

Отзыв официального оппонента Иванчика А.В.  
на диссертационную работу  
**Дмитриева Антона Сергеевича**  
**«Динамика Бозе-звезд**  
**из аксионов темной материи»,**  
представленную на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук  
по специальности 1.3.3 – теоретическая физика

Наблюдаемое отсутствие нарушения CP-инвариантности в квантовой хромодинамике (КХД), при естественном наличии в КХД-лагранжиане членов, порождающих такое нарушение, привело к формулировке так называемой сильной CP-проблемы. Наиболее вероятное решение этой проблемы предполагает существование новой элементарной частицы – псевдо-голдстоуновского бозона, аксиона. Свойства этой частицы таковы, что она является одним из возможных кандидатов в частицы, составляющие темную материю, тем самым определяющую эволюцию Вселенной на материально-доминированной стадии расширения и формирование крупномасштабной структуры Вселенной. Интересным дополнительным астрофизическим проявлением аксионов, является возможность их Бозе-конденсации с формированием гравитационно-связанных Бозе-«звезд». Теоретические исследования таких объектов, поиск их возможных наблюдательных проявления являются важными аспектами для развития астрофизики, космологии и физики элементарных частиц, что и определяет **актуальность** диссертационной работы.

Представленная диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и двух приложений. **Во введении**, описаны цели работы и ее актуальность, основные положения, выносимые на защиту, список публикаций по теме диссертации.

**Первая глава** посвящена рассмотрению Бозе-звезды из аксионов темной материи с ненулевым угловым моментом. Для случая пренебрежимо малого самодействия вычисляются их профили и определяется энергия конфигураций для различных угловых моментов. Доказывается теорема о нестабильности вращающихся Бозе-звезд в случае малого или притягивающего самодействия. Численно иллюстрируется распад звезды с  $l = 1$ . Приводятся вычисления мод неустойчивости всех вращающихся объектов. Обсуждаются возможные обобщения результатов.

**Глава 2** посвящена изучению автомодельной гравитационной кинетики процесса образования конденсата Бозе-Эйнштейна. Вводится упрощенное кинетическое уравнение для гравитационного рассеяния и обсуждается его масштабная симметрия. Приводится численный пример кинетической эволюции функции распределения, приближающейся к автомодельному аттрактору. Рассматриваются стационарные степенные каскады в гравитационной кинетике. Изучаются скейлинговые (перемасштабированные) решения. Описывается явление адиабатической автомодельности.

**В главе 3** решается задача роста Бозе-звезд в ансамбле гравитационно-взаимодействующих аксионов темной материи. Реализуется обобщение метода, разработанного в главе 2 и решается задача о росте аксионных звезд. Далее обсуждаются изменения закона роста, связанные с наличием ненулевого, но малого самодействия.

**В заключении** приводятся основные результаты работы.

Численные методы и ряд аналитических вычислений вынесены **в приложения**.

В результате выполнения диссертационной работы были получены **новые и важные** научные результаты.

1. Доказана теорема о неустойчивости вращающихся Бозе-звезд из аксионов темной материи — аксиально-симметричных решений системы уравнений Гросса–Питаевского и Пуассона. Проведено полное численное моделирование, демонстрирующее процесс разрушения вращающейся Бозе-звезды с угловым моментом, равным единичному кванту. Показано, что Бозе-звезды с угловым моментом, равным единичному кванту, стабильны при достаточно сильном отталкивающем самодействии между аксионами.
2. На основе кинетического уравнения Больцмана построена модель однородного ансамбля гравитационно-взаимодействующих аксионов темной материи. Модель описывает обмен частицами с «внешней средой», в частности, с Бозе-звездой, помещенной в ансамбль, с помощью поглощающего граничного условия при низких энергиях, обеспечивающего уход частиц из системы, и внешнего источника, пополняющего ансамбль новыми частицами.

3. Показано, что эволюция функции распределения частиц ансамбля по энергии в построенной модели под действием источника, не инвариантного относительно масштабных преобразований, происходит приближенно автомодельно.
4. Проведено масштабное численное моделирование эволюции ансамбля гравитационно взаимодействующих аксионов, содержащего Бозе-звезду. Показано, что зависимость функции распределения частиц в ансамбле от времени является приближенно автомодельной. Данная зависимость подтверждена прямым сравнением с эволюцией функции распределения в модели, построенной на основе уравнения Больцмана. Этот факт позволил определить закон роста массы Бозе-звезды со временем.

Полученные результаты значимо развивают наши представления о формировании гравитационных структур из аксионов, в особенности результат о нестабильности вращающихся аксионных Бозе-звезд.

Научные положения, выносимые на защиту, представляются вполне **обоснованными**. Достоверность результатов обусловлена понятными теоретическими методами и подходами, использовавшимися при их получении.

Автореферат полностью отражает содержание и структуру диссертации.

Диссертационная работа носит ярко выраженный теоретический характер, поэтому естественно возникает множество вопросов, связанных с диапазонами конкретных физических параметров, исследуемых в диссертации объектов и о практической применимости полученных результатов.

(i) Так хотелось бы более четко понимать характерные диапазоны размеров и масс Бозе-звезд и степень их устойчивости при различных взаимодействиях с реальным астрофизическим окружением галактики.

(ii) Например, какова их гравитационная устойчивость в различных гравитационных полях, создаваемых компактными молекулярными облаками, звездами главной последовательности, компактными звездами (белые карлики или нейтронные звезды) или черными дырами.

(iii) Вторым примером взаимодействия Бозе-звезд с сильными магнитными полями магнитных звезд, белых карликов, нейтронных звезд и магнетаров, которое будет вызывать их более сильное (в сравнении с «неконденсатными» аксионами темной материи) свечение в результате конверсии аксионов в фотоны.

Знание характерных параметров аксионных Бозе-звезд как раз и позволило бы оценить на сколько эти эффекты значимы.

Следующий вопрос относится к результатам второй и третьей главы, они получены в приближении изотропного падения частиц, которое определяется лишь их энергией. Но во Вселенной мало (практически нет) невращающихся объектов или объектов с нулевым прицельным параметром (исключением могут стать Бозе-звезды из главы 1). Это означает что в реальности падающие частицы будут передавать ненулевой момент Бозе-звезде, а из главы 1 диссертации мы знаем, что она его будет сбрасывать, т.е. суммарно в среде с ненулевым моментом импульса по отношению к Бозе-звезде, ее рост массы будет насколько-то заторможен по сравнению с рассматриваемым случаем.

В главе 3 численное моделирование демонстрирует возникновение и эволюцию лишь одной Бозе-звезды, в то время гравитационная неустойчивость зачастую демонстрирует эффекты фрагментации, когда большие гравитационно-связанные масштабы дробятся на более мелкие. Было бы желательно более детальное пояснение, полученного результата.

Так же имеется ряд стилистических замечаний.

1. Формулировка целей работы на стр. 11 составлена так, что из нее уже видно, что тот, кто ставит цели исследования уже знает точный ответ.
2. На странице 22 имеется загадочное утверждение «Скорее, они являются седловыми точками энергии, которые могут быть разрушены сколь угодно малым возмущением, растущим экспоненциально со временем».
3. Впечатляющая фраза на стр. 82 «Заметим, что последние могут приводить к «впечатляющим» наблюдательным эффектам, см., например, [53, 128, 145, 146].» - содержит орфографическую ошибку и сильно интригует.
4. Внимательно прочитав диссертацию, оппонент отдает должное предвидению диссертанта, который на стр. 85 уже благодарит оппонентов за внимательное прочтение диссертации.

Приведенные замечания не в коей мере не умаляют научную значимость полученных результатов поэтому считаю, что диссертационная работа **Дмитриева Антона Сергеевича** «Динамика Бозе-звезд из аксионов темной материи», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3 — теоретическая физика, полностью соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года No 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор безусловно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент:

Заведующий сектором теоретической астрофизики

Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе,

доктор физико-математических наук,

член-корреспондент РАН

Иванчик А.В.

E-mail: iav@astro.ioffe.ru

14 мая 2026 г.

194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26

ФГБУН Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе

Российской академии наук

Телефон: (812) 297-2245

E-mail: post@mail.ioffe.ru

Подпись Иванчика А.В. удостоверяю  
зам.зав.отделом кадров ФТИ им. А.Ф. Иоффе  
\_\_\_\_\_ / Н.С. Буценко

Сведения об официальном оппоненте

**Иванчик Александр Владимирович**

Доктор физико-математических наук по специальности 01.03.02 — астрофизика и звездная астрономия, профессор, член-корреспондент РАН.

Место работы: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук (ФТИ им. А.Ф. Иоффе), отделение физики плазмы, атомной физики и астрофизики, ведущий научный сотрудник.

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

1. Prokhorenko S., Sazonov S., Gilfanov V., Balashev S., Meshcheryakov A., **Ivanchik A.**, Bikmaev I., Sunyaev R. SRG/eROSITA-SDSS view on the relation between X-ray and UV emission for quasars //Journal of High Energy Astrophysics. – 2026. – Т. 53. – №. 9. – С.100611.
2. Kurichin O. A., **Ivanchik A. V.** Improved radiative transfer corrections in helium emission lines. //Physical Review D.– 2026. – Т. 113. – №. 4. – С. 043012-1-20.
3. **Ivanchik A. V.**, Kurichin O. A., Yurchenko V. Y. Cosmological Neutrinos and Their Influence on the Evolution of the Universe //Radiophysics and Quantum Electronics. – 2024. – Т. 66. – №. 9. – С. 639-649.
4. Lysyy Y. A., Kislitsyn P. A., **Ivanchik A. V.** Low-energy neutrino emission from primordial black holes: A new possibility of observing Hawking radiation //Astronomy Letters. – 2024. – Т. 50. – №. 11. – С. 649-656.
5. A.N. Popov, D.P. Barsukov, **A.V. Ivanchik**, S.V. Bobashev. Positron Production Due to Interaction of Cosmological Background Photons //Technical Physics. – 2024. – Т. 69. – №. 6. – С. 1727-1729.
6. **Ivanchik A. V.**, Kurichin O. A., Yurchenko V. Y. Neutrino at different epochs of the Friedmann Universe //Universe. – 2024. – Т. 10. – №. 4. – С. 169.
7. Kurichin O. A., **Ivanchik A. V.** An Improved Photoionization Model for Analysis of H II Region Spectra for the Determination of Primordial He Abundance //Astronomy Letters. – 2024. – Т. 50. – №. 12. – С. 807-820.

8. Chernikov P. A., **Ivanchik A. V.** The influence of the effective number of active and sterile neutrinos on the determination of the values of cosmological parameters //Astronomy Letters. – 2022. – T. 48. – №. 12. – C. 689-701
9. P.A. Kislitsyn, S.A. Balashev, M.T. Murphy, C. Ledoux, P. Noterdaeme, **A.V. Ivanchik.** A new precise determination of the primordial abundance of deuterium: measurement in the metal-poor sub-DLA system at  $z= 3.42$  towards quasar J 1332+ 0052 //Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2024. – T. 528. – №. 3. – C. 4068-4081.