

**ОТЗЫВ НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ**  
на диссертацию **Кирилла Юрьевича Краава**  
на тему: «**Свойства релятивистских  $\gamma$ -мод и влияние диффузии на динамику нейтронных звезд**»

Я хорошо знаю Кирилла Юрьевича Краава по многолетней совместной научной работе в секторе теоретической астрофизики ФТИ им. А.Ф. Иоффе. За это время Кирилл проявил себя как способный, целеустремленный исследователь, продемонстрировавший быстрый профессиональный рост и уверенно владеющий современными методами теоретической физики и астрофизики компактных объектов.

Диссертационная работа К.Ю. Краава посвящена одной из **актуальных** и в то же время весьма сложных задач современной теоретической астрофизики – исследованию колебаний нейтронных звезд. Прежде всего она изучает свойства релятивистских  $\gamma$ -мод, а также влияние диффузии и других диссипативных процессов на их динамику. Актуальность этой тематики не вызывает сомнений. Нейтронные звезды являются уникальными природными лабораториями, в которых реализуются физические условия, недостижимые на Земле, и потому изучение их колебательных свойств, механизмов затухания и гравитационно-волновой неустойчивости представляет принципиальный интерес как для теории сверхплотного вещества, так и для современной наблюдательной астрофизики. Особое значение имеет то обстоятельство, что последовательное описание  $\gamma$ -мод в рамках общей теории относительности долгое время оставалось существенно менее разработанным, чем в ньютоновском приближении, поскольку надежный подход к их моделированию фактически отсутствовал. В то же время роль диффузии частиц как возможного эффективного механизма подавления таких колебаний до последнего времени оставалась практически не изученной.

В диссертации представлены результаты двух тесно связанных направлений исследований. Первое направление посвящено изучению диффузии как диссипативного механизма в нейтронных звездах и сравнению ее эффективности с эффективностью сдвиговой и объемной вязкости. Второе направление посвящено исследованию свойств релятивистских  $\gamma$ -мод: их спектра, собственных функций, гравитационно-волновой раскачки и подавления различными диссипативными механизмами. В частности, в работе рассчитываются окна неустойчивости  $\gamma$ -мод в звездах с нуклонным и гиперонным составом вещества.

К числу наиболее важных результатов диссертации, на мой взгляд, относятся следующие. Во-первых, Кириллом впервые рассчитаны времена

диффузионного подавления звуковых волн, а также  $f$ -,  $p$ - и  $g$ -мод в нейтронных звездах с нуклонным составом вещества. Кирилл показал, что протонная сверхпроводимость может радикально усиливать диффузионную диссипацию, в результате чего при не слишком высоких температурах диффузия становится ведущим механизмом затухания ряда колебаний. Во-вторых, в диссертации предложен оригинальный подход к решению хорошо известной проблемы непрерывного спектра релятивистских  $g$ -мод. Этот результат представляется особенно важным, поскольку указанная проблема оставалась нерешенной на протяжении многих лет и существенно затрудняла развитие релятивистской теории  $g$ -мод. В рамках разработанного подхода Кирилл впервые получил спектр и собственные функции релятивистских  $g$ -мод и показал, что их свойства качественно отличаются от свойств  $g$ -мод в ньютоновской теории.

Весьма существенным результатом является также установленный в диссертации факт, что эффект увлечения инерциальных систем отсчета приводит к неаналитической зависимости собственных функций и спектра  $g$ -мод от угловой скорости вращения звезды. Это не только проясняет природу ранее возникавших трудностей, но и приводит к важным наблюдательным и теоретическим следствиям, включая изменение геометрии потоков вещества и локализацию  $g$ -мод во внешних слоях звезды в пределе медленного вращения. Наряду с этим в работе впервые получены формулы для энергии релятивистских  $g$ -мод и темпов ее изменения под действием гравитационного излучения, сдвиговой вязкости, объемной вязкости и диффузии. На этой основе Кириллом рассчитаны окна неустойчивости  $g$ -мод в нейтронных звездах с нуклонным и гиперонным составом вещества. В частности, показано, что одной лишь диффузии недостаточно для объяснения наблюдаемых параметров нейтронных звезд в маломассивных рентгеновских двойных системах (LMXB), тогда как гиперонная объемная вязкость может обеспечить эффективное подавление релятивистских  $g$ -мод в звездах с параметрами, характерными для таких систем.

Следует подчеркнуть, что диссертация носит ярко выраженный **оригинальный** характер. Кирилл не просто применял известные методы к новым задачам, а разрабатывал собственные аналитические подходы, позволившие продвинуться в решении ряда фундаментальных проблем физики нейтронных звезд. Он успешно использует методы релятивистской гидродинамики, кинетической теории, теории колебаний и современного численного моделирования. В ходе работы над диссертацией он продемонстрировал способность самостоятельно формулировать научные задачи, критически анализировать имеющуюся литературу и доводить исследование до содержательного физического результата.

По теме диссертации опубликовано **6 работ**, все в рецензируемых научных журналах; всего К.Ю. Краав является автором **11 публикаций** в международных изданиях. Он неоднократно представлял свои результаты на российских и международных конференциях и семинарах. Отдельно отмечу, что Кирилл успешно прошел полугодовую стажировку в Институте Вайцмана, где его научные результаты получили высокую оценку. Все это свидетельствует о **высоком уровне его научной квалификации** и большом потенциале для дальнейшей научной работы. На мой взгляд, в процессе выполнения диссертации К.Ю. Краав сформировался как зрелый и самостоятельный исследователь. Его отличают настойчивость, аккуратность в работе и умение глубоко разбираться в сложных вопросах современной теоретической астрофизики.

Считаю, что Кирилл Юрьевич Краав, **безусловно**, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1 – «Физика космоса, астрономия».

**Научный руководитель**

д. ф.-м. н., профессор РАН,  
ведущий научный сотрудник  
сектора теоретической астрофизики  
ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН

**М.Е. Гусаков**