

ОТЗЫВ

официального оппонента Зыбина Кирилла Петровича
на диссертацию 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

Диссертация Ерошенко Ю.Н. посвящена одной из наиболее актуальных тем современной астрофизики и космологии - выяснению природы темной материи (скрытой массы) во Вселенной и поиску ее возможных наблюдательных проявлений. Ключ к пониманию природы темной материи может дать изучение нелинейных самогравитирующих структур в ранней Вселенной, таких как сгустки темной материи, первичные черные дыры и др. Эти структуры могут как сами представлять темную материю, так и влиять на ее распределение, создавая вокруг себя плотные сгущения. В этих сгущениях эффективность аннигиляции частиц темной материи выше, чем в среднем, если темная материя состоит из аннигилирующих частиц. Теоретические расчеты усиления потоков гамма-излучения от аннигиляции частиц в сгустках темной материи являются одним из главных результатов диссертации.

История изучения мелкомасштабных компактных объектов темной материи началась с модели нейтральных звезд, предложенной в работах Phys. Lett. A. 208, 276 (1995) и УФН 167, 913 (1997). Затем эта тема развивалась в различных направлениях и вариациях. В частности, множество работ было посвящено изучению величины минимальной возможной массы объектов темной материи (сгустков). Уже в одной из первых работ соискателя в соавторстве с В.С. Березинским и В.И. Докучаевым (Phys. Rev. D 68, 103003 (2003)) на эту тему были получены ряд результатов, которые широко цитируются и используются в других работах. Так, например, метод вычисления момента кинетического отщепления частиц темной материи путем решения кинетического уравнения показал, что отщепление частиц происходит экспоненциально быстро. Ранее этот процесс отщепления исследовался на уровне оценок и его ход во времени был неясен. Затем соискателем и его коллегами была выполнена серия работ, в которых вычислялась начальная функция масс сгустков и исследовались процессы приливного гравитационного разрушения сгустков темной материи при их пролете рядом со звездами. Как и следовало ожидать, при таких взаимодействиях выживают центральные наиболее плотные области сгустков. Это происходит из-за сохранения адиабатических инвариантов

ввиду больших частот обращения частиц по орбитам в центре сгустка по сравнению с характерным обратным временем приливного взаимодействия, что было установлено в расчетах структуры бездиссипативной гравитационной сингулярности (ЖЭТФ 94, 3 (1988)). Почти весь сигнал от аннигиляции генерируется в центре сгустков, поэтому выживание их центральных областей имеет принципиальное значение для суммарного аннигиляционного потока. Также в работах соискателя и соавторов впервые обоснована модель образования сверхплотных сгустков темной материи из адиабатических возмущений плотности на стадии радиационного доминирования. Ранее считалось, что на этой стадии сгустки могут формироваться только из энтропийных возмущений. В частности, упомянутые выше нейтральные звезды могут относиться к классу сверхплотных сгустков.

В диссертации рассматривается и ряд других вопросов, по которым выполнены оригинальные вычисления и получены новые результаты. Например, расчет темпа гравитационных всплесков от столкновений первичных черных дыр в скоплениях получил актуальность в связи с недавней регистрацией гравитационного всплеска интерферометром LIGO. В последние годы было обнаружено несколько квазаров на больших красных смещениях больше шести, высокая светимость которых говорит о наличии черных дыр большой массы. Раннюю активность квазаров трудно объяснить в рамках обычных астрофизических сценариев, поскольку они требуют достаточно большого времени. В связи с этим, разработка новых теорий образования сверхмассивных черных на больших красных смещениях и их наблюдательная проверка являются актуальными задачами. Перспективны модели с сильно нелинейными структурами - первичными черными дырами и их скоплениями, которые могут образовываться еще на стадии доминирования во Вселенной излучения по различным механизмам и рано эволюционировать в сверхмассивные черные дыры. Кроме того, в диссертации исследована модель нарастания вокруг первичных черных дыр плотных пиков из темной материи. Аннигиляция частиц в этих пиках может давать дополнительный вклад в фоновое гамма-излучение, что, возможно, поможет идентифицировать частицы темной материи.

Остановимся кратко на содержании диссертации Ерошенко Ю.Н.

Во Введении диссертации дан обзор современного состояния рассматриваемой области исследования, в котором в краткой форме обсуждаются основные наблюдательные данные, предлагавшиеся модели и актуальные задачи по теме диссертации.

В Главе 1 диссертации рассмотрено образование и последующая эволюция сгустков темной материи в случае стандартного спектра космологических возмущений плотности. Выведено и решено в частных случаях кинетическое уравнение для процессов кинетического отщепления, свободного разлета нейтралов, и найдена минимальная масса сгустка. Выполнен расчет процессов приливного разрушения сгустков в иерархических структурах и при взаимодействиях со звездами в Галактике. Получено, что на ранней иерархической стадии формирования структур в процессах приливного гравитационного разрушения выживают 0.1-0.5% сгустков в каждом логарифмическом интервале масс. Внешние слои сгустков, не разрушившихся на иерархической стадии, затем эффективно разрушаются при гравитационном взаимодействии со звездами гало и диском Галактики. В итоге, доля массы гало Галактики в форме сгустков составляет порядка 3%. Однако в галактической окрестности Солнца выживают почти все центральные сердцевинки сгустков. Эти избежавшие разрушения сердцевинки могут являться основными источниками аннигиляционного сигнала. Усиление аннигиляционного сигнала зависит от спектра первичных космологических возмущений плотности и может достигать примерно одного порядка величины. Данный эффект делает более жесткими ограничения на сечение аннигиляции, следующие из сравнения вычисленного и наблюдаемого гамма-фона.

Во 2-й главе исследованы сверхплотные сгустки темной материи, которые могли формироваться на космологической стадии доминирования излучения при наличии избытка в спектре адиабатических возмущений плотности на малых масштабах. Был разработан метод сшивки начальных условий, полученных из линейной теории возмущений, и нелинейной модели как в сферическом, так и в несферическом случае. Получено, что в случае адиабатических возмущений плотности принципиальную роль в формировании СТМ играет несферичность начальных возмущений. Из наблюдательных ограничений на гамма-излучение, полученных на телескопе Fermi-LAT, найдены ограничения на комбинации параметров, характеризующих частицы темной материи и сгустки в моделях, в которых источниками начальных возмущений являются адиабатические флуктуации плотности или петли космических струн.

В Главе 3 исследован ряд моделей, описывающих распределением вещества вокруг первичных черных дыр и скоплений черных дыр. Получено, что на догалактической стадии вокруг первичных черных дыр и их скоплений возможно формирование плотных пиков и гало из темной материи. Пики плотности могут являться яркими источниками аннигиляционного гамма-излучения. Сравнение рассчитанного сигнала с данными Fermi-LAT ограничивает сверху современный космологический параметр плотности

первичных черных дыр. Гало вокруг больших первичных черных дыр и их скоплений могут представлять особый класс плотных галактик и ранних квазаров на больших красных смещениях. Слияние первичных черных дыр в скоплениях сопровождается всплесками гравитационных волн, и поиск таких сигналов дает принципиальную возможность проверки предлагаемых моделей на будущих детекторах гравитационных волн.

4-я глава диссертационной работы посвящена исследованию нелинейных гравитационных структур трех типов, которые могли рождаться в ранней Вселенной. В рамках конформной теории гравитации найдены решения типа «гравитационные пузырей» и решения с переменным скаляром кривизны. Были рассмотрены черные дыры с зарядами на внутренних квантовых орбиталях и получено условие существования физически приемлемого (с конечным нормировочным интегралом) решения уравнения Дирака в гравитационном поле заряженной черной дыры. Впервые было показано, что внутри черной дыры могут существовать стационарные электронные уровни. Исследована глобальная структура пространства-времени в задаче Вайдья, описывающей аккрецию излучения на первичную черную дыру.

В Заключении обсуждаются основные результаты диссертационной работы.

Результаты, представленные в диссертации, получены путем как аналитических, так и численных расчетов. При исследовании нелинейных структур в ранней Вселенной применялись методы гравитационной динамики в ньютоновском приближении и в рамках общей теории относительности, а также с использованием конформной теории гравитации, которая может предшествовать общей теории относительности в ранней Вселенной.

Актуальность диссертации основана на том, что проблема темной материи до сих пор остается одной из главных в астрофизике. Несмотря на многочисленные эксперименты по прямой регистрации частиц темной материи, сделать это пока не удалось, поэтому весьма актуальны методы косвенного поиска этих частиц по их аннигиляционному излучению. В диссертации Ерошенко Ю.Н. предложен ряд новых подходов в этой области, которые основаны на мелкомасштабной кластеризации темной материи - формировании плотных и сверхплотных сгустков. Поиск этих объектов дает дополнительные возможности для идентификации темной материи. Разработанные новые модели и подходы говорят о научной новизне полученных в диссертации результатах, а возможность их использования в будущих работах по расчету аннигиляционного сигнала и поиску частиц темной материи свидетельствует об их практической значимости.

Полученные в диссертационной работе основные результаты представлены на международных и российских конференциях, а также докладывались на научных семинарах. Опубликованные по результатам диссертационной работы научные статьи активно цитируются ведущими специалистами в рассматриваемой области.

Тем не менее, диссертация имеет несколько недостатков. По ее содержанию необходимо сделать следующие критические замечания:

1. В разделе 1.1.1 Ю.Н. Ерошенко вводит кинетическое уравнение, описывающее динамику темной материи (1.10). При этом автор использует уравнение Фоккера-Планка, ссылаясь на книгу Ландау Лифшица и Питаевского «Физическая Кинетика». Заметим, что из цитируемой книги следует, что кинетическое уравнение вообще говоря должно быть нелинейным и не обязательно иметь вид уравнения Фоккера-Планка. Отметим также, что используемое автором «равновесное» бозе распределение нейтрально (1.27) по импульсам не обнуляет используемый им интеграл столкновений — равновесным распределением является функция Максвелла. Поэтому возникает вопрос о области применимости вводимых автором приближений.

2. В разделе 1.3.1 используются профиль плотности гало темной материи Наварро-Френка-Уайта, но не учитывается тот факт, что в центральной области гало значительную часть гравитационного потенциала создает барионное вещество. Хотя с точки зрения наблюдаемого сигнала это дает незначительную поправку, интересно было бы выяснить, как барионное вещество повлияет на функцию распределения сгустков в гало. Такую задачу можно было бы рассмотреть, например, в адиабатическом приближении, считая, что «оседание» барионов на дно потенциальной ямы происходит медленно по сравнению с частотой осцилляций СТМ в гало.

3. В Главе 3 рассматривались скопления первичных черных дыр. На число одиночных (обособленных) первичных черных дыр во Вселенной имеются ряд ограничений в различных диапазонах масс. Подобные ограничения должны существовать и на плотные скопления первичных черных дыр. Однако в работах соискателя, а также в тех работах, в которых рассматривалось формирование скоплений, эти ограничения не обсуждаются.

Перечисленные недостатки, однако, не уменьшают общую научную ценность диссертационной работы Ерошенко Ю.Н.

Работа написана ясным языком и, несмотря на широкий круг рассмотренных в ней моделей, имеет единую структуру. **Автореферат адекватно и полно отражает содержание диссертации.** Все основные результаты опубликованы в 39-и статьях соискателя по теме диссертации.

Достоверность полученных теоретических результатов основана на том, что для получения ограничений на параметры моделей применяется метод сравнения рассчитанных величин с верхними наблюдательными пределами по гамма-фону, полученными на гамма-телескопах. При разработке теоретических моделей требовалась их непротиворечивость и согласие с известными астрофизическими и космологическими данными, а также там, где это возможно, выделялись эффекты, на основе которых в будущем можно выполнить дополнительную наблюдательную проверку моделей.

На основании сказанного выше можно сделать вывод, что по научному уровню, объему работы, а также по актуальности и оригинальности полученных результатов диссертация **Ерошенко Юрия Николаевича** «Нелинейные гравитационно-связанные структуры в ранней Вселенной» **удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым** к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, установленным в «Положении о присуждении ученых степеней», утверждённом постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, а ее автор **заслуживает** присвоения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 - теоретическая физика.

Официальный оппонент
доктор физико-математических наук,
член-корреспондент
Российской академии наук,
главный научный сотрудник
ОТФ ФИАН им.П.Н. Лебедева
E-mail: zybin@lpi.ru

25.01.2017

Зыбин Кирилл Петрович

ОТФ ФИАН им. П.Н. Лебедева - Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Отделение теоретической физики им. И.Е. Тамма, тел. +7 (499) 132-62-03.

Подпись К.П. Зыбина удостоверяю: ученый секретарь Колобов А.В.

Зыбин Кирилл Петрович

Член-корреспондент Российской академии наук, главный научный сотрудник

Доктор физико-математических наук (специальность 01.04.02 -
теоретическая физика)

Список основных публикаций за последние 5 лет:

1. Зыбин К.П., Сирота В.А., "Модель вытягивающихся вихрей и обоснование статистических свойств турбулентности", УФН 185, 593–612 (2015)
2. Gurevich A.V. et al., Gamma-ray emission from thunderstorm discharges, Physics Letters A, Vol. 375, p. 1619-1625 (2011)
3. Zybin K., Sirota V., Ilyin A., Small-scale vorticity filaments and structure functions of the developed turbulence, Physica D: Nonlinear Phenomena, Vol. 241, p. 269-275 (2012)
4. Gurevich A.V. et al., Strong Flux of Low-Energy Neutrons Produced by Thunderstorms, Physical Review Letters, vol. 108, id. 125001 (2012)
5. Zybin K.P., Sirota V.A., Vortex filament model and multifractal conjecture, Physical Review E, vol. 85, id. 056317 (2012)
6. Gurevich A.V., Mesyats G.A., Zybin K.P. et al., Observation of the Avalanche of Runaway Electrons in Air in a Strong Electric Field, Physical Review Letters, vol. 109, id. 085002 (2012)
7. Zybin K.P., Sirota V.A., Multifractal structure of fully developed turbulence, Physical Review E, vol. 88, id. 043017 (2013)
8. Gurevich A.V. et al., Correlation of Radio and Gamma Emissions in Lightning Initiation, Physical Review Letters, vol. 111, id. 165001 (2013)
9. Zybin K.P., Sirota V.A., Multifractal structure of fully developed turbulence, Physical Review E, vol. 88, id. 043017 (2013)
10. Il'yn, A. S.; Sirota, V. A.; Zybin, K. P., Statistical Properties of the T-Exponential of Isotropically Distributed Random Matrices,

Journal of Statistical Physics, Volume 163, pp.765-783 (2016)

11. К.П. Зыбин, А.С. Ильин, Свойства турбулентности, возникающей под воздействием внешней случайной силы в модели Бюргерса, УФН 186, 1349–1353 (2016)