

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе
Санкт-Петербургский
государственный университет



С.В. Микушев

« 08 » мая 2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»
о диссертации Краава Кирилла Юрьевича
«Свойства релятивистских g -мод
и влияние диффузии на динамику нейтронных звезд», представленной на
соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия

В диссертации исследуются колебания нескольких типов, возникающие в веществе нейтронных звезд различного состава и в различных состояниях при ньютоновском поле и в рамках ОТО, причем основное внимание уделяется g -модам. Изучено влияние механизмов затухания колебаний: диффузии, диссипации энергии, гравитационного излучения и наличия гиперонов.

Общеизвестно, что изучение нейтронных звезд представляет большой интерес не только для астрофизики, но и для физики, так как состояние материи в них такое, какое неосуществимо в лаборатории. Поэтому важно найти все возможные способы извлечения информации о состоянии вещества нейтронных звезд, о процессах, происходящих в нем, и возможности наблюдения проявлений этих процессов. Наряду с тепловыми, химическими и другими процессами взаимодействия большую роль играют менее изученные процессы колебаний различной природы. Именно выяснению тонкостей этих колебаний посвящена диссертация К.Ю. Краава, поэтому ее актуальность несомненна.

Диссертация состоит из Введения с обычными общими характеристиками диссертации, 4 глав и Заключения с подведением итогов.

В главе 1, содержание которой значительно шире ее названия «Элементы теории колебаний», сначала приводятся известные сведения о строении нейтронной звезды, о ее коре и ядре, составе и состоянии вещества в этих частях, с особым вниманием к возможности наличия гиперонной составляющей, проявления сверхтекучести и сверхпроводимости компонентов, видам уравнений состояния вещества и возможным модам колебаний. Формулируются предположения и приближения, принимаемые в диссертации. Затем приводятся формулы и уравнения сначала бездиссипативной, а затем и диссипативной гидродинамики. В частности, обсуждаются условия химического, гидростатического и теплового равновесия, а также типы колебаний, закон сохранения энергии и возмущения энергии вещества под действием различных факторов. Особое внимание уделяется диссипативным механизмам и энергопотерям при их действии, а также за счет излучения гравитационных волн.

Уже из приведенного перечисления деталей применяемой теории видна широта и глубина подхода к решению поставленной задачи исследования колебаний в нейтронных звездах.

Во второй главе исследуется механизм подавления колебаний различных мод диффузией в нормальном и сверхпроводящем веществе и сравнивается его эффективность с самым известным, обычным механизмом — сдвиговой вязкостью. Для разных мод при разных состояниях вещества роль этих механизмов оказывается различной.

Третья и четвертая главы посвящены центральной проблеме работы: g -модам. В третьей главе сначала выводятся уравнения, описывающие g -моды в коре и ядре нейтронной звезды в ньютоновском (нерелятивистском) приближении, граничные условия к ним. Затем приводятся подобные уравнения, справедливые в рамках ОТО. Отмечается, что уравнения в первом приближении теории возмущений по малой скорости вращения звезды приводят к непрерывному спектру собственных частот колебаний в некотором интервале, что было известно в литературе, входило в противоречие с численными расчетами и подвергалось критике с различных точек зрения. Автор находит способ разрешить это противоречие, выводит уравнения для g -мод с дискретным спектром отдельно для ядра и коры и

граничные условия к ним с учетом увлечения инерциальных систем отсчета (и.с.о., с параметром ε) и более аккуратным учетом скорости вращения звезды Ω . Уравнения решаются численно для набора частных случаев. Приводятся рисунки, отражающие поведение первых тороидальных функций мод при разных скоростях вращения. Отмечаются особенности, возникающие при переходе к пределу $\varepsilon \rightarrow 0$ и $\Omega \rightarrow 0$. Одна особенность, называемая неаналитичностью, состоит в невозможности представить решения в виде разложений по формуле Тейлора по малому параметру. Другая особенность — изменение порядка малости (ордеринга) величин по отношению друг к другу.

При чтении этой главы возникает некоторая трудность восприятия текста. Говорится, что числа L и m определяют угловую зависимость мод, однако зависимость от азимута ψ подразумевается закреплением числа m , о чем сказано только в первой главе и в сноске. Не указаны верхние пределы сумм по $L \geq m$. Много раз функции $P^m_l(x)$ называются полиномами, однако при нечетных m они не многочлены (не полиномы), так как содержат множитель $\sqrt{1-x^2}$ (синус, наряду с x — косинусом полярного угла).

Что касается противоречия между континуумом мод в пределе и их дискретным спектром при более подробных рассмотрении для конечных значений параметров и при численных расчетах, то можно предположить, что все же удастся найти способ перехода к пределу при уменьшении параметров.

В главе 4 изучается влияние на r -моды диссипации энергии и излучения гравитационных волн, порождающих так называемые окна неустойчивости. Результаты, получаемые в рамках ОТО, сравниваются с ньютоновскими. Сначала приводятся данные наблюдений для двойных рентгеновских систем малой массы, помещенные на плоскости (Ω, T^∞) (T^∞ — внутренняя температура нейтронной звезды, определяемая с учетом гравитационного красного смещения и восстанавливаемая по наблюдениям). Отмечается противоречие между наблюдениями, согласно которым неустойчивость должна быть характерна почти для всех таких звезд, и теорией, предсказывающей малую вероятность обнаружения источников в глубине окна неустойчивости. Последовательно рассматриваются дополнительные факторы, приводящие к усилению действия механизмов диссипации: совместное действие релятивизма и небаротропности вещества, диффузия частиц, присутствие гиперонов в ядре. В

конце главы рассмотрены диссипация за счет отдельно сдвиговой вязкости и диффузии, а также их совместного действия. Кроме того, изучено поведение γ -мод в звездах с преимущественно гиперонным составом, приведены диаграммы окон неустойчивости на плоскости (Ω, T^∞) при разных предположениях о составе и состоянии вещества, на эти же диаграммы помещены данные наблюдений. Результаты обсуждаются, отмечается, что принятая модель позволяет ближе подойти к согласию с наблюдениями.

В качестве положений, выносимых на защиту, приведены четыре самых существенных результатов, которыми диссертант, по-видимому, гордится. И эти результаты действительно составляют выжимку всей работы, но можно было бы привести и многое другое, что частично сделано в конце текста (приведено семь пунктов), или сформулировать положения в более общей форме. Заметим, что и название диссертации отражает только часть (основную) ее содержания. Большое количество и важность полученных результатов позволяет пожелать диссертанту, не откладывая в долгий ящик, перейти к разработке материала следующей диссертации, расширив теоретическую и численную стороны работы и их сочетание.

Текст работы написан хорошим языком и без погрешностей, обнаружена лишь одна опечатка: «неналитичность» после (4.38).

Результаты работы опубликованы в 6 статьях в ведущих мировых изданиях: три статьи в *Physical Review*, по одной в *MNRAS*, *Universe* и *Journal of Physics Conference Series*. Во всех статьях диссертант первый соавтор с определяющим вкладом, как сказано в тексте. Результаты являются новыми, проясняют существенные проблемы астрофизики нейтронных звезд и поэтому могут считаться вкладом в этот раздел астрофизики. Они много раз докладывались на престижных семинарах и конференциях и могут быть использованы в СПбГУ, ИНАСАН и других учреждениях России и зарубежья, занимающихся теорией и наблюдениями нейтронных звезд.

Диссертационная работа Краава К.Ю. «Свойства релятивистских γ -мод и влияние диффузии на динамику нейтронных звезд» полностью соответствует требованиям «Положения о присуждении учёных степеней ФГБУН Физико-технический института им. А.Ф. Иоффе РАН», предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, а её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1. Физика

космоса, астрономия.

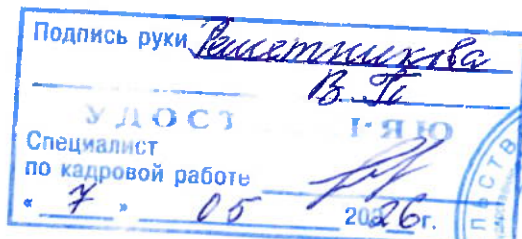
Отзыв подготовлен доктором физико-математических наук, профессором, профессором кафедры астрофизики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» Нагирнером Дмитрием Исидоровичем.

Отзыв обсужден и одобрен на заседании кафедры астрофизики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» 05.05.2026, № протокола 44/8/2-02-3.

И.о. заведующего кафедрой астрофизики
профессор



В.П. Решетников



Сведения о ведущей организации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»
Адрес: 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7-9
Тел.: +7(812) 328-97-01
e-mail: spbu@spbu.ru
web-site: <https://spbu.ru/>