

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА ФТИ 34.01.04.25  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии  
наук  
по диссертации  
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК  
аттестационное дело № \_\_\_\_\_  
решение диссертационного совета от 03.06.2026 г. № 3

О присуждении Крааву Кириллу Юрьевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Свойства релятивистских  $g$ -мод и влияние диффузии на динамику нейтронных звезд» в виде рукописи по специальности 1.3.1 – «физика космоса, астрономия» принята к защите 02 апреля 2026 г., протокол № 2, диссертационным советом ФТИ 34.01.04.25 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, расположенном по адресу: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 26. Диссертационный совет утвержден приказом директора ФТИ им. А.Ф. Иоффе № 02.01-02-153 прил. 4 от 15 июля 2025 г., приказом директора ФТИ им. А.Ф. Иоффе от № 02.01-02-224 от 17 октября 2025 г. об изменении состава диссертационного совета ФТИ 34.01.04.25.

Соискатель Краав Кирилл Юрьевич, 13 июля 1996 г.р., в 2019 году окончил федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет Российской академии наук» по специальности «Физика» (03.04.02) и в том же году поступил в аспирантуру Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук (ФТИ им. А.Ф. Иоффе) по направлению подготовки 03.06.01 «Физика и астрономия», специальность 1.3.1 – «физика космоса, астрономия», которую окончил в 2024 г. В настоящее время Краав К.Ю. работает в должности младшего научного сотрудника в секторе теоретической астрофизики отделения физики плазмы, атомной физики и астрофизики ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Научный руководитель – Гусаков Михаил Евгеньевич, доктор физико-математических наук, профессор РАН, ведущий научный сотрудник государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Официальные оппоненты:

1. Иванов Павел Борисович, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник Астрокосмического центра ФИАН им. П.Н. Лебедева, дал положительный отзыв на диссертацию, содержащий пять замечаний.

2. Коломейцев Евгений Эдуардович, к.ф.-м.н. (PhD TU Dresden), ведущий научный сотрудник Объединенного института ядерных исследований, дал положительный отзыв на диссертацию, содержащий шесть замечаний.

Оппоненты в отзывах указали, что диссертация «Свойства релятивистских  $g$ -мод и влияние диффузии на динамику нейтронных звезд» полностью соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук Положением о присуждении ученых степеней в ФГБУН Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Санкт-Петербургский государственный университет – предоставила положительное заключение, подписанное и.о. заведующего кафедрой астрофизики, доктором физико-математических наук, профессором Решетниковым Владимиром Петровичем. Заключение содержит четыре замечания. Ведущая организация в своем заключении указала, что «диссертационная работа Крава К. Ю. полностью соответствует требованиям Положения о присуждении учёных степеней в ФГБУН Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а её автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия».

Выбор официальных оппонентов обосновывается тем, что они имеют ученые степени доктора и кандидата физико-математических наук (PhD TU Dresden), работают в различных организациях, не имеют других ограничений, накладываемых п. 3.7 действующего Положения о присуждении ученых степеней. Выбранные оппоненты являются широко известными специалистами и обладают высоким уровнем компетентности в научной области, в которой выполнена диссертационная работа, что подтверждается их публикациями в рецензируемых научных журналах.

Выбор ведущей организации обосновывается тем, что Санкт-Петербургский государственный университет (СПбГУ) является одним из ведущих центров исследований в области астрономии и астрофизики. В частности, в этом

институте ведутся теоретические и наблюдательные исследования нейтронных звезд, являющихся предметом исследования диссертационной работы. Кроме того, на базе диссертационных советов, формирующихся под каждую работу, СПбГУ обладает правом проводить защиты диссертаций в том числе и по специальности 1.3.1 – «физика космоса, астрономия».

Соискатель является автором и соавтором 11 опубликованных работ, в том числе 6 работ по теме диссертации. Работы по теме диссертации опубликованы в рецензируемых научных изданиях, входящих в международную базу цитирований Web Of Science, пять из которых входят в первый и второй уровень Белого списка Российского центра научной информации. Во всех публикациях соискатель является первым автором, и его вклад в них является определяющим.

1. Kraav K., Gusakov M., Diffusion as a damping mechanism for neutron-star oscillations // Journal of Physics Conference Series. – 2020. – Vol. 1967. – Id. 012023.
2. Kraav K.Y., Gusakov M.E., Kantor E.M., Diffusion as a leading dissipative mechanism in superconducting neutron stars // MNRAS. – 2021. – Vol.506, no. 1. – P. L74-L78.
3. Kraav K. Y., Gusakov M. E., Kantor E. M., Nonanalytic behavior of the relativistic r-modes in slowly rotating neutron stars // Phys. Rev. D. –2022. – Vol. 106, no. 10. – Id. 103009.
4. Kraav K. Y., Gusakov M. E., Kantor E. M., Nonanalytic Relativistic r-Modes of Slowly Rotating Nonbarotropic Neutron Stars // Universe. – 2022. – Vol.8, no. 10. – Id. 542.
5. Kraav K. Y., Gusakov M. E., Kantor E. M., Instability windows of relativistic r-modes // Phys. Rev. D. – 2024. – Vol. 109, no. 4. – Id. 043012.
6. Kraav K. Y., Gusakov M. E., Kantor E. M., Instability windows of relativistic r-modes in stably stratified neutron stars with hyperonic cores // Phys. Rev. D. – 2025. – Vol. 112, no. 4. – Id. 043012.

На автореферат поступило два отзыва:

1. Отзыв от Чугунова Андрея Игоревича, к.ф.-м.н., старшего научного сотрудника ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Отзыв положительный и содержит 2 замечания:

- На стр. 5 указано, что проблема непрерывного спектра колебаний делала изучение физических свойств релятивистских  $\gamma$ -мод «практически невозможным». Это представляется излишне категоричным – численные расчеты релятивистских  $\gamma$ -мод проводились в работах [40,41].
- В качестве замечания, носящего скорее характер предложения для будущих исследований, отмечу, что для всеобъемлющего объяснения наблюдений нейтронных звезд в LMXB мало показать, что они устойчивы (такая модель предложена в диссертации, см. положение 7), нужно еще объяснить «кривые нагрева» – соответствие наблюдаемых температур темпам аккреции. Такой анализ позволяет ставить ограничения на нейтринную светимость из их недр [например, Potekhin et al. (2019)]. Возможно, совместный анализ неустойчивости  $\gamma$ -мод колебаний и кривых нагрева позволит наложить новые, более строгие ограничения на параметры сверхплотного вещества.

2. Отзыв от Журавлева Вячеслава Вячеславовича, к.ф.-м.н., старшего научного сотрудника Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга Московского Государственного университета им. М.В. Ломоносова. Отзыв положительный, содержит 7 замечаний:

- В описании Главы 3 автор ссылается на примеры численных расчетов  $\gamma$ -мод, выполненных без предположения о медленном вращении НЗ. Проверялось ли соответствие оригинальных полуаналитических решений, полученных автором, этим, либо аналогичным численным расчетам?
- Возможен ли расчет методом автора более общих низкочастотных мод колебаний вращающихся НЗ, которые во вращающихся звездах обычно именуется инерционными модами? Можно ли оценить актуальность такого расчета для физики НЗ?
- Автор ограничивается решением линейной задачи о колебаниях НЗ. В то же время, существуют работы, где анализируется резонансное взаимодействие  $\gamma$ -мод, например, с (другими) инерционными модами (Phil Arras et al. 2003) с учетом их конечных

амплитуд, в результате чего энергия передается последним. Амплитуда насыщения  $\gamma$ -мод и влияние мод при этом достаточно мала. Было бы полезно проанализировать, как это может сочетаться с линейными механизмами диссипации  $\gamma$ -мод, рассмотренными в диссертационной работе.

- В заглавии диссертационной работы стоило указать, какая именно диффузия в ней исследуется.
- В конце раздела об актуальности темы диссертации последние три предложения относятся скорее уже к обоснованию новизны работы и описанию ее результатов.
- Там же можно прочесть: "существенная часть работы сосредоточена на изучении  $\gamma$ -мод... для которых основной возвращающей силой служит сила Кориолиса". Означает ли это, что есть некие второстепенные возвращающие силы, без которых  $\gamma$ -моды не существуют?
- В описании раздела 2.1 утверждается, что "электроны сцеплены с нейтронами и протонами электромагнитным взаимодействием". Не вполне понятно, каким именно образом электроны взаимодействуют с электронейтральными частицами.

Диссертационный совет отмечает, что в рамках выполненных соискателем исследований получен ряд новых результатов, важных для наблюдательной астрофизики и сейсмологии нейтронных звезд:

- Проведены расчеты времен затухания за счет диффузии частиц для звуковых волн, а также  $f$ -,  $p$ - и  $g$ -мод в нейтронных звездах с нуклонным составом ядра. Показано, что обусловленные диффузией энергопотери колебаний испытывают значительное усиление протонной сверхпроводимостью, из-за чего для звуковых мод,  $p$ -мод и  $g$ -мод в сверхпроводящих нейтронных звездах с температурой  $T \lesssim 10^8$  K и нуклонным ядром диффузия является ведущим каналом диссипации.
- Предложено решение «проблемы непрерывного спектра» — накопившихся в литературе качественных противоречий, связанных с влиянием эффектов общей теории относительности на свойства  $\gamma$ -мод. Получены релятивистские аналоги уравнений ньютоновских  $\gamma$ -мод, рассчитаны спектр и собственные функции релятивистских  $\gamma$ -мод.
- Установлено, что частоты и собственные функции релятивистских  $\gamma$ -мод из-за эффекта увлечения инерциальных систем отсчета неаналитическим образом зависят от угловой скорости вращения звезды. Показано, что эта неаналитичность влияет на геометрию потоков вещества и, в частности,

при медленных скоростях вращения проявляется как локализация  $\gamma$ -мод у поверхности звезды. Получены формулы для собственных функций и спектра релятивистских  $\gamma$ -мод в пределе медленного вращения.

- Выведены выражения для энергии релятивистских неаналитических  $\gamma$ -мод и темпов ее изменения, связанного с гравитационно-волновым излучением и влиянием диффузии, сдвиговой вязкости и объемной вязкости. Продемонстрировано, что специфические свойства  $\gamma$ -мод в общей теории относительности модифицируют зависимость этих величин от скорости вращения. Получены выражения, описывающие эту зависимость в пределе медленного вращения.
- Проведены расчеты времени гравитационно-волновой раскачки и времен подавления релятивистских  $\gamma$ -мод диффузией, сдвиговой вязкостью и объемной вязкостью в нейтронных звездах с нуклонным ядром. Установлено, что обусловленные увлечением инерциальных систем отсчета особенности релятивистских  $\gamma$ -мод существенно ускоряют подавление  $\gamma$ -мод, вызванное объемной вязкостью и диффузией частиц. Показано, что в релятивистской теории диффузия оказывается ведущим механизмом энергопотерь для  $\gamma$ -мод в сверхпроводящих нейтронных звездах с температурой  $T \lesssim 10^8$  K и нуклонным составом вещества.
- Рассчитаны окна неустойчивости релятивистских  $\gamma$ -мод в нейтронных звездах с нуклонным ядром. Изучена возможность объяснения стабильности наблюдаемых частот вращения звезд в LMXB системах с помощью диффузионного подавления  $\gamma$ -мод. R-моды в таких звездах не подавляются стандартными механизмами (сдвиговой и объемной вязкостью). Поэтому, в отсутствие других каналов диссипации, при наблюдаемых частотах вращения они должны были бы приводить к замедлению вращения из-за интенсивного излучения гравитационных волн. Показано, что в звездах с параметрами, характерными для маломассивных рентгеновских двойных систем (LMXB), диффузионные энергопотери недостаточно велики для подавления  $\gamma$ -мод и, следовательно, объяснения стабильных частот вращения таких звезд.
- Рассчитаны окна неустойчивости релятивистских  $\gamma$ -мод в нейтронных звездах с учетом возможного появления гиперонов в их ядрах. Показано, что из-за увеличения коэффициента объемной вязкости, связанного со слабыми безлептонными процессами в гиперонном веществе, а также свойств релятивистских  $\gamma$ -мод, обусловленных влиянием увлечения инерциальных систем отсчета, объемная вязкость крайне эффективно подавляет релятивистские  $\gamma$ -моды. Согласно представленным результатам, гиперонная объемная вязкость способна обеспечить

диссипацию, достаточную для подавления  $g$ -мод в звездах в LMXB системах даже с учетом эффектов нуклонной сверхтекучести и сверхпроводимости.

Достоверность результатов обеспечена использованием известных и апробированных методов аналитического и численного моделирования. Расчеты проводятся в рамках физически обоснованных предположений, границы применимости которых строго оговорены. В доступных предельных случаях результаты работы сравнивались с ранее опубликованными расчетами и показали согласие с ними. Результаты работы представлялись и обсуждались на астрофизических семинарах ФТИ им. А.Ф. Иоффе (Санкт-Петербург; 2020, 2021, 2023 и 2024) и института Вейцмана (Rehovot; 2024), а также на международных и российских конференциях: «The Modern Physics of Compact Stars and Relativistic Gravity» (Yerevan; 2021 и 2025), «Infinite and Finite Nuclear Matter» (Дубна; 2023 и 2025), «Физика нейтронных звезд» (Санкт-Петербург; 2023), «High Energy Astrophysics» (Москва; 2022), «Всероссийская астрономическая конференция» (Москва; 2021), «Физика А.СПб» (Санкт-Петербург; 2020, 2021 и 2024).

Научная и практическая значимость диссертационной работы Краава К.Ю. обоснована тем, что она предлагает решение ряда насущных проблем, связанных с физикой колебаний нейтронных звезд. В диссертации подробно исследована природа «проблемы непрерывного спектра», затруднявшей изучение физики релятивистских  $g$ -мод с 1997 года. Оригинальный подход к анализу уравнений, предложенный в диссертации, раскрыл ряд специфических особенностей релятивистских  $g$ -мод, в частности – их усиленное подавление объемной вязкостью. Комбинированное влияние этого эффекта и увеличения коэффициента объемной вязкости в гиперонном веществе, в свою очередь, позволяет объяснить стабильное вращение нейтронных звезд в маломассивных рентгеновских двойных системах. Кроме того, в диссертации выявлена существенная роль диффузии частиц в подавлении колебаний нейтронных звезд. В частности, показано, что сверхпроводимость протонов увеличивает диффузионные энергопотери, и в результате для многих гидродинамических колебаний сверхпроводящих нейтронных звезд диффузия частиц является основным каналом диссипации энергии. Таким образом, результаты диссертационного исследования указывают на новые неожиданные аспекты сейсмологии нейтронных звезд, что необходимо учитывать при теоретическом моделировании и интерпретации наблюдений данных объектов.

Личный вклад соискателя состоял во включенном участии в решении всех поставленных задач, формулировке выводов и подготовке публикаций.

Соискатель Краав К.Ю. ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы и привел собственную аргументацию.

Диссертация Краава К.Ю. является законченным научным исследованием, вносящим существенный вклад в физику нейтронных звезд.

На заседании 03 июня 2026 года диссертационный совет принял решение присудить Крааву К.Ю. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении голосования диссертационный совет в количестве 16 человек, из них 10 докторов по специальности 1.3.1 – «физика космоса, астрономия», участвовавших в заседании, из 19 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за 16, против 0, мнение не выявлено 0.

Председатель  
диссертационного совета,  
д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН

Иванчик Александр Владимирович

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
к.ф.-м.н.

Штернин Петр Сергеевич