

ОТЗЫВ

члена диссертационного совета Постнова Константина Александровича на диссертацию Гусакова Михаила Евгеньевича на «Динамические процессы в нейтронных звёздах», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия.

На протяжении более полувека нейтронные звезды (НЗ) остаются в центре внимания физиков и астрофизиков. Это уникальные природные компактные сверхплотные объекты со сверхсильным магнитным полем, изучение которых проливает свет на физические процессы в экстремальных условиях, недостижимых в лабораторных экспериментах. Несмотря на колоссальный прогресс в понимании внутреннего строения и эволюции НЗ, многие базовые проблемы (такие как уравнение состояния ядра, эволюция магнитного поля и др.) остаются нерешенными окончательно, а новейшие наблюдательные данные, полученные методами многоканальной астрономии, ставят новые вопросы. Этим определяется **актуальность** предмета исследования диссертации М.Е. Гусакова. Из всего широкого круга вопросов по физике нейтронных звезд диссертант выделил крупное важное направление исследования динамических процессов, происходящих в коре и ядре вращающихся сверхтекучих нейтронных звезд, которые имеют наблюдательные проявления (динамика вращения, пульсационные моды, тепловая и магнитная эволюция) и могут быть проверены в различных астрофизических наблюдениях методами современной многоканальной астрономии.

Диссертационная работа М.Е. Гусакова представлена в виде научного доклада, состоящего из 8 глав и на 59 страницах с 20 рисунками и суммирующего результаты автора, полученные на протяжении двух десятилетий и опубликованные в 50 статьях в рецензируемых международных журналах. Список цитированной литературы, сверх авторских работ, содержит 202 наименования.

В Главе 2 дается введение в гидродинамику сверхтекучих смесей в нейтронных звездах и приводятся результаты расчетов автора основных макроскопических параметров теории – релятивистской матрицы сверхтекучих плотностей и функции отклика системы на длинноволновые статические векторные возмущения. Полученные кинетические уравнения имеют широкую область применения для расчетов кинетических коэффициентов в сверхтекучих смесях и нейтринных процессов. **Впервые** показано, что коэффициенты вязкости в сверхтекучих смесях определяются неравновесными реакциями, а рассчитанная объемная вязкость может значительно усиливать диссипацию звуковых волн в сверхтекучем нуклонном веществе. Расчеты для нуклонного вещества обобщены на случай сверхтекучего и сверхпроводящего нуклон-гиперонного вещества, которое может существовать в ядрах массивных нейтронных звезд. Показано, что для сверхпроводящих протонов в ядрах НЗ диффузия n - e является наиболее эффективным механизмом диссипации звуковых волн.

В Главе 3 систематически изучаются глобальные колебания сверхтекучих НЗ и их диссипация в рамках ОТО при конечных температурах. Приведены результаты расчета спектра колебаний f - и p -мод в сверхтекучих НЗ при конечных температурах, выполненного

автором **впервые**. Показано, что вблизи резонансов расщепляющихся нормальных и сверхтекучих мод затухание нормальных мод усиливается и становится сравнимым с затуханием сверхтекучих мод. Показано, что учет конечных температур в сверхтекучих НЗ приводит появлению g -мод в спектре колебаний и при некоторых условиях к появлению конвекции в экзотическом веществе. Изучена диссипация g -мод за счет диффузии в сверхпроводящих НЗ.

В Главе 4 суммированы результаты серии работ автора по формулировке релятивистской диссипативной МГД сверхтекучих/сверхпроводящих смесей во вращающихся нейтронных звездах с учетом электромагнитного поля, конечных температур, вихрей Фейнмана-Онзагера-Абрикосова и различных диссипативных эффектов. Полученные результаты могут использоваться при расчете спектра колебаний и их затухания в НЗ и для эволюции тепловой и магнитной эволюции НЗ.

В Главе 5 детально рассмотрены g -моды колебаний быстро вращающихся НЗ и возможные сценарии подавления их неустойчивости. g -моды с отрицательной энергией рассматриваются как один из главных механизмов торможения быстро вращающихся НЗ с излучением гравитационных волн. В работах М.Е. Гусакова с соавторами изучено подавление неустойчивости g -мод за счет увеличения объемной вязкости в нуклон-гиперонном веществе, а также развит минимальный сценарий стабилизации g -мод без привлечения экзотического вещества за счет резонансного затухания g -мод при приближении их частот к частотам сверхтекучих мод и их взаимного трения. Найдены области стабильности g -мод на диаграмме частота вращения – температура НЗ и показано их качественное согласие с положением наблюдаемых быстро вращающихся НЗ в маломассивных рентгеновских двойных системах. Предложен **новый класс** астрофизических источников (HOFNAR) – горячих быстро вращающихся неаккрецирующих нейтронных звезд, температура которых поддерживается диссипацией g -мод в полосе неустойчивости.

В Главе 6 рассматривается самосогласованная эволюция магнитного поля как в несверхтекучих/несверхпроводящих сверхтекучих НЗ, так и в сверхтекучих и сверхпроводящих НЗ. Показано, что объемные движения вещества в таких вращающихся НЗ приводит к ускоренной диссипации поля на шкале в несколько десятков млн лет, согласующейся с возрастом радиопульсаров.

В Главе 7 суммированы результаты диссертанта по изучению физики аккрецированной коры НЗ в тесных двойных системах. Построено микроскопическое уравнение состояния аккрецированной коры и описаны физические принципы его определяющие. Показано, что оно близко к термодинамически равновесному УрС и сильно отличается от традиционно применяемого в литературе в пренебрежении диффузии нейтронов. Показано, что энерговыделение в ядерных реакциях в полностью аккрецированной коре НЗ значительно меньше, чем для расчетов в рамках традиционного подхода. Предложен **новый термодинамический потенциал** для универсального нахождения уравнения состояния вещества во внутренней коре НЗ, который также наглядно позволяет объяснить неустойчивость ядер по бета-равновесию на границе с ядром при повышении давления.

В Главе 8 собраны результаты диссертанта по изучению физических эффектов и процессов, важных для физики внутреннего строения НЗ, их динамики и астрофизических проявлений (распады плазмонов на пары нейтрино-антинейтрино, плавучесть протонных и нейтронных вихрей в НЗ, динамически изменяющаяся нуклонная щель и ее влияние на колебания НЗ и кинетику вещества). Предложен **новый физический механизм** нагрева старых миллисекундных пульсаров с аккрецированной корой за счет глубокого прогрева коры при торможении НЗ, ведущем к повышению давления в коре и возникновению ядерных реакций с выделением тепла.

Диссертационная работа М.Е. Гусакова производит очень хорошее впечатление. В своих работах автор продемонстрировал умение ставить и решать сложные физические задачи методами теоретической и математической физики. Модельные предположения физически обоснованы и соответствуют самым современным представлениям о внутреннем строении и динамике нейтронных звезд. Полученные в диссертации результаты прошли всестороннюю апробацию в высокорейтинговых мировых журналах, докладывались лично диссертантом на многочисленных международных конференциях и уже активно используются в работах других авторов. Разработанные методики расчетов динамических свойств нейтронных звезд востребованы в профильных институтах и учреждениях в России и за рубежом и открывают новые перспективы для изучения внутреннего строения нейтронных звезд методами современной многоканальной астрономии.

Диссертация М.Е. Гусакова **является научно-квалификационной работой**, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как **научное достижение** в области изучения внутреннего строения и динамики нейтронных звезд.

Диссертация Гусакова Михаила Евгеньевича на тему: «Динамические процессы в нейтронных звёздах» полностью соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 19.11.2021 № 11181/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», а соискатель Гусаков Михаил Евгеньевич **безусловно заслуживает** присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия. Нарушения пунктов 9 и 11 указанного Порядка в диссертации не обнаружены.

Член диссертационного совета

Доктор физ.-мат. наук, профессор,
член-корр. РАН директор ГАИШ МГУ


 К.А. Постнов

02 апреля 2024 года