

**ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию Офенгейма Дмитрия Дмитриевича
«Модельно-независимый анализ эволюции нейтронных звёзд»,
представленной на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.03.02 – Астрофизика и звездная астрономия**

Диссертация посвящена различным аспектам эволюции нейтронных звёзд: остыванию за счёт излучения нейтрино и фотонов; эволюции магнитного поля внутри звезды и его влиянию на сдвиговую вязкость; устойчивости вращения относительно возбуждения g -моды колебаний. По каждой теме в диссертации представлены оригинальные идеи и получены новые результаты, которые, несомненно, будут интересны не только астрофизикам, но и физикам, изучающим плотное ядерное вещество.

В первой главе автор систематизирует различные процессы нейтринной и фотонной светимости звезд и предлагает аналитические аппроксимационные формулы, которые достаточно хорошо работают для различных режимов остывания и уравнений состояния ядерного вещества. Несмотря на то, что представленные результаты в целом технические, они являются чрезвычайно полезными для учета эффектов остывания звезд в более общих расчетах, так как позволяют сэкономить вычислительные ресурсы. Несомненно, они будут использованы и другими исследователями. В полную силу полученные в главе 1 результаты проявили себя в главе 2, в которой они позволили определить «стандарты скорости» нейтринного и фотонного остываний звезды. Таким образом, различные сценарии остывания могут быть представлены всего двумя параметрами: коэффициентами усиления/ослабления нейтринного и фотонного остывания. Это дает возможность при тепловом анализе остывающих звезд получить дополнительные ограничения на массу аккрецированного вещества, а также на соотношение массы-радиуса ($M-R$) звезды. Такой анализ был проведен для двенадцати звёзд, включая пульсар Вела (одну из самых холодных звёзд на нейтринной стадии охлаждения) и звезду XMMU J1732 (одну из самых горячих со слабым магнитным полем). Полученные результаты представляют собой несомненный научный интерес.

Вместе с тем, приходится отметить определенный недостаток в обсуждении физики, вызывающей усиление или подавление охлаждения звёзд. В основном обсуждаются только эффекты, связанные с нуклонным спариванием. Другие эффекты, связанные с изменением свойств нуклонов (эффективная масса и т.п) и нуклон-нуклонного взаимодействия в среде, упоминаются лишь вскользь. Вместе с тем, именно такие эффекты оказываются важны для вычислений, сделанных в четвертой главе диссертации. В этой связи я не могу согласиться с тем, что метод анализа остывания нейтронных звёзд, предложенный в главе 2, является полностью «модельно-независимым». Он является таким в рамках сделанных предположений и для достаточно широкого, но ограниченного набора уравнений состояния, рассмотренных в работе. Появление новых фаз с гиперонами, мезонными конденсатами или кварками могут существенно менять уравнение состояния и нейтринную светимость ядерного вещества, так что, во-первых, интерполяционные формулы будут хуже работать, и, во-вторых, скорость охлаждения будет зависеть от массы звезды более резко, и такую зависимость надо учитывать явно.

Глава 3 посвящена самосогласованному решению уравнений магнитной гидродинамики. Полученные решения показывают, что вещество нейтронной звезды находится в коллективном движении и диффузионные скорости отдельных компонент малы по сравнению со скоростью общего потока. Это новый результат, принципиально отличающийся от предположений, традиционно делаемых в других работах. Кроме того, в этой главе была посчитана сдвиговая вязкость коры нейтронной звезды с магнитным полем.

Было бы желательно, чтобы в работе, хотя бы кратко, были обсуждены вопросы, связанные с появлением других фаз в недрах звезды, в которых присутствуют другие заряженные частицы (заряженные гипероны и мезонные конденсаты). Какие граничные условия должны быть наложены на магнитное поле на границе различных фаз?

Последняя глава посвящена вычислению объемной вязкости вещества нейтронной звезды в присутствии гиперонов. Главный вклад в объемную вязкость возникает за счёт механизма, предложенного Мандельштамом и Леонтовичем, при котором диссипация энергии колебаний происходит из-за отставания процессов превращения частиц разных сортов друг в друга от частоты колебаний. Определяющей является скорость таких процессов. В работе вычисляются матричные элементы слабых процессов рождения и уничтожения гиперонов с учетом обмена как тяжелым W -бозоном, так и легким пионом. При этом в последнем случае учитывались эффекты запаздывания, т.е. зависимость пионного пропагатора от частоты. Это отличает данную работу от предыдущих работ на эту тему, в которых такой частотной зависимостью просто пренебрегали. Как показали вычисления, её учет может приводить к существенному усилению вероятности реакций, в зависимости от уравнения состояния ядерного вещества и модели пионного поляризационного оператора в среде. На мой взгляд, это интересный и важный результат.

Однако, если средовые эффекты оказались важными для слабых процессов с участием гиперонов, возможно, их следовало бы также учитывать и в процессах с рождением нейтрино. Подобное обсуждение, объединяющее главы 1, 2 и 4, придало бы работе замкнутость.

Сделанные замечания ни в коей мере не умаляют достоинств работы и не влияют на основные полученные результаты, их значимость и достоверность. Они в большей степени должны продемонстрировать потенциальную возможность для дальнейших исследований.

Результаты диссертации опубликованы в международных журналах, доложены на международных конференциях и уже хорошо цитируются.

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 диссертация Офенгейма Дмитрия Дмитриевича «Модельно-независимый анализ эволюции нейтронных звёзд» соответствует всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям Положением о присуждении учёных степеней в ФТИ им. А.Ф. Иоффе, а автор, безусловно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 – астрофизика и звёздная астрономия.

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

Евгений Эдуардович Коломейцев

Адрес: 141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6
эл почта: kolomei@theor.jinr.ru
тел.: +7499 1964930

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

01.06.2020

Ученый секретарь ЛТФ ОИЯИ

А.В. Андреев