

**ОТЗЫВ научного руководителя  
на диссертацию 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.**

Природа темной материи остается одной из ключевых проблем современной фундаментальной физики. Отсутствие убедительных экспериментальных свидетельств существования новых тяжелых частиц, которые могли бы претендовать на роль частиц темной материи, по итогам работы Большого адронного коллайдера, стимулировало научное сообщество к более активному изучению альтернативных гипотез. Значительное развитие в последние годы получила гипотеза о том, что темная материя образована очень легкими частицами. Большой интерес среди таких кандидатов представляют аксионы КХД, существование которых предсказывается в моделях физики частиц, предложенных для решения сильной CP-проблемы в КХД, а также струнные аксионы - ультралегкие (псевдо)скалярные частицы, возникающие в различных моделях теории струн. Для аксионов КХД и струнных аксионов разработаны механизмы космологического рождения и определены интервалы масс, в которых они могут составлять темную материю. В частности, аксионы КХД могут составлять темную материю при массе порядка  $10^{-5}$  эВ, тогда как для струнных аксионов характерный масштаб масс составляет  $10^{-22}$  эВ. При такой чрезвычайно малой массе частиц требуемая наблюдаемая плотность темной материи достигается лишь при их огромной концентрации, что в свою очередь создает условия для формирования конденсата Бозе-Эйнштейна. Конденсация происходит за счет гравитационной релаксации, в которой из-за высокой концентрации участвуют флуктуации плотности, а не отдельные частицы. Образовавшийся конденсат не является однородным: под действием гравитационного притяжения он формирует компактные объекты — так называемые Бозе-звезды. В модели аксионов КХД масса такой звезды соответствует астероидной массе, тогда как в модели ультралегкой темной материи из струнных аксионов она достигает  $10^9$  масс Солнца. Существование Бозе-звезд — ключевое предсказание моделей легкой темной материи. Их обнаружение стало бы убедительным подтверждением справедливости данных моделей.

Диссертационное исследование А. С. Дмитриева направлено на изучение процессов образования и эволюции Бозе-звезд из аксионов темной материи с целью получения предсказаний об их распространенности в современной Вселенной. Решение этой задачи необходимо для выработки стратегии наблюдательного поиска таких объектов, что определяет актуальность и научную значимость представленной работы.

В первой главе диссертации аналитически доказана теорема о нестабильности Бозе-звезд, обладающих ненулевым угловым моментом, для физически важных

случаев, соответствующих моделям аксионов КХД и ультралегкой темной материи. Полученные аналитические результаты согласуются с данными численного моделирования. Показано, что времена жизни вращающихся Бозе-звезд всегда сравнимы с их внутренними динамическими временными масштабами (обратными энергиям связи), что исключает возможность их образования в реалистичных космологических сценариях и ставит под сомнение их существование как долгоживущих квазистационарных астрофизических объектов. Тем самым А.С. Дмитриев показал, что в современной Вселенной Бозе-звезды могут существовать исключительно как сферически-симметричные «капли» конденсата Бозе-Эйнштейна, лишенные углового момента.

Вторая и третья главы диссертации посвящены построению модели, основанной на кинетическом уравнении Больцмана, описывающей эволюцию массы Бозе-звезды во времени. После своего образования Бозе-звезда продолжает аккрецировать аксионы из окружающей гравитационно-связанной структуры. В модели аксионов КХД такой структурой является аксионный миникластер, тогда как в сценарии со струнными аксионами Бозе-звезда поглощает аксионы непосредственно из галактического гало.

Во второй главе А.С. Дмитриев построил модель однородного ансамбля гравитационно-взаимодействующих аксионов темной материи, основанную на кинетическом уравнении Больцмана. Кинетика в ансамбле описывается интегралом парных гравитационных столкновений в приближении Л.Д. Ландау. Взаимодействие аксионов с Бозе-звездой, помещенной в ансамбль, учитывается через поглощающее граничное условие (поглощение звездой) и внешний источник высокоэнергичных частиц. Последний описывает возвращение в ансамбль частиц, получивших энергию в столкновениях с частицами, которые теряют энергию и переходят на звезду. Уравнение Больцмана инвариантно относительно двухпараметрических масштабных преобразований. Автором показано, что при выборе источника, обладающего аналогичной инвариантностью, существует двухпараметрическое семейство автомодельных решений. Численно показано, что эти решения выступают в роли аттракторов кинетической эволюции: независимо от выбора начального распределения функция распределения с течением времени выходит на автомодельный режим. Более того, А.С. Дмитриев показал, что при выборе источника, явно нарушающего масштабную инвариантность, система эволюционирует в режиме адиабатической автомодельности. В каждый момент времени функция распределения может быть аппроксимирована автомодельным решением, однако параметры автомодельности медленно меняются со временем.

В третьей главе А.С. Дмитриев, опираясь на результаты главы 2, выводит закон роста массы Бозе-звезды со временем. Численное моделирование ансамбля аксионов с Бозе-звездой подтверждает приближенно автомодельный характер эволюции функции распределения, что обосновывает применение метода адиабатической автомодельности. С использованием законов сохранения и уравнения состояния

конденсата автором получена аналитическая зависимость роста массы звезды. Полученная зависимость позволяет сделать оценки относительно распространенности Бозе-звезд в современной Вселенной: плотные миникластеры аксионов КХД к настоящему времени должны быть практически полностью поглощены Бозе-звездами, тогда как рост Бозе-звезд в галактиках из ультралегкой темной материи находится на начальной стадии.

Диссертационная работа А.С. Дмитриева вносит важный вклад в проблему оценки распространенности аксионных Бозе-звезд в современной Вселенной. Разработанные автором подходы к описанию кинетической эволюции имеют междисциплинарное значение и могут быть востребованы в таких областях, как классическая теория поля, космология ранней Вселенной и физика конденсированного состояния. Результаты диссертации опубликованы в рецензируемых журналах, а также были представлены и обсуждены на всероссийских и международных конференциях и научных семинарах.

За время работы над диссертацией А.С. Дмитриев проявил себя как самостоятельный и квалифицированный исследователь, в полной мере овладевший современным математическим аппаратом теоретической физики и численными методами решения сложных дифференциальных уравнений в частных производных, включая их реализацию на графических процессорах.

Считаю, что диссертационная работа Дмитриева Антона Сергеевича «Динамика бозе-звезд из аксионов темной материи» полностью соответствует требованиям, предъявляемым ВАК при Минобрнауки России к кандидатским диссертациям, а ее автор, несомненно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3 — Теоретическая физика.

16 февраля 2026 г.

Заместитель директора ИЯИ РАН  
по научной работе,  
к.ф.-м.н.

А.Г. Панин

М.П.