

На правах рукописи

Офенгейм Дмитрий Дмитриевич

**Модельно-независимый анализ эволюции
нейтронных звёзд**

01.03.02 – Астрофизика и звёздная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук.

Научный руководитель: **Яковлев Дмитрий Георгиевич**
д. ф.-м. н., проф., чл.-корр. РАН
заведующий сектором ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Официальные оппоненты: **Попов Сергей Борисович**
д. ф.-м. н., проф. РАН,
ведущий научный сотрудник
Государственный астрономический институт
им. П.К. Штернберга МГУ

Коломейцев Евгений Эдуардович
к. ф.-м. н. (PhD TU Dresden),
ведущий научный сотрудник
Объединённый институт ядерных исследований

Ведущая организация: Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН

Защита состоится 11 июня 2020 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета ФТИ 34.01.04 Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук по адресу: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 26.
E-mail: post@mail.ioffe.ru

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН и на сайте <http://www.ioffe.ru>.

Автореферат разослан «_____» _____ 2020 г.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

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

Штернин П.С.

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Нейтронные звёзды — уникальные природные лаборатории по исследованию сверхплотного вещества в экстремальных условиях. Плотность вещества в этих звёздах превосходит стандартную плотность ядерной материи $\rho_0 = 2.8 \times 10^{14} \text{ г см}^{-3}$ в несколько раз, а магнитное поле достигает значений $\sim 10^{16} \text{ Гс}$ (см., например, [1]). Изучение вещества при таких условиях — один из вызовов современной физики: такую материю сложно исследовать как в лабораторных экспериментах, так и чисто теоретически [1, 2]. В частности:

- Уравнение состояния сверхплотного вещества до сих пор не удаётся рассчитать точно, несмотря на прогресс теории [3]. Например, не ясно, появляются ли в ядрах нейтронных звёзд гипероны и/или экзотические формы материи.
- Считается, что барионы в недрах нейтронных звёзд должны быть сверхтекучими [4], однако истинные зависимости критических температур барионов от плотности пока неизвестны.
- Нейтронные звёзды обладают очень сильными магнитными полями, однако микрофизика вещества в таких полях, как и эволюция полей, изучены неполно.

Наблюдения нейтронных звёзд дают дополнительную информацию об их устройстве. Например:

- Сравнение наблюдений нейтронных звёзд, для которых измерены температура поверхности и возраст, с предсказаниями теории остывания этих звёзд позволяет делать выводы о свойствах сверхтекучести внутри звёзд (см. [4] и ссылки там).
- Оценки магнитных полей пульсаров по наблюдениям их торможения дают информацию о магнитной и тепловой эволюции нейтронных звёзд (например, [5]).
- Наблюдаемые нагретые и быстро вращающиеся нейтронные звёзды в маломассивных рентгеновских двойных системах должны быть устойчивы по отношению к излучению гравитационных волн, что не просто объяснить теоретически [6].

Теоретические модели сверхплотного вещества сложны. Их использование требует больших вычислительных ресурсов. Поэтому актуальны методы, позволяющие единым образом сопоставлять с наблюдениями свойства широкого круга моделей нейтронных звёзд. Такие методы называют универсальными, или модельно-независимыми. Например, такой метод существует для анализа нейтронного остывания нейтронных звёзд [7]. Важно разработать подобные методы для фотонной стадии остывания и для изучения других проявлений нейтронных звёзд.

Цели и задачи работы. Целью диссертации является разработка мето-

дов исследования фундаментальных свойств сверхплотного вещества и основных параметров нейтронных звёзд по наблюдательным данным для широкого круга современных теоретических моделей сверхплотного вещества. Поставленные задачи:

- Исследовать универсальные свойства остывания нейтронных звёзд с разными уравнениями состояния. Используя результаты, разработать модельно-независимый метод исследования остывания, в том числе на фотонной стадии, и применить его к анализу наблюдательных данных.
- Исследовать квазистационарные потоки вещества в ядре нейтронной звезды с магнитным полем с помощью недавно предложенного [8] самосогласованного метода.
- Рассчитать сдвиговую вязкость в коре нейтронной звезды с магнитным полем.
- Рассчитать и аппроксимировать универсальными выражениями объёмную вязкость вещества ядер нейтронных звёзд с гиперонами для современных уравнений состояния вещества. Применить результаты к расчёту окон неустойчивости γ -мод колебаний нейтронных звёзд.

Научная новизна

1. Нейтринные светимости нейтронных звёзд за счёт ряда важных нейтринных процессов, а также теплоёмкости этих звёзд аппроксимированы аналитическими функциями массы и радиуса звезды, едиными для широкого класса уравнений состояния плотного вещества.
2. На основе аппроксимаций разработано аналитическое описание остывания нейтронных звёзд, единым образом описывающее нейтринную и фотонную стадии остывания.
3. Выполнен модельно-независимый анализ нескольких остывающих нейтронных звёзд. Наложены ограничения на свойства сверхтекучести нуклонов в недрах звезды RX J1856–3754. Уточнены аналогичные ограничения для звезды XMMU J1732–344 и пульсара в созвездии Парусов (пульсара Вела); на их примере исследована возможность использования теории остывания для одновременного ограничения массы и радиуса нейтронных звёзд.
4. Самосогласованный метод расчёта квазистационарных процессов в нейтронных звёздах с магнитным полем применён к расчёту течений вещества, вызываемых в ядре звезды осесимметричным полем. Показано, что эволюция сильных магнитных полей (в магнитарах) может определяться увлечением полей этими течениями.
5. Вычислены коэффициенты электронной сдвиговой вязкости в коре нейтронной звезды с сильным магнитным полем; исследована зависимость вязкости от свойств вещества коры и величины поля.
6. Рассчитаны скорости слабых безлептонных процессов и объёмная вязкость в веществе ядер нейтронных звёзд с Λ и Ξ^- -гиперонами с учётом канала слабого взаимодействия за счёт обмена мезоном. Получены аппрок-

- симации результатов, универсальные относительно уравнения состояния.
7. Найденная объёмная вязкость нейтронных звёзд с гиперонами использована для расчёта окон неустойчивости r -мод колебаний таких звёзд. Показано, что наличие гиперонов в ядрах наблюдаемых нагретых быстро вращающихся нейтронных звёзд в маломассивных рентгеновских двойных системах помогает объяснить существование этих звёзд, если учесть канал обмена мезоном в слабых безлептонных процессах.

Научная и практическая значимость. Результаты диссертации могут использоваться в различных областях физики нейтронных звёзд.

Разработанный модельно-независимый метод анализа остывающих нейтронных звёзд значительно упрощает интерпретацию их наблюдений и открывает широкие возможности для исследования свойств сверхплотного вещества. Он позволяет делать выводы о параметрах сверхтекучести и уравнения состояния вещества в недрах наблюдаемых нейтронных звёзд, а также об их массах и радиусах.

Расчёт потоков вещества, обусловленных магнитным полем, важен для построения самосогласованной модели эволюции магнитного поля в ядре нейтронной звезды и свидетельствует о необходимости пересмотра общепринятой картины эволюции поля.

Сдвиговая вязкость электронов в замагниченной коре нейтронных звёзд и объёмная вязкость их гиперонных ядер важны для моделирования затухания колебаний звёзд, релаксации дифференциального вращения их недр, подавления неустойчивости колебаний звёзд относительно излучения гравитационных волн и других диссипативных явлений.

Достоверность полученных результатов. Результаты диссертации получены с помощью достоверных математических и вычислительных методов в рамках адекватных физических приближений с чётко сформулированными критериями применимости. Там, где возможно, выполнено сравнение с результатами предшествующих исследований.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Получение аппроксимаций нейтринной светимости и теплоёмкости нейтронных звёзд аналитическими функциями массы и радиуса звезды, пригодными для широкого класса уравнений состояния. Разработка единого аналитического модельно-независимого описания нейтринной и фотонной стадий остывания нейтронных звёзд.
2. Интерпретация наблюдений ряда остывающих нейтронных звёзд модельно-независимым методом. Наложение ограничений на свойства сверхтекучести нуклонов в звёздах RX J1856–3754, XMMU J1732–344 и пульсара Велла; исследование возможности использовать теорию остывания для одновременного ограничения массы и радиуса нейтронных звёзд на примере последних двух звёзд.
3. Самосогласованный расчёт течений вещества в ядрах нейтронных звёзд с

осесимметричным магнитным полем. Демонстрация того, что увлечение магнитного поля этими потоками может вносить важный вклад в эволюцию звёзд с сильным полем (магнитаров).

4. Расчёт и анализ электронной сдвиговой вязкости в коре нейтронной звезды с сильным магнитным полем.
5. Расчёт скоростей слабых безлептонных процессов и объёмной вязкости в ядрах нейтронных звёзд с Λ и Ξ^- -гиперонами. Учёт канала слабого взаимодействия за счёт обмена виртуальным мезоном. Аппроксимация результатов универсальными формулами.
6. Применение полученной объёмной вязкости для расчёта окон неустойчивости γ -мод колебаний нейтронных звёзд с гиперонными ядрами. Демонстрация того, что учёт канала слабого взаимодействия за счёт обмена мезоном может позволить добиться устойчивости γ -мод колебаний нейтронных звёзд в маломассивных рентгеновских двойных системах.

Апробация работы и публикации. Результаты диссертации получены в период с 2015 по 2020 гг. и опубликованы в 11 статьях в международных рецензируемых журналах (10 статей — в журналах из списка ВАК). Основные результаты доложены на астрофизических семинарах ФТИ им. А.Ф. Иоффе, а также на всероссийских и международных конференциях: «Физика СПб» (Санкт-Петербург, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 2015—2017, 2019), «Фундаментальные и прикладные космические исследования» (Москва, ИКИ РАН, 2015), «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра» (Москва, ИКИ РАН, 2016, 2017, 2019), «Physics of Neutron Stars» (St. Petersburg, Alferov University, 2017), «Modern Physics of Compact Stars and Relativistic Gravity» (Yerevan, Yerevan State University, 2017), «PHAROS WG2 meeting — Superfluids and superconductors in neutron stars: from laboratory to astrophysical observations» (Warsaw, N. Copernicus Astronomical Center, 2018), «PHAROS WG1+WG2 meeting “Neutron stars: the equation of state, superconductivity/superfluidity and transport coefficients”» (Coimbra, Coimbra University, 2018).

Личный вклад автора. Вклад автора в результаты, вынесенные на защиту, является определяющим. Опубликованные работы выполнены в соавторстве с научным руководителем, сотрудниками ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Астрономического центра им. Н. Коперника (Варшава, Польша) и Института астрономии и астрофизики Тюбингенского университета (Тюбинген, Германия), однако подавляющая часть расчётов проведена автором лично.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка обозначений, списка литературы и 5 приложений. Объём диссертации составляет 158 страниц, включая 48 рисунков и 9 таблиц. Список литературы включает 214 наименований.

Содержание работы

Во **Введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

Глава 1 посвящена построению универсальных аппроксимаций нейтринной светимости и теплоёмкости нейтронных звёзд, применимых к широкому кругу моделей сверхплотного вещества. В *разделе 1.1* описано строение нейтронных звёзд и перечислены наблюдательные проявления этих звёзд, рассмотренные в диссертации. В *разделе 1.2* изложена постановка задачи об остывании изолированных нейтронных звёзд в приближении изотермичности их внутренних слоев. Влиянием магнитного поля на остывание пренебрегается. Такие звёзды охлаждаются, в основном, за счёт излучения нейтрино из их ядер и теплового электромагнитного излучения их поверхности. Через несколько десятилетий после рождения звезды при взрыве сверхновой её недра становятся изотермическими и характеризуются единой температурой \tilde{T} , сдвинутой по гравитационному красному смещению. Уравнение остывания звезды принимает вид

$$C(\tilde{T}) \frac{d\tilde{T}}{dt} = -L_\nu^\infty(\tilde{T}) - L_\gamma^\infty(\tilde{T}). \quad (1)$$

Здесь C — теплоёмкость звезды, L_ν^∞ и L_γ^∞ — её нейтринная и фотонная светимости, определённые в системе отсчёта удалённого наблюдателя.

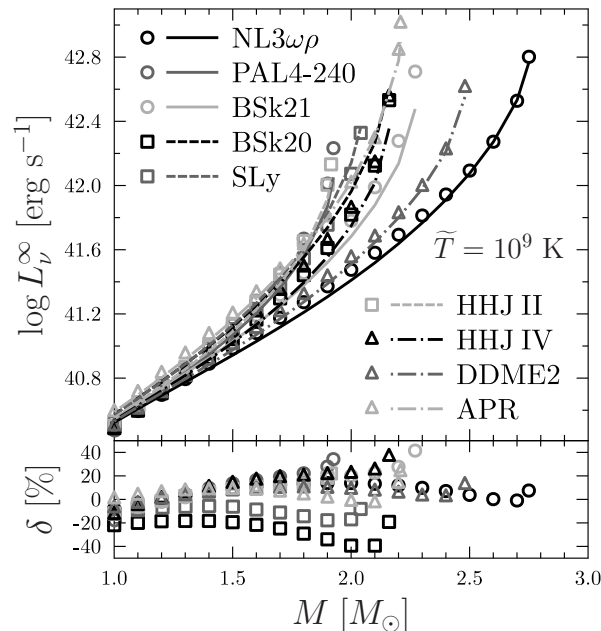


Рис. 1. Нейтринная светимость за счёт модифицированного урка-процесса как функция массы звезды для девяти уравнений состояния при $\tilde{T} = 10^9$ К. Кривые — аппроксимация, символы — численный расчёт. Внизу — ошибки аппроксимации.

Связь светимости L_γ^∞ с температурой \tilde{T} определяется внешней теплоизолирующей оболочкой звезды. Свойства этих оболочек и аналитические аппроксимации зависимостей $L_\gamma^\infty(\tilde{T})$ приведены в статьях [9, 10]. Величины L_ν^∞ и C определяются свойствами ядра звезды.

В *разделе 1.3* рассмотрены вклады в светимость за счёт прямого урка-процесса, модифицированного урка-процесса и тормозного излучения нейтринных пар при столкновениях нейтронов. Они аппроксимированы аналитическими выражениями вида $L_\nu^\infty = \Lambda(M, R)\tilde{T}^n$, где M и R — масса и радиус нейтронной звезды, $n = 6$ для прямого урка-процесса, $n = 8$ для модифицированного урка-процесса и тормозного излучения. Используются выражения для излучательных способностей этих процессов в несверхтекуче-

чем веществе. Аналогично аппроксимированы парциальные вклады нейтронов, протонов и лептонов в теплоёмкость в виде $C = \Sigma(M, R)\tilde{T}$. В таком же виде получены аппроксимации полной теплоёмкости звезды и теплоёмкости без учёта вклада протонов (при сильной сверхтекучести протонов и нормальных нейтронах). Полученные аппроксимации позволяют рассчитывать светимость и теплоёмкость звезды по значениям M и R для существенно разных нуклонных уравнений состояния, описанных в разделе 1.3.2. Для примера на рисунке 1 дано сравнение подгонки и исходного расчета светимости L_ν^∞ за счёт модифицированного урка-процесса. Каждая кривая и ряд однотипных символов соответствует одному уравнению состояния.

В *разделе 1.4* приведена аппроксимация нейтринной светимости изотермической коры нейтронной звезды за счёт излучения нейтрино вырожденными электронами при столкновениях с атомными ядрами. В большинстве приложений этим вкладом в полную светимость L_ν^∞ можно пренебречь.

В *разделе 1.5* получено приближённое аналитическое решение уравнения остывания (1) для случаев, когда светимости удовлетворяют соотношениям $L_\nu^\infty \propto \tilde{T}^n$ и $L_\gamma^\infty \propto \tilde{T}^\alpha$ с постоянными значениями n и α . Такое приближение верно, например, для чисто железной ($\alpha \approx 2.2$) или чисто углеродной ($\alpha \approx 2.3$) теплоизолирующей оболочки. Получен закон остывания, единым образом описывающий нейтринную (когда $L_\nu^\infty \gg L_\gamma^\infty$, возраст звезды $t \lesssim 10^5$ лет) и фотонную (когда $L_\gamma^\infty \gg L_\nu^\infty$, возраст $t \gtrsim 10^5$ лет) стадии остывания. В пределе

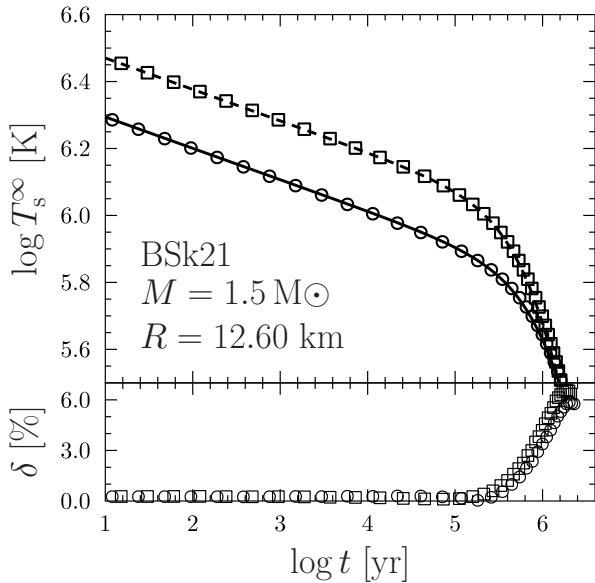


Рис. 2. Кривая остывания нейтронной звезды с железной теплоизолирующей оболочкой. Символы — численное решение уравнения (1), где основной вклад в L_ν^∞ даёт либо модифицированный урка-процесс (кружки), либо тормозное излучение нейтронов (квадратики). Линии — приближённое аналитическое решение. Внизу — модуль ошибки аппроксимации.

малых возрастов звезды (на нейтринной стадии) это решение совпадает с хорошо известным законом $\tilde{T} \propto t^{-1/(n-2)}$. На рисунке 2 показаны примеры кривых остывания нейтронной звезды с массой $1.5 M_\odot$ и уравнением состояния BSk21 [11] в виде зависимости наблюдаемой температуры поверхности T_s^∞ от возраста звезды. Результаты численного решения уравнения (1) показаны символами, расчёт по полученной аналитической формуле — линиями. Ошибка аппроксимации не превосходит 7%. Использование такой аппроксимации существенно упрощает анализ остывания звёзд с возрастом $t \gtrsim 10^5$ лет.

В *разделе 1.6* подведён итог результатам главы 1; они опубликованы в статьях [A1, A2].

В **главе 2** на основе результатов главы 1 усовершенствован метод модельно-

независимого анализа остывания нейтронных звёзд, предложенный в [7]. В *разделе 2.1* описаны имеющиеся данные наблюдений остывания изолированных нейтронных звёзд со слабым магнитным полем. В *разделе 2.2* изложена суть модельно-независимого анализа остывания. Он основан на парадигме “минимального” остывания [12, 13], согласно которой наблюдаемые остывающие нейтронные звёзды имеют нуклонные ядра с запрещённым прямым урка-процессом. Тогда двумя основными регуляторами остывания становятся: масса ΔM_{acc} аккрецированного вещества в теплоизолирующей оболочке и сверхтекучесть нуклонов в ядре звезды. Стандартным называется сценарий остывания, при котором нуклоны нормальны. Тогда скорость остывания звезды на нейтринной стадии $d\tilde{T}/dt = -\ell_{\text{SC}}$, где $\ell_{\text{SC}} = L_{\nu}^{\infty}/C$ отвечает так называемой стандартной «нейтринной свече» [7] — звезде, нейтринная светимость которой определяется модифицированным урка-процессом, а теплоемкость — всеми частицами ядра. Аппроксимации из главы 1 представляют ℓ_{SC} в виде функции массы M и радиуса R звезды. Метод, предложенный в [7], учитывает влияние сверхтекучести на скорость нейтринного остывания ℓ введением безразмерного фактора нейтринного остывания $f_{\ell} = \ell/\ell_{\text{SC}}$. В разделе 2.2 введён аналогичный безразмерный фактор фотонного остывания $f_C = (L_{\gamma}^{\infty}/C)_{\text{SC}}/(L_{\gamma}^{\infty}/C) = C/C_{\text{SC}}$, фактически определяющийся влиянием сверхтекучести на теплоёмкость. Данный метод позволяет исследовать остывание нейтронных звёзд, не задаваясь моделями уравнения состояния и сверхтекучести, и, следовательно, является модельно-независимым. В разделе 2.2 исследованы пределы изменения и свойства факторов f_{ℓ} и f_C на современном уровне знаний о сверхтекучести в ядре звезды. В частности, $f_{\ell} < 1$ указывает на синглетную сверхтекучесть протонов и нормальные нейтроны в ядре звезды, а $f_{\ell} > 1$ и $f_C \lesssim 0.7$ — на триплетную сверхтекучесть нейтронов. Показано, что сценарии остывания нейтронных звёзд обычно можно характеризовать парами чисел (f_C, f_{ℓ}) .

В *разделе 2.3* исследовано остывание девяти нейтронных звёзд: пульсаров J0205+6449, B0531+21, J1119–6127, J1357–6429, B0833–45 (пульсар Вела), B1706–44, J0538+2817 и B2334+61 и RX J0822–4300. Эти звёзды находятся на нейтринной стадии; их остывание не зависит от фактора f_C . Для каждой звезды построены области значений ΔM_{acc} и f_{ℓ} , при которых кривая остывания соответствует наблюдаемым температуре и возрасту (данные взяты из [14]; модель оболочки — из [9]). Если теоретически допустить диапазон $0.01 < f_{\ell} < 100$, то для некоторых из этих звёзд (PSR J0205+6449, PSR J1357–6429, Вела, PSR B1706–44, PSR B2334+61) удаётся ограничить сверху ΔM_{acc} .

В *разделе 2.4* проведено подробное исследование остывания пульсара Вела. На основе детального анализа его рентгеновского спектра (Д.А. Зюзин, [A3]) вычислена зависимость f_{ℓ} от предполагаемых массы и радиуса пульсара (при заданной массе ΔM_{acc}). На рисунке 3 цветом показана такая зависимость для железной теплоизолирующей оболочки [9]. Белыми контурами изображены границы доверительных областей для M и R пульсара Вела на уровнях

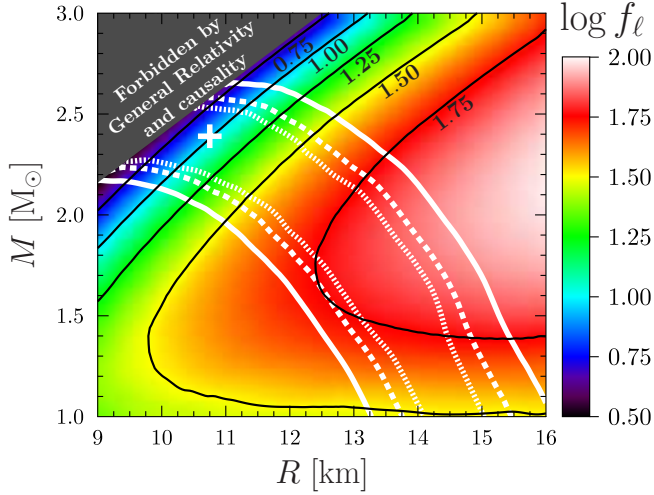


Рис. 3. Фактор нейтринного охлаждения f_ℓ для пульсара Вела как функция его массы и радиуса для железной теплоизолирующей оболочки. Чёрные контуры — линии постоянных значений f_ℓ , белые — доверительные области для массы и радиуса Велы, полученные из спектрального анализа. Подробнее см. текст.

Аналогичный вывод сделан в [15] при исследовании остывания звезды XMMU J1732–344. В *разделе 2.5* анализ её остывания уточнён. Для этого введён в рассмотрение фактор f_{lp} , определяемый согласно выражению $\ell = f_{lp}l_{SC} + \ell_{nn}$, где ℓ_{nn} — функция остывания звезды с полностью сверхтекучими протонами и нормальными нейтронами. Как и l_{SC} , величина ℓ_{nn} представима в виде функции M и R с помощью результатов главы 1. Как и для пульсара Вела, была вычислена зависимость f_{lp} от предполагаемой массы и радиуса XMMU J1732–344. Поскольку фактор f_{lp} имеет нижнюю теоретическую границу (мал, но конечен), удалось наложить ограничения — более строгие, чем в [15], — на массу и радиус XMMU J1732–344 и на массу ΔM_{acc} в её теплоизолирующей оболочке.

В *разделе 2.6* исследовано остывание нейтронной звезды RX J1856–3754. Использована интерпретация её рентгеновского спектра с помощью тонкой водородной атмосферы над твёрдой железной поверхностью [16]. Согласованность моделей атмосферы и теплоизолирующей оболочки требует, чтобы последняя была полностью железной. Возраст RX J1856–3754 принят равным $t \approx (3 - 5) \times 10^5$ лет [5]. Эта звезда уже завершила нейтринную стадию остывания; её охлаждение определяется обоими факторами f_ℓ и f_C . Чтобы определить их значения, использован аналитический закон остывания из раздела 1.5. Результат показан на диаграмме $f_\ell - f_C$ (рисунок 4) полосой между чёрными линиями. На этой же диаграмме схематически показаны области А–Е, запрещённые по разным теоретическим соображениям, перечисленным в разделе 2.2 (серая тонировка), и область, соответствующая нейтронным звёздам с нормальными нейтронами и сверхтекучими протонами (одинарная штриховка). Чёрный кружок — стандартное остывание $f_C = f_\ell = 1$. Двойной штриховкой показано множество точек (f_C, f_ℓ) , одновременно разрешённых теоретически

достоверности 50%, 68% и 90%, полученные в ходе спектрального анализа. Как видно, при любых предположениях о массе и радиусе пульсара скорость его остывания во много раз выше стандартной нейтринной свечи. Если максимальное теоретически допустимое значение f_ℓ окажется существенно ниже 100 (например, $\max f_\ell = 30$), то область масс и радиусов, в которой фактор остывания более высок, придется исключить. Таким образом, показана принципиальная возможность использовать теорию остывания для уточнения совместных ограничений на M и R нейтронных звёзд, полученных путём спектрального анализа.

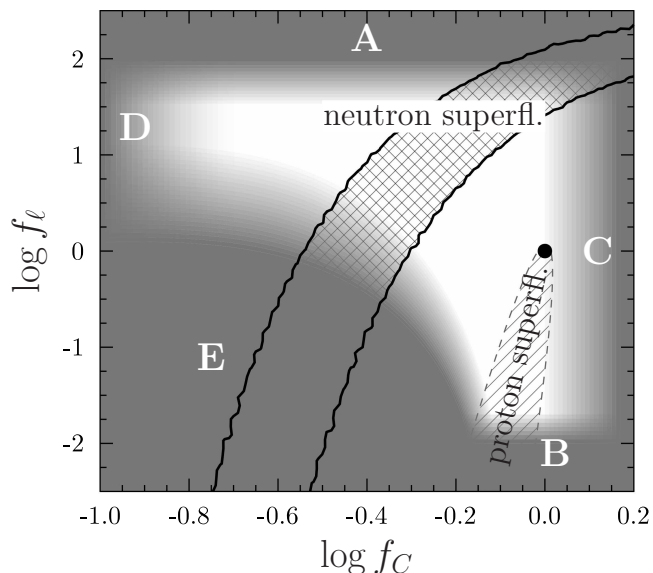


Рис. 4. Факторы остывания для звезды RX J1856–3754. Полоса между сплошными линиями — область, согласующаяся с наблюдаемыми значениями T_s^∞ и t для этой звезды. Серые области А–Е запрещены теоретическими соображениями. Двойная штриховка — реалистичные сценарии остывания RX J1856–3754. Одинарной штриховкой схематически показана область, соответствующая несверхтекучим нейтронам в ядре звезды. Детали см. в тексте.

ние квазистационарных течений вещества, вызванных магнитным полем в ядре звезды (по методу из [8]), и расчёт сдвиговой вязкости в замагниченной коре звезды.

В *разделе 3.2* описана постановка задачи о квазистационарной эволюции магнитного поля в несверхтекучем и несверхпроводящем ядре звезды, состоящем из нейтронов, протонов и электронов. Используются уравнения нерелятивистской магнитной гидродинамики (МГД) с учётом основных механизмов диссипации: трения между частицами разных сортов и неравновесных урка-процессов. Уравнения линеаризованы по возмущениям среды относительно гидростатического равновесия в отсутствие магнитного поля и записаны в квазистационарном приближении [8]. Согласно последнему, течения среды подстраиваются под мгновенную конфигурацию магнитного поля. Это позволяет пренебречь производными по времени в уравнениях Эйлера и неразрывности для частиц каждого сорта, однако в законе Фарадея производную по времени от магнитного поля следует сохранить.

В *разделе 3.3* реализована самосогласованная схема [8] решения задачи в ядре звезды с осесимметричным полем. Движения вещества удобно разложить на общий поток барионов со скоростью U_b и диффузионные потоки частиц каждого сорта $a = n, p, e$ со скоростями w_a . Для этих величин получены явные выражения. Выписаны уравнения эволюции функций полоидального магнитного

и согласующихся с наблюдениями RX J1856–3754. Как видно, для объяснения остывания этой звезды нужно предположить, что её остывание на нейтринной стадии протекало заметно быстрее, чем в стандартном сценарии, например за счёт сверхтекучести нейтронов в её ядре.

В *разделе 2.7* представлен анализ обновлённых наблюдательных данных по остыванию пульсара J0633+0632, который, в зависимости от массы ΔM_{acc} в теплоизолирующей оболочке, может находиться как на нейтринной, так и на фотонной стадии остывания. В *разделе 2.8* подведён итог результатам главы 2; они опубликованы в статьях [A1, A2, A4, A5, A3, A6].

Глава 3 посвящена исследованию процессов в нейтронных звёздах с магнитным полем. Во вступительном *разделе 3.1* дана общая характеристика двух рассмотренных задач: вычисление

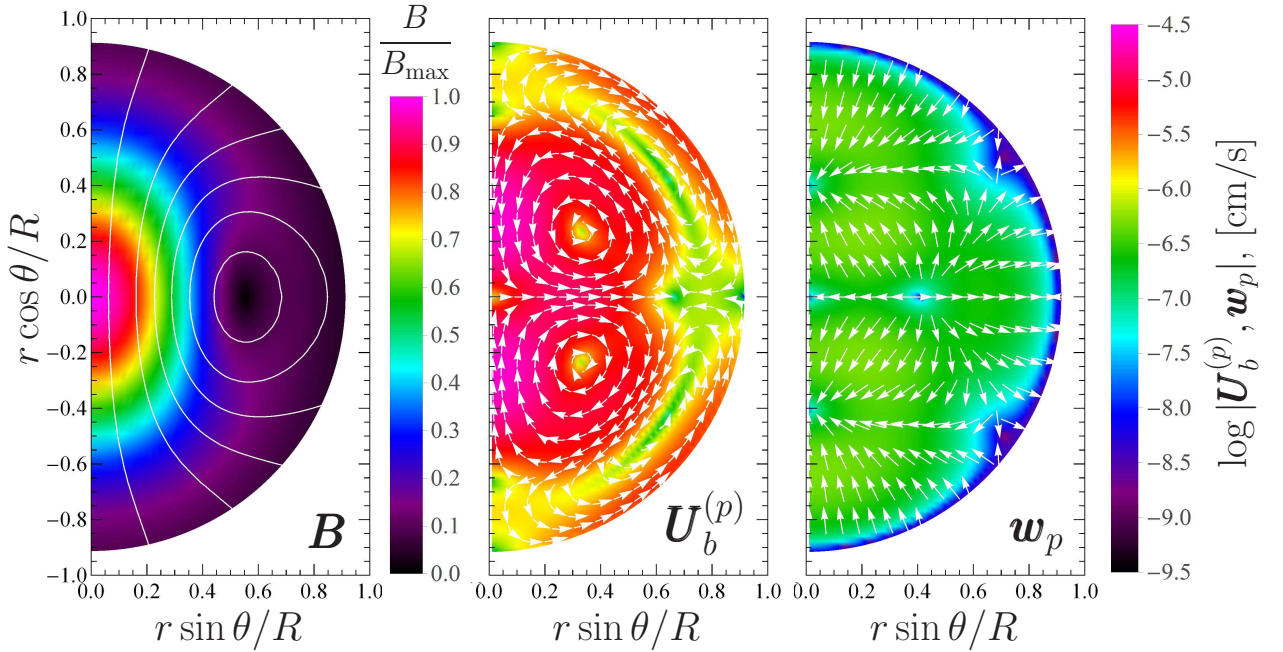


Рис. 5. Слева: пример модели магнитного поля \mathbf{B} . Белым показаны силовые линии поля, цвет — отношение величины поля в данной точке к наибольшему значению поля в звезде $B_{\max} = 5 \times 10^{15}$ Гс. В центре: полоидальная компонента скорости $\mathbf{U}_b^{(p)}$ общего потока барионов для данной модели поля. Справа: диффузионная скорость протонов \mathbf{w}_p в ядре звезды. Цвет — величины скоростей в логарифмическом масштабе, стрелки указывают направление скоростей в данной точке. Область коры звезды не показана. Температура $\tilde{T} = 2 \times 10^8$ К.

потока Ψ и полоидального электрического тока I (например, [17]).

В разделе 3.4 полученные формулы применены для расчёта возмущений химических потенциалов и потоков частиц всех сортов в типичной нейтронной звезде ($M = 1.4 M_{\odot}$, уравнение состояния ННЖ [18]) с двумя моделями полоидального магнитного поля в ядре звезды. Для одной из них полученная картина потоков показана на рисунке 5. Важное свойство решения: скорость потока барионов \mathbf{U}_b значительно превосходит диффузионные скорости частиц. Для обеих моделей поля наблюдается иерархия скоростей $U_b \sim (10 - 30)w_{p,e} \sim (100 - 300)w_n$, причём $w_e \sim w_p$. Анализ показал, что подобная иерархия выполняется для широкого класса конфигураций магнитного поля в широком диапазоне температур. Следовательно, частицы всех сортов движутся под действием магнитного поля почти как единое целое. Это противоречит обычно принимаемому утверждению, что нейтроны в ядре звезды практически неподвижны (см. [19] и ссылки там). В конце раздела 3.4 показано, что наличие общего потока вещества в ядре звезды может приводить к новому механизму эволюции магнитного поля в ядре звезды за счёт увлечения поля этим потоком с характерным временем эволюции $\tau_U = B/|\text{rot}(\mathbf{U}_b \times \mathbf{B})|$. Для звезды с несверхтекучим ядром

$$\tau_U \sim (10^4 - 10^5) \text{ лет} \times \left(\tilde{T}_8 / B_{15} \right)^2, \quad (2)$$

где $\tilde{T}_8 = \tilde{T}/(10^8 \text{ К})$, а B_{15} — характерное значение поля в ядре в единицах

10^{15} Гс. В ядрах магнитаров (нейтронных звёзд со сверхсильным полем) магнитное поле может достигать $\sim 10^{16}$ Гс, а температура может составлять несколько сотен млн. К [20], что приводит к оценке $\tau_U \sim 10^3$ лет. Это заметно меньше характерного возраста магнитаров $\sim 10^4$ лет. Значит, увлечение магнитного поля потоками вещества в ядрах магнитаров может заметно влиять на их магнитную и тепловую эволюцию.

В *разделе 3.5* вычислена электронная сдвиговая вязкость в замагниченной коре звезды. Эта вязкость в основном определяется столкновениями электронов с атомными ядрами [21]. Вычисления проведены для сильно вырожденных электронов произвольной степени релятивизма. Интеграл столкновений в уравнении Больцмана брался в приближении времени релаксации, причём эффективное время релаксации взято из расчётов [21] на основе более глубокого подхода. Сдвиговая вязкость в присутствии магнитного поля описывается пятью коэффициентами вязкости [22]: продольной вязкостью η_0 , совпадающей с вязкостью немагнитной среды, двумя поперечными вязкостями $\eta_{1,2}$ и двумя холловскими вязкостями $\eta_{3,4}$. Последние четыре вязкости сильно зависят от магнитного поля. Исследована зависимость коэффициентов вязкости от параметров вещества и силы магнитного поля.

В *разделе 3.6* дана сводка результатов третьей главы, кратко обсуждены их возможные приложения. Материалы главы опубликованы [A7, A8, A9].

Глава 4 посвящена расчёту объёмной вязкости ζ в нейтронных звёздах с гиперонными ядрами и её роли в подавлении неустойчивости г-мод колебаний таких звёзд по отношению к излучению гравитационных волн. Во вступительном *разделе 4.1* описано понятие окна неустойчивости этих колебаний на диаграмме частота вращения звезды ν — температура недр \tilde{T} и изложена суть парадокса г-мод колебаний нейтронных звёзд [6]. Он заключается в том, что многие нейтронные звёзды в маломассивных рентгеновских двойных системах (LMXB) лежат на этой диаграмме внутри окон неустойчивости, рассчитанных для звёзд с нуклонными ядрами с учётом простейших механизмов диссипации. Однако объяснить наблюдение столь большого числа звёзд с частотами и температурами в окнах неустойчивости трудно. Для решения данного парадокса привлекают дополнительные механизмы диссипации — в частности, объёмную вязкость за счёт слабых безлептонных процессов, протекающих в гиперонных ядрах нейтронных звёзд. В *разделе 4.2* описаны модели гиперонных уравнений состояния использованные для расчёта вязкости. Рассмотрены современные уравнения состояния, в которых первыми появляются Λ и Ξ^- -гипероны.

В *разделе 4.3* в рамках несверхтекучей нерелятивистской гидродинамики рассчитана связь между объёмной вязкостью ζ и суммарной скоростью всех слабых безлептонных процессов λ при гармоническом колебании среды с частотой ω . Она имеет вид

$$\zeta = 2\zeta_{\max}\lambda_{\max}\lambda / (\lambda_{\max}^2 + \lambda^2), \quad (3)$$

где ζ_{\max} — максимально достижимая объёмная вязкость при данной частоте

ω и плотности среды ρ , а λ_{\max} — скорость слабых процессов, при которой достигается максимум ζ при данных ρ и ω . Величины ζ_{\max} и λ_{\max} определяются уравнением состояния и не зависят от того, какие слабые безлептонные процессы протекают в веществе. Зависимости $\zeta_{\max}(\rho, \omega)$ и $\lambda_{\max}(\rho, \omega)$ аппроксимированы формулами, которые качественно воспроизводят поведение этих функций, универсальное для разных моделей уравнения состояния.

В разделе 4.4 вычислены скорости слабых безлептонных процессов, протекающих в ядре звезды с Λ и Ξ^- -гиперонами. Таких процессов пять: $np \leftrightarrow \Lambda p$, $nn \leftrightarrow \Lambda n$, $n\Lambda \leftrightarrow \Lambda\Lambda$, $\Lambda n \leftrightarrow \Xi^- p$ и $n\Xi^- \leftrightarrow \Lambda\Xi^-$. Последние три ранее не исследовались в контексте нейтронных звёзд. При расчёте скоростей этих процессов использована модель слабого неупругого взаимодействия барионов за счёт обмена мезоном. Подтверждён результат работы [23], где показано, что слабые безлептонные процессы в нейтронных звёздах идут за счёт обмена мезоном во много раз эффективнее, чем за счёт контактного обмена W -бозоном (последний в основном используется в литературе, посвящённой подавлению неустойчивости r -мод объёмной вязкостью, например, [24]). Выражение для скорости процесса $12 \leftrightarrow 34$ имеет вид

$$\lambda_{12 \leftrightarrow 34} \approx \frac{5.1 \times 10^{45}}{\text{эрг см}^3 \text{ с}} \frac{q_{12 \leftrightarrow 34}^{(\max)} - q_{12 \leftrightarrow 34}^{(\min)}}{1 \text{ ГэВ}} T_8^2 \Theta \left(q_{12 \leftrightarrow 34}^{(\max)} - q_{12 \leftrightarrow 34}^{(\min)} \right) \mathcal{W}_{12 \leftrightarrow 34}. \quad (4)$$

Здесь $T_8 = T/(10^8 \text{ К})$ — локальная температура среды, $q_{12 \leftrightarrow 34}^{(\max)} = \min\{p_{F1} + p_{F3}, p_{F2} + p_{F4}\}$, $q_{12 \leftrightarrow 34}^{(\min)} = \max\{|p_{F1} - p_{F3}|, |p_{F2} - p_{F4}|\}$ (p_{Fi} — импульс Ферми частиц сорта i), $\Theta(x)$ — функция Хевисайда, а $\mathcal{W}_{12 \leftrightarrow 34}$ — усреднённый по углам квадрат матричного элемента процесса $12 \leftrightarrow 34$. Эта безразмерная величина не зависит от температуры и слабо зависит от плотности среды. Для всех процессов, кроме $n\Lambda \leftrightarrow \Lambda\Lambda$, её можно считать константой, значение которой, однако, сильно зависит от модели уравнения состояния. Согласно расчётам, $\mathcal{W}_{np \leftrightarrow \Lambda p}$ и $\mathcal{W}_{\Lambda n \leftrightarrow \Xi^- p}$ находятся в пределах $\sim 0.5 - 1.5$, $\mathcal{W}_{nn \leftrightarrow \Lambda n} \sim 0.3 - 0.6$, $\mathcal{W}_{n\Xi^- \leftrightarrow \Lambda\Xi^-} \sim 0.04 - 0.10$, а $\mathcal{W}_{n\Lambda \leftrightarrow \Lambda\Lambda}$ с ростом плотности увеличивается от $\sim 0.05 - 0.1$ до $\sim 0.2 - 0.3$. Зависимости $\lambda_{12 \leftrightarrow 34}(\rho, T)$ аппроксимированы выражениями, универсальными относительно уравнения состояния.

В разделе 4.5 вычисленная вязкость ζ применена для расчёта окон неустойчивости r -мод (согласно методу из [24]). Пример такого расчёта показан на рисунке 6. Чёрные кривые изображают границы окон неустойчивости для заданных масс звёзд (указаны на рисунке); устойчивая область частот и температур для данной звезды находится снизу от соответствующей кривой. Для данного сценария вклад в суммарную скорость слабых процессов вносит только процесс $n\Lambda \leftrightarrow \Lambda\Lambda$. Это качественно соответствует предположению о сильной сверхтекучести заряженных барионов и умеренной сверхтекучести нейтральных барионов в ядре звезды. При добавлении в λ вкладов других процессов границы окон неустойчивости будут сдвигаться в область низких температур. В сравнении с предыдущими расчётами (например, [24]), полученные области устойчивости

сдвинуты к низким температурам. Так происходит благодаря учёту канала слабого взаимодействия за счёт обмена мезоном (который не рассмотрен в [24]). Сделанный расчёт показывает, что предположение о наличии гиперонов в нейтронных звёздах в LMXB может позволить добиться устойчивости γ -мод колебаний этих звёзд и объяснить наблюдения.

В *разделах 4.6 и 4.7* обсуждены упрощения, сделанные при вычислениях, и перечислены результаты главы 4. Материалы главы опубликованы в статьях [A10, A11].

В **Заключении** кратко перечислены основные результаты диссертации:

1. Получены аппроксимации парциальных вкладов нейтронов, протонов и лептонов в интегральную теплоёмкость нейтронной звезды, а также полной теплоёмкости несверхтекучей звезды и звезды с сильной протонной сверхтекучестью. Аппроксимированы вклады в нейтринную светимость нейтронных звёзд за счёт прямого и модифицированного урка-процессов, а также за счёт тормозного излучения нейтрино при столкновениях нейтронов. Аппроксимации имеют вид функций массы звезды, её радиуса и внутренней температуры. Они универсальны для широкого класса моделей нуклонных уравнений состояния в ядре звезды. На их основе предложено аналитическое модельно-независимое решение задачи остывания нейтронных звёзд, единое для нейтринной и фотонной стадий остывания.
2. Проведен модельно-независимый анализ остывания 12 нейтронных звёзд с измеренными температурами поверхности и возрастами. В нескольких случаях получены ограничения на свойства сверхтекучести нуклонов в недрах звёзд и на массу аккрецированного вещества в их теплоизолирующих оболочках. Анализ рентгеновского спектра звезды XMMU J1732–344 и пульсара Вела позволил изучить возможность использования теории остывания для наложения ограничений на массы и радиусы нейтронных звёзд.
3. Выполнен самосогласованный расчёт квазистационарных потоков вещества, возникающих в нуклонном ядре нейтронной звезды с осесимметричным магнитным полем. Показано, что скорости общего потока вещества

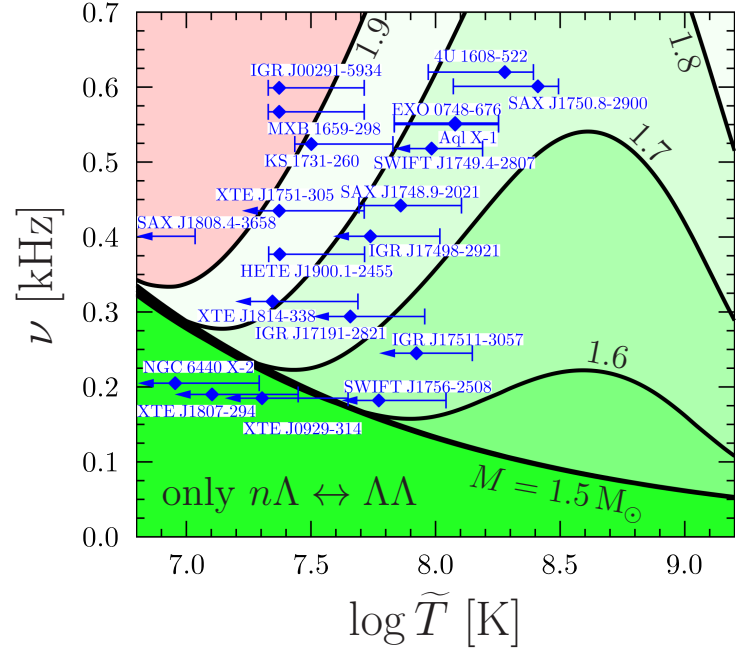


Рис. 6. Окна неустойчивости для нейтронных звёзд с уравнением состояния FSU2H в случае, когда все процессы, кроме $n\Lambda \leftrightarrow \Lambda\Lambda$, подавлены. Данные наблюдений взяты из работ, указанных в диссертации. Подробности см. в тексте.

многократно превосходят диффузионные скорости частиц разных сортов, что требует пересмотра распространённой в литературе картины эволюции магнитного поля в ядре звезды. Показано, что увлечение магнитного поля потоком вещества в ядре может вносить существенный вклад в эволюцию поля магнитаров.

4. Рассчитана электронная сдвиговая вязкость за счёт рассеяния электронов на атомных ядрах в коре нейтронной звезды с сильным магнитным полем. Исследовано поведение коэффициентов сдвиговой вязкости в зависимости от силы магнитного поля и свойств вещества коры.
5. Рассчитаны скорости слабых безлептонных процессов и объемная вязкость в веществе ядер нейтронных звезд с Λ и Ξ^- -гиперонами с учетом канала обмена одним виртуальным мезоном. Результаты аппроксимированы аналитическими формулами, позволяющими легко оценивать объёмную вязкость для широкого класса уравнений состояния нуклонно-гиперонного вещества.
6. Изучены окна неустойчивости γ -мод колебаний нейтронных звезд с гиперонными ядрами с учётом обмена мезоном в слабых безлептонных реакциях. Результаты сопоставлены с данными наблюдений нейтронных звезд в маломассивных рентгеновских двойных системах. Показана потенциальная важность рассмотренного канала реакций для объяснения наблюдений этих источников.

Список публикаций

- A1. Neutrino luminosities and heat capacities of neutron stars in analytic form / D. D. Ofengeim, M. Fortin, P. Haensel et al. // *Phys. Rev. D.* — 2017. — Vol. 96, no. 4. — P. 043002.
- A2. Ofengeim D. D., Yakovlev D. G. Analytic description of neutron star cooling // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2017. — Vol. 467, no. 3. — P. 3598–3603.
- A3. Ofengeim D. D., Zyuzin D. A. Thermal Spectrum and Neutrino Cooling Rate of the Vela Pulsar // *Particles.* — 2018. — Vol. 1, no. 1. — P. 194–202.
- A4. Analysing neutron star in HESS J1731-347 from thermal emission and cooling theory / D. D. Ofengeim, A. D. Kaminker, D. Klochkov et al. // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2015. — Vol. 454. — P. 2668–2676.
- A5. Ofengeim D. D., Yakovlev D. G. Cooling status of three neutron stars // *J. Phys. Conf. Ser.* — 2017. — Vol. 932. — P. 012049.
- A6. XMM-Newton observations of a gamma-ray pulsar J0633+0632: pulsations, cooling and large-scale emission / A. Danilenko, A. Karpova, D. Ofengeim et al. // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2020. — Vol. 493, no. 2. — P. 1874–1887.
- A7. Ofengeim D. D., Gusakov M. E., Kantor E. M. Quasistationary fluid motions in magnetized neutron stars // *J. Phys. Conf. Ser.* — 2018. — Vol. 1038. — P. 012009.

- A8. Ofengeim D. D., Gusakov M. E. Fast magnetic field evolution in neutron stars: The key role of magnetically induced fluid motions in the core // *Phys. Rev. D.* — 2018. — Vol. 98, no. 4. — P. 043007.
- A9. Ofengeim D. D., Yakovlev D. G. Shear viscosity in magnetized neutron star crust // *EPL (Europhysics Letters)*. — 2015. — Vol. 112, no. 5. — P. 59001.
- A10. Bulk viscosity in neutron stars with hyperon cores / D. D. Ofengeim, M. E. Gusakov, P. Haensel, M. Fortin // *Phys. Rev. D.* — 2019. — Vol. 100, no. 10. — P. 103017.
- A11. R-mode stabilization in neutron stars with hyperon cores / D. D. Ofengeim, M. E. Gusakov, P. Haensel, M. Fortin // *J. Phys. Conf. Ser.* — 2019. — Vol. 1400. — P. 022029.

Цитированная литература

1. Haensel P., Potekhin A. Y., Yakovlev D. G. *Neutron Stars. 1. Equation of State and Structure.* — Springer, New York, 2007.
2. Lattimer J. M., Prakash M. The equation of state of hot, dense matter and neutron stars // *Phys. Rep.* — 2016. — Vol. 621. — P. 127–164.
3. Burgio F. G., Fantina A. F. Nuclear Equation of State for Compact Stars and Supernovae // *The Physics and Astrophysics of Neutron Stars* / Ed. by L. Rezzolla, P. Pizzochero, D. I. Jones et al. — Springer, Cham, 2018. — P. 255.
4. *Stellar superfluids* / D. Page, J. M. Lattimer, M. Prakash, A. W. Steiner // *Novel Superfluids*, vol. 2 / Ed. by K. H. Bennemann, J. B. Ketterson. — Oxford University Press, Oxford, 2015. — P. 505–579.
5. Unifying the observational diversity of isolated neutron stars via magnetothermal evolution models / D. Viganò, N. Rea, J. A. Pons et al. // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2013. — Vol. 434. — P. 123–141.
6. Haskell B. R-modes in neutron stars: Theory and observations // *International Journal of Modern Physics E.* — 2015. — Vol. 24, no. 9. — P. 1541007.
7. Cooling rates of neutron stars and the young neutron star in the Cassiopeia A supernova remnant / D. G. Yakovlev, W. C. G. Ho, P. S. Shternin et al. // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2011. — Vol. 411. — P. 1977–1988.
8. Gusakov M. E., Kantor E. M., Ofengeim D. D. Evolution of the magnetic field in neutron stars // *Phys. Rev. D.* — 2017. — Vol. 96. — P. 103012.
9. Thermal Structure and Cooling of Superfluid Neutron Stars with Accreted Magnetized Envelopes / A. Y. Potekhin, D. G. Yakovlev, G. Chabrier, O. Y. Gnedin // *Astrophys. J.* — 2003. — Vol. 594. — P. 404–418.
10. Beznogov M. V., Potekhin A. Y., Yakovlev D. G. Diffusive heat blanketing envelopes of neutron stars // *MNRAS.* — 2016. — Vol. 459. — P. 1569–1579.
11. Analytical representations of unified equations of state for neutron-star matter / A. Y. Potekhin, A. F. Fantina, N. Chamel et al. // *Astron. Astrophys.* — 2013. — Vol. 560. — P. A48.

12. Minimal Cooling of Neutron Stars: A New Paradigm / D. Page, J. M. Lattimer, M. Prakash, A. W. Steiner // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* — 2004. — Vol. 155. — P. 623–650.
13. Enhanced cooling of neutron stars via Cooper-pairing neutrino emission / M. E. Gusakov, A. D. Kaminker, D. G. Yakovlev, O. Y. Gnedin // *Astron. Astrophys.* — 2004. — Vol. 423. — P. 1063–1071.
14. Beznogov M. V., Yakovlev D. G. Statistical theory of thermal evolution of neutron stars // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2015. — Vol. 447. — P. 1598–1609.
15. The neutron star in HESS J1731-347: Central compact objects as laboratories to study the equation of state of superdense matter / D. Klochkov, V. Suleimanov, G. Pühlhofer et al. // *Astron. Astrophys.* — 2015. — Vol. 573. — P. A53.
16. Thin magnetic hydrogen atmospheres and the neutron star RX J1856.5 3754 / W. C. G. Ho, D. L. Kaplan, P. Chang et al. // *Astrophys. Space Sci.* — 2007. — Vol. 308. — P. 279–286.
17. Goedbloed J. P., Keppens R., Poedts S. *Advanced Magnetohydrodynamics.* — Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2010.
18. Heiselberg H., Hjorth-Jensen M. Phases of dense matter in neutron stars // *Phys. Rep.* — 2000. — Vol. 328, no. 5-6. — P. 237–327.
19. The relevance of ambipolar diffusion for neutron star evolution / A. Passamonti, T. Akgün, J. A. Pons, J. A. Miralles // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2017. — Vol. 465. — P. 3416–3428.
20. Potekhin A. Y., Chabrier G. Magnetic neutron star cooling and microphysics // *Astron. Astrophys.* — 2018. — Vol. 609. — P. A74.
21. Chugunov A. I., Yakovlev D. G. Shear Viscosity and Oscillations of Neutron Star Crust // *Astron. Rep.* — 2005. — Vol. 49. — P. 724–738.
22. Лифшиц Е. М., Питаевский Л. П. *Физическая кинетика.* — М.: Наука, 1979. — Серия: “Теоретическая физика”, том X.
23. van Dalen E. N., Dieperink A. E. Bulk viscosity in neutron stars from hyperons // *Phys. Rev. C.* — 2004. — Vol. 69. — P. 025802.
24. Nayyar M., Owen B. J. R-modes of accreting hyperon stars as persistent sources of gravitational waves // *Phys. Rev. D.* — 2006. — Vol. 73. — P. 084001.