На правах рукописи

Кондратьев Илья Алексеевич

Магниторотационные процессы в коллапсирующих сверхновых

Специальность 1.3.1.
Физика космоса, астрономия

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» и Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт космических исследований Российской академии наук.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук **Моисеенко Сергей Григорьевич**

Официальные оппоненты: д.ф.-м.н., с.н.с., **Колдоба Александр Васильевич,** заведующий кафедрой моделирования и технологий разработки нефтяных месторождений ФГАОУ ВО "Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)"

д.ф.-м.н., доцент, **Ламзин Сергей Анатольевич,** ведущий научный сотрудник Государственного астрономического института имени П.К. Штернберга МГУ М.В. Ломоносова

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", г. Москва

Защита состоится 25 марта 2025 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.1.032.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте астрономии Российской академии наук (ИНАСАН) по адресу: 119017, г. Москва, ул. Пятницкая, д. 48.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института астрономии РАН и на сайте http://www.inasan.ru/.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 119017, г. Москва, ул. Пятницкая, д. 48, ученому секретарю диссертационного совета 24.1.032.01.

Автореферат разослан 14 февраля 2025 года.
Телефон для справок: +7 (495) 951-54-61.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.1.032.01,
канд. физ.-мат. наук Чупина Наталия Викторовна

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Диссертация посвящена численному исследованию процессов, связанных с наличием магнитного поля и вращения при взрывах коллапсирующих сверхновых и остывании одиночных нейтронных звезд (НЗ).

Взрывы сверхновых с коллапсирующим ядром являются одними из самых ярких событий во Вселенной. По окончании стадии термоядерного горения ядро массивной ($M \gtrsim 8M_\odot$) звезды теряет гидродинамическую устойчивость, и за характерное время $\lesssim 1$ секунды после катастрофического сжатия ядра до ядерных плотностей высвобождается огромное количество энергии ($E \sim 10^{53}$ эрг), по порядку величины равное энергии гравитационной связи сколлапсировавшего объекта. Согласно наблюдениям, характерная энергия около $\sim 10^{51}$ эрг передается веществу оболочки ядра, которое выносится в межзвездную среду в виде взрывной волны. Не смотря на более чем 50-летнюю историю изучения физического механизма вспышек, его детали не вполне выяснены к настоящему времени, что делает данную проблему одной из актуальных задач фундаментальной астрофизики. Среди наиболее разработанных можно выделить нейтринный и магниторотационный (МР) механизмы. В рамках нейтринного механизма [1], возникшая вблизи протонейтронной звезды ударная волна отскока, движущаяся наружу, останавливается падающим на центр веществом с периферии ядра звезды по прохождении $\sim$ 100 км. Последующее взаимодействие нейтрино с веществом за фронтом стоячей ударной волны, а также усиливающие его гидродинамические эффекты, такие как конвекция [2], неустойчивость стоячей аккрецирующей ударной волны (SASI - Standing Accretion Shock Instability, [3]), приводят к перемешиванию и нагреву вещества и дальнейшему движению ударной волны наружу. В настоящее время, в рамках численного моделирования нейтринного механизма, энергия взрыва сверхновых, как правило, существенно ниже наблюдаемых значений [4]. МР механизм, предложенный в работе [5], с другой стороны, является менее чувствительным к деталям нейтринной физики, однако требует наличия в ядре звезды вращения и магнитного поля. В рамках МР механизма, в результате неоднородного коллапса ядра система представляет собой дифференциально вращающуюся протонейтронную звезду и оболочку. Вмороженное магнитное поле, "накручиваясь" со временем, усиливается за счет энергии дифференциального вращения. Увеличение магнитного давления приводит к возникновению волны сжатия, которая, распространяясь по спадающему фону плотности, переходит в движущуюся наружу МГД ударную волну, генерирующую взрыв сверхновой. МГД расчеты МР взрыва (см. [6—13]) предсказывают высокую энергетику взрыва, согласующуюся с наблюдениями, что делает МР механизм одним из самых реалистичных.

МР механизм всегда приводит к несферической форме взрывной волны от сверхновой. При нарушении зеркальной симметрии магнитного поля в предсверхновой возможна дополнительная асимметрия МР выброса относительно экваториальной плоскости. Это происходит ввиду того, что в разных полушариях усиление тороидального магнитного поля будет происходить по-разному, приводя к струйным выбросам различной интенсивности. В этом случае в системе возможно формирование нескомпенсированного импульса. В силу закона сохранения импульса возникает эффект отдачи – образование линейной скорости ("kick") у протонейтронной звезды. Такой эффект наблюдается у ряда НЗ [14; 15], характерная величина скорости составляет несколько сотен километров в секунду. В настоящее время исследование эффекта отдачи представляет большой интерес для современной теории сверхновых [16—18] как в рамках нейтринного, так и в рамках МР механизма. Однако, в случае последнего не проводилось систематических исследований.

После стадии формирования НЗ, начинается стадия ее остывания, которая длится на протяжении миллионов лет. На этой стадии, в некоторых случаях НЗ можно наблюдать как слабый пульсирующий рентгеновский источник. К настоящему моменту известно несколько объектов, отождествленных с нейтронными звездами, излучающих почти чернотельный спектр в мягком рентгеновском диапазоне, искаженный эффектами наличия сильного магнитного поля. "Великолепная Семерка" – это неформальное название группы из одиночных, остывающих нейтронных звезд, которые находятся на расстоянии от 120 до 150 парсек от Земли ([19—21]). Эти объекты также называются XDINS (X-ray Dim Isolated Neutron Stars). Они интересны также тем, что на основе данных теплового излучения от них можно изучать структуру сильного магнитного поля нейтронных звезд. Наличие достаточно сильного поля ($B > 10^{11}$ Гс) приводит к анизотропии теплового потока в коре и внешней оболочке нейтронной звезды, и, следовательно, неоднородному распределению температуры по ее поверхности. Причиной пульсаций теплового излучения является то, что наблюдатель может видеть за период вращения нейтронной звезды области различной температуры, величина и интенсивность которых существенно зависят от локальной величины и направления магнитного поля источника. Кривые блеска нескольких объектов Семерки (RX J0720.4-3125, RX J0806.4-4123 и RX J0420.0-5022) проявляют достаточно сильные пульсации и имеют несимметричную форму пиков, что, вероятно, определяется наличием недипольного магнитного поля в них [22]. Сравнение результатов наблюдений [19; 23] с многомерными расчетами анизотропного переноса тепла во внешних слоях [24—27] вращающихся замагниченных НЗ позволит лучше установить структуру магнитного поля в этих объектах. В настоящее время, с такими современными рентгеновскими телескопами, как $NICER$ [28], возможно сравнение размеров наблюдаемого теплового

источника с результатами численных моделей, что позволяет наложить более точные ограничения на уравнение состояния сверхплотного вещества по наблюдаемому радиусу [29; 30].

Математические модели, описывающие поведение астрофизической плазмы в указанных здесь объектах, являются сложными нелинейными многомерными (интегро-) дифференциальными уравнениями, ввиду чего решить их аналитически можно только для очень небольшого числа случаев при наличии упрощающих рассмотрение предположений. Ввиду этого часто приходится прибегать к численным моделям. Развитие различных численных подходов, написание комплексов программ для моделирования различных систем, а также их использование для исследования различных задач астрофизики представляют собой отдельный интерес и являются основной частью раздела относительно молодой науки – *Вычислительной астрофизики*. Для моделирования уравнений газовой динамики/магнитной гидродинамики в контексте астрофизических приложений используются три наиболее распространенных подхода – 1) метод конечных разностей [31—33], 2) гидродинамика сглаженных частиц – smoothed particles hydrodynamics (SPH) [34; 35], а также 3) метод конечного объема [36; 37]. Методы конечного объема оперируют уравнениями в форме законов сохранения (консервативность) и используются в большинстве современных кодов для моделирования магнитогидродинамических уравнений в теории коллапсирующих сверхновых. Недавно также получили свое развитие полунеявные подходы, которые пока еще практически не применялись для астрофизических приложений [38—40]. В рамках полунеявного подхода в потоках сохраняющихся величин проводится расщепление на акустическую и адвективную части [41]. Члены, отвечающие акустической части, берутся неявно по времени, что позволяет существенно снизить вычислительные расходы при моделировании областей течения с малыми числами Маха, при этом ударные волны и быстрое движение сжимаемого газа учитываются корректно в силу использования консервативной формы уравнений [40; 41].

Целью настоящей работы являются изучение влияния неосесимметричных конфигураций магнитных полей на процессы анизотропного переноса тепла во внешних слоях нейтронных звезд и связанные с ним наблюдательные проявления, а также исследование свойств компактного объекта (приобретенной скорости протонейтронной звезды) и морфологии взрыва в рамках магниторотационного сценария вспышек коллапсирующих сверхновых при наличии экваториально несимметричных магнитных полей в ядре звезды-предсверхновой.

Для достижения поставленных целей необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Получить распределения температуры в коре и на поверхности замагниченной нейтронной звезды. Построить по рассчитанным

распределениям поверхностной температуры синтетические кривые блеска и тепловые спектры. Для этого необходимо разработать комплекс программ для численного решения трехмерного уравнения теплопроводности в коре и внешней оболочке замагниченной нейтронной звезды; разработать комплекс программ для построения тепловых спектров и кривых блеска замагниченной нейтронной звезды, излучающей в тепловом диапазоне.

2. Исследовать задачу о коллапсе ядра массивной звезды и магниторотационном взрыве сверхновой при нарушении зеркальной симметрии магнитного поля. Для этого необходимо разработать комплекс программ для моделирования многомерных уравнений магнитной гидродинамики при наличии самогравитации и уравнения состояния общего вида, заданного в табличной форме, с учетом процессов излучения и поглощения нейтрино и антинейтрино.

Научная новизна:

1. Впервые было проведено трехмерное самосогласованное исследование распространения тепла во внешних слоях замагниченных нейтронных звезд и его наблюдательных проявлений.
2. Впервые разработан комплекс программ для исследования астрофизических МГД-течений при помощи полунеявной численной схемы высокого порядка точности с использованием подвижности сетки в криволинейной геометрии для уравнения состояния общего вида, самогравитации и учета нейтринных потерь.
3. Было выполнено оригинальное систематическое исследование возникновения больших линейных скоростей (эффект отдачи) нейтронных звезд, формирующихся при магниторотационных взрывах сверхновых. Впервые проведено сравнение различных способов генерации экваториальной асимметрии магниторотационного взрыва сверхновой.

Практическая значимость

Полученные распределения температуры на поверхности нейтронной звезды, а также синтетические кривые блеска для них, позволяют объяснить качественные особенности наблюдаемых кривых блеска одиночных вращающихся нейтронных звезд, связанные со структурой магнитного поля.

Разработанный комплекс программ для решения трехмерного уравнения теплопроводности в коре нейтронной звезды и моделирования синтетических кривых блеска по получаемым распределениям температуры может быть использован для сравнения реальных спектров и кривых блеска теплового излучения нейтронных звезд с предсказаниями теоретических моделей без предположений о симметрии магнитного поля.

Численное моделирование магниторотационного взрыва сверхновой с нарушением зеркальной симметрии магнитного поля позволило получить эффект отдачи нейтронных звезд и возникновение больших линейных скоростей при их рождении. Это позволяет естественным образом объяснить существование быстролетящих нейтронных звезд.

Разработанный комплекс программ для решения многомерных уравнений магнитной гидродинамики при наличии самогравитации и нейтринных потерь может быть использован для моделирования совершенно разных замагниченных течений как астрофизической, так и лабораторной плазмы.

Методология и методы исследования. Все исследования, изложенные в тексте диссертации, проведены при помощи методов численного моделирования. Для расчетов теплопроводности во внешних слоях (Глава 1) замагниченной нейтронной звезды использовался трехмерный конечно-разностный метод опорных операторов, хорошо зарекомендовавший себя в различных двумерных астрофизических расчетах [31; 32; 42]. Сеточные аналоги дифференциальных операторов построены на сетке из тетраэдров. Для расчета модели внешней оболочки использовались стандартные методы Рунге-Кутты решения обыкновенных дифференциальных уравнений. Численные методики для гидродинамических уравнений, изложенные в Главе 2, используют аппарат метода конечного объема [36; 37] для уравнений, записанных в форме законов сохранения. В МГД-коде реализована процедура очистки дивергенции магнитного поля [43]. Для МГД расчетов взрыва коллапсирующих сверхновых в Главе 3 также использовался метод конечного объема в сферических координатах с использованием приближенного метода Годуновского типа [44]. Использовались кусочно-параболический метод [45] для уточнения порядка точности по пространству и монотонный метод Рунге-Кутты третьего порядка точности по времени [46].

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Впервые на основе разработанных комплексов программ для трехмерного моделирования теплопроводности в коре нейтронной звезды при наличии тензора теплопроводности, зависящего от магнитного поля были получены трехмерные распределения температуры в коре и на поверхности нейтронной звезды. Были построены синтетические кривые блеска. Исследовано влияние неосесимметричных полей на наблюдательные проявления одиночных радиотихих нейтронных звезд.
2. Для моделирования самогравитирующих многомерных астрофизических МГД течений разработан комплекс программ с использованием метода конечного объема. Он основан как на явных по времени схемах высокого порядка точности, так и с использованием полунеявных алгоритмов с более мягким условием

устойчивости. Комплекс программ реализован на подвижной сетке, позволяющей учесть вращение квазилагранжевым способом, позволяющим более эффективно моделировать течения с дифференциальным вращением, такие как аккреционные диски и магниторотационные сверхновые.

3. Показано, что протонейтронная звезда при магниторотационном взрыве сверхновой может приобрести линейную скорость до 500 километров в секунду. Это согласуется с наблюдательными данными для большинства известных нейтронных звезд. Рассмотрено несколько сценариев с разными начальными конфигурациями магнитных полей – присутствие в ядре звезды мультиполей разного порядка, наличие смещенного дипольного поля, а также присутствие сильного тороидального поля в дополнение к дипольному полю.

Достоверность полученных численных результатов подтверждается использованием хорошо разработанных численных методов, сравнением тестовых расчетов с известными аналитическими и численными результатами, а также качественным совпадением результатов с имеющимися наблюдательными данными по сверхновым с коллапсирующим ядром и остывающим замагниченным нейтронным звездам, качественным совпадением в ряде предельных и тестовых случаев с результатами других групп (научные группы, специализирующиеся на релятивистской астрофизике/физике коллапсирующих сверхновых из университетов Валенсии (Испания) и Монаш (Австралия)). Основные результаты опубликованы в рецензируемых журналах, рекомендуемых ВАК.

Апробация работы.

Основные результаты диссертации были представлены в качестве устных и стендовых докладов на следующих международных конференциях:

1. Kondratyev I.A., Moiseenko S.G., Bisnovatyi-Kogan G.S., Glushikhina M.V. “Anisotropic heat transfer in outer layers of neutron stars”, XXXI Canary Islands Winter School of Astrophysics 24 November 2019, Tenerife, Spain
2. Kondratyev I.A., Moiseenko S.G., Bisnovatyi-Kogan G.S., Glushikhina M.V. “Three - dimensional simulation of stationary heat transfer in magnetized neutron star” The Modern Physics of Neutron Stars and Relativistic Gravity - 2021, 27.09.2021 - 30.09.2021, Erevan, Armenia
3. Kondratyev I.A., Moiseenko S.G. “A semi - implicit multidimensional unstructured gas dynamical solver for astrophysical applications” Sixteenth Marcel Grossmann Meeting-MG16, 05.07.2021 - 10.07.2021, online
4. I.A. Kondratyev, S.G. Moiseenko “Semi-implicit numerical method for differentially rotating compressible astrophysical flows”, Fifth

Workshop on Numerical Modeling in MHD and Plasma Physics: Methods, Tools, and Outcomes, 12-14 Oct 2022, Online

5. I.A. Kondratyev, S.G. Moiseenko, G.S. Bisnovatyi-Kogan "Magnetorotational supernova explosions: jets and mirror symmetry violation", Sixth Workshop on Numerical Modeling in MHD and Plasma Physics: Methods, Tools, and Outcomes, 12-13 Oct 2023, Moscow, Russia
6. I.A. Kondratyev "2D simulations of magnetorotational supernova explosions with violated mirror symmetry", Challenges and Innovations in computational astrophysics - V (ChaICA-V), 7-9 Nov 2023, Online

На научных семинарах:

1. "Магнитоплазменные процессы в релятивистской астрофизике" (Таруса, 2018, 2022, 2023, 2024 г.)
2. Теоретического отдела Физического института РАН (Москва, 2020 г.)
3. "Вычислительные методы и математическое моделирование" Института Прикладной Математики им. М.В. Келдыша РАН (Москва, 2021 г.)
4. Главной (Пулковской) Астрономической Обсерватории РАН (ГАО РАН, Москва, 2023 г.)
5. Астрофизической группы Института Теоретической и Экспериментальной Физики (ИТЭФ НИЦ "Курчатовский институт", 2023 г.)
6. Астрофизический семинар Института Астрономии РАН (ИНАСАН, 2024 г.)

Личный вклад. Все представленные в диссертации результаты получены автором в результате совместных исследований. Все программное обеспечение, описанное в тексте диссертации, разработано и протестировано автором лично. Численные и аналитические расчеты, результаты которых доложены в данной работе, также выполнены лично автором. В равном с соавторами вкладе выполнялись физическая и математическая постановки задач, выбор численных методик, а также участие в интерпретации результатов расчетов. Результаты, выносимые на защиту, согласованы с соавторами.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 7 печатных изданиях, 7 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и двух приложений. Полный объем диссертации составляет 141 страницу, включая 39 рисунков и 11 таблиц. Список литературы содержит 174 наименования на 16 страницах.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы. Приведены сведения об апробации полученных результатов, а также о степени участия соискателя в проведенном исследовании.

Первая глава посвящена исследованию анизотропной теплопроводности во внешних слоях замагниченных НЗ при наличии неосесимметричных магнитных полей. Построена модель внешних слоев НЗ, включающая в себя кору, в которой решается трехмерное уравнение теплопроводности с тензорным коэффициентом для вырожденных электронов [47], зависящим от магнитного поля, и внешнюю оболочку, для которой строится одномерная локальная модель тепловой структуры аналогично подходу, взятому из работы [48], в которой тепло переносится электронами и излучением. В **Приложении А** представлены выражения для используемых уравнения состояния и коэффициентов непрозрачности для модели внешней оболочки замагниченной НЗ. Модель оболочки встраивается в граничное условие излучения фотонов с поверхности НЗ для трехмерной задачи в коре, в то время как температура ядра предполагается постоянной, ввиду медленного охлаждения. Полученная краевая задача нелинейна и решается численно конечно-разностным методом опорных операторов на трехмерной сетке из тетраэдров. В **Приложении Б** приведено описание трехмерного метода опорных операторов, тестовые расчеты и применение данного подхода к решению трехмерной задачи о теплопроводности в коре НЗ. Далее приведены данные сравнения рассчитанной модели с дипольным полем с аналогичными двумерными моделями из работ [24; 25], результаты находятся в хорошем качественном и количественном согласии. Также приведены результаты осесимметричных распределений температуры при наличии квадрупольного поля. После этого в данной главе приводятся результаты трехмерных расчетов для НЗ с несоосной суперпозицией дипольного и квадрупольного магнитных полей с различным отношением углов между осями мультиполей Θ_b, а также отношением между их индукциями на полюсах $\beta = B_{p,quad}/B_{p,dip}$. Получено, что при параметре $\beta < 1$ форма холодного пояса искривляется, его площадь растет, а горячие шапки на полюсах НЗ имеют различные размеры, и их центры не лежат на прямой, проходящей через центр звезды. Подобная структура в распределении температуры поверхности, по-видимому, имеется в источнике RX J0720.4–3125 из "Великолепной семерки" [21]. С ростом квадрупольной компоненты по отношению к дипольной, возникает второй холодный

пояс при β в интервале $[0.9; 1.5]$ в зависимости от угла наклона осей. Далее представлены результаты построения синтетических кривых блеска для рассчитанных распределений температуры в приближении локально-чернотельной модели с приближенным учетом эффектов общей теории относительности [49]. Получено, что как для двухпиковой (видно оба горячих полюса в отсутствие квадруполя), так и для однопиковой (виден только один прецессирующий полюс за период вращения) кривой блеска ее структура может существенно искривиться, а пульсации – усилиться до 4 раз по сравнению с чисто дипольным случаем. Также возникают асимметрии пиков, похожие на наблюдаемые в источниках RX J0420 и RX J0806 [50], что может говорить о наличии в их структуре несоосной квадрупольной компоненты.

Вторая глава посвящена построению многомерных численных схем для моделирования уравнений гравитационной газовой динамики и магнитной гидродинамики (МГД) при помощи явных и полунеявных конечно-объемных подходов. В рамках явных методов рассматривается схема, построенная на приближенном методе Годунова [37]. Для полунеяных схем подход для решения уравнений сжимаемой жидкости состоит в расщеплении потока на акустическую и адвективную части [41], для газовой динамики и магнитной гидродинамики можно показать, что за акустические волны в среде отвечают член с градиентом давления ∇P в уравнении на импульс и член с потоком энтальпии $\nabla \cdot H\rho\mathbf{v}$ в уравнении на энергию. Взяв эти члены неявными по времени, можно получить, что в условие устойчивости не будет входить скорость звуковых волн, что может существенно ускорить расчеты при наличии областей с малыми числами Маха [39]. В рассматриваемой главе содержится развитие этих методов на криволинейные геометрии, широко используемые в астрофизике. В главе также содержатся способы уточнения решения по пространству как для явных, так и для полунеявных схем с использованием кусочно-полиномиальной реконструкции в криволинейных геометриях [45] и использованием многостадийных методов Рунге-Кутты [46; 51]. Методы построены на подвижной вращающейся сетке для учета возможного крупномасштабного вращения в потоке плазмы, характерного для аккреционных дисков и магниторотационных взрывов сверхновых. Квазилагрнжевый учет вращения заключается в переходе в подвижную систему отсчета при расчете потоков консервативных переменных [52; 53] с перестройкой структуры сетки на каждом временном слое. Представлены результаты тестовых расчетов.

Третья глава посвящена систематическому исследованию эффекта отдачи нейтронной звезды в рамках магниторотационного механизма взрыва коллапсирующих сверхновых. Рассмотрены модели коллапса и взрыва сверхновой при наличии различных полей с нарушенной зеркальной симметрией. Наличие таких полей в ядре массивной звезды перед коллапсом приводит к тому, что магнитное давление, градиент которого генерирует

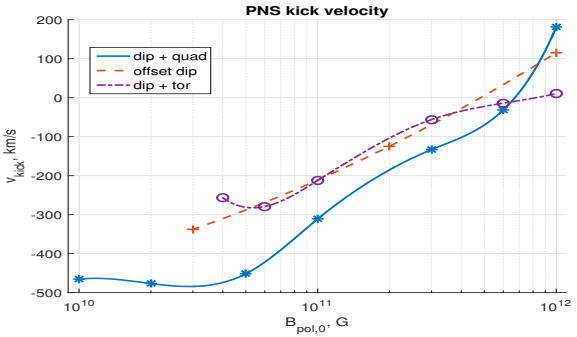

Рис. 1 — Зависимость скорости протонейтронной звезды от начального полоидального магнитного поля для различных семейств моделей в конце расчетов. Сглаженные линии представляют модели DQ (синие сплошные), Do (красные пунктирные) и DT (фиолетовые штрихпунктирные).

взрыв, становится различным в северном и южном полушариях. Это приводит к выбросам различной интенсивности в различных полушариях, и – в силу закона сохранения импульса – возникает эффект отдачи и передача части импульса протонейтронной звезде [54; 55]. Расчеты коллапса и магнитноротационного взрыва проведены для вращающейся замагниченной звезды с начальной массой на главной последовательности в 35 $M_\odot$. Рассмотрено три сценария генерации нарушений зеркальной симметрии поля в ядре массивной звезды – с суперпозицией дипольного и квадрупольного полей (DQ) в ядре звезды-предсверхновой, со смещенным дипольным полем (Do) и с комбинацией дипольного и симметричного тороидального магнитных полей (DT). Для моделирования использовались осесимметричные нерелятивистские идеальные МГД-уравнения при наличии самогравитации, реалистичного уравнения состояния плотного вещества и процессов с нейтрино. Последние учитываются в рамках схемы нейтринных потерь/нагрева с учетом процессов с электронными нейтрино и антинейтрино в оптически толстых и тонких областях сколлапсировавшего ядра [56].

На Рис. 1 представлены зависимости скоростей протонейтронной звезды от начального полоидального поля в ядре звезды перед коллапсом, полученные в рамках расчетов для различных моделей генерации асимметрии. Во всех трех семействах моделей получены зависимости скорости компактного объекта от магнитного поля, причем модели DQ и Do оказываются качественно схожими. В данных семействах моделей наблюдается изменение направления скорости компактного объекта и асимметрии выбросов с ростом магнитного поля, в то время как в моделях DT асимметрия взрыва и скорость протонейтронной звезды максимальны для

минимальных полей и далее монотонно спадают до нуля с ростом величины начального полоидального магнитного поля. Полученные в расчетах скорости протонейтронных звезд $v_{kick} \sim 100 - 500$ км/с хорошо согласуются с данными наблюдений пульсаров (см., напр., [57]).

В **заключении** приведены основные результаты работы, которые состоят в следующем:

1. С использованием разработанного трехмерного комплекса программ были проведены расчеты теплопроводности во внешних слоях замагниченной нейтронной звезды без предположений об осевой симметрии магнитного поля. По рассчитанным распределениям температуры построены синтетические кривые блеска в локально-чернотельном приближении, которое является достаточно точным для объектов типа "Великолепной семерки". Получено, что включение даже относительно слабого (с индукцией в два раза меньше) несоосного к дипольному квадрупольного магнитного поля может привести к существенному росту пульсаций и искривлению наблюдаемых пиков на кривой блеска по сравнению с чисто дипольным случаем. Это может позволить косвенно детектировать наличие несоосных старших мультиполей в некоторых рентгеновских источниках, отождествленных с одиночными нейтронными звездами. Разработанный комплекс программ можно применять для сравнения наблюдательных данных с теоретическими предсказаниями о структуре магнитного поля во внешних слоях нейтронных звезд.
2. Для выполнения многомерных численных МГД-расчетов моделирования течений космической и лабораторной плазмы был разработан комплекс программ на основе конечно-объемной численной схемы. Рассмотрены как стандартные явные консервативные методы с вычислением потоков приближенным методом Годунова, так и более современные подходы на основе расщепления потока на адвективную и акустическую части. При этом, члены в уравнениях газовой динамики, отвечающие акустическим колебаниям, берутся неявно по времени. Для обоих подходов рассмотрены также случаи криволинейных геометрий и учет крупномасштабного вращения на подвижной сетке. Комплексы программ можно использовать для моделирования широкого класса течений.
3. На основе разработанного комплекса для моделирования МГД уравнений был численно исследован эффект отдачи протонейтронной звезды при взрывах коллапсирующих сверхновых в рамках магниторотационного механизма. Систематически рассмотрены различные виды нарушения экваториальной симметрии выбросов в зависимости от начачального магнитного поля массивной звезды перед коллапсом. Получено, что во всех сценариях возможно

формирование существенно асимметричных выбросов за времена порядка одной секунды после коллапса ядра, вследствие чего образуются быстролетящие нейтронные звезды со скоростями в несколько сотен километров в секунду, что хорошо согласуется с данными наблюдений.

Публикации автора по теме диссертации

A1. *Kondratyev, I. A.* Application of 3D basic operators method extension to astrophysical problems / I. A. Kondratyev, S. G. Moiseenko // Journal of Physics: Conference Series. — 2019. — Vol. 1163. — P. 012069.

A2. Numerical simulation of an anisotropic heat transfer in magnetized neutron stars with 3D basic operators method / I. A. Kondratyev [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. — 2019. — Vol. 1336. — P. 012006.

A3. 3D моделирование анизотропной теплопроводности во внешних слоях замагниченных нейтронных звезд / И. А. Кондратьев [и др.] // Астрономический журнал. — 2020. — Т. 97, № 3. — С. 206—224.

A4. Three-dimensional heat transfer effects in external layers of a magnetized neutron star / I. A. Kondratyev [et al.] // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2020. — Vol. 497, no. 3. — P. 2883—2892.

A5. *Kondratyev, I. A.* A Semi-Implicit Numerical Method for Differentially Rotating Compressible Flows / I. A. Kondratyev, S. G. Moiseenko // Lobachevskii Journal of Mathematics. — 2023. — Vol. 44, no. 1. — P. 44—56.

A6. *Kondratyev, I. A.* Magnetorotational Supernova Explosions: Jets and Mirror Symmetry Violation / I. A. Kondratyev, S. G. Moiseenko, G. S. Bisnovatyi-Kogan // Lobachevskii Journal of Mathematics. — 2024. — Vol. 45, no. 1. — P. 50—59.

A7. *Kondratyev, I. A.* Magnetorotational Neutron Star Kicks / I. A. Kondratyev, S. G. Moiseenko, G. S. Bisnovatyi-Kogan // Physical Review D. — 2024. — Vol. 110, no. 8. — P. 083025.

Список литературы

1. *Colgate, S. A.* The Hydrodynamic Behavior of Supernovae Explosions / S. A. Colgate, R. H. White // Astrophys. J. — 1966. — Т. 143. — С. 626.

2. *Epstein, R. I.* Lepton-driven convection in supernovae / R. I. Epstein // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 1979. — Т. 188, № 2. — С. 305.

3. *Blondin, J. M.* Stability of Standing Accretion Shocks, with an Eye toward Core-Collapse Supernovae / J. M. Blondin, A. Mezzacappa, C. DeMarino // Astrophys. J. — 2003. — Т. 584, № 2. — С. 971.

4. *Mueller, B.* The dynamics of neutrino-driven supernova explosions after shock revival in 2D and 3D / B. Mueller // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2015. — Т. 452. — С. 287.

5. *Bisnovatyi-Kogan, G. S.* The Explosion of a Rotating Star As a Supernova Mechanism / G. S. Bisnovatyi-Kogan // Astron. Zh. — 1970. — Т. 47. — 813 (Soviet Astronomy, 14, 652 (1971)).

6. *Bisnovatyi-Kogan, G. S.* The Magnetohydrodynamic Rotational Model of Supernova Explosion / G. S. Bisnovatyi-Kogan, I. P. Popov, A. A. Samokhin // Astrophys. Space. Sci. — 1976. — Т. 41. — С. 287.

7. Magneto-driven Shock Waves in Core-Collapse Supernovae / T. Takiwaki [и др.] // Astrophys. J. — 2004. — Т. 616. — С. 1086.

8. *Ardeljan, N. V.* Magnetorotational Supernovae / N. V. Ardeljan, G. S. Bisnovatyi-Kogan, S. G. Moiseenko // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2005. — Т. 359. — С. 333.

9. Simulations of Magnetically Driven Supernova and Hypernova Explosions in the Context of Rapid Rotation / A. Burrows [и др.] // Astrophys. J. — 2007. — Т. 664. — С. 416.

10. *Takiwaki, T.* Gravitational Wave Signatures of Magnetohydrodynamically Driven Core-Collapse Supernova Explosions / T. Takiwaki, K. Kotake // Astrophys. J. — 2011. — Т. 743, № 4. — С. 30.

11. Magnetorotational Core-Collapse Supernovae in Three Dimensions / P. Moesta [и др.] // Astrophys. J. Lett. — 2014. — Т. 785, № L29.

12. *Obergaulinger, M.* Protomagnetar and black hole formation in high-mass stars / M. Obergaulinger, M. A. Aloy // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2017. — Т. 469, № L43.

13. *Bugli, M.* Three-dimensional core-collapse supernovae with complex magnetic structures – I. Explosion dynamics / M. Bugli, J. Guilet, M. Obergaulinger // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2021. — Т. 507, № 1. — С. 443.

14. *Hansen, B. M. S.* The pulsar kick velocity distribution / B. M. S. Hansen, E. S. Phinney // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 1997. — Т. 291. — С. 569.

15. The Australia Telescope National Facility Pulsar Catalogue / R. N. Manchester [и др.] // Astron. J. — 2005. — Т. 129. — С. 1993.

16. *Wongwathanarat, A.* Three-dimensional neutrino-driven supernovae: Neutron star kicks, spins, and asymmetric ejection of nucleosynthesis products / A. Wongwathanarat, H.-T. Janka, E. Müller // Astron. Astrophys. — 2013. — Т. 552. — A126.

17. A Theory for Neutron Star and Black Hole Kicks and Induced Spins / A. Burrows [и др.] // Astrophys. J. — 2024. — Т. 963. — С. 63.

18. Three dimensional magnetorotational core-collapse supernova explosions of a 39 solar mass progenitor star / J. Powell [и др.] // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2023. — Т. 522, № 4. — С. 6070.

19. *Kaplan, D. L.* A Coherent Timing Solution for the Nearby Isolated Neutron Star RX J0720.4–3125 / D. L. Kaplan, M. H. van Kerkwijk // Astrophys. J. — 2005. — Т. 628, № L45.

20. *Haberl, F.* The XMM-Newton view of radio-quiet and X-ray dim isolated neutron stars / F. Haberl // in proceedings of the XMM-Newton EPIC Consortium meeting, Palermo, 2003 October 14–16, Mem. Soc. Astron. It. — 2004. — Т. 75. — 454 [arXiv:astro—ph/0401075].

21. *Turolla, R.* Isolated Neutron Stars: The Challenge of Simplicity / R. Turolla // Astrophys. Space Sci. Lib. — 2009. — Т. 357. — С. 141.

22. *Zane, S.* Unveiling the thermal and magnetic map of neutron star surfaces though their X-ray emission: method and light-curve analysis / S. Zane, R. Turolla // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2006. — Т. 366. — С. 727.

23. Toward a Mass and Radius Determination of the Nearby Isolated Neutron Star RX J185635–3754 / J. A. Pons [и др.] // Astrophys. J. — 2002. — Т. 564. — С. 981.

24. *Geppert, U.* Temperature distribution in magnetized neutron star crusts / U. Geppert, D. Kuker, D. Page // Astron. Astrophys. — 2004. — Т. 426. — С. 267.

25. *Perez-Azorin, J. F.* Anisotropic thermal emission from magnetized neutron stars / J. F. Perez-Azorin, J. A. Miralles, J. A. Pons // Astron. Astrophys. — 2006. — Т. 451. — С. 1009.

26. *Pons, J.* Magneto-thermal evolution of neutron stars / J. Pons, J. Miralles, U. Geppert // Astron. Astrophys. — 2009. — Т. 496. — С. 207.

27. Unifying the observational diversity of isolated neutron stars via magneto-thermal evolution models / D. Vigano [и др.] // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2013. — Т. 434. — С. 123.

28. A NICER view of the massive pulsar PSR J0740+ 6620 informed by radio timing and XMM-Newton spectroscopy / T. E. Riley [и др.] // The Astrophysical Journal Letters. — 2021. — Т. 918, № 2. — С. L27.

29. *Page, D.* Surface Temperature of a Magnetized Neutron Star and Interpretation of the ROSAT Data. II. / D. Page, A. Sarmiento // Astrophys. J. — 1996. — Т. 473. — С. 1067.

30. *Potekhin, A. Y.* Neutron Stars—Thermal Emitters / A. Y. Potekhin, J. A. Pons, D. Page // Space Science Rev. — 2015. — Т. 191. — С. 239.

31. *Ardeljan, N. V.* Nonstationary magnetorotational processes in a rotating magnetized cloud / N. V. Ardeljan, G. S. Bisnovatyi-Kogan, S. G. Moiseenko // Astron. Astrophys. — 2000. — Т. 355. — С. 1181.

32. *Ardeljan, N. V.* Implicit Free-Lagrange method for computing two-dimensional magnetogasdynamic flows / N. V. Ardeljan, K. V. Kosmachevskii // Comput. Math. Modelling. — 1995. — Т. 6. — С. 209.

33. *Murphy, J. W.* BETHE-HYDRO: an arbitrary Lagrangian-Eulerian multidimensional hydrodynamics code for astrophysical simulations / J. W. Murphy, A. Burrows // Astrophys. J. Suppl. — 2008. — Т. 179, № 1. — С. 209.

34. *Gingold, R. A.* Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars / R. A. Gingold, J. J. Monaghan // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 1977. — Т. 181, № 3. — С. 375.

35. *Price, D. J.* Smoothed particle hydrodynamics and magnetohydrodynamics / D. J. Price // Journal of Computational Physics. — 2012. — Т. 231, № 3. — С. 759.

36. *Toro, E. F.* Riemann Solvers and numerical methods for fluid dynamics: A practical introduction / E. F. Toro. — Springer, 2009.

37. *Бисикало, Д.* Газодинамика тесных двойных звезд / Д. Бисикало, А. Жилкин, А. Боярчук. — М.: Физматлит, 2013.

38. *Casulli, V.* Pressure method for the numerical solution of transient, compressible fluid flows / V. Casulli, D. Greenspan // International Journal for Numerical Methods in Fluids. — 1984. — Т. 4, № 11. — С. 1001.

39. *Dumbser, M.* A conservative, weakly nonlinear semi-implicit finite volume scheme for the compressible Navier–Stokes equations with general equation of state / M. Dumbser, V. Casulli // Applied Mathematics and Computation. — 2016. — Т. 272, № 2. — С. 479.

40. A divergence-free semi-implicit finite volume scheme for ideal, viscous, and resistive magnetohydrodynamics / M. Dumbser [и др.] // International Journal for Numerical Methods in Fluids. — 2019. — Т. 89, № 1/2. — С. 16.

41. *Toro, E. F.* Flux splitting schemes for the Euler equations / E. F. Toro, M. E. Vazquez-Cendon // Computers and Fluids. — 2012. — Т. 70. — С. 1.

42. *Арделян, Н. В.* Вопросы построения и исследования полностью консервативных разностных схем магнитной газодинамики / Н. В. Арделян, К. В. Космачевский, С. В. Черниговский. — М.: МГУ, 1987.

43. Hyperbolic Divergence Cleaning for the MHD Equations / A. Dedner [и др.] // J. Comp. Phys. — 2002. — Т. 175. — С. 645.

44. *Miyoshi, T.* A multi-state HLL approximate Riemann solver for ideal magnetohydrodynamics / T. Miyoshi, K. Kusano // J. Comp. Phys. — 2005. — Т. 208. — С. 315.

45. *Mignone, A.* High-order conservative reconstruction schemes for finite volume methods in cylindrical and spherical coordinates / A. Mignone // J. Comp. Phys. — 2014. — Т. 270, № 1. — С. 784.

46. *Shu, S.-W.* Efficient implementation of essentially non-oscillatory shock-capturing schemes / S.-W. Shu, S. Osher // J. Comp. Phys. — 1988. — Т. 77. — С. 439.

47. *Bisnovatyi-Kogan, G. S.* Calculation of Thermal Conductivity Coefficients of Electrons in Magnetized Dense Matter / G. S. Bisnovatyi-Kogan, M. V. Glushikhina // Plasma Physics Reports. — 2018. — Т. 44, № 4. — С. 355.

48. *Potekhin, A. Y.* Thermal structure and cooling of neutron stars with magnetized envelopes / A. Y. Potekhin, D. G. Yakovlev // Astron. Astrophys. — 2001. — Т. 374. — С. 213.

49. *Page, D.* Surface Temperature of a Magnetized Neutron Star and Interpretation of the ROSAT Data. I. Dipolar Fields / D. Page // Astrophys. J. — 1995. — Т. 442. — С. 273.

50. *Haberl, F.* The isolated neutron star X-ray pulsars RX J0420.0–5022 and RX J0806.4–4123: New X-ray and optical observations / F. Haberl, et al. // Astron. Astrophys. — 2004. — Т. 424. — С. 635.

51. *Ascher, U. M.* Implicit-explicit Runge-Kutta methods for time-dependent partial differential equations / U. M. Ascher, S. J. Ruuth, R. J. Spite // Appl. Numer. Math. — 1997. — Т. 25 (2—3). — С. 151.

52. *Duffel, P. C.* DISCO: A 3D moving-mesh magnetohydrodynamics code designed for the study of astrophysical disks / P. C. Duffel // Astrophys. J. Suppl. — 2016. — Т. 226. — С. 2.

53. *Masset, F.* A fast Eulerian transport algorithm for differentially rotating disks / F. Masset // Astron. Astrophys. Suppl. Ser. — 2000. — Т. 141, № 1. — С. 165.

54. *Bisnovatyi-Kogan, G. S.* Violation of Mirror Symmetry of the Magnetic Field in a Rotating Star and Possible Astrophysical Manifestations / G. S. Bisnovatyi-Kogan, S. G. Moiseenko // Astron. Rep. — 1992. — Т. 69. — С. 563.

55. *Sawai, H.* Numerical Simulations of Equatorially Asymmetric Magnetized Supernovae: Formation of Magnetars and Their Kicks / H. Sawai, K. Kotake, S. Yamada // Astrophys. J. — 2008. — Т. 672. — С. 465.

56. *O'Connor, E.* A new open-source code for spherically symmetric stellar collapse to neutron stars and black holes / E. O'Connor, C. D. Ott // Class. Quant. Grav. — 2010. — T. 27, № 114103.

57. *Lyne, A. G.* High birth velocities of radio pulsars / A. G. Lyne, D. R. Lorimer // Nature. — 1994. — T. 369, № 6476. — C. 127.