

На правах рукописи

Дмитриев Антон Сергеевич

**Динамика Бозе-звезд из аксионов
темной материи**

1.3.3 — Теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН)

Научный руководитель:

Панин Александр Григорьевич, кандидат физико-математических наук, заместитель директора по научной работе, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук.

Официальные оппоненты:

Дворников Максим Сергеевич, доктор физико-математических наук, 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.

Иванчик Александр Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН, 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.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Математический институт имени В.А. Стеклова Российской академии наук (МИАН), отдел теоретической физики.

Защита диссертации состоится _____ в _____ часов на заседании диссертационного совета 24.1.163.01 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН) по адресу: 117312, Москва, проспект 60-летия Октября, д. 7а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯИ РАН и на сайте www.inr.ru

Автореферат разослан _____

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.163.01,
кандидат физико-математических наук

Демидов Сергей Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Природа темной материи остается одной из ключевых загадок фундаментальной физики. Известно, что она обнаруживает себя исключительно через гравитационное воздействие, а данные, указывающие на ее негравитационные свойства, пока не нашли достаточного подтверждения. Тем не менее, гравитационные эффекты позволяют косвенно изучать ее пространственное распределение, что дает потенциальную возможность получить ответ на вопрос, сконцентрирована ли темная материя в компактные структуры или распределена в галактике относительно равномерно. Таким образом, исследование «темных объектов» (сгустков темной материи) и их свойств, а также возможности их обнаружения астрономическими методами, представляет собой возможный путь проверки конкретных теоретических моделей.

Одним из перспективных кандидатов на роль темной материи Вселенной, предсказывающих формирование «темных объектов», является аксион. Аксион впервые был введен в модели, предложенной Роберто Печчеи и Хелен Куинн в 1977 году [1], для объяснения отсутствия CP-нарушающей фазы $\bar{\theta}$ в секторе сильного взаимодействия Стандартной модели. Суть их подхода заключалась в том, чтобы перейти от представления CP-нарушающей фазы $\bar{\theta}$ как фиксированного параметра Стандартной модели к ее описанию в виде динамической переменной. На практике это означает добавление нового поля - поля аксиона, которое связывается с сильным ядерным взаимодействием так же, как CP-нарушающая фаза $\bar{\theta}$. Введенное аксионное поле релаксирует к значению, при котором параметр $\bar{\theta}$ обращается в ноль. Это, в свою очередь, приводит к исчезновению электрического дипольного момента нейтрона, что согласуется с экспериментальными ограничениями.

Чтобы добавить аксион в Стандартную модель, мы вводим новую симметрию, называемую симметрией Печчеи-Куинн (PQ) [1], которая является глобальной $U(1)_{PQ}$ симметрией. Введение симметрии PQ как правило требует добавления нового бозонного поля помимо единственного бозона Хиггса Стандартной модели. Потенциал для этого поля выбирается так, что симметрия оказывается спонтанно-нарушенной. Обозначим f_a - вакуумное среднее поля, при котором происходит нарушение симметрии. Как известно, результатом спонтанного нарушения является появление безмассовой частицы - Намбу-Голдстоуновского бозона [2, 3] - в спектре возмущений над вакуумом. Аксионом называется Намбу-Голдстоуновский бозон, соответствующий спонтанно нарушенной симметрии Печчеи-Куинн [1]. Он представлен полем a , которое пропорционально фазе $\bar{\theta}$ сильной CP проблемы, делая угол динамическим, а не фиксированной и загадочной константой.

Важно отметить, что симметрия Печчеи-Куинн является точной только на классическом уровне, в то время как на квантовом уровне эта симметрия является явно нарушенной. В этом случае поле аксиона будет иметь массу, то есть следует говорить о псевдо-Намбу-Голдстоуновском бозоне. Масса может быть вычислена, с одной стороны, с помощью учета инстантонных поправок, а с другой стороны, за счет взаимодействия поля аксиона с другими полями Стандартной модели. Эти взаимодействия малы, поскольку они оказываются подавлены за счет большого энергетического масштаба симметрии Печчеи-Куинн f_a .

На энергетическом масштабе КХД можно определить массу аксиона при нулевой температуре в терминах хорошо понятной физики сильного ядерного взаимодействия, рассматривая смешивание аксиона с нейтральным пионом - связанным состоянием кварков с теми же квантовыми числами, что и аксион. Взаимодействия аксиона с

нейтральным пионом приводят к появлению небольшой массы для аксиона. При этом масса аксиона дается следующим соотношением:

$$m_a f_a \sim m_\pi f_\pi,$$

где m_π - масса пиона, а f_π - константа, которая известна из скорости распада пиона посредством слабого взаимодействия. Обсуждаемое выше смешивание, приводит к эффективному потенциалу аксиона:

$$V(a) \approx -\Lambda_{\text{QCD}}^4 \cos\left(\frac{a}{f_a} + \bar{\theta}\right),$$

где $\Lambda_{\text{QCD}} \approx 200$ МэВ. Таким образом, можно вычислить массу аксиона:

$$m_a \approx (5.70 \pm 0.007) 10^{-6} \text{ЭВ} \left(\frac{10^{12} \text{ГэВ}}{f_a}\right),$$

где ошибка включает экспериментальные и теоретические вклады, появляющиеся в подробном расчете аксион-пионного смешивания [4].

Гипотеза о том, что аксионы могут составлять темную материю, приводит к интересным следствиям. Чтобы аксионы обеспечивали наблюдаемую плотность темной материи, их масса должна быть исключительно мала. Однако из-за этой малой массы их общее количество должно быть колоссальным. В результате каждое квантовое состояние заполняется огромным числом аксионов, что приводит к экстремально высокой фазовой плотности. Такая ситуация позволяет описывать аксионную темную материю не как совокупность отдельных частиц, а как классическое скалярное поле $a(x, t)$. На космологических масштабах аксионное поле можно считать пространственно однородным. Оно совершает гармонические колебания с частотой, равной массе аксиона m_a , а его амплитуда уменьшается из-за космологического расширения: $a(t) \approx a_0 \cos(m_a t)/R(t)^{3/2}$. Здесь $R(t)$ - масштабный фактор, а константа a_0 фиксируется начальными условиями на ранних этапах эволюции поля. Плотность

энергии аксионной материи принимает вид: $\rho \approx m_a^2 a_0^2 / R(t)^3$. Это соотношение отражает характерное для нерелятивистской материи поведение $\rho \propto 1/R^3$, что согласуется с ролью аксионов как кандидатов в холодную темную материю.

Ключевым фактором, определяющим дальнейшую эволюцию аксионного поля, является момент нарушения симметрии Печчеи–Квинн (PQ) по отношению к окончанию инфляции. Если нарушение PQ-симметрии происходит до завершения инфляции (и сохраняется нарушенным в последующую эпоху), то квантовые флуктуации аксионного поля генерируют возмущения постоянной кривизны (isocurvature), которые в зависимости от соотношения между f_a и параметром Хаббла на инфляции, накладывают жесткие ограничения на параметры аксионных моделей [5, 6, 7].

Другой сценарий предполагает, что нарушение PQ-симметрии происходит после завершения космологической инфляции в ходе высокотемпературного фазового перехода при $T_c \sim f_a$. В результате фаза комплексного поля Печчеи–Квинн приобретает случайные значения от $-\pi$ до π в причинно-несвязанных пространственных областях, что приводит к пространственной неоднородности аксионного поля на размере горизонта.

При таких температурах эффективный потенциал аксиона пренебрежимо мал, так что аксион можно считать безмассовым. Благодаря свободному распространению (free-streaming) релятивистских возмущений поля, начальные пространственные неоднородности эффективно сглаживаются в пределах текущего горизонта.

Эффективность подавления неоднородностей внутри горизонта резко снижается с возникновением массы аксиона m_a в эпоху КХД-фазового перехода при $T \sim 1 - 2$ ГэВ. В результате аксионное поле остается неоднородным с характерным размером неоднородностей, определяемым размером горизонта в эту эпоху, а масса неоднород-

ности определяется массой внутри горизонта [8].

Помимо рассмотренного механизма, аксионная темная материя может эффективно рождаться при распаде топологических дефектов. Ключевую роль здесь играют аксионные струны, возникающие при нарушении PQ-симметрии через механизм Киббла [9]. Эволюционируя до КХД-фазового перехода, такие струны пересекаются, формируя петли. Последующий распад этих петель служит мощным источником аксионов [10, 11].

В эпоху фазового перехода КХД аксионное поле приобретает потенциал, явно нарушающий $U(1)_{PQ}$ -симметрию. При охлаждении Вселенной поле аксиона релаксирует к одному из минимумов потенциала. В каждой причинно-несвязанной области минимум выбирается случайно, поэтому спустя несколько хаббловских времен, когда множество областей вновь оказывается внутри горизонта, формируются доменные стенки — конфигурации поля, плавно интерполирующие между соседними вакуумами. Границами этих стенок выступают космические струны, которые довольно быстро их дестабилизируют, разрывая на компактные фрагменты. Распад образовавшейся сети топологических дефектов сопровождается интенсивным излучением аксионов. В спектре излучения присутствует нерелятивистская компонента, вносящая дополнительный вклад в плотность холодной темной материи.

Результаты численного моделирования динамики аксионного поля в эпоху КХД фазового перехода показали, что сложная нелинейная динамика, описанная выше, приводит к усилению неоднородностей аксионного поля. Вследствие этого формируются области, где контраст плотности массы существенно превышает единицу. При переходе от радиационно-доминированной к материально-доминированной стадии эти области становятся гравитационно-связанными, образуя сверхплотные миникластеры. Их характерная мас-

са, определяемая полной массой аксионов в хаббловском объеме при температуре $T = 1$ ГэВ, составляет $\sim 10^{-12}$ солнечных масс, а характерный размер — около 10^{12} см.

Для эффективного экспериментального поиска аксионов критически важно определить диапазон их возможных масс. Масса определяет характерную частоту спектра электромагнитного излучения, генерируемого при взаимодействии аксионов с внешними электромагнитными полями (например, в сильных магнитных полях, согласно эффекту Примакова). Точные оценки массового диапазона позволяют оптимизировать параметры детекторов, настраивая их на резонансные частоты, соответствующие ожидаемым сигналам, что повышает шансы регистрации этих слабовзаимодействующих частиц.

В сценариях, где нарушение PQ-симметрии происходит до инфляции, роль темной материи могут играть аксионы с минимально возможной массой (так называемая *ultralight* или *fuzzy* темная материя). Они эффективно генерируются на стадии инфляции. Чрезвычайно малая масса частиц приводит к тому, что их длина волны де Бройля сравнивается с космологическими масштабами. Это, в свою очередь, препятствует гравитационному коллапсу вещества на малых масштабах и подавляет формирование мелкомасштабных структур (таких как карликовые галактики) в ранней Вселенной. Консервативные ограничения на массу аксиона в этом сценарии составляют $m_a \geq 10^{-22}$ эВ, так что длина волны сравнивается с размером карликовых галактик. Однако анализ наблюдательных данных, в частности, по внутренней динамике ультратусклых карликовых галактик [12] и спектрам Лайман-альфа леса [13], позволяет усилить эти ограничения на два порядка величины. Этот предел также применяется к другим формам бозонной темной материи, и является фундаментальным нижним пределом массы частицы темной материи. В противном случае аксионы могут составлять долю от общей

плотности темной материи на уровне 2% [14].

Верхнее ограничение на массу КХД аксиона может быть получено, используя связь между массой и константой взаимодействия частицы с ядерной материей, и следует из данных наблюдений сверхновой SN1987A [15]. Аксион-нуклонное взаимодействие приводит к излучению аксионов нейтронами и протонами внутри коллапсирующего ядра сверхновой. Произведенные аксионы взаимодействуют очень слабо с окружающей ядерной материей и поэтому могут покидать ядро сверхновой, приводя к избыточному охлаждению по сравнению со случаем без аксионов. Это сокращает длительность фазы нейтринного излучения, поскольку часть энергии, которая в стандартной модели уносится нейтрино, перераспределяется на аксионное излучение. В то же время нейтринная вспышка сверхновой SN1987A была зарегистрирована в детекторах на Земле. Ее продолжительность согласуется с предсказаниями стандартных моделей сверхновых. Таким образом, скорость производства аксионов должна быть низкой, что приводит к верхнему ограничению на аксион-нуклонную константу взаимодействия g_{aNN} , и, таким образом, к верхнему ограничению на m_a , которое составляет $m_a \lesssim 2 \times 10^{-2}$ эВ.

Вычисление массы аксиона как частицы темной материи в сценарии, в котором PQ-симметрия нарушается после инфляции, сталкивается со сложностями. Современные вычислительные мощности, включая суперкомпьютеры, не позволяют провести полное моделирование процесса из-за колоссального разрыва в масштабах: несоизмеримость размеров струн и длин волн аксионов делает их совместное моделирование на одной сетке невозможным. Как следствие, оценки массы широко варьируются в зависимости от применяемых упрощенных методов и находятся в диапазоне $2.5 \cdot 10^{-5}$ эВ $\lesssim m_a \lesssim 0.5 \cdot 10^{-3}$ эВ [16, 17].

На поздних временах градиенты поля малы, и аксион описы-

ваются уравнениями Гросса-Питаевского-Пуассона. Эти уравнения возникают как нерелятивистский предел уравнения Клейна-Гордона для поля аксиона в режиме линейной гравитации, в соответствии с подстановкой, $a = \sqrt{2/m_a}(\psi e^{im_a t} + \psi^* e^{-im_a t})$. «Волновая функция» ψ подчиняется системе:

$$i \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\nabla^2 \psi}{2m_a} + \frac{\lambda_a}{8m_a^2} |\psi|^2 \psi + m_a U \psi,$$

$$\nabla^2 U = 4\pi G m_a |\psi|^2,$$

где $\lambda_a = -m_a^2/f_a^2$ - безразмерная константа самодействия аксиона, принимающая значение $\lambda_a \sim -10^{-48}$ для аксионов КХД ($\lambda_a \sim -10^{-100}$ для «fuzzy» темной материи). Плотность массы аксионов в ведущем порядке равна $m_a |\psi|^2$. Переход к этой системе уравнений существенно упрощает моделирования на поздних временах.

Моделирования миникластеров, описываемых системой уравнений Гросса-Питаевского и Пуассона, показывают [18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28], что в них образуются аксионные звезды (Бозе-звезды) [29, 30] — гравитационно-связанные капли Бозе-Эйнштейновского конденсата астероидной массы [8, 31, 32, 33, 34, 35]. Бозе-звезды являются самогравитирующей системой аксионов, подчиняющейся уравнениям Гросса-Питаевского-Пуассона в основном состоянии потенциала, который создается Бозе-звездой. Образование таких объектов происходит благодаря тому, что фазовая плотность миникластеров настолько велика [36], что в них может произойти термализация посредством универсальных гравитационных взаимодействий [22]. Это приводит к образованию Бозе-звезды в центре каждой такой структуры [18, 22, 26]. В зависимости от модели аксиона, а также от начального размера и массы миникластера, время образования Бозе-звезды может варьироваться от нескольких часов до времени жизни Вселенной. Таким образом, сегодня Вселенная должна быть заполнена аксионными звездами. В результате, часть темной

материи может быть скрыта от наблюдений Бозе-звездами [37].

Более того, достигнув большой массы, Бозе-звезды могут взрываться с образованием релятивистских аксионов [38] благодаря наличию притягивающего самодействия или излучать радиофотоны с помощью параметрического резонанса [30], что, в свою очередь, в зависимости от удаленности источника может объяснять быстрые радио всплески (FRB) [39] и аномалии ARCADE 2 и EDGES [40].

Вызывает удивление то, что ни одно из существующих моделирования не показывает образование Бозе-звезд с ненулевым угловым моментом, даже если с самого начала присутствовала сильная сферическая асимметрия. Встречается множество работ, в которых численно наблюдается формирование Бозе-звезд с нулевым полным угловым моментом [41, 18, 22, 26, 42], их столкновения [19], слияния [43, 44, 45] или приливное разрушение [46, 47]. В конце моделирования они сильно осциллируют [23, 12, 48], совершают случайные блуждания [49, 48], частично или полностью разрушаются [19, 47], но никогда не приобретают ненулевой угловой момент.

Несмотря на такие результаты численного моделирования, сами по себе вращающиеся Бозе-звезды, если они стабильны, будут важны для астрофизики и космологии. Их центробежные барьеры могут сопротивляться коллапсам чрезмерно массивных звезд из-за притягивающего самодействия бозонов [50, 51, 38]. Это означает, в частности, что быстровращающиеся аксионные звезды КХД могут достигать больших масс и плотностей [52], которых, возможно, будет достаточно для возникновения наблюдаемого параметрического радиоизлучения [30, 52, 53, 45]. Кроме того, угловые моменты Бозе-звезд в принципе обнаружимы: непосредственно, путем наблюдения гравитационных волн от их слияний [54, 55, 56] или косвенно, если они коллапсируют во вращающиеся черные дыры [57, 29], которые сливаются и испускают гравитационные волны.

Результаты моделирования образования космических структур и миникластеров темной материи [18, 19, 20, 21, 23, 24, 25, 26, 27, 28] указывают, что массы Бозе-звезд M_{bs} растут на временных масштабах, которые определяются релаксационным временем (временем образования Бозе-звезды), но затем темп их роста замедляется почти до полной остановки [18, 19, 20]. Результаты численного моделирования в контролируемых условиях (ящики с периодическими граничными условиями, рукотворные миникластеры) — хотя и свидетельствуют о медленном росте Бозе-звезд в поздние эпохи, приводят к разным законам, описывающим этот процесс: $M_{bs} \propto t^{1/2}$ в [22], $t^{1/4}$ в [58] и $t^{1/8}$ в работах [26, 42]. Изучение этой несогласованности в результатах позволит получить правильный закон роста для звезд из аксионов темной материи, который поможет раскрыть распределение этих объектов в современной Вселенной (см. также [59, 60, 61]), таким образом открывая новые пути для обнаружения (или ограничений) ультралегкой и аксионной темной материи.

На протяжении всей работы будет использоваться система единиц $\hbar = c = 1$.

Цели и задачи диссертации

Целью данной работы является изучение динамики гравитационно-связанного конденсата Бозе-Эйнштейна, состоящего из аксионов темной материи. Для этого необходимо решить следующие **задачи**:

- Получить решения, описывающие конденсат Бозе-Эйнштейна, состоящий из аксионов темной материи (Бозе-звезды) с ненулевым угловым моментом, как в случае отсутствующего короткодействующего самодействия, так и при его наличии, а также исследовать эти решения на стабильность. Определить, каким образом эти состояния разрушаются, и можно ли их стабилизировать с помощью самодействия.

- Исследовать кинетику Бозе-газа из аксионов темной материи, взаимодействующего за счет гравитационного рассеяния в приближении Ландау (парные столкновения с малой передачей импульса). Найти автомодельные решения кинетического уравнения Больцмана, и показать, что эти решения являются аттракторами. Построить приближенный метод для описания эволюции системы, в случае нарушения точной автомодельной эволюции внешним источником.
- Исследовать конденсацию и дальнейший рост Бозе-звезды в облаке аксионов. Показать, что эволюция облака является приблизительно автомодельной. Разработать приближенный метод для описания эволюции свободного газа и получить закон роста Бозе-звезды со временем, а также обобщить этот закон на случай присутствия малого короткодействующего самодействия.

Теоретическая и практическая значимость

Все результаты диссертации имеют теоретическую значимость для космологии и физики частиц в области исследований темной материи.

В результате выполнения данной работы было показано, что Бозе-звезды с ненулевым угловым моментом, состоящие из аксионов темной материи, являются нестабильными. Неустойчивость вращающихся Бозе-звезд обеспечивает универсальный механизм избавления от углового момента. Вычисленные времена жизни указывают на то, что они не могут образовываться в реалистичных сценариях формирования [41, 18, 22, 26, 42], а также не могут считаться долгоживущими квазистационарными состояниями. Это исключает сценарий [52] с вращающимися аксионными звездами, достигающими порога для взрывного параметрического радиоизлучения [30, 53, 45]. Тем не ме-

нее, излучение во время промежуточных стадий, когда плотная и короткоживущая вращающаяся конфигурация сбрасывает свой угловой момент может стать предметом отдельного изучения. Для этого необходимы дальнейшие исследования, направленные, в первую очередь, на построение и обоснование конкретного механизма ее формирования.

Применение разработанного в диссертации адиабатического подхода к росту Бозе-звезд из аксионов темной материи оказалось удивительно успешным: требование автомодельности (приближенной автомодельности) предоставило эвристический закон, объясняющий результаты численного моделирования. Однако в последствии этот метод может быть улучшен.

Метод адиабатической автомодельности, примененный к обычной негравитационной кинетике, может обобщить существующие «нетепловые аттракторы» [62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71] на системы со слегка нарушенной масштабной симметрией.

Стоит отметить, что теоретически обоснованный и проверенный закон роста для Бозе-звезд может описать распределение этих объектов в современной Вселенной (см. также [59, 60, 61]), что позволит предложить новые пути для поиска темной материи.

Положения, выносимые на защиту

1. Вращающиеся Бозе-звезды — гравитационно-связанные «капли» конденсата Бозе-Эйнштейна из аксионов темной материи, обладающие ненулевым угловым моментом, — нестабильны. Нестабильность наблюдается в случаях притягивающего или отсутствующего (пренебрежимо малого) короткодействующего самодействия между аксионами. При достаточно сильном отталкивающем самодействии между аксионами вращающиеся Бозе-звезды с угловым моментом, равным одному кванту, стабильны.

2. Для однородного ансамбля гравитационно-взаимодействующих аксионов уравнение Больцмана, описывающее эволюцию функции распределения частиц по энергии в приближении Ландау (парные столкновения частиц с малой передачей импульса), с учетом влияния «внешней среды» через поглощающие граничные условия в области низких энергий и действие внешнего источника частиц, допускает существование автомодельных решений, зависящих от двух параметров. Причина существования таких решений заключается в инвариантности относительно масштабных преобразований уравнения без источника и с источником, обладающим данной симметрией.
3. Эволюция системы с источником частиц, не обладающим симметрией относительно масштабных преобразований, протекает в режиме адиабатической автомодельности, при котором функция распределения частиц ансамбля по энергии является приближенно автомодельной, а параметры, характеризующие автомодельность, слабо зависят от времени.
4. Бозе-звезда, помещенная в ансамбль гравитационно-взаимодействующих аксионов темной материи, поглощает из него частицы так, что зависимость от времени функции распределения частиц ансамбля по энергии является приближенно автомодельной.
5. Приближенно автомодельное поведение для функции распределения по энергиям частиц ансамбля, окружающих Бозе-звезду, вместе с законами сохранения полного числа частиц и полной энергии позволяют определить закон роста массы Бозе-звезды со временем.

Апробация диссертации

Результаты диссертации представлены автором лично на следующих российских и международных конференциях и семинарах:

- XXV Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2019», Москва, 8–12 апреля 2019 года (устный доклад).
- Международная конференция «International Conference on Particle Physics and Cosmology», Ереван, Армения, 2 - 7 октября 2023 года (устный доклад).
- Международный семинар «QUARKS-2024», Переславль-Залесский, Россия, 20 мая — 24 мая 2024 года (устный доклад).
- Семинар Отдела теоретической физики Института ядерных исследований РАН, Москва, 26 января 2026 года (устный доклад).

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** диссертации приводится мотивация и актуальность изучения темной материи, состоящей из легких аксионов. Обсуждаются предшествующие исследования, которые предсказывают возникновение Бозе-звезд — «капель» Бозе-Энштейновского конденсата, состоящего из аксионов темной материи. Результаты рассмотренных моделей показывают, что на сегодняшний день Вселенная должна быть заполнена Бозе-звездами.

В **главе 1** рассматриваются Бозе-звезды из аксионов темной материи с ненулевым угловым моментом. Для случая пренебрежимо малого самодействия вычисляются профили вращающихся Бозе-звезд, как стационарные решения системы уравнений Шредингера-Пуассона, а также вычисляется энергия этих конфигураций для различных угловых моментов.

Аналитически доказана теорема о том, что вращающиеся Бозе-звезды неустойчивы при любом ненулевом угловом моменте, если

параметр самодействия их бозонов притягивающий или пренебрежимо малый, $\lambda \leq 0$. Этот результат справедлив для популярных моделей с КХД аксионной или «fuzzy» темной материей.

Далее в главе исследуется рост линейных возмущений на фоне вращающейся Бозе-звезды с ненулевым угловым моментом и пренебрежимо малым самодействием, и определяется самая быстрорастущая мода, разрушающая Бозе-звезду. В главе приводятся результаты вычислений мод неустойчивости для всех вращающихся объектов: численно, при умеренно малых l и аналитически, при $l \gg 1$.

Получены выражения, с помощью которых могут быть оценены времена жизни неустойчивых вращающихся звезд. Времена жизни всегда сравнимы с обратными энергиями связи Бозе-звезд и меньше времен свободного падения в их гравитационных полях. Таким образом, вращающиеся звезды не могут образовываться в реалистичных сценариях формирования [41, 18, 22, 26, 26, 42] и фактически не могут даже считаться долгоживущими квазистационарными состояниями.

Отдельно в главе исследуются модели, в которых параметр самодействия между бозонами не нулевой. В этом случае линейные моды возмущений на фоне Бозе-звезды с угловым моментом, равным одному кванту, по-прежнему растут, разрушая Бозе-звезду, в случае $\lambda \leq 0$, как и предсказано доказанной в главе теоремой. В случае достаточно сильного отталкивающего самодействия Бозе-звезда остается стабильной.

Глава 2 посвящена изучению автомоделной кинетики для облака, состоящего из перенаселенного газа гравитационно взаимодействующих бозонов, окружающего конденсат Бозе-Эйнштейна (Бозе-звезду). На основе кинетического уравнения Больцмана построена модель однородного ансамбля гравитационно-взаимодействующих аксионов темной материи. В интеграле столкновений учтены парные

гравитационные взаимодействия с малой передачей импульса (приближение Ландау). Показано, что кинетическое уравнение для этого газа масштабно-инвариантно. Симметрия, а также возможность обмена частицами или энергией с конденсатом обуславливает существование семейства автомодельных решений кинетического уравнения с произвольными масштабными размерностями D , конечными энергиями и числом частиц. Эти решения описывают конденсацию газа при $2 < D < 3$, а также, по-видимому, испарение конденсата при $D > 3$. В главе вычисляются, как устойчивые профили решений с хвостами Рэля–Джинса $F \propto \omega^{-1/2}$, так и неустойчивые с поведением $F \propto \omega^{-1/3}$ при $\omega \rightarrow 0$.

Важным свойством найденных устойчивых решений является то, что они выступают в роли «нетепловых аттракторов» [72] для кинетических эволюций. Это означает, что функции распределения со временем стремятся к этим решениям независимо от начальных условий, что было явно проверено с помощью зависящей от времени численной симуляции кинетического уравнения Больцмана. Более того, в процессе эволюции функция распределения остается приближенно автомодельной, даже если масштабная инвариантность исходного кинетического уравнения явно нарушена. В этом новом режиме, который назван режимом адиабатической автомодельности, функция распределения следует за медленно эволюционирующими автомодельными профилями, масштабная размерность которых медленно изменяется со временем, $D = D(t)$. На основе этого наблюдения в главе разработан эффективный метод решения существенно неравновесных кинетических задач.

Численное моделирование системы уравнений Шредингера–Пуассона, проведенное в **главе 3**, посвящено изучению эволюции ансамбля гравитационно взаимодействующих бозонов, содержащего Бозезвезду. Анализ данных моделирования позволил заключить, что вре-

менная зависимость функции распределения частиц в ансамбле имеет приближенно автомодельный характер. Данный вывод получил независимое подтверждение с помощью прямого сравнения с эволюцией функции распределения в модели, построенной на основе уравнения Больцмана. Обнаруженная согласованность результатов сделала возможным использование разработанного в главе 2 подхода для вывода закона роста Бозе-звезды.

В главе представлены результаты применения метода главы 2 к описанию процесса роста Бозе-звезды внутри миникластеров из аксионов КХД [8, 31, 32, 33, 73, 34]. Согласно полученным результатам, основная масса вещества наиболее плотных миникластеров на текущий момент содержится в их аксионных звездах.

Также в главе 3 удалось обобщить закон роста Бозе-звезды для моделей, в которых присутствует малое, но не нулевое короткодействующее самодействие между бозонами. Учет малого самодействия изменяет закон роста для Бозе-звезд и приводит к ускоренному росту при отталкивающем самодействии ($\lambda > 0$) и к замедлению роста при притягивающем самодействии ($\lambda < 0$), что на качественном уровне согласуется с результатами работы [42].

В **заключении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Доказана теорема о нестабильности вращающихся Бозе-звезд из аксионов темной материи — аксиально-симметричных решений системы уравнений Гросса–Питаевского–Пуассона, обладающих минимальной энергией и ненулевым угловым моментом, — в случаях притягивающего или пренебрежимо малого (отсутствующего) короткодействующего самодействия между частицами. Для случая без самодействия численно найдены возмущения, приводящие к разрушению вращающихся Бозе-звезд. Проведено полное численное моделирование, демонстри-

рующее 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. В интеграле столкновений учтены парные гравитационные взаимодействия с малой передачей импульса (приближение Ландау). 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. Для данной системы найдено двухпараметрическое семейство автомодельных решений в двух случаях: без внешнего источника частиц и в присутствии внешних источников, инвариантных относительно масштабных преобразований.
3. Показано, что эволюция функции распределения частиц ансамбля по энергии в построенной модели под действием источника, не инвариантного относительно масштабных преобразований, происходит приближенно автомодельно. В этом режиме параметры, определяющие форму автомодельного решения, слабо зависят от времени.
4. Проведено масштабное численное моделирование эволюции ансамбля гравитационно взаимодействующих аксионов, содержащего Бозе-звезду. На основе полученных численных результатов 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.

Основные публикации по теме диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в 3 статьях в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах Web of Science, Scopus и RSCI:

1. A. S. Dmitriev et al. Instability of rotating Bose stars. // Physical Review D. — 2021 — Vol. 104, no. 2. — P. 023504.
2. A. S. Dmitriev, D. G. Levkov, A. G. Panin, and I. I. Tkachev. Self-Similar Growth of Bose Stars // Physical Review Letters — 2024 — Vol. 132, no. 9. — P. 091001.
3. A.S. Dmitriev, D.G. Levkov, A.G. Panin, I.I. Tkachev. Self-similar kinetics for gravitational Bose-Einstein condensation // Physical Review D. — 2025 — Vol. 112, no. 12 — P. 123533.

Список литературы

- [1] Peccei R. D., Quinn H. R. CP Conservation in the Presence of Pseudoparticles // Phys. Rev. Lett. — 1977. — Jun. — Vol. 38. — P. 1440–1443. — Access mode: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.38.1440>.
- [2] Nambu Y. Axial Vector Current Conservation in Weak Interactions // Phys. Rev. Lett. — 1960. — Apr. — Vol. 4. — P. 380–382. — Access mode: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.4.380>.

- [3] Goldstone J. Field theories with « Superconductor » solutions // *Il Nuovo Cimento* (1955-1965). — 1961. — Vol. 19. — P. 154–164. — Access mode: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:120409034>.
- [4] The QCD axion, precisely / Grilli di Cortona G., Hardy E., Pardo Vega J., and Villadoro G. // *JHEP*. — 2016. — Vol. 01. — P. 034. — 1511.02867.
- [5] Graham P. W., Scherlis A. Stochastic axion scenario // *Phys. Rev. D*. — 2018. — Aug. — Vol. 98. — P. 035017. — Access mode: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.98.035017>.
- [6] Takahashi F., Yin W., Guth A. H. QCD axion window and low-scale inflation // *Phys. Rev. D*. — 2018. — Jul. — Vol. 98. — P. 015042. — Access mode: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.98.015042>.
- [7] Rosa J., Ventura L. Spontaneous breaking of the Peccei-Quinn symmetry during warm inflation. — 2021. — 05.
- [8] Kolb E. W., Tkachev I. I. Axion miniclusters and Bose stars // *Phys. Rev. Lett.* — 1993. — Vol. 71. — P. 3051–3054. — hep-ph/9303313.
- [9] Kibble T. Topology of cosmic domains and strings // *Journal of Physics A: Mathematical and General*. — 2001. — 01. — Vol. 9. — P. 1387.
- [10] Gorghetto M., Hardy E., Villadoro G. Axions from strings: the attractive solution // *Journal of High Energy Physics*. — 2018. — 07. — Vol. 2018. — P. 151.
- [11] Gorghetto M., Hardy E., Villadoro G. More Axion Stars from Strings. — 2024. — 05.

- [12] Marsh D. J., Niemeyer J. C. Strong Constraints on Fuzzy Dark Matter from Ultrafaint Dwarf Galaxy Eridanus II // *Phys. Rev. Lett.* — 2019. — Vol. 123, no. 5. — P. 051103. — 1810.08543.
- [13] Rogers K. K., Peiris H. V. Strong Bound on Canonical Ultralight Axion Dark Matter from the Lyman-Alpha Forest // *Phys. Rev. Lett.* — 2021. — Vol. 126, no. 7. — P. 071302. — 2007.12705.
- [14] Hlozek R., Marsh D. J. E., Grin D. Using the Full Power of the Cosmic Microwave Background to Probe Axion Dark Matter // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* — 2018. — Vol. 476, no. 3. — P. 3063–3085. — 1708.05681.
- [15] Raffelt G. G. Astrophysical axion bounds // *Lect. Notes Phys.* — 2008. — Vol. 741. — P. 51–71. — hep-ph/0611350.
- [16] Klaer V. B., Moore G. D. The dark-matter axion mass // *JCAP.* — 2017. — Vol. 11. — P. 049. — 1708.07521.
- [17] Gorghetto M., Hardy E., Villadoro G. More axions from strings // *SciPost Phys.* — 2021. — Vol. 10, no. 2. — P. 050. — 2007.04990.
- [18] Schive H.-Y., Chiueh T., Broadhurst T. Cosmic Structure as the Quantum Interference of a Coherent Dark Wave // *Nature Phys.* — 2014. — Vol. 10. — P. 496–499. — 1406.6586.
- [19] Schive H.-Y. et al. Understanding the Core-Halo Relation of Quantum Wave Dark Matter from 3D Simulations // *Phys. Rev. Lett.* — 2014. — Vol. 113, no. 26. — P. 261302. — 1407.7762.
- [20] Deciphering the Soliton-Halo Relation in Fuzzy Dark Matter / Liao P.-Y., Su G.-M., Schive H.-Y., et al. // *Phys. Rev. Lett.* — 2025. — Aug. — Vol. 135. — P. 061002. — 2412.09908.

- [21] Mocz P. et al. Galaxy formation with BECDM – I. Turbulence and relaxation of idealized haloes // MNRAS. — 2017. — Vol. 471, no. 4. — P. 4559. — 1705.05845.
- [22] Levkov D. G., Panin A. G., Tkachev I. I. Gravitational Bose-Einstein condensation in the kinetic regime // Phys. Rev. Lett. — 2018. — Vol. 121, no. 15. — P. 151301. — 1804.05857.
- [23] Veltmaat J., Niemeyer J. C., Schwabe B. Formation and structure of ultralight bosonic dark matter halos // Phys. Rev. D. — 2018. — Vol. 98, no. 4. — P. 043509. — 1804.09647.
- [24] Schwabe B., Niemeyer J. C. Deep Zoom-In Simulation of a Fuzzy Dark Matter Galactic Halo // Phys. Rev. Lett. — 2022. — Vol. 128, no. 18. — P. 181301. — 2110.09145.
- [25] Simulating mixed fuzzy and cold dark matter / Schwabe B., Gosenca M., Behrens C., Niemeyer J. C., and Easter R. // Phys. Rev. D. — 2020. — Vol. 102, no. 8. — P. 083518. — 2007.08256.
- [26] Eggemeier B., Niemeyer J. C. Formation and mass growth of axion stars in axion miniclusters // Phys. Rev. D. — 2019. — Vol. 100, no. 6. — P. 063528. — 1906.01348.
- [27] Mina M., Mota D. F., Winther H. A. Solitons in the dark: First approach to non-linear structure formation with fuzzy dark matter // Astron. Astrophys. — 2022. — Vol. 662. — P. A29. — 2007.04119.
- [28] Amin M. A., May S., Mirbabayi M. Early Growth of Structure in Warm Wave Dark Matter. — 2025. — 2506.12131.
- [29] Ruffini R., Bonazzola S. Systems of selfgravitating particles in general relativity and the concept of an equation of state // Phys. Rev. — 1969. — Vol. 187. — P. 1767–1783.

- [30] Tkachev I. Coherent Scalar-Field Oscillations Forming Compact Astrophysical Object // Soviet Astronomy Letters. — 1986. — Vol. 12. — P. 305–308. — Access mode: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1986SvAL...12..305T>.
- [31] Kolb E. W., Tkachev I. I. Nonlinear axion dynamics and formation of cosmological pseudosolitons // Phys. Rev. D. — 1994. — Vol. 49. — P. 5040–5051. — astro-ph/9311037.
- [32] Vaquero A., Redondo J., Stadler J. Early seeds of axion miniclusters // JCAP. — 2019. — Vol. 04. — P. 012. — 1809.09241.
- [33] Buschmann M., Foster J. W., Safdi B. R. Early-Universe Simulations of the Cosmological Axion // Phys. Rev. Lett. — 2020. — Vol. 124, no. 16. — P. 161103. — 1906.00967.
- [34] Ellis D., Marsh D. J. E., Behrens C. Axion Miniclusters Made Easy // Phys. Rev. D. — 2021. — Vol. 103, no. 8. — P. 083525. — 2006.08637.
- [35] Miniclusters from axion string simulations / Pierobon G., Redondo J., Saikawa K., Vaquero A., and Moore G. D. — 7. — 2307.09941.
- [36] Tkachev I. I. On the possibility of Bose star formation // Phys. Lett. — 1991. — Vol. B261. — P. 289–293.
- [37] Dev P. S. B., Lindner M., Ohmer S. Gravitational waves as a new probe of Bose–Einstein condensate Dark Matter // Phys. Lett. — 2017. — Vol. B773. — P. 219–224. — 1609.03939.
- [38] Levkov D. G., Panin A. G., Tkachev I. I. Relativistic axions from collapsing Bose stars // Phys. Rev. Lett. — 2017. — Vol. 118, no. 1. — P. 011301. — 1609.03611.

- [39] Tkachev I. I. Fast radio bursts and axion miniclusters // JETP Letters. — 2015. — Vol. 101, no. 1. — P. 1–6.
- [40] Kehayias J., Kephart T. W., Weiler T. J. The excess radio background and fast radio transients // Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. — 2015. — oct. — Vol. 2015, no. 10. — P. 053. — Access mode: <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2015/10/053>.
- [41] Seidel E., Suen W.-M. Formation of solitonic stars through gravitational cooling // Phys. Rev. Lett. — 1994. — Vol. 72. — P. 2516–2519. — gr-qc/9309015.
- [42] Chen J. et al. New insights into the formation and growth of boson stars in dark matter halos // Phys. Rev. D. — 2021. — Vol. 104, no. 8. — P. 083022. — 2011.01333.
- [43] Schwabe B., Niemeyer J. C., Engels J. F. Simulations of solitonic core mergers in ultralight axion dark matter cosmologies // Phys. Rev. D. — 2016. — Vol. 94, no. 4. — P. 043513. — 1606.05151.
- [44] Amin M. A., Mocz P. Formation, gravitational clustering, and interactions of nonrelativistic solitons in an expanding universe // Phys. Rev. D. — 2019. — Vol. 100, no. 6. — P. 063507. — 1902.07261.
- [45] Hertzberg M. P., Li Y., Schiappacasse E. D. Merger of Dark Matter Axion Clumps and Resonant Photon Emission // JCAP. — 2020. — Vol. 07. — P. 067. — 2005.02405.
- [46] Ultralight scalars as cosmological dark matter / Hui L., Ostriker J. P., Tremaine S., and Witten E. // Phys. Rev. D. — 2017. — Vol. 95, no. 4. — P. 043541. — 1610.08297.

- [47] Tidal disruption of fuzzy dark matter subhalo cores / Du X., Schwabe B., Niemeyer J. C., and Bürger D. // *Phys. Rev. D.* — 2018. — Vol. 97, no. 6. — P. 063507. — 1801.04864.
- [48] Li X., Hui L., Yavetz T. D. Oscillations and Random Walk of the Soliton Core in a Fuzzy Dark Matter Halo // *Phys. Rev. D.* — 2021. — Vol. 103, no. 2. — P. 023508. — 2011.11416.
- [49] Schive H.-Y., Chiueh T., Broadhurst T. Soliton Random Walk and the Cluster-Stripping Problem in Ultralight Dark Matter // *Phys. Rev. Lett.* — 2020. — Vol. 124, no. 20. — P. 201301. — 1912.09483.
- [50] Zakharov V. E., Kuznetsov E. A. Solitons and collapses: two evolution scenarios of nonlinear wave systems // *Physics-Uspekhi.* — 2012. — jun. — Vol. 55, no. 6. — P. 535–556. — Access mode: <https://doi.org/10.3367%2Fufne.0182.201206a.0569>.
- [51] Chavanis P.-H. Mass-radius relation of Newtonian self-gravitating Bose-Einstein condensates with short-range interactions: I. Analytical results // *Phys. Rev. D.* — 2011. — Vol. 84. — P. 043531. — 1103.2050.
- [52] Hertzberg M. P., Schiappacasse E. D. Dark Matter Axion Clump Resonance of Photons // *JCAP.* — 2018. — Vol. 11. — P. 004. — 1805.00430.
- [53] Levkov D., Panin A., Tkachev I. Radio-emission of axion stars // *Phys. Rev. D.* — 2020. — Vol. 102, no. 2. — P. 023501. — 2004.05179.
- [54] Abbott B. P. et al. GWTC-1: A Gravitational-Wave Transient Catalog of Compact Binary Mergers Observed by LIGO and Virgo during the First and Second Observing Runs // *Phys. Rev. X.* — 2019. — Vol. 9, no. 3. — P. 031040. — 1811.12907.

- [55] Abbott B. P. et al. Binary Black Hole Population Properties Inferred from the First and Second Observing Runs of Advanced LIGO and Advanced Virgo // *Astrophys. J. Lett.* — 2019. — Vol. 882, no. 2. — P. L24. — 1811.12940.
- [56] Abbott R. et al. Tests of General Relativity with Binary Black Holes from the second LIGO-Virgo Gravitational-Wave Transient Catalog. — 2010.14529.
- [57] Kaup D. J. Klein-Gordon Geon // *Phys. Rev.* — 1968. — Vol. 172. — P. 1331–1342.
- [58] Chan J. H.-H., Sibiryakov S., Xue W. Condensation and evaporation of boson stars // *JHEP.* — 2024. — Vol. 2401. — P. 071. — 2207.04057.
- [59] Maseizik D., Sigl G. Distributions and collision rates of ALP stars in the Milky Way // *Phys. Rev. D.* — 2024. — Vol. 110, no. 8. — P. 083015. — 2404.07908.
- [60] Radio lines from accreting axion stars / Maseizik D., Mondal S., Seong H., and Sigl G. // *JCAP.* — 2025. — Vol. 2505. — P. 033. — 2409.13121.
- [61] Gorghetto M., Hardy E., Villadoro G. More axion stars from strings // *JHEP.* — 2024. — Vol. 2408. — P. 126. — 2405.19389.
- [62] Semikoz D. V., Tkachev I. I. Kinetics of Bose condensation // *Phys. Rev. Lett.* — 1995. — Vol. 74. — P. 3093–3097. — hep-ph/9409202.
- [63] Semikoz D. V., Tkachev I. I. Condensation of bosons in kinetic regime // *Phys. Rev.* — 1997. — Vol. D55. — P. 489–502. — hep-ph/9507306.

- [64] Nowak B., Gasenzer T. Universal dynamics on the way to thermalization // *New J. Phys.* — 2014. — Vol. 16, no. 9. — P. 093052. — 1206.3181.
- [65] Turbulent thermalization process in heavy-ion collisions at ultrarelativistic energies / Berges J., Boguslavski K., Schlichting S., and Venugopalan R. // *Phys. Rev. D.* — 2014. — Vol. 89, no. 7. — P. 074011. — 1303.5650.
- [66] Universal attractor in a highly occupied non-Abelian plasma / Berges J., Boguslavski K., Schlichting S., and Venugopalan R. // *Phys. Rev. D.* — 2014. — Vol. 89, no. 11. — P. 114007. — 1311.3005.
- [67] Universality far from equilibrium: From superfluid Bose gases to heavy-ion collisions / Berges J., Boguslavski K., Schlichting S., and Venugopalan R. // *Phys. Rev. Lett.* — 2015. — Vol. 114, no. 6. — P. 061601. — 1408.1670.
- [68] Piñeiro Orioli A., Boguslavski K., Berges J. Universal self-similar dynamics of relativistic and nonrelativistic field theories near non-thermal fixed points // *Phys. Rev. D.* — 2015. — Vol. 92, no. 2. — P. 025041. — 1503.02498.
- [69] Chantesana I., Piñeiro Orioli A., Gasenzer T. Kinetic theory of nonthermal fixed points in a Bose gas // *Phys. Rev. A.* — 2019. — Vol. 99, no. 4. — P. 043620. — 1801.09490.
- [70] Schmied C.-M., Mikheev A. N., Gasenzer T. Non-thermal fixed points: Universal dynamics far from equilibrium // *Int. J. Mod. Phys. A.* — 2019. — Vol. 34, no. 29. — P. 1941006. — 1810.08143.
- [71] Numerical analysis of a self-similar turbulent flow in Bose-Einstein condensates / Semisalov B. V., Grebenev V. N., Medvedev S. B.,

and Nazarenko S. V. // Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulations. — 2021. — Nov. — Vol. 102. — P. 105903. — 2104.14591.

[72] Berges J., Rothkopf A., Schmidt J. Non-thermal fixed points: Effective weak-coupling for strongly correlated systems far from equilibrium // Phys. Rev. Lett. — 2008. — Vol. 101. — P. 041603. — 0803.0131.

[73] First Simulations of Axion Minicluster Halos / Eggemeier B., Redondo J., Dolag K., Niemeyer J. C., and Vaquero A. // Phys. Rev. Lett. — 2020. — Vol. 125, no. 4. — P. 041301. — 1911.09417.

Научное издание
Дмитриев Антон Сергеевич
Динамика Бозе-звезд из аксионов
темной материи

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Принято в печать 18.03.2026

Ф-т 60x84/16 Уч.-изд.л. 1,3 Зак. № 005/26 Тираж 80 экз. Бесплатно

Печать цифровая

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований Российской академии наук

Издательский отдел
117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а