

**Отзыв официального оппонента на диссертацию
Михаила Викторовича Безногова
«ТЕПЛОВАЯ ЭВОЛЮЦИЯ НЕЙТРОННЫХ ЗВЁЗД
С АККРЕЦИОННЫМИ ОБОЛОЧКАМИ»,**

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 – Астрофизика и звездная астрономия

Диссертационная работа М.В. Безногова посвящена проблеме тепловой эволюции нейтронных звёзд. Как подробно объясняется во **Введении**, нейтронные звёзды являются естественными природными лабораториями по исследованию физических процессов, происходящих в экстремальных условиях, недоступных в земных экспериментах. Изучение параметров нейтронных звёзд способно наложить важные ограничения на уравнение состояния сверхплотного вещества и, тем самым, направить усилия теоретиков. Фактически, сейчас у нас нет иных способов проверить правильность наших представлений о физике вещества с плотностью в несколько раз выше ядерной, кроме как через посредство нейтронных звёзд. Таким образом, тема диссертации М.В. Безногова, безусловно, **актуальна**.

Одним из основных источников данных о нейтронных звёздах является исследование их тепловой эволюции. Однако при интерпретации экспериментальных данных по остыванию нейтронных звёзд возникают значительные сложности, связанные с неопределённостью состава и параметров их теплоизолирующих оболочек. Для решения этой проблемы диссертантом разработан подход, позволяющий рассчитать строение этих оболочек, и тем самым связать наблюдаемую температуру поверхности T_s и внутреннюю температуру нейтронной звезды T_b . Описанию решения этой задачи и применению результатов к проблеме остывания нейтронных звёзд посвящены первые четыре главы диссертации. Последняя, пятая, описывает оригинальный подход к статистической теории тепловой эволюции нейтронных звёзд. Рассмотрим теперь подробно основные **результаты** диссертационной работы. Она состоит из введения, пяти глав, каждая из которых завершается краткими выводами и заключения. Кроме того, она содержит два приложения, содержащие аналитические аппроксимации полученных соотношений и список литературы в 182 пункта, свидетельствующий о широкой эрудиции автора в освещаемых вопросах.

В **первой главе** даются основные определения для неидеальной многокомпонентной плазмы, описывается оригинальный подход к диффузии составляющих её компонент, выводятся выражения для диффузионных потоков и связанного с диффузией энерговыделения. Важной особенностью полученных выражений является последовательный учёт конечного градиента

температуры, обобщающий известный изотермический предел. Тем самым становится возможным применить данную теорию к случаю теплоизолирующих оболочек нейтронных звёзд. Кроме того, в результате анализа полученных соотношений выявлено существование нового, «кулоновского» механизма разделения зарядов в звёздной плазме. Этот механизм отвечает за разделение компонент с одинаковым отношением заряда к массе Z/A . В конце данной главы приводятся примеры расчётов, показывающие, что, хотя для компонент с разным Z/A доминирует обычный, «гравитационный» механизм разделения, однако в широко распространённом случае смесей с одинаковым Z/A (${}^4\text{He}$ и ${}^{12}\text{C}$, например) главную роль будет играть именно «кулоновский» механизм.

Вторая глава посвящена проблеме вычисления коэффициентов диффузии в бинарных смесях. Вначале даётся широкий обзор и анализ существующих подходов. В результате автор приходит к выводу, что наиболее адекватным рассматриваемой задаче методом является метод эффективных потенциалов. Затем описывается соответствующий алгоритм вычисления коэффициентов диффузии через эффективный потенциал, связанный с нахождением радиальных функций распределения гиперцепным методом. В заключение проводится сравнение с имеющимися в литературе данными по бинарным смесям, полученными другими методами, обсуждаются замеченные отличия, а также способы их устранения.

В **третьей главе** на основании результатов предыдущих двух строятся модели теплоизолирующих оболочек нейтронных звёзд для различных композиций составляющих их бинарных ионных смесей. Описывается эффект стратификации элементов в них, вводится важный параметр массы накопленных лёгких элементов в оболочке. Затем подробно рассматриваются конкретные, важные для приложений примеры расчёта структуры оболочек, делается вывод об относительной слабости влияния членов с градиентом температуры на искомые соотношения T_b-T_s . Помимо диффузионно-равновесных, рассмотрены оболочки, находящиеся в неравновесном по отношению к диффузии состоянии. В результате получен важный вывод о слабой чувствительности соотношения T_b-T_s и к этому фактору. Полученные соотношения T_b-T_s аппроксимированы удобными для приложений соотношениями (Приложение Б).

В **главе 4** полученные соотношения T_b-T_s применяются к проблеме остывания известного пульсара Вела в созвездии Парусов. На основании известной температуры поверхности, в зависимости от предполагаемого темпа остывания (функции нейтринного охлаждения f_1) оказывается возможным сделать выводы о составе теплоизолирующей оболочки данного пульсара. В частности, в рамках модели минимального остывания оболочка Велы должна состоять преимущественно из железа. Затем изучается влияние массы

накопленных лёгких элементов ΔM на кривые остывания. Показано, что наибольшее «уширение» кривой остывания происходит при использовании модели PCY97 для теплоизолирующей оболочки, в то время как для бинарных смесей (особенно H-He и He-C) оно сравнительно мало. В заключение приводится сравнение рассчитанных кривых остывания с имеющимися данными по изолированным нейтронным звёздам, обсуждаются два режима остывания – нейтринный и фотонный, и ограничения, которые можно наложить на функцию f_1 исходя из проведённого анализа.

Глава 5 содержит изложение оригинальной статистической теории тепловой эволюции нейтронных звёзд. Поскольку индивидуальные экспериментальные данные по каждой нейтронной звезде содержат значительное количество неопределённостей (например, неизвестный состав теплоизолирующей оболочки, являющейся основным объектом исследования предыдущих глав), то имеет смысл использовать статистический подход, который снизит влияние индивидуальных погрешностей наблюдения и позволит извлечь максимум полезной информации. Для анализа нейтронные звёзды были разделены на две группы: изолированные и аккрецирующие, для каждой из которых предполагалось своё распределение по массам. Важным экспериментальным фактом, на который указывает диссертант, является то, что нейтронные звёзды образуют единую популяцию объектов. Однако обычный подход к тепловой эволюции приводит к тому, что тяжёлые и маломассивные нейтронные звёзды должны остывать по-разному, а значит, и представлять собой отдельные популяции, чего не наблюдается. Как показано автором, учёт различного состава теплоизолирующих оболочек также не способен исправить ситуацию. В качестве решения было предложено сглаживание порога включения прямого урка-процесса, что может быть вызвано различными причинами: протонной сверхтекучестью, магнитным полем и т.д. Подробный анализ позволил найти параметры этого размытия, а также показал, что учёт этого эффекта действительно даёт возможность непротиворечиво описать имеющиеся данные об остывании нейтронных звёзд.

Общие итоги по работе представлены в **Заключении**. Они соответствуют заявленным целям и задачам исследования, характеризуют заявленную научную новизну и практическую значимость работы, кратко суммируют основные результаты исследования.

Научное и прикладное значение полученных результатов заключается, во-первых, в развитии и применении теории диффузии к случаю неидеальной плазмы теплоизолирующих оболочек нейтронных звёзд. При этом был предсказан новый, кулоновский механизм разделения ионов. Во-вторых, полученные соотношения между поверхностной и внутренней температурами нейтронных звёзд T_b-T_s , снабжённые удобными аппроксимационными формулами, безусловно, найдут своё применение в дальнейших исследованиях.

В-третьих, разработанный оригинальный статистический подход к исследованию остывания нейтронных звёзд позволяет по-новому взглянуть на имеющиеся наблюдательные данные. В частности, он приводит к выводу о необходимости размытия порога включения прямого урка-процесса, что стимулирует дальнейшие теоретические исследования в поиске конкретного механизма такого размытия.

Достоверность результатов, полученных в работе, основывается на корректном применении математического аппарата, опробованных методах исследования процесса диффузии, а также сравнении с данными наблюдений. Материалы диссертации прошли апробацию на международных и российских конференциях и семинарах. Результаты исследований по теме диссертации опубликованы в зарубежных рецензируемых научных журналах. Автореферат полно и правильно отражает содержание диссертации.

Результаты диссертационной работы могут быть использованы в университетах и научных организациях, занимающихся исследованиями в области астрофизики и физики нейтронных звёзд. К таковым, в частности, относятся Государственный астрономический институт имени П.К. Штернберга при МГУ и «ГНЦ РФ Институт теоретической и экспериментальной физики» НИЦ «КИ». Все основные результаты диссертации являются **новыми** и впервые опубликованы в работах автора.

К недостаткам работы можно отнести:

1. Формула (1.6) даёт определение обобщённых сил на случай учёта конечного градиента температуры. Однако ни обоснования именно такого выбора, ни ссылок на него нет.

2. Для расчёта процесса диффузии крупномасштабное электрическое поле E , вызванное поляризацией плазмы, очень важно (см. (1.9) и т.д.). Было бы правильно привести оценки его значений, полученные в результате расчётов.

3. На стр. 25 утверждается, что профили скорости имеют максимум на границе белого карлика, поскольку «ускорение свободного падения там наибольшее». Это не так! В звёздах и, в частности, в белых карликах, g имеет максимум в глубине звезды. Так, для политропы $n=3$ максимум лежит при значении m/M_s примерно 0.2. Очевидно, что такое поведение вызывается другими множителями в формулах (1.28) и (1.34).

4. Важнейший обнаруженный эффект – «аномальность» смеси H-He по сравнению с остальными (стр. 67 и далее). В тексте походя сказано, что это вызывается сильным отличием заряда водорода к массе, и низкой лучистой непрозрачностью гелия. Представляется, что такой важный эффект должен быть проверен особо, отдельным расчётом – достаточно ли упомянутых выше объяснений, или нет.

5. При обсуждении основной идеи статистического подхода (пункт 5.4.1) говорится о «плотности вероятности на плоскости температура поверхности - возраст» (или светимость - темп аккреции). Однако результирующие формулы (5.4) ($dP_i = p_i(T, t)dT$ и т.д.) дают «вероятность найти нейтронную звезду возраста t в диапазоне поверхностных температур dT », то есть несколько иную величину. Если бы речь действительно шла о «плотности вероятности на плоскости» то должно было бы быть $dP_i = p_i(T, t)dTdt$ и аналогично для dP_a .

Тем не менее, отмеченные недостатки не влияют на общую высокую оценку работы, ее научную ценность и полезность проведенных исследований. Основные результаты исследования, в первую очередь, полученные соотношения $T_b - T_s$ и оригинальный статистический подход к тепловой эволюции нейтронных звёзд, являются важными инструментами для дальнейших исследований.

Диссертация Михаила Викторовича Безногова «Тепловая эволюция нейтронных звёзд с аккреционными оболочками» выполнена на высоком научном уровне и представляет собой законченную научно-исследовательскую работу. Она удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям, а её автор, несомненно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 – Астрофизика и звёздная астрономия.

Официальный оппонент
кандидат физико-математических наук
по специальностям 01.04.02 и 01.03.02,
начальник Лаборатории Физики Плазмы и Астрофизики
ФГБУ «ГНЦ РФ ИТЭФ» НИЦ «КИ»
Почтовый адрес: 117218, Россия, г. Москва,
ул. Большая Черёмушкинская, д. 25
тел. 8 (499) 123-75-65, e-mail: yudin@itep.ru

А. В. Юдин

Подпись А.В. Юдина заверяю:
Учёный секретарь
ФГБУ «ГНЦ РФ ИТЭФ» НИЦ «КИ»
кандидат физико-математических наук

В. В. Васильев

02 декабря 2016 г.