

В диссертационный совет Д002.119.01
на базе Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Института ядерных исследований
Российской академии наук (ИЯИ РАН)

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию
Ерошенко Юрия Николаевича
на тему «Нелинейные гравитационно-связанные структуры в ранней Вселенной»
по специальности 01.04.02 - теоретическая физика
на соискание ученой степени доктора физико-математических наук

Диссертация посвящена теоретическому исследованию образования в ранней вселенной гравитационно-связанных структур и их возможных наблюдательных проявлений в современную эпоху. Большая часть объема диссертации посвящена расчетам процессов образования плотных сгустков темной материи, а также вопросам, связанным с первичными черными дырами, космическими струнами и сверхмассивными черными дырами в ядрах галактик (в моделях их первичного происхождения). Несмотря на то, что в настоящее время нет убедительных свидетельств существования первичных черных дыр, космических струн и сгустков темной материи теоретическое обсуждение возможных наблюдательных проявлений существования таких объектов представляется не только целесообразным, но и представляющим несомненную научную ценность. В случае, если общая теория относительности описывает гравитационное взаимодействие на всех шкалах, следует заключить необходимость существования темной материи и ее сгустков.

Несмотря на значительные усилия исследователей, до сих пор открытыми остаются вопросы о природе частиц темной материи. Хотя темная материя составляет около 27% плотности вещества во Вселенной, в настоящий момент неизвестно из чего эта материя состоит.

Наиболее вероятной считается модель темной материи в форме новых слабо взаимодействующих элементарных частиц, таких как, например, нейтралино. Во многих низкоэнергетических экспериментах предпринимаются большие усилия зарегистрировать эти частицы напрямую по их слабому взаимодействию с атомными ядрами мишеней, а также ведется поиск частиц темной материи на Большом адронном коллайдере по эффекту недостатка импульса частиц-продуктов реакций. Эти поиски однако пока не принесли результата, хотя в некоторых экспериментах (DAMA и др.) сообщалось о возможном обнаружении признаков взаимодействия частиц темной материи. Поэтому остается актуальной и, вероятно, останется еще долгое время работа по косвенному исследованию темной материи.

Прежде всего, косвенным эффектом является возможная аннигиляция частиц темной материи с генерацией гамма-излучения. Примесь аннигиляционного гамма-излучения может присутствовать в космических гамма-фонах. Выделение сигнала над уровнем фона является нетривиальной задачей, для которой требуется знать как общие свойства источников излучения, так и астрофизические процессы, дающие основную часть фона. В диссертации Ю.Н. Ерошенко главное внимание уделяется природе источников аннигиляционного гамма-излучения в виде мелкомасштабных сгустков темной материи. Формирование таких сгустков должно неизбежно происходить в ранней Вселенной из возмущений плотности, если первичный спектр возмущений близок к спектру Гаррисона-Зельдовича. Приблизительно такой спектр предсказывают простейшие теории инфляции. Сгустки темной материи даже в самых консервативных вариантах дают усиление аннигиляционного сигнала в несколько раз, но это усиление может достигать и нескольких порядков величины в случае нестандартного спектра возмущений.

Диссертационная работа состоит из Введения, четырех основных глав, Заключения и Списка цитируемой литературы.

Во Введении описана основная мотивировка и актуальность работы и дан миниобзор современного состояния исследований в рассматриваемой предметной области.

В первой главе диссертационной работы на основе кинетического уравнения был исследован эффект обрезания спектра масс сгустков со стороны малых масс. В работе впервые было получено выражение для изменения со временем температуры нейтрального газа вблизи момента кинетического отщепления частиц темной материи, а также впервые минимальная масса сгустка найдена путем учета постепенного перехода от радиационно-доминированной к пылевидной стадии эволюции Вселенной. Для расчета аннигиляционного сигнала важным фактором является распределение сгустков по их массе и плотностям. В диссертации был разработан новый метод расчета функции распределения сгустков с учетом их приливного разрушения внутри объектов с большей массой и найдена функция распределения.

Одним из главных результатов диссертации стал расчет процессов приливного гравитационного разрушения сгустков гравитационным полем галактического диска и звезд гало во время движения сгустков по орбитам в гало с момента образования Галактики. В диссертации были обнаружены два режима приливного разрушения: разрушение за единичный пролет вблизи звезды и постепенное разрушение за множество пролетов мимо звезд. Была учтена прецессия орбит сгустков в гало Галактики, этот эффект прецессии важен для эффекта приливного разрушения диском, т.к. за счет прецессии орбита меняет свою ориентацию по отношению к диску. С этим связано изменение эффективности приливного разрушения сгустков. Также было получено, что анизотропия аннигиляционного сигнала по отношению к плоскости диска может достигать 9%. На основе полученных в 1-й главе результатов было рассчитано усиление аннигиляционного сигнала в зависимости от параметров сгустков и свойств частиц темной материи. Свойства частиц влияют на усиление сигнала, в основном, за счет изменения минимальной массы сгустков.

Основной темой второй главы диссертационной работы являются сверхплотные сгустки темной материи, формирующиеся на радиационно-доминированной стадии эволюции Вселенной при наличии в спектре возмущений дополнительного максимума. Ранее, до работ соискателя и его соавторов, подобные сверхплотные сгустки рассматривались только в случае возмущений плотности с постоянной кривизной, например в модели с аксионной темной материей. В диссертации приведено обоснование возможности образования сверхплотных сгустков на радиационно-доминированной стадии также из возмущений кривизны, иначе называемых адиабатическими возмущениями. При этом очень важным фактором эволюции адиабатических возмущений оказался рост несферичности возмущений. Только возмущения, которые изначально были с высокой степенью точности сферическими, смогли вириализоваться и создать сверхплотные сгустки, а несферичные возмущения распались во время эволюции. В диссертации были рассчитаны характеристики получающихся сгустков и их число. Было показано, что аннигиляция нейтралитно в этих сгустках может давать сигнал на уровне наблюдаемых фоновых излучений.

В третьей главе рассмотрен ряд задач, связанных с первичными черными дырами и кластеризацией темной материи вокруг первичных черных дыр. В частности, был рассмотрен вопрос о формировании пиков плотности вокруг первичных черных дыр на ранней стадии радиационного доминирования во Вселенной. Было показано, что плотность в формирующихся пиках может значительно превосходить плотность гало темной материи, которые должны возникать вокруг первичных черных дыр позже за счет вторичной аккреции. Если частицы темной материи способны аннигилировать, то аннигиляция в пиках является дополнительным источником фоновых гамма-излучений. Сравнение с данными спутника Fermi-LAT по гамма-фону, позволило автору получить новые жесткие ограничения совместно на число черных дыр и сечение аннигиляции частиц темной материи.

Также в 3-й главе исследуется происхождение сверхмассивных черных дыр в центрах галактик и природа ранних квазаров. Эта задача является весьма актуальной в связи с обнаружением сверхмассивных черных дыр с массами более 10 миллиардов солнечных масс со значениями красных смещений более 6, что является большой проблемой для теоретического описания формирования столь массивных объектов за относительно небольшое космологическое время. В диссертации обосновывается модель происхождения сверхмассивных черных дыр за счет множественного слияния первичных черных дыр меньших масс. Эти первичные черные дыры могли образовываться как по одиночке и быть центрами конденсации особого класса плотных протогалактик, так и возникать в плотных скоплениях черных дыр. В диссертации была исследована динамика подобных кластеров и рассмотрен коллапс центральных областей кластеров в черные дыры. Было показано, что такие коллапсы могут происходить на больших красных смещениях и, тем самым, являться триггером зажигания ранних квазаров. Кроме того, был рассчитан ожидаемый темп гравитационных всплесков от столкновений черных дыр в скоплениях.

Еще одним вопросом, рассмотренным в 3-й главе, является нерелятивистская прецессия звезд вокруг сверхмассивной черной дыры в центре галактики с учетом возмущающего

влияния окружающей скрытой массы (в том числе, темной материи) на гравитационный потенциал. По характеру прецессии можно будет найти количество скрытой массы и ее распределение (в случае, если плотность звездного скопления незначительна по сравнению с плотностью скрытой массы), что даст информацию об истории формирования центральной черной дыры. В частности, это может представить проверку астрофизических или первичных сценариев ее формирования. Важно отметить, что эта тема в настоящее время является очень актуальной в связи с тем, что продолжается измерение орбит звезд вблизи центральной черной дыры в Галактике и точность измерения параметров орбит несомненно будет улучшена в ближайшее время с использованием интерферометра GRAVITY и в дальнейшем с использованием телескопов E-ELT и TMT. Всё возрастающая точность наблюдений в ближайшие годы может оказаться достаточной, чтобы выявить обсуждающиеся в диссертации эффекты релятивистской и нерелятивистской прецессии орбит звезд.

В четвертой главе рассмотрены гравитационные нелинейные структуры, которые могут иметь отношение к процессам в ранней Вселенной. Были получены новые решения для аккреции в задаче Вайдья в диагональных координатах и построена глобальная геометрия для решений. Полученные решения могут описывать аккрецию на первичные черные дыры. Были найдены условия существования решений для заряженных частиц в метрике Рейсснера-Нордстрема и выдвинута гипотеза о том, что такие системы могут представлять частицы темной материи. Также в диссертации получены новые решения в конформной теории гравитации в виде гравитационных пузырей. Если конформная гравитация в ранние эпохи предшествовала общей теории относительности, то такие структуры могли существовать в ранней Вселенной.

В Заключении приведены основные результаты исследования.

Актуальность проведенного исследования состоит в том, что природа темной материи является в настоящее время одной из главных загадок астрофизики и космологии. На ее решение направлены усилия многих групп ученых.

Новизна исследования подтверждается тем, что в диссертации были предложены новые методы и подходы к расчетам различных эффектов, прежде всего, структуры и распределения сгустков темной материи. Также в диссертации разработаны новые модели, которые ранее не рассматривались, и получены новые математические решения для нелинейных гравитационных структур. Новизна результатов подтверждается также публикацией результатов работы в ведущих отечественных и международных журналах, в которых имеется рецензирование высокого научного уровня, что приводит к тому, что в этих журналах публикуются научные работы, имеющие научную новизну и практическую ценность.

Практическая ценность диссертации состоит в том, что часть ее результатов, например, коэффициент усиления аннигиляционных сигналов можно напрямую использовать в расчетах гамма-фонов от аннигиляции. В ближайшие годы, вероятно, удастся выделить в наблюдениях аннигиляционные сигналы и тогда потребуется выполненный в диссертации

аккуратный расчет мелкомасштабного распределения темной материи. Также при интерпретации данных наблюдений можно будет использовать полученные распределения гравитационных всплесков и угол прецессии звезд вокруг сверхмассивной черной дыры в центре Галактики.

Диссертационная работа содержит ряд недостатков. Укажем на некоторые из них. Автор использует сокращение СТМ для сгустков темной материи. Такое сокращение не является общепринятым и затрудняет чтение текста. Некоторые термины необходимо прояснить, например, что имеется в виду по словом “догалактические”. На странице 8 диссертации говорится о возможности, что конформная теория гравитации может предшествовать общей теории относительности. Этот тезис необходимо пояснить, поскольку обычно рассматривается единая теория гравитации на всем интервале времени. На странице 14 говорится о “центральных сердцевинах СТМ”, однако не пояснено, что такое “центральные сердцевинны”. Список публикаций (страницы 17-23) не упорядочен ни в хронологическом, ни в алфавитном порядке. На странице 19 в указании на работу [21] нарушено единообразие представления ссылки на работу. В списке публикаций автора диссертации и в списке литературы шестизначный номер статьи указан как номер страницы в таких журналах как Phys. Rev. D, Phys. Rev. Lett., Classical and Quantum Gravity и других. На странице 23 при указании работы [13] в названии сборника трудов конференции пропущено “, Proceedings of the “. При указании докладов автора диссертации, автор не упорядочил их ни в хронологическом, и а алфавитном порядке. При указании самого большого значения красного смещения для галактик необходимо было дать ссылку на публикацию (первая строка на странице 30), поскольку обычно считается, что самая удаленная галактика GN-z11 имеет красное смещение $z = 11.09$ (ApJ, **819**, (2016)). При обсуждении формирования каустик на странице 36 необходимо было дать ссылку на работу Арнольда, Шандарина и Зельдовича (1982) (V. I. Arnold, S. F. Shandarin & Ya. B. Zeldovich 20, pp. 111-130), где обсуждается формирования структур, являющихся обобщением блинов Зельдовича (1970) (Zeldovich Ya, Astron. Astrophys. 4, 84 (1970) тем более, что ниже автор диссертации использует лагранжев подход, предложенный Зельдовичем. На странице 40 необходимо напомнить определение передаточной функции $T(k)$. На странице 43 необходимо было при обсуждении сверхмассивных черных дыр с большим красным смещением необходимо было привести результат Ву и др (Wu et al. Nature, 518, p.512 (2015)), где сообщается об открытии черной дыры с массой 12 миллиардов солнечных масс с красным смещением $z=6.3$. На странице 44 фамилии авторов цитированных работ приводятся латинскими буквами, в то время как в других местах текста дается их русский перевод. На странице 51 в формуле (1.15) необходимо уточнить $a(t)$ или используемую космологическую модель. На странице 75 необходимо было определить величину r с индексом Солнце (как ясно из последующего текста, это значение от Солнца до Центра Галактики). Утверждение на странице 94, что из некоррелированности следует независимость случайных величин в общем случае неверно (из независимости следует некоррелированность, обратное утверждение в общем случае неверно). В разделе 2.5 сказано, что доля массы MACHO составляет около 20% скрытой массы в гало. Действительно группа, MACHO делало такое утверждение, однако позднее группы EROS и OGLE, основываясь на их наблюдательных данных, утверждали, что эта доля составляет 5 – 10%. На странице 125—126 автор диссертации пишет “Проблема микролинз к настоящему времени практически потеряла актуальность, т. к. почти все

события можно объяснить переменностью звезд.” Утверждение о потере актуальности сомнительно (группа OGLE продолжает наблюдения микролинзирования, а также продолжают наблюдения пиксельного линзирования в направлении галактики M31 и тем самым, уточнены заключения группы MACHO, в частности, с использованием этих данных найдены экзопланетные системы вблизи зоны обитаемости с температурой на твердой поверхности в диапазоне 0 – 100 градусов Цельсия, см. например, обзор S. Mao, Res. Astron. Astrophys. 12, 947). Утверждение на странице 128 “Для того, чтобы СТМ мог служить гравитационной линзой, его радиус не должен значительно превышать радиус Эйнштейна” требует пояснения. Указанная на странице 174 ссылка на работу [178] должна быть заменена на [77] (статьи [77] и [178] совпадают). Для текста диссертации на русском языке предпочтительно давать ссылки на варианты статей и книг на русском языке в случае, если русский является языком оригинала (см. например [240] и ряд статей, опубликованных изначально на русском языке), а для русскоязычных изданий необходимо указывать том (а не Vol.) и страницы, а не P. Название журналов необходимо давать единообразно (иногда указано сокращение JCAP, а иногда более полное название этого журнала).

Имеются опечатки на страницах 18, 45, 46, 57, 58, 62, 75, 114, 117, 204, 268, 282, 284, 298.

Указанные недостатки, однако, не снижают качества и общей положительной оценки работы. Диссертация Ю.Н. Ерошенко представляет собой целостный научный труд, который содержит ряд новых результатов и проясняет важные аспекты проблемы мелкомасштабной кластеризации темной материи и свойства других нелинейных структур в ранней Вселенной.

Достоверность и обоснованность полученных в диссертации результатов подтверждается внутренней непротиворечивостью моделей и их согласием с известным массивом наблюдательных астрофизических данных. Применяемые спектры возмущений и другие числовые зависимости там, где это было возможно, нормировались на экспериментальные данные. В расчетах использовались современные методы теоретической физики, позволяющие получать обоснованные решения. Результаты, полученные в диссертации, являются новыми и актуальными, а их достоверность подтверждается адекватностью научных методов, использованных при их получении, а также тем, что автор привлекает наблюдательные данные для отбора реалистичных параметров теории.

Основные выводы и методы диссертации могут найти дальнейшее применение в интерпретации наблюдений и в теоретических исследованиях, проводимых в ИТЭФ, ОИЯИ, ИТФ РАН, ФИАН, ГАИШ МГУ.

Материалы диссертации полно изложены в опубликованных работах автора в российских и зарубежных научных журналах и докладывались на научных конференциях. Автором диссертации опубликовано большое количество работ в научных журналах самого высокого уровня, что значительно превышает необходимые требования, связанными с публикациями соискателя ученой степени доктора физико-математических наук. Автореферат правильно отражает основное содержание диссертации.

Таким образом, диссертация Ерошенко Юрия Николаевича «Нелинейные гравитационно-связанные структуры в ранней Вселенной» на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 - теоретическая физика является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение, что соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденных Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор несомненно заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук.

Официальный оппонент,
доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник
НИЦ «Курчатовский институт»
ФГБУ «ГНЦ РФ ИТЭФ»

Захаров Александр Федорович

30 января 2017 г.

Подпись А.Ф. Захарова удостоверяю

Ученый секретарь
НИЦ «Курчатовский институт» – ФГБУ «ГНЦ РФ ИТЭФ»

В.В. Васильев

Захаров Александр Федорович

Доктор физико-математических наук по специальности 01.03.02 – Астрофизика и звездная астрономия

Должность: ведущий научный сотрудник

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» Федеральное государственное бюджетное учреждение «Государственный научный центр Российской Федерации - Институт Теоретической и Экспериментальной Физики» (НИЦ «Курчатовский институт» ФГБУ «ГНЦ РФ ИТЭФ»)

Адрес: 117218 Россия, Москва, ул. Большая Черемушкинская, 25

Телефон: +7(499)1238093

E-mail: director@itep.ru

Список основных публикаций по теме диссертации за последние 5 лет:

1. A.F. Zakharov, F. De Paolis, G. Ingrosso, A.A. Nucita, Shadows as a tool to evaluate black hole parameters and a dimension of spacetime, *New Astron. Rev.* 56 (2012) 64-73
2. G. Ingrosso, S. Calchi Novati, F. De Paolis, Ph. Jetzer, A.A. Nucita, A.F. Zakharov, Search for exoplanets in M31 with pixel-lensing and the PA-99-N2 event revisited, *Gen. Rel. Grav.* 43 (2011) 1047-1060
3. Захаров А.Ф., "Поиски экзопланет с помощью гравитационного микролинзирования", *УФН* 181 (2011) 1114–1122
4. F. De Paolis, G. Ingrosso, A.A. Nucita, A. Qadir, A.F. Zakharov, Estimating the parameters of the Sgr A* black hole, *Gen. Rel. Grav.* 43 (2011) 977-988
5. D. Borka, P. Jovanovic, V.B. Jovanovic, A.F. Zakharov, Constraints on RnRn gravity from precession of orbits of S2-like stars, *Phys. Rev. D* 85 (2012) 124004
6. A.F. Zakharov, D. Borka, V.B. Jovanovic, P. Jovanovic, Constraints on RnRn gravity from precession of orbits of S2-like stars: a case of a bulk distribution of mass, *Adv. Space Res.* 54 (2014) 1108-1112
7. A.F. Zakharov, P. Jovanovic, D. Borka, V.B. Jovanovic, Constraining the range of Yukawa gravity interaction from S2 star orbits II: Bounds on graviton mass, *JCAP* 1605 (2016) no.05, 045
8. G. Ingrosso, S. Calchi Novati, F. De Paolis, Ph. Jetzer, A.A. Nucita, F. Strafella, A.F. Zakharov, Polarization in microlensing towards the Galactic bulge, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 426 (2012) 1496

9. Constraining the range of Yukawa gravity interaction from S2 star orbits
D. Borka, P. Jovanovic, V.Bc Jovanovic, A.F. Zakharov,
JCAP 1311 (2013) 050
10. A.F. Zakharov et al., Exoplanetary searches with gravitational microlensing: polarization issues,
Adv. Space Res. 54 (2014) 1319-1325
11. A.F. Zakharov, Constraints on a charge in the Reissner-Nordström metric for the black hole at the Galactic Center,
Phys. Rev. D90 (2014) 062007
12. A.B. Arbuzov, B.M. Barbashov, R.G. Nazmitdinov, V.N. Pervushin, A. Borowiec, K.N. Pichugin, A.F. Zakharov, Universe as a representation of affine and conformal symmetries,
Phys. Part. Nucl. Lett. 8 (2011) 187-201
13. Conformal and Affine Hamiltonian Dynamics of General Relativity
V.N. Pervushin, A.B. Arbuzov, B.M. Barbashov, R.G. Nazmitdinov, A. Borowiec, K.N. Pichugin, A.F. Zakharov,
Gen. Rel. Grav. 44 (2012) 2745-2783
14. A.B. Arbuzov, R.G. Nazmitdinov, A.E. Pavlov, V.N. Pervushin, A.F. Zakharov, Radiative breaking of conformal symmetry in the Standard Model,
Europhys. Lett. 113 (2016) no.3, 31001
15. V.N. Pervushin, A.B. Arbuzov, B.M. Barbashov, R.G. Nazmitdinov, A. Borowiec, K.N. Pichugin, A.F. Zakharov, The general relativity with conformal units,
Phys. Part. Nucl. 43 (2012) 682-688