

ОТЗЫВ официального оппонента  
на диссертацию Краава Кирилла Юрьевича  
«Свойства релятивистских  $r$ -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

Диссертация посвящена актуальной проблеме астрофизики – стабильности вращения нейтронных звезд относительно возбуждения  $r$ -мод – квазитороидальных колебаний вращающихся звезд, для которых основной возвращающей силой служит сила Кориолиса. Из-за излучения гравитационных волн  $r$ -моды оказываются неустойчивыми, и рост их амплитуды должен был бы привести к быстрому замедлению вращения звезд, что противоречит наблюдениям. Много различных механизмов диссипации, которые были бы достаточно сильными чтобы подавить неустойчивость, были предложено в литературе. Однако согласованной картины явления пока не получалось.

Автор подошел к решению проблемы с самого начала и вывел уравнения для релятивистских  $r$ -мод с учетом эффектов ОТО (увлечения инерциальных систем отсчета) и небаротропности уравнения состояния. Так было обнаружено, что релятивистские  $r$ -моды в небаротропном веществе существенно отличаются от своих ньютоновских аналогов и обладают рядом необычных свойств: они имеют другой спектр колебаний и геометрию потоков вещества. Самое главное – было обнаружено, что собственные функции релятивистских  $r$ -мод имеют неаналитическую зависимость от скорости вращения звезды в отличие от ньютоновских  $r$ -мод. Эти особенности релятивистских  $r$ -мод кардинально влияют на их устойчивость. Также автор исследовал новый механизм диссипации энергии  $r$ -мод, связанный с диффузией частиц. Дополнительно учтено влияние гиперонной объемной вязкости. Показано, что релятивистские  $r$ -моды подавляются диффузией и объемной вязкостью сильнее, чем в ньютоновской теории.

Упомянутые выше результаты представляются мне яркими и чрезвычайно интересными. Хочу отметить, что и остальные из семи результатов, сформулированных в заключении диссертации, являются новыми и представляют собой несомненный научный интерес.

Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения.

В **первой главе** представляется разработанный формализм релятивистской диссипативной гидродинамики нормальных и сверхтекучих/сверхпроводящих смесей. Автор аккуратно отмечает все сделанные приближения и особенности определения энергии и закона её сохранения в ОТО, вводит общее определение адиабатического индекса и объемной вязкости, которые могут использоваться в веществе с протекающими химическими реакциями, описывает различные диссипативные процессы в нейтронной звезде и выводит общие формулы для энергопотерь звезды. Кратко представлены выражения для излучения гравитационных волн и объяснено появление неустойчивости Чандрасекара-Фридмана-Шатца. Также в этой главе обсуждается влияние нуклонного спаривания. Таким образом, эта глава является подготовительной для всех последующих, и собранные в ней уравнения и формулы используются во всех остальных главах работы.

Тем досаднее, что именно в этой главе в отличие от остальных нет заключительной секции, в которой можно было бы собрать все необходимые выражения в окончательной форме и дать необходимые определения. Это упростило бы дальнейшее чтение и сократило бы пролистывание 70 первых страниц в поисках нужной формулы.

В начале главы не хватает краткого описания строения нейтронной звезды и её состава, кривых масс-радиус для уравнений состояния, которые будут использоваться в приложениях. Здесь же можно было четко указать, какое нуклонное спаривание (протонное и/или нейтронное) будет использоваться в дальнейшем. Тогда можно было бы избежать чехарды с нейтронным спариванием: на стр. 70 нейтроны считаются нормальными, а на стр. 72 рассматривается нейтронная сверхтекучесть, которая оказывается триплетного типа на стр. 73, в то время как на стр. 90 упоминается опять только сверхпроводящее вещество, но на стр. 207 снова обсуждается нейтронная сверхтекучесть.

Важность вкладов от различных процессов (1.27-1.33) в объемную вязкость зависит от отношения скорости реакции и скорости вращения звезды. Поэтому характерные значения скоростей вращения звезд и химических реакций следовало бы привести в начале главы 1 на основании расчетов, сделанных в работах [63,64].

**Глава 2** исследует влияние диффузии частиц на подавление колебаний нейтронных звезд. Рассматриваются звуковые волны,  $f$ -моды,  $p$ -моды и  $g$ -моды. Их затухание за счет диффузии сравнивается с затуханием за счет сдвиговой вязкости, которая традиционно считается наиболее эффективным диссипативным механизмом при не слишком высоких температурах. Оказывается, в веществе с нормальными протонами влияние диффузии является слабым и его можно не учитывать для всех рассмотренных колебаний, кроме  $g$ -мод. Если же протоны сверхпроводящие, диффузия приводит к очень быстрому подавлению колебаний, в особенности звука,  $p$ -мод и  $g$ -мод, для которых подавление диффузией происходит намного быстрее подавления сдвиговой вязкостью.

Рисунок 2.1 показывает, что появление новой заряженной компоненты (мюоны) приводит к резкому росту эффективности диффузионных потерь энергии. Как по мнению автора изменится диффузионное время затухания, если учесть возможность образования отрицательно заряженного пионного конденсата?

**Глава 3** посвящена задаче моделирования  $r$ -мод. Сначала обсуждаются стандартные методы моделирования ньютоновских  $r$ -мод и сложности, возникающие в наивном релятивистском обобщении теории («проблема непрерывного спектра»). В дальнейшем предлагается альтернативный метод описания релятивистских  $r$ -мод. Анализ уравнений для колебаний показал, что собственные функции релятивистских  $r$ -мод неаналитичным образом зависят от  $\Omega$  и  $\epsilon$ , и что их производные по  $r$  оказываются более высокого порядка  $\sim \epsilon^{1/2}/\Omega$ , нежели сами эти функции. Это одна из причин, по которой релятивистские  $r$ -моды не удастся описать в рамках стандартной теории возмущений, основанной на формальном разложении в ряды Тейлора по  $\Omega$  и  $\epsilon$ . Несмотря на насыщенность формулами, эта глава представляет собой увлекательное чтение.

Применению общего формализма для описания диссипации и гравитационного излучения к релятивистским  $r$ -модам и определению устойчивости вращения нейтронных звезд посвящена **четвертая глава**. Пользуясь формализмом из предыдущей главы, были получены выражения для расчета энергии  $r$ -мод и темпов её изменения. По сравнению с ньютоновским случаем, при медленных скоростях вращения особенности релятивистских  $r$ -мод снижают эффективность их раскачки и существенно увеличивают эффективность их подавления диссипативными механизмами. В пределе экстремально медленного вращения, когда релятивистские  $r$ -моды радикально отличаются от ньютоновских, были выведены аналитические выражения для энергопотерь.

Для описания звезды использовались два уравнения состояния TM1C и FSU2H, которые оба позволяют появление  $\Lambda$  и  $\Xi$  гиперонов в ядре нейтронной звезды. Усиление подавления  $r$ -мод гиперонной объемной вязкостью за счет эффектов ОТО приводит к тому, что для  $r$ -мод последняя оказывается намного более значимым диссипативным механизмом, чем считалось ранее. Автор показывает, что гиперонная вязкость способна подавить  $r$ -моды даже в наиболее «проблемных» – быстро вращающихся и умеренно горячих – звездах в LMXB системах, причем подобное подавление возможно даже с учетом эффектов нуклонного спаривания.

В связи с этим результатом возникает вопрос, можно ли представить себе механизм подавления  $r$ -мод без гиперонов, чье присутствие все-таки слишком сильно снижает максимальную массу нейтронных звезд? Насколько критичным является наличие  $\Xi$  гиперонов? Параметры взаимодействия  $\Xi$  гиперонов с нуклонами являются сильно модельно-зависимыми, и  $\Xi$  могут не появляться в нейтронной звезде.

Сделанные выше замечания ни в коей мере не умаляют достоинств работы и не влияют на основные полученные результаты, их значимость и достоверность.

Результаты диссертации опубликованы в международных журналах, доложены на международных конференциях

В диссертации автор продемонстрировал отличное понимание физики нейтронных звезд. Диссертантом показано владение различными методами теоретических исследований.

Автореферат соответствует содержанию диссертации.

В заключение можно с уверенностью констатировать, что диссертационное исследование «Свойства релятивистских  $r$ -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».

Евгений Эдуардович Коломейцев

Официальный оппонент  
кандидат физико-математических наук  
ведущий научный сотрудник  
Лаборатории теоретической физики  
Объединенного института ядерных исследований

Адрес: 141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6  
эл почта: kolomei@theor.jinr.ru  
тел.: +7 915 057 7015

Подпись в.н.с. ЛТФ ОИЯИ Е.Э. Коломейцева заверяю

19.05.2026

директор ЛТФ ОИЯИ

проф. д. ф.-м. н. Д.И. Казаков

