

ОТЗЫВ

официального оппонента Дворникова Максима Сергеевича на диссертацию Дмитриева Антона Сергеевича «Динамика Бозе-звезд из аксионов темной материи», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3 – «Теоретическая физика».

Диссертационная работа А.С. Дмитриева посвящена изучению процессов образования и эволюции конденсата Бозе-Эйнштейна состоящего из аксионов темной материи, также называемого Бозе-звездами. Работу можно разделить на две части. Первая посвящена исследованию Бозе-звезд с ненулевым угловым моментом. Во второй части работы обсуждается образование и рост Бозе-звезд, окруженных облаком аксионов. Особое внимание в диссертации уделено исследованию кинетической эволюции Бозе-газа, состоящего из аксионов, взаимодействующего за счет гравитационного рассеяния.

Актуальность и значимость проведенных исследований обусловлены необходимостью объяснить отсутствие вращающихся Бозе-звезд в данных крупномасштабных численных симуляций, а с другой стороны найти закон роста массы образующихся Бозе-звезд с целью получения предсказаний о их массах и распространенности в современной Вселенной. Ответы на эти вопросы стали бы важным шагом в разработке стратегий поиска таких объектов.

Практическая значимость работы. В результате выполнения работы Антоном Дмитриевым было показано, что Бозе-звезды с ненулевым угловым моментом, состоящие из аксионов темной материи, являются нестабильными. Это было доказано как с помощью запрещающей теоремы, так и продемонстрировано численно. Применение разработанного в диссертации адиабатического кинетического подхода к росту Бозе-звезд из аксионов темной материи позволило получить эвристический закон, объясняющий результаты численного моделирования.

Диссертация Антона Дмитриева состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы из 150 наименований и двух приложений. Объем диссертации составляет 122 страницы. Диссертация включает 34 иллюстрации.

Введение посвящено обоснованию актуальности диссертации, перечисляются цели, научная новизна, теоретическая и практическая значимость проведенных исследований, сформулированы выносимые на защиту положения. Там же приводится обзор моделей, в которых предсказывается возникновение Бозе-звезд.

В первой главе аналитически доказана теорема о нестабильности Бозе-звезд, обладающих ненулевым угловым моментом, в случаях притягивающего или отсутствующего короткодействующего самодействия. Полученные аналитические результаты согласуются с результатами численного моделирования. Показано, что времена жизни вращающихся Бозе-звезд всегда сравнимы с обратными энергиями связи, что говорит о том, что такие объекты не могут считаться квазистационарными. Однако при отталкивающем самодействии Бозе-звезда с угловым моментом $l=1$ может быть стабилизирована. Тем самым А.С. Дмитриев показал, что в современной Вселенной Бозе-звезды в большинстве моделей не могут обладать ненулевым угловым моментом, а могут существовать только как сферически-симметричные конфигурации конденсата Бозе-Эйнштейна.

Во второй главе изучается кинетическое уравнение Больцмана, которое описывает

ансамбль гравитационно взаимодействующих аксионов темной материи. Частицы в ансамбле могут взаимодействовать с Бозе-звездой, этот факт учитывается автором с помощью поглощающего граничного условия и добавления внешнего источника частиц. А кинетика аксионов, составляющих ансамбль, описывается интегралом столкновений в приближении Л.Д. Ландау. Уравнение Больцмана сохраняет свой вид при двухпараметрическом масштабировании. Автор установил, что если выбрать источник, обладающий такой же инвариантностью, то существует целое семейство автомодельных решений, зависящих от двух параметров. Численные расчеты подтверждают, что эти решения играют роль аттракторов в кинетической эволюции: каким бы ни было начальное распределение, со временем функция распределения стремится к автомодельной эволюции. Кроме того, А.С. Дмитриев показал: даже если источник явно нарушает масштабную инвариантность, система приходит к режиму адиабатической автомодельности. В этом случае функция распределения в каждый момент времени близка к автомодельному решению, однако параметры самой автомодельности медленно изменяются во времени.

В третьей главе А.С. Дмитриев приводит результаты численного моделирования системы уравнений Шредингера-Пуассона, в результате которого образуется Бозе-звезда. На основе численного моделирования автор подтверждает приближенно автомодельный характер эволюции функции распределения, что служит обоснованием для применения метода адиабатической автомодельности, изложенного во второй главе. Используя законы сохранения и уравнение состояния, которое связывает массу и энергию Бозе-звезды, автор выводит аналитическую зависимость для роста ее массы. Полученное соотношение позволяет оценить массы Бозе-звезд в современной Вселенной: наиболее плотные миникластеры, состоящие из аксионов КХД, к настоящему времени должны быть в значительной степени поглощены Бозе-звездами, тогда как Бозе-звезды в галактиках, сформированные из ультралегкой темной материи, находятся лишь на начальной стадии роста.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

Приложения содержат детали численных и аналитических вычислений проводимых в работе.

По представленной диссертационной работе можно сделать следующие **замечания**:

1. В первой главе диссертации исследуется устойчивость вращающихся Бозе-звезд. Получено, что такая Бозе-звезда в большинстве случаев является неустойчивой. Однако, в диссертации обходится вопрос о возможности образования вращающихся Бозе-звезд, что само по себе является неочевидной проблемой. Таким образом, в диссертации изучается сущность, которая, возможно, в принципе и возникнуть не может. Это является **недостатком** работы.

2. В главах 2 и 3 диссертации изучается динамика образования Бозе-звезды из кластера скалярных частиц. Однако, в любой реальной ситуации кластер из частиц темной материи не является изолированным объектом. Он окружен барионным веществом с тем или иным пространственным распределением, которое неизбежно будет гравитационно влиять на образующуюся Бозе-звезду. Отсутствие рассмотрения данного процесса является **недостатком** работы.

3. В диссертации встречаются опечатки. Например, на стр. 18: «привпедет к величению энергии». Кроме того, во многих местах текста используется сокращение «ур.» вместо «уравнение», что допустимо для конспекта, но не для рукописи, которой является диссертация. Помимо этого, отмечу ряд жаргонных выражений типа «в

двумерных терминах» и «экстремизируем энергию» на стр. 38. Это также является **недостатками** диссертации.

Тем не менее, приведенные выше замечания ни в коей мере не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация выполнена на высоком научном уровне, отвечает требованиям к диссертационным работам, установленным ВАК. Все полученные диссертантом результаты являются новыми. Обоснованность и достоверность результатов не вызывают сомнений. Список цитированной литературы соответствует теме исследования. Апробацией результатов служат 4 доклада, сделанных на международных и российских конференциях и семинарах. По теме диссертации опубликовано 3 работы в рецензируемых высокорейтинговых научных журналах, входящих в список ВАК. Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.3 — «теоретическая физика». **Автореферат правильно и полно отражает** содержание диссертации.

Диссертация А.С. Дмитриева «Динамика Бозе-звезд из аксионов темной материи», удовлетворяет всем критериям «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Антон Сергеевич Дмитриев, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3. – Теоретическая физика.

19.05.2026 г.

Официальный оппонент

доктор физико-математических наук,

и.о. заведующего теоретическим отделом,

ведущий научный сотрудник

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения

радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН)

/ М.С. Дворников /

maxdvo@izmiran.ru,

+7 (495) 851-0290

108840, город Москва, город Троицк,

ул. Калужское ш., д. 4

ИЗМИРАН

Подпись М.С. Дворникова заверяю:

ученый секретарь ИЗМИРАН

кандидат физ.мат. наук

/ А.И Рез /

Сведения об официальном оппоненте

Дворников Максим Сергеевич

Доктор физико-математических наук по специальности 1.3.3 – теоретическая физика.

тел. +7 (495) 851-0290, адрес электронной почты: maxdvo@izmiran.ru

Место работы: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН), теоретический отдел, и.о. заведующего теоретическим отделом, ведущий научный сотрудник.

Список основных публикаций по теме рецензируемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. P. M. Akhmetiev, **M. S. Dvornikov**. Evolution of mirror axion solitons //Theoretical and Mathematical Physics. – 2025. – Т. 225. – №. 2. – С. 2017-2029.
2. P. M. Akhmetiev, **M. S. Dvornikov**. Magnetic fields in inhomogeneous axion stars //International Journal of Modern Physics D. – 2024. – Т. 33. – №. 02. – С. 2450001.
3. P. M. Akhmetiev, **M. S. Dvornikov**. Evolution of the magnetic field in spatially inhomogeneous axion structures //Theoretical and Mathematical Physics. – 2024. – Т. 218. – №. 3. – С. 515-529.
4. **M. S. Dvornikov**. Thin layer axion dynamo //The European Physical Journal C. – 2024. – Т. 84. – №. 9. – С. 892.
5. **M. S. Dvornikov**. Interaction of inhomogeneous axions with magnetic fields in the early universe //Physics Letters B. – 2022. – Т. 829. – С. 137039.
6. **Dvornikov M. S.** Neutrino Cluster Cooling by Cherenkov Plasmon Emission //Physics of Particles and Nuclei. – 2025. – Т. 56. – №. 2. – С. 472-477.
7. **Dvornikov M.** Magnetic helicity in rotating neutron stars //Helicities in Geophysics, Astrophysics and Beyond. – 2023. – С. 117-132.
8. **Dvornikov M.** Scattering of neutrinos by a rotating black hole accounting for the electroweak interaction with an accretion disk //International Journal of Modern Physics D. – 2024. – Т. 33. – №. 14. – С. 2340001.
9. **Dvornikov M.** Gravitational scattering of spinning neutrinos by a rotating black hole with a slim magnetized accretion disk //Classical and Quantum Gravity. – 2023. – Т. 40. – №. 1. – С. 015002.