной оптики и космомикробиологии НИИ ЯП БГУ, д.ф.-м.н. В.В. Тихомировым. Приведенные в диссертации научные результаты, вынесенные на защиту, получены соискателем и проанализированы вместе с научным руководителем.

Результаты, полученные остальными соавторами опубликованных работ, не включены в диссертацию.

Апробация результатов диссертации

Результаты исследований, включенные в диссертацию, докладывались на следующих конференциях:

- Международная конференция «XII Annual Seminar Nonlinear Phenomena in Complex Systems». Минск, Беларусь. 17-20 мая 2005.
- 5-я международная конференция «Boyai-Gauss-Lobachevsky: Methods of Non-Euclidean Geometry in Modern Physics». Минск, Беларусь. 10-13 октября 2006.
- Международная конференция «International Conference on Gravitation, Cosmology, Astrophysics and nonstationary Hydrodynamics dedicated to 90th anniversary of K.P. Staniukovich». Москва, Россия. 2-4 марта 2006.
- 4-я международная конференция «Fourth Aegean Summer School on Black Holes». Митилини, Греция. 17-22 сентября 2007.
- 14-я международная конференция «Foundations & Advances in Nonlinear Science». Минск, Беларусь. 22-25 сентября 2008.
- II Конгресс физиков Беларуси. Минск, Беларусь. 3-5 ноября 2008.
- Международная конференция «The sun, the stars, the universe and general relativity. International conference in honor of Ya. B. Zeldovich 95th Anniversary». Минск, Беларусь. 20-23 апреля 2009.
- Международная конференция «Nonlinear Phenomena in Complex Systems», Минск, Беларусь. 18-21 мая 2010.
- III Конгресс физиков Беларуси. Минск, Беларусь. 25-27 сентября 2011.
- Международная конференция «XIX Annual Seminar Nonlinear Phenomena in Complex Systems». Минск, Беларусь. 17-20 апреля 2012.

Опубликованность результатов диссертации

По теме диссертационной работы опубликовано 14 работ, в числе которых 5 статей в научных журналах [1, 2, 3, 4, 5], 6 статей в сборниках трудов конференций [14, 6, 7, 8, 9, 11], одна в сборнике научных трудов [10] и две статьи в сборниках тезисов конференций [12, 13]. Объем публикаций в научных журналах составляет 2.4 авторских листа. Объем других публикаций составляет 2.6 авторских листов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, 4 глав, заключения, списка использованных источников и 6 приложений. В главе 1 приводится аналитический обзор литературы по тематике диссертации и детальное обоснование выбора направления исследований. В главе 2 исследован режим стационарной сферически-симметричной гидродинамической аккреции ультрарелятивистской плазмы на ПЧД в космологии мира на бране RSII. В главе 3 получены ограничения на распространенности пятимерных ПЧД на основании характеристик различных процессов, начиная от эпохи первичного нуклеосинтеза и заканчивая астрофизическими данными соответствующими нынешней эпохе. В главе 4 исследованы процессы взаимодействия многомерных ПЧД в моделях гравитации с плоскими дополнительными измерениями с веществом плотных небесных тел – белых карликов.

Полный объем диссертации составляет 160 страниц; работа содержит 28 рисунков на 28 страницах и 1 таблицу, на 1 странице. Список использованных источников на 17 страницах включает 256 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Глава 1 содержит обзор литературы по теме диссертации, состоит из трех разделов и рассматривает основные результаты исследований по многомерным моделям гравитации и их следствиям в космологии и в физике черных дыр (ЧД). В первом разделе излагается мотивация введения дополнительных пространственных измерений на базе современных теоретических представлений. Показано, что результаты последних исследований в теории суперструн допускают существование решений, которые предусматривают неоднородную компактификацию дополнительных пространственных измерений как по топологии, так и по масштабу компактификации. На этом основании

прослеживается построение феноменологических моделей с дополнительными пространственными измерениями, отражающими в той или иной степени свойства фундаментальных объектов теории суперструн – D -бран, ставшими основой для развития современных моделей мира на бране. Демонстрируется, что такие модели обладают богатой феноменологией и позволяют наметить решение классических проблем, таких как проблема иерархии, размерность пространства-времени и эффективная четырехмерность нашего мира.

Отдельно подчеркиваются результаты приложения многомерных концепций мира на бране к космологии и физике черных дыр. Так, показано, что космология мира на бране приводит к существованию нового класса решений, с нестандартным поведением масштабного фактора при высоких энергиях в радиационную эпоху, а модификация свойств черных дыр продемонстрирована на примере обобщенного $D > 4$ -мерного решения Шварцшильда-Тангерлини.

В разделе 1.2 обсуждается вопрос о модификации полевых уравнений под влиянием дополнительных измерений, а также их решения для индуцированной на 4-бране гравитации. Показана связь вакуумных пятимерных полевых уравнений с соответствующими четырехмерными, установлено усиление роли пятимерной гравитации по мере приближения к горизонту D -мерной ЧД при $r_g < r \lesssim l$, где l - радиус кривизны AdS_5 -пространства, что в контексте ПЧД обосновывает применение 4-мерных проективных решений, модифицированных влиянием дополнительных измерений. Там же отмечается важное для развиваемой в работе теории аккреции свойство ковариантных уравнений движения – сохранение своей 4-мерной тензорной структуры.

Раздел 1.3 посвящен астрофизике ПЧД. На примере ряда предыдущих работ отмечается, что влияние дополнительных измерений на условия в ранней Вселенной должно приводить к существенному изменению масштабов аккреции на черные дыры, что неизбежно влечет к модификации влияния ПЧД на различные процессы в ранней Вселенной. При этом, без построения корректной модели аккреции степень воздействия ПЧД оставалась неопределенной. Так, приводятся результаты предшествующих исследований влияния, оказываемого ПЧД на различных стадиях космологической эволюции на свое окружение, начиная от эпохи первичного нуклеосинтеза и кончая генерацией космических лучей в нашу эпоху, а также следующие из них ограничения на первичные распространенности ПЧД вместе с имеющимися неопределенностями из-за отсутствия точного масштаба аккреционной эффективности.

В данной главе также приводятся аргументы в пользу генерации микро черных дыр в коллайдерных экспериментах и процессах в космических лучах, что приводит к проблеме стабильности небесных тел по отношению к поглощению их многомерными черными дырами. Указывается, что в условиях

усиления гравитационного поля у многомерных ПЧД, они могут более эффективно захватываться плотными небесными телами, сильнее тормозиться в них, а также способны к их полному поглощению, что открывает возможности поиска ПЧД по поглощению ими различных небесных тел.

На основании анализа проблем и достижений, проводимого в данной главе, формулируется цель работы и основные задачи исследования.

В **Главе 2** исследуется режим стационарной сферически-симметричной гидродинамической аккреции ультрарелятивистской плазмы (УРП) на ПЧД в 5-мерной космологии мира на бране RSII.

В разделе 2.1 исходя из ковариантных законов сохранения тензора энергии-импульса и плотности потока энтропии выводятся уравнения адиабатической гидродинамической аккреции («аккреции Бонди») УРП на D -мерную черную дыру, обобщающие известные общерелятивистские 4-мерные уравнения:

$$v'v = -\frac{D-3}{2r} \left(\frac{r_g}{r}\right)^{D-3} - \frac{p'}{p+\rho} \left(1 - \left(\frac{r_g}{r}\right)^{D-3} + v^2\right), \quad (1)$$

$$\frac{2}{r} + \frac{v'}{v} + \frac{\sigma'}{\sigma} = 0, \quad (2)$$

где p , ρ , σ - давление, плотность энергии и плотность энтропии соответственно, v - скорость аккреционного потока, $x' \equiv \partial x / \partial r$. Приложение полученных уравнений к аккреции УРП в 5-мерной модели RSII дается в разделе 2.2, где получены первые интегралы уравнений движения, исследованы их свойства и показано, что в данном случае допустимы режимы дозвуковой и трансзвуковой аккреции, аналогичные им истечения и сверхзвуковая эжекция. Показано, что граничные условия для ЧД оставляют без изменений известный 4-мерный результат: существование единственного возможного трансзвукового режима аккреции, связанного с наличием особой точки в уравнениях аккреции. Эта особая (звуковая) точка найдена [14]:

$$r_s = \sqrt[D-3]{\frac{D-1}{2} r_g}, \quad v_s \equiv v(r_s) = \sqrt{\frac{D-3}{2(D-1)}}, \quad T_s \equiv T(r_s) = \sqrt{\frac{2(D-1)}{3(D-3)}} T(\infty), \quad (3)$$

где $T(r)$ - температура, ее свойства исследованы, на основании чего показано, что впервые может быть определен введенный ранее в уравнение аккреционного роста массы ПЧД

$$\frac{dM}{dt} = F 4\pi r_g^2 \rho(t) \quad (4)$$

коэффициент аккреционной эффективности F . При этом подчеркивается, что, как следует из (4), рост массы ПЧД, в отличие от 4-мерного случая,

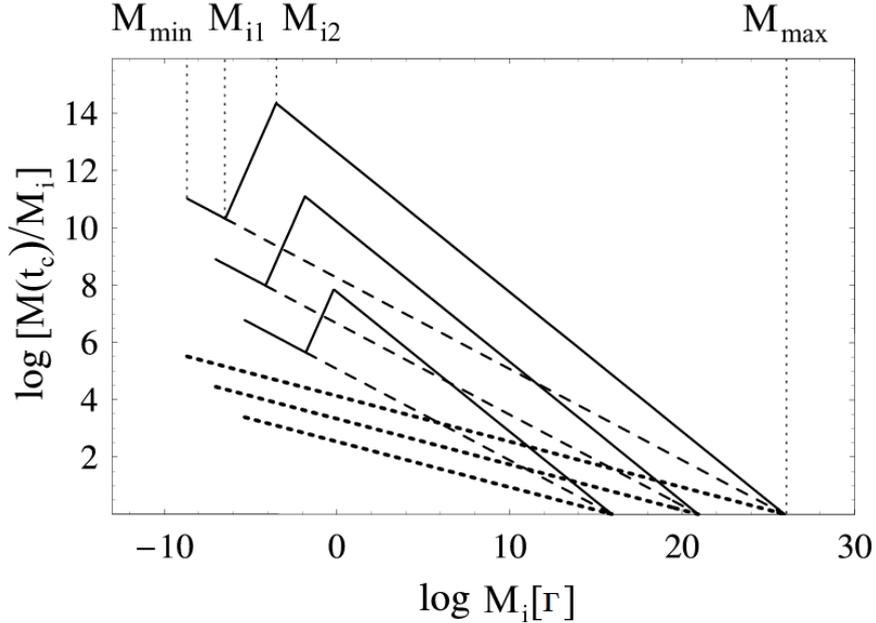
м.б. значительным и экспоненциально зависящим от F :

$$M(t) = M_i \left(\frac{t}{t_i} \right)^{\frac{2F}{\pi}}, \quad (5)$$

где M_i – начальная масса ПЧД, сформированной в момент t_i .

Отмечается, что в противоположность качественным соображениям предыдущих работ о том, что взаимодействие частиц излучения космологической плазмы может приводить к значению F даже меньшему чем $F = 1$ (соответствующему аккреции невзаимодействующего излучения), в данной работе показано, что учет взаимодействия частиц приводит, наоборот, к значению F превышающему единицу [1, 2]:

$$F = \frac{8}{3\sqrt{3}} \simeq 1.54. \quad (6)$$



Сплошная линия соответствует коэффициенту роста масс ПЧД с учетом стадии гидродинамической аккреции, длинная и короткая пунктирные линии получены из (5) при фиксированном значении $F = 1$ и $F = 0.5$ соответственно

Рисунок 1 – Рост массы ПЧД в зависимости от начальной массы для случаев $l/l_4 = 10^{21}, 10^{26}$ и 10^{31} (снизу вверх)

В разделе 2.3. на этих основаниях вычисляется полный рост массы многомерных ПЧД к моменту t_c окончания стадии влияния дополнительного пространственного измерения и переходу на фридмоновский космологический режим. Результирующий рост масс представлен на рисунке 1, где $l_4 \approx 1.6 \times 10^{-35}$ м.

В **Главе 3** получены ограничения на распространенность пятимерных ПЧД на основании изучения различных процессов, происходивших как в ранней Вселенной, так и по астрофизическим данным, соответствующим нынешней эпохе.

Ограничения накладываются на параметр начальной распространенности, соответствующий моменту формирования ПЧД:

$$\alpha_i = \alpha_i(M_i) = \frac{\rho_{PBH, M_i}(t_i)}{\rho_{rad}(t_i)}, \quad (7)$$

где $\rho_{PBH, M_i}(t_i)$ — массовая плотность ПЧД с массой формирования M_i , а $\rho_{rad}(t_i)$ — плотность энергии излучения в момент t_i формирования таких ПЧД.

Общий принцип получения ограничений состоит в реконструкции значения (7) вследствие учета зависимости поведения масштабного фактора и плотности материи на различных космологических стадиях. Так, для момента испарения ПЧД t_{ev} , имеем:

$$\alpha(t_{ev}) \simeq \alpha_i(M_i) \frac{M(t_c) a(t_{ev})}{M_i a(t_i)}, \quad (8)$$

где отношение масштабного фактора есть

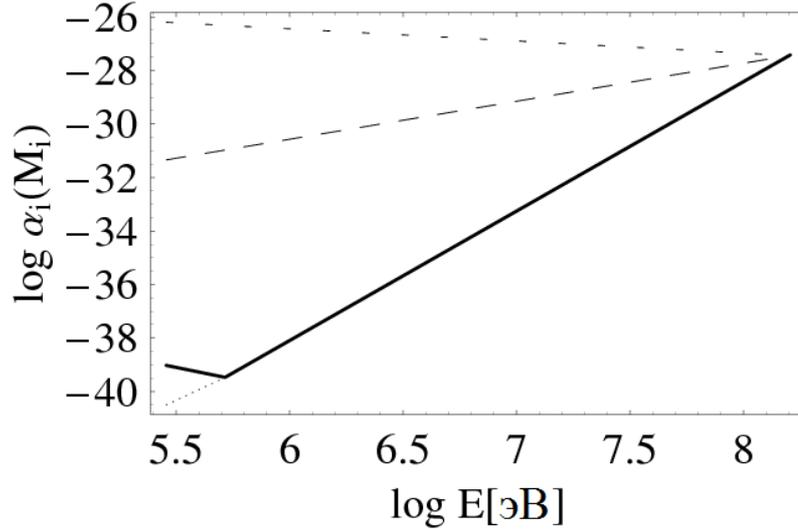
$$\frac{a(t_{ev})}{a(t_i)} = \left(\frac{t_c}{t_i}\right)^{1/4} \left(\frac{t_{eq}}{t_c}\right)^{1/2} \left(\frac{t_{ev}}{t_{eq}}\right)^{2/3}, \quad (9)$$

если $t_{ev} > t_{eq}$ и

$$\frac{a(t_{ev})}{a(t_i)} = \left(\frac{t_c}{t_i}\right)^{1/4} \left(\frac{t_{ev}}{t_c}\right)^{1/2}, \quad (10)$$

если $t_{ev} < t_{eq}$, момент времени $t_{eq} \approx 72.6$ тыс. лет соответствует равновесию материи и излучения. В итоге, на основании наблюдательной информации о значении $\alpha(t_{ev})$, можно получить значение (7) в зависимости от радиуса кривизны дополнительного измерения l . В разделе 3.1 рассматриваются ограничения, соответствующие эпохам с малым красным смещением. Получаются ограничения исходя из вклада ПЧД в современную плотность скрытой массы, на основании данных по антипротонному избытку и на основании диффузного гамма-фона. В последнем случае рассчитывался спектр мощности излучения Хокинга для ПЧД, испаряющихся в нашу эпоху и имеющих массу M^* [2, 3]:

$$I(E) = \frac{c}{4\pi} \frac{M^*}{E} n(t_0, M_i(M^*)), \quad (11)$$



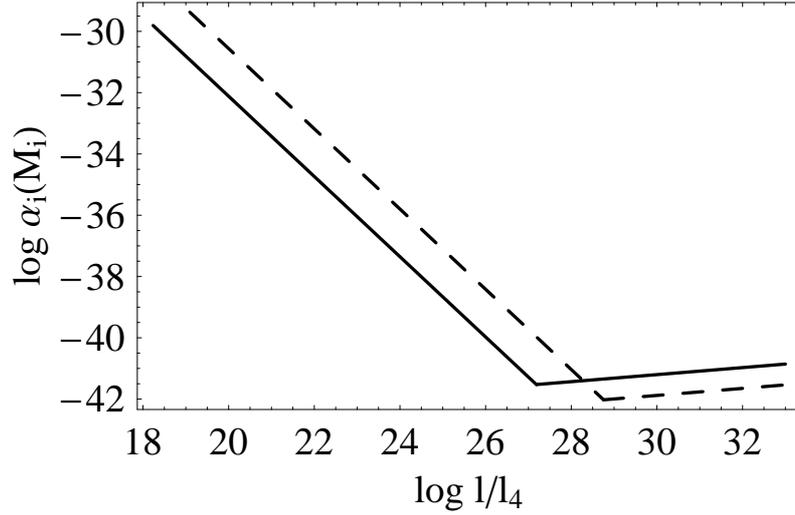
Точечная, длинная и короткая пунктирные линии получены из коэффициента роста массы ПЧД (5) при $F = 1.54, 1$ и 0.5 , соответственно

Рисунок 2 – Ограничения на начальную распространенность масс ПЧД в зависимости от энергии диффузного гамма-фона

где E – энергия излученных ПЧД гамма-квантов, $n(t_0, M_i(M^*))$ – плотность числа ПЧД с массой порядка M^* в нашу эпоху t_0 , связанная с начальной массой ПЧД M_i уравнением аккреционного роста массы (5). Сравнивая (11) с наблюдательными данными по диффузному гамма-фону, можно получить новые ограничения, представленные на рисунке 2 сплошной линией [2, 3]

В разделе 3.2 рассматриваются ограничения на начальные распространенности ПЧД, исходя из данных по процессам при больших красных смещениях. Приводятся ограничения, полученные на основании данных по распространности гелия, фоторасщеплению дейтерия, возмущению реликтового фона и ионизации водорода. В последнем случае возможность обнаружения проявления ПЧД связана с влиянием их хокинговского излучения на остаточную ионизацию водорода после эпохи рекомбинации при $t_{dec} \simeq 380$ тыс. лет ($z \simeq 1100$). Степень остаточной ионизации водорода влияет как на распространение излучения так и на процесс формирования звезд третьего поколения при красном смещении $z \simeq 20$. На рисунке 3 приведены итоговые ограничения на основании ионизации водорода [3, 4, 14].

Все ограничения, полученные в данной главе, отличаются гораздо большей жесткостью (вплоть до 10 порядков), по сравнению с эволюцией ПЧД в стандартной четырехмерной космологии. Исходя из полученных ограничений можно установить верхний предел на радиус кривизны дополнительного измерения в модели RSII на уровне $l/l_4 \leq 10^{29}$.



Сплошная линия - $z_{ev} = 1100$, пунктирная - $z_{ev} = 20$

Рисунок 3 – Ограничения на начальную распространенность масс ПЧД на основании данных об ионизации водорода

В **Главе 4** исследованы процессы взаимодействия многомерных ПЧД в ADD-модели мира на бране с плоскими компактными дополнительными измерениями с веществом плотных небесных тел – белых карликов (БК). Рассматривается шестимерная гравитация, как первая экспериментально разрешенная в данной модели. В разделе 4.1 рассчитывается время поглощения БК шестимерной ПЧД. Для этого в общем виде интегрируются уравнения движения в случае политропного уравнения состояния с показателем Γ , что приводит к D -мерному обобщению релятивистского уравнения Бернулли [9]:

$$\left(1 - \frac{a_s(r_s)^2}{\Gamma - 1}\right)^2 \left(1 - \frac{D-7}{D-3} a_s(r_s)^2\right) = \left(1 - \frac{a_s(\infty)^2}{\Gamma - 1}\right)^2, \quad (12)$$

где $a_s(r)$ - скорость звука. С учетом (12) можно выразить темп аккреции dM/dt через параметры невозмущенной среды и после интегрирования получить время роста массы ПЧД как в режиме 6-мерной аккреции, так и после, когда ПЧД ведет себя эффективно как 4-мерный объект. В итоге получено, что 6-мерные ПЧД поглощают БК за время на $\gtrsim 5$ порядков меньшее, чем 4-мерные аналоги [8, 9].

На этом основании в разделе 4.2. доказывается большая эффективность метода поиска ПЧД по поглощению плотных небесных тел в многомерных моделях гравитации. Там же вычисляется область допустимых значений многомерной массы Планка M_D , при которой ПЧД успевают набрать достаточную для полного поглощения белого карлика массу в режиме многомерной аккреции.

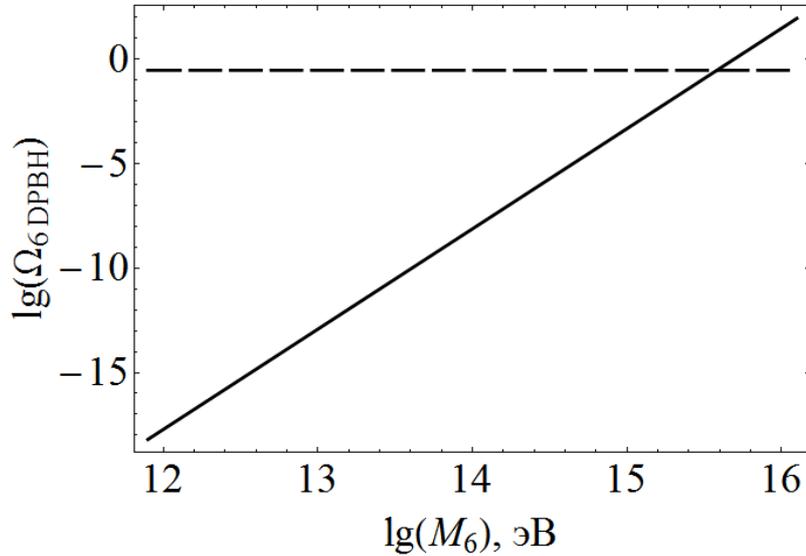
В разделе 4.3 исследуется процесс захвата белым карликом шестимерной ПЧД. На основании данных о галактической динамике и звездной статистике находится средняя скорость захвата белым карликом ПЧД [5, 11]:

$$\langle \Gamma \rangle = 3\sqrt{2\pi}G_4M_{WD}R_{WD} \frac{1}{\sqrt{\sigma_{BH}^2 + \sigma_{WD}^2}} \frac{|\Delta E|}{E_{av}}, \quad (13)$$

где G_4 -четырёхмерная гравитационная постоянная, M_{WD} , R_{WD} -масса и радиус типичного белого карлика, σ_{BH} , σ_{WD} -дисперсия скоростей ПЧД и белых карликов соответственно, $|\Delta E|$ -энергия, теряемая ПЧД при однократном прохождении через белый карлик, $E_{av} = 3\frac{M(\sigma_{BH}^2 + \sigma_{WD}^2)}{2}$ - средняя относительная кинетическая энергия ПЧД массы M на больших расстояниях.

В разделе 4.4 исследуется процесс торможения шестимерной ПЧД в веществе белого карлика, связанный как с аккреционным ростом массы ПЧД, так и с процессом прямой передачи энергии. Показывается, что оба механизма торможения дают сопоставимый вклад в торможение ПЧД на длине пути, пройденном внутри типичного белого карлика [11].

На основании полученных результатов в разделе 4.5 находится вероятность захвата ПЧД всеми белыми карликами Галактики [5, 11]:



Пунктир соответствует вкладу скрытой массы $\Omega_{DM} = 0.3$

Рисунок 4 – Ограничение на долю вклада шестимерных ПЧД в среднюю плотность вещества в зависимости от фундаментального масштаба гравитации

$$\begin{aligned}
P_{capt} &= 2\pi \langle \Gamma \rangle \int_{-\infty}^{\infty} dz \int_0^{\infty} dR R n_{BH}(R, z) n_{WD}(R, z) \\
&\simeq 4 \times 10^{16} \Omega_{PBH} \left(\frac{10^3 \text{кг}}{M} \right) \frac{|\Delta E|}{E_{av}} \text{год}^{-1},
\end{aligned} \tag{14}$$

а также ограничения на распространенность многомерных ПЧД по данным о популяции белых карликов в Галактике в зависимости от фундаментального масштаба многомерной гравитации [11], изображенные на рисунке 4

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

В настоящей работе исследовались процессы взаимодействия многомерных черных дыр с окружающей материей как с космологической, так и с астрофизической точек зрения на предмет получения наблюдательной информации о свойствах многомерного пространства-времени и его роли в ранней Вселенной. Основные научные результаты диссертации состоят в следующем:

1. Построена модель сферически-симметричной стационарной гидродинамической аккреции ультрарелятивистской плазмы на первичную черную дыру в космологических сценариях мира на бране. Получено численные значения безразмерного параметра - коэффициента аккреционной эффективности в пространствах произвольной размерности для невращающейся и незаряженной ПЧД. Вычислен аккреционный рост масс пятимерных ПЧД к моменту выхода Вселенной на фридмановский четырехмерный режим расширения и показано, что более 80% спектра начальных масс пятимерных ПЧД испытывают режим гидродинамической аккреции. [1, 2, 4, 14, 7, 10].
2. Получены астрофизические ограничения на распространенность пятимерных ПЧД, спектр масс которых модифицирован аккрецией в фазу влияния дополнительного измерения на космологическое расширение, вытекающие из анализа данных по диффузному гамма-спектру, полной плотности материи, антипротонному избытку, распространенности гелия, фоторасщеплению дейтерия, возмущению реликтового фона, ионизации водорода. Все ограничения отличаются гораздо большей жесткостью (до 10 и более порядков), по сравнению с ограничениями в стандартной четырехмерной космологии. На основании полученных ограничений установлен верхний предел на радиус кривизны дополнительного измерения в модели RSII на уровне $l/l_4 \leq 10^{29}$. [2, 3, 4, 14, 7, 10, 12, 13].

3. Получено релятивистское обобщение уравнений адиабатической аккреции вещества с политропным уравнением состояния на D -мерную ЧД и показано, что время поглощения типичного белого карлика первичной черной дырой в шестимерной модели гравитации меньше на 5 и более порядков, чем соответствующее время поглощения в случае четырехмерной гравитации. Показано, что массы семимерных ЧД после окончания режима многомерной аккреции по порядку величины сопоставимы с четырехмерной хокинговской массой только вблизи фундаментального масштаба семимерной гравитации 1 ТэВ, что делает поиск проявлений семимерной гравитации затруднительным на основании метода поглощения первичными черными дырами плотных небесных тел. [5, 8, 9, 11].
4. Показано, что эффективное торможение многомерных ЧД в веществе белого карлика, связанное как с быстрым ростом массы в результате многомерной аккреции, так и с передачей энергии сильным гравитационным полем многомерной ЧД окружающей среде, позволяет шестимерным ЧД потерять до 20% их кинетической энергии, которой они обладают на межзвездных расстояниях при однократном прохождении через белый карлик. [5, 11].
5. Показано, что процесс поглощения белого карлика шестимерной первичной черной дырой предоставляет возможность поиска проявлений дополнительных измерений при фундаментальном масштабе шестимерной гравитации от 1 ТэВ до 1 ПэВ, что позволяет установить ограничение на распространенность шестимерных первичных черных дыр на уровне 10^{-16} от современной плотности скрытой массы. [5, 11].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Полученные в диссертации результаты имеют отношение к наблюдательным проявлениям фундаментальной структуры пространства-времени как в ранней Вселенной, так и в нашу эпоху, и могут быть использованы для ограничения существующих теорий гравитации с дополнительными пространственными измерениями.

Полученные результаты также можно использовать для исследования процессов кластеризации скрытой массы в гало Галактики и при интерпретации экспериментов по гравитационному микролинзированию.

Также полученные данные нужно учитывать при исследовании спектра

первичных возмущений в космологии мира на бране, а также при построении кинетики аккреции и обобщения теории аккреции в случае нестационарной динамики.

Полученные результаты также демонстрируют возможность исследования фундаментального многомерного гравитационного масштаба астрофизическими и космологическими средствами неускорительной физики в пределах, значительно превосходящих возможности современных коллайдерных экспериментов.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи в научных журналах

1. Tikhomirov, V.V. Primordial black hole mass growth in braneworld cosmologies / V.V. Tikhomirov, Y.A. Tselkov // *Nonlin.Phenom.Complex Syst.* — 2005. — Vol. 8:3. — P. 308–312.

2. Tikhomirov, V.V. How particle collisions increase the rate of accretion from cosmological background onto primordial black holes in braneworld cosmology / V.V. Tikhomirov, Y.A. Tsalkou // *Phys. Rev. D.* — 2005. — Vol. 72. — P. 121301 (R).

3. Tikhomirov, V.V. New limits on the abundance of primordial black holes in braneworld cosmology / V.V. Tikhomirov, Y.A. Tsalkou // *Gravitation & Cosmology.* — 2006. — Vol. 12. — P. 231–234.

4. Тихомиров, В.В. О возможностях исследования начальной стадии эволюции Вселенной / В. В. Тихомиров, В. В. Малыщиц, С. Э. Сягло, Ю. А. Целков // *Вестник БГУ. Серия 1, Физика. Математика. Информатика.* — 2006. — № 3. — С. 40–48.

5. Тихомиров, В. В. Об ускорении аккреции на первичные черные дыры в присутствии дополнительных измерений / В. В. Тихомиров, Ю. А. Целков // *Весці НАН Беларусі. Сер. физ.-мат. навук.* — 2012. — № 2. — С. 75–83.

Материалы конференций

6. Тихомиров, В.В. Аккреция на первичные черные дыры в теориях с дополнительными измерениями / В. В. Тихомиров, Ю. А. Целков // *Сборник работ 60-й научной конференции студентов и аспирантов Белгосуниверситета 14-16 мая 2003 г., ч.1.* / БГУ. — Минск, 2003. — С. 235–237.

7. Целков, Ю.А. Современные астрофизические ограничения на распространенность первичных черных дыр в космологических сценариях мира на бране / Ю. А. Целков // *Сборник работ 63-й научной конференции студентов и аспирантов Белгосуниверситета 23-26 мая 2006 г., ч.1.* / БГУ. — Минск, 2006. — С. 184–187.

8. Тихомиров, В.В. Поглощение плотных космических объектов первичными черными дырами в космологических теориях с дополнительными пространственными измерениями / В.В. Тихомиров, Ю. А. Целков // *Конгресс физиков Беларуси: сборник научных трудов, Минск, 3-5 ноября, 2008 г.* / ГНУ «Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси»; редкол.: С. Я. Килин [и др.]. — Минск, 2008. — С. 26–27.

9. Tikhomirov, V.V. To the problem of absorption abilities of small mass extra dimensional black holes in the context of black holes production at the LHC / V. V. Tikhomirov, Yu. A. Tsalkou // Proceedings of the XIV International Conference and School «Foundations & Advances in Nonlinear Science» September 22-25, Minsk 2008. / Editors: V.I. Kuvshinov, G.G. Krylov. — Minsk, 2009. —P. 115–122.

10. Тихомиров, В.В. О возможностях исследования начальной стадии эволюции Вселенной / В. В. Тихомиров, В. В. Малышиц, С. Э. Сягло, Ю. А. Целков // Фундаментальные и прикладные физические исследования в НИИ ЯП БГУ 2002-2009 гг. Сборник научных трудов / БГУ; Под ред.: проф. В.Г.Барышевского. —Минск, 2009. —С. 96–110.

11. Ignatenko, V.I. On the celestial body absorption by 6D black holes / V.I. Ignatenko, V. V. Tikhomirov, Yu. A. Tsalkou // Proceedings of the International conference in honor of Ya. B. Zeldovich 95th Anniversary «The sun, the stars, the universe and general relativity», April 20-23, Minsk 2009. / AIP Conference Series; Editors: R. Ruffini [et al.], 2010. —P. 97–102.

Тезисы конференций

12. Tikhomirov, V.V. New Limits on the Abundance of Primordial Black Holes in braneworld Cosmology / V.V. Tikhomirov, Yu. A. Tsalkou // Book of abstracts: Programm of International Conference on Gravitation, Cosmology, Astrophysics and nonstationary Hydrodynamics dedicated to 90th anniversary of K.P. Staniukovich, Moscow, March 1-4, 2006 / Moscow, 2006. — P. 21.

13. Tikhomirov, V.V. Primordial black holes in Randall-Sundrum one brane cosmology / V.V. Tikhomirov, Yu. A. Tsalkou // Book of abstracts: Program of the 5th International Conference Boyai-Gauss-Lobachevsky: Methods of Non-Euclidean Geometry in Modern Physics. Minsk, Oct. 10-13, 2006 / Minsk, 2006. — P. 9.

Электронные ресурсы

14. Tikhomirov, V.V. Primordial black holes in Randall-Sundrum one brane cosmology / V.V. Tikhomirov, Yu. A. Tsalkou // Proceedings of the 5th International Conference Boyai-Gauss-Lobachevsky: Methods of Non-Euclidean Geometry in Modern Physics. Minsk, Oct. 10-13, 2006. [Electronic Source]. - Mode of access: <http://dragon.bas-net.by/bgl5/tikhomirov.pdf> - Date of access: 16.11.2006.

Резюме

Целков Юрий Александрович

Астрофизические и космологические проявления многомерных первичных черных дыр в моделях мира на бране

Ключевые слова: Первичная черная дыра (ПЧД), многомерная гравитация, космология мира на бране, теория аккреции, белый карлик.

Цель диссертационной работы – ограничение распространенности первичных черных дыр в космологических сценариях мира на бране, следующее из теории аккреции, модифицированной влиянием дополнительных пространственных измерений.

Впервые показано, что для корректного описания процесса аккреции на ПЧД в космологических сценариях мира на бране, необходимо учитывать столкновительный характер взаимодействия частиц космологической плазмы. Представлена новая процедура вычисления интенсивного аккреционного роста массы ПЧД в высокоэнергетическом режиме пятимерной космологии Рандалл-Сундрум II и выявлена значительная роль гидродинамической аккреции, что приводит к пересмотру возможных наблюдательных проявлений дополнительных пространственных измерений в процессах ранней Вселенной.

Установлено, что увеличение аккреционного роста приводит к существенному ужесточению ограничений на начальные распространенности ПЧД, налагаемые значением критической плотности, измеренным спектром жесткого гамма-фона, антипротонным избытком, так же как и наблюдательными данными по первичному нуклеосинтезу, возмущению реликтового фона и остаточной ионизацией водорода.

Также показано, что значительное изменение свойств ПЧД в присутствии дополнительных измерений делает метод поиска многомерных ПЧД, основанный на поглощении ими небесных тел, более реалистичным и эффективным. Исследованы процессы захвата белым карликом многомерной ПЧД и её торможения в веществе белого карлика. Показано, что возможность обнаружения поглощения белого карлика позволяет как установить ограничения на распространенности шестимерных ПЧД в модели Аркани-Хамеда-Димопулоса-Двали, так и исследовать шестимерную гравитацию с массой Планка в диапазоне от 1 ТеВ до 1 ПэВ.

Resume

Tsalkou Yury Alyaksandravich

Astrophysical and cosmological manifestations of multidimensional primordial black holes in the brane world models

Key words: Primordial black hole (PBH), multidimensional gravity, braneworld cosmology, accretion theory, white dwarf.

The purpose of the thesis is to restrict initial mass fraction of the PBHs in the braneworld cosmology following from the accretion theory modified due to effect of extra spatial dimensions.

It is shown for the first time that collisions of particles of cosmological background should be taken into consideration to adequately describe accretion onto PBHs in braneworld cosmologies. A new procedure of evaluation of intensive PBH accretion mass growth on the high-energy phase of the five-dimensional Randall-Sundrum Type II braneworld cosmology is given and the significant role of hydrodynamic accretion is revealed, leading to a revision of the possible observational manifestations of extra spatial dimensions in the processes of the early universe.

Increase of the accretion rate leads to much tighter constraints on initial primordial black hole mass fraction imposed by the critical density limit, measurements of high-energy diffuse photon background, antiproton excess, as well as constraints from the nucleosynthesis data and observational limits on distortion of the CMB spectrum and residual hydrogen ionization, obtained in the work.

It is shown also that a drastic modifications of PBH properties in the extra dimension presence makes the method of extradimensional PBH search by of possible celestial body absorption much more effective and realistic. The processes of capturing an extradimensional PBH by a white dwarf and deceleration of the PBH in the white dwarf matter is considered. It is shown that the possibility of detection of a white dwarf absorption allows to set up a constraint on the six-dimensional PBH mass fraction in the Arkani-Hamed-Dimopoulos-Dvali braneworld as well as the six-dimensional gravity in the region of Planck masses from 1 TeV to 1 PeV can be searched for.

Рэзюмэ

Цалкоў Юрий Аляксандравіч

Астрафізічныя і касмалагічныя праявы шматмерных першасных чорных дзірак у мадэлях свету на бране

Ключавыя словы: Першасная чорная дзірка (ПЧД), шматмерная гравітацыя, касмалогія свету на бране, тэорыя акрэцыі, белы карлік.

Мэта дысертацыйнай работы – абмежаванне распаўсюджанасці першасных чорных дзірак у касмалагічных сцэнарыях свету на бране, наступнае з тэорыі акрэцыі, мадыфікаванай уплывам дадатковых прасторавых вымярэнняў.

Упершыню паказана, што для карэктнага апісання працэсу акрэцыі на ПЧД у касмалагічных сцэнарыях свету на бране неабходна ўлічваць сталкнавіцельны характар узаемадзеяння часцінак касмалагічнай плазмы. Прадстаўлена новая працэдура вылічэння інтэнсіўнага акрецыйнага росту масы ПЧД у высокаэнергетычным рэжыме пяцімернай касмалогіі Рандалл-Сундрум II і выяўлена значная роля гідрадынамічнай акрэцыі, што прыводзіць да перагляду магчымых наглядальных праяў дадатковых прасторавых вымярэнняў у працэсах ранняга Сусвету.

Усталявана, што павелічэнне акрецыйнага росту прыводзіць да істотнага ўзмацнення жорсткасці абмежаванняў на пачатковыя распаўсюджанасці ПЧД, якія накладваюцца значэннем крытычнай шчыльнасці, вымераным спектрам цвёрдага гама-фону, антыпратонным лішкам, гэтак жа як і вядомымі дадзенымі па першасным нукліясінтэзу, абурэнню рэліктавага фону і рэшткавай іянізацыяй вадароду.

Таксама паказана, што значная змена ўласцівасцяў ПЧД у прысутнасці дадатковых вымярэнняў робіць метады пошуку шматмерных ПЧД, заснаваны на паглыннанні імі нябесных целаў, больш рэалістычным і эфектыўным. Даследаваны працэсы захопу белым карлікам шматмернай ПЧД і тармажэнні яе ў рэчыве белага карліка. Паказана, што магчымасць выяўлення паглынання белага карліка дазваляе як усталяваць абмежаванні на распаўсюджанасці шасцімерных ПЧД у мадэлі Аркані-Хамеда-Дімопулоса-Двалі, так і даследаваць шасцімерную гравітацыю з масай Планка ў дыяпазоне ад 1 ТэВ да 1 ПэВ.

ЦЕЛКОВ
Юрий Александрович

**АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ И КОСМОЛОГИЧЕСКИЕ
ПРОЯВЛЕНИЯ МНОГОМЕРНЫХ ПЕРВИЧНЫХ ЧЕРНЫХ
ДЫР В МОДЕЛЯХ МИРА НА БРАНЕ**

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

Подписано в печать «15» апреля 2013 г. Формат 60 × 90 1/16.
Бумага офисная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,5.
Учет. изд. л. 1,2. Тираж 60 экз. Заказ № 4

Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси,
220072, г. Минск, пр. Независимости, 68.
Отпечатано на ризографе Институт физики им. Б.И. Степанова
НАН Беларуси