

**ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию Краава Кирилла Юрьевича
«Свойства релятивистских γ -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»**

Диссертационная работа посвящена изучению так называемых вращательных колебаний (или, γ -мод) в релятивистских моделях нейтронных звезд (НЗ). Рассматриваются НЗ с реалистическим состоянием вещества, протонной сверхпроводимостью и нейтронной сверхтекучестью, детально обсуждаются вопросы диссипации γ -мод за счет трех различных механизмов и их усиление за счет так называемой неустойчивости Чандрасекара-Фридмана-Шулца, связанной с излучением гравитационных волн. Учитывается возможная роль гиперонов, которые могут присутствовать в некоторых моделях НЗ. Диссертация представляется несомненно актуальной, так как свойства колебаний НЗ могут дать информацию о структуре сверхплотного вещества, которую невозможно получить из наземных экспериментов, а изучение возможности излучения гравитационных волн нейтронными звездами представляет существенный интерес для гравитационно-волновой астрономии.

На защиту выносятся следующие результаты: 1) впервые учтена роль нового механизма диссипации γ -мод и других мод колебаний НЗ, связанная с относительным движением компонент материи НЗ с учетом протонной сверхпроводимости. 2) Предложен новый подход к описанию релятивистских γ -мод, позволяющий снять качественные противоречия, возникающие при использовании других методов. 3) Изучено влияние на спектр и собственные функции γ -мод эффекта увлечения систем отсчета, возникающего в моделях релятивистских вращающихся НЗ, и показано, что оно существенно. 4) Изучена роль объемной вязкости, связанной с наличием гиперонов, как механизма затухания γ -мод.

Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения, содержит 249 страниц, включая 24 рисунка, 2 таблицы и список литературы, насчитывающий 201 наименование.

Первая глава носит вводный характер. В ней автор рассматривает современные представления о физике вещества нейтронных звезд и на их основе предлагает звездную модель, которая используется во всех дальнейших расчетах. Здесь обсуждаются принимаемые приближения, приводятся уравнения колебаний и формулы для характерных времен, на

которых амплитуда колебаний меняется из-за излучения гравитационных волн и влияния различных механизмов диссипации энергии.

Вторая глава рассматривает ранее не изучавшееся влияние диффузии частиц, то есть движения частиц различных сортов друг относительно друга, на простейшие виды колебаний – на звуковые волны, а также на глобальные осцилляции невращающихся НЗ. Для определения роли диффузии автор сравнивает времена затухания колебаний за счет диффузии с временами их затухания за счет сдвиговой вязкости, считающейся основным механизмом диссипации в не слишком молодых НЗ. Расчеты проводятся в предположении как нормальных, так и сверхпроводящих протонов. Автор показывает, что протонная сверхпроводимость неожиданным образом значительно ускоряет диффузионное подавление колебаний, из-за чего для многих рассмотренных колебаний в сверхпроводящих НЗ диффузия оказывается определяющим механизмом диссипации, а влияние сдвиговой вязкости на ее фоне оказывается пренебрежимо слабым.

Третья глава изучает влияние эффектов общей теории относительности (ОТО) на свойства γ -мод – практически тороидальных инерционных колебаний вращающихся звезд. Автор предлагает оригинальный метод описания релятивистских γ -мод, который позволяет разрешить накопившиеся в литературе качественные противоречия между предсказаниями разных подходов касательно свойств спектра и собственных функций γ -мод в ОТО. Применение этого метода приводит автора к уравнениям релятивистских γ -мод, которые можно считать релятивистским обобщением «классических» нерелятивистских уравнений γ -мод. Детальный анализ этих уравнений в совокупности с проведенными численными расчетами выявляет сильное влияние релятивистского увлечения инерциальных систем отсчета (и.с.о.) на спектр и собственные функции γ -мод. Наиболее интересным следствием этого эффекта, с точки зрения автора, является неаналитичность γ -мод по угловой скорости вращения звезды, то есть невозможность представить собственные функции и спектр γ -мод в виде рядов по данному параметру. Эта неаналитичность выражена тем ярче, чем медленнее вращается звезда, и проявляется в виде локализации γ -мод у поверхности звезды. Кроме того, автор обращает внимание на то, что увлечение и.с.о. модифицирует геометрию движения вещества, отклонение которой от числа тороидальной становится сильнее, чем в нерелятивистской теории.

Четвертая глава продолжает изучение свойств релятивистских γ -мод. В ней автор рассматривает влияние релятивистских эффектов на времена гравитационно-волновой раскачки γ -мод и времена их подавления сдвиговой вязкостью, объемной вязкостью и диффузией частиц. Показывается, что учет ОТО замедляет развитие гравитационно-волновой неустойчивости γ -мод и, в

то же время, ускоряет их подавление всеми рассмотренными диссипативными механизмами. Отмечается, что обнаруженные отличия релятивистских γ -мод от ньютоновских сильнее всего влияют на эффективность диффузии частиц и объемной вязкости: даже при умеренных скоростях вращения, когда собственные функции релятивистских γ -мод качественно похожи на ньютоновские, эти механизмы подавляют γ -моды как минимум на 1.5-2 порядка быстрее, чем предсказывается ньютоновской теорией. В результате комбинированное усиление диффузии протонной сверхпроводимостью и особенностями собственных функций релятивистских γ -мод в широком диапазоне температур приводит к доминирующей роли диффузии в подавлении γ -мод в сверхпроводящих НЗ с нуклонным составом вещества. Автор также показывает, что, если допустить присутствие гиперонов в звездном веществе, основным механизмом подавления релятивистских γ -мод становится объемная вязкость, обусловленная протеканием слабых безлептонных процессов с участием гиперонов. В частности, показывается, что этот механизм оказывается достаточно эффективным для подавления γ -мод в звездах с параметрами, наблюдаемыми в двойных маломассивных рентгеновских системах.

Текст диссертации написан ясным научным языком, обращает на себя весьма существенный объем выполненной работы. Обнаружен и объяснен качественный эффект специфической неаналитичности релятивистских γ -мод. Несмотря на отличное впечатление от представленной диссертации, необходимо отметить ряд замечаний, возникших после ее прочтения.

(1) Во-первых, автор использует только асимптотические методы исследования γ -мод, предполагая некоторые их свойства (например, их тороидальный характер) заданными в ведущем порядке по рассматриваемому малому параметру. По моему мнению, такой подход было необходимо дополнить численным решением уравнений, описывающих возмущения НЗ.

(2) В списке литературы не приведена ссылка на основополагающую работу по γ -модам Papaloizou, J., Pringle, J. E., MNRAS, 1978, 182, 423.

(3) Не совсем понятно, почему «диффузионный механизм» затухания γ -мод, рассмотренный в диссертации, называется диффузионным, так как диффузия обычно ассоциируется со случайным блужданием частиц, которое не необходимо для этого механизма.

(4) В работе не обсуждается нелинейное взаимодействие моды, раскачиваемой гравитационно-волновой неустойчивостью с другими модами колебаний НЗ. Такой процесс может конкурировать с процессами подавления гравитационно-волновой неустойчивости, рассмотренными в диссертации.

(5) Текст не свободен от мелких неточностей и неясных мест, опечаток, небольших грамматических ошибок. Приведу несколько примеров. При чтении стр. 20 может возникнуть впечатление, что закон Гиббса-Дюгема независим от второго закона термодинамики, тогда как он является его следствием. На стр. 75 читаем «либо один либо нейтрон», а на стр. 80 присутствует не совсем понятный «чистый градиент в уравнении Эйлера». На стр. 70 наречие «вдобавок» написано в добавок, а на странице 132 читаем «В следствие» вместо «Вследствие». Выбор основных переменных представляется не совсем удачным, так как в уравнениях гидродинамики остается скорость света даже в ньютоновском пределе. Фамилия Schutz может, по моему мнению, быть переведена на русский как «Шутц» или «Шулц», но не «Шатц».

Перечисленные замечания, конечно же, не портят отличного впечатления от выполненной работы и не умаляют ценности полученных автором результатов. Все выносимые на защиту результаты представляются оригинальными и достоверными. Автореферат правильно отражает содержание диссертации. Считаю, что диссертационное исследование «Свойства релятивистских g -мод и влияние диффузии на динамику нейтронных звезд» отвечает всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, а соискатель Краав Кирилл Юрьевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1. — «Физика космоса, астрономия».

Официальный оппонент:

Главный научный сотрудник
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Физического института имени П. Н. Лебедева Российской академии наук
(ФИАН), доктор физико-математических наук
Иванов Павел Борисович *Иванов* 05 мая 2026 г.

Контактные данные:

119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д.53

Телефон: +7 (495) 333-25-23

e-mail: ivanovpb@lebedev.ru

Подпись П. Б. Иванова удостоверяю:

Ученый секретарь ФИАН

Кандидат физико-математических наук

Колобов
Колобов Андрей Владимирович