



УТВЕРЖДАЮ

Проректор Национального
исследовательского университета
«Высшая школа экономики»

к.э.н., доцент Рощин Сергей Юрьевич
« 05 » ноября 2024 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

**федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики»**

Диссертация Кондратьева Ильи Алексеевича на тему «Магниторотационные процессы в коллапсирующих сверхновых» выполнена на базовой кафедре физики космоса Института космических исследований Российской академии наук факультета физики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики».

В 2019 г. окончил магистратуру федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» по направлению 03.04.01 «Прикладные математика и физика».

В 2023 г. окончил очную аспирантуру федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» по направлению подготовки 03.06.01 «Физика и астрономия», направленность (профиль) «Физика космоса, астрономия».

В период подготовки диссертации соискатель ученой степени Кондратьев Илья Алексеевич работал в отделе прикладной и теоретической астрономии и радиоинтерферометрии федерального государственного бюджетного учреждения науки Института космических исследований Российской академии наук в должности инженера.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук Моисеенко Сергей Григорьевич работает заведующим отделом прикладной и теоретической астрономии и радиоинтерферометрии федерального государственного бюджетного учреждения науки Института космических исследований Российской академии наук, а также профессором базовой кафедры физики космоса Института космических исследований Российской академии наук федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики».

По итогам обсуждения принято следующее заключение.

Актуальность темы

Выяснение деталей физического механизма вспышек коллапсирующих сверхновых является одной из старейших задач фундаментальной астрофизики, не решенной до конца к настоящему времени. В настоящее время наиболее

разработанными являются нейтринный и магниторотационный механизмы, для исследования которых, как правило, приходится прибегать к многомерным численным (магнито)гидродинамическим расчетам. Многие свойства нейтронных звезд определяются процессами при их рождении во время взрыва сверхновой. Одним из таких свойств является наличие эффекта отдачи нейтронной звезды (т.н. “kick”), связанное с асимметрией истечений, что приводит к возникновению у нейтронной звезды большой линейной скорости движения порядка нескольких сотен километров в секунду. В настоящее время активно ведутся исследования возникновения эффекта отдачи при взрывах коллапсирующих сверхновых в рамках нейтринного механизма, однако для магниторотационного механизма всплеск исследований этого вопроса практически не приводилось, что делает данную тему актуальной.

Некоторые одиночные нейтронные звезды могут наблюдаться как рентгеновские источники с периодическими изменениями их спектра, связанными с тем, что за период вращения нейтронной звезды наблюдателю видны области ее поверхности с различной температурой. Вариации поверхностной температуры связаны с подавлением потока тепла поперек магнитного поля во внешних слоях нейтронной звезды. Моделируя распределение тепла в нейтронной звезде с учетом тензорной природы теплопроводности в магнитном поле, можно получать карты поверхностной температуры, зависящие от величины и конфигурации магнитного поля. Путем сравнения данных наблюдений с результатами моделирования тепловых процессов в нейтронных звездах можно лучше понять структуру сильного магнитного поля в этих объектах. Ряд источников показывает сильно несимметричные кривые блеска, что может быть связано с неосесимметричными полями в них. Актуальным является получение трехмерных распределений температуры на поверхности замагниченной нейтронной звезды при различных конфигурациях магнитного поля и соответствующих им кривых блеска.

Научные положения диссертации

- 1) На основе разработанного комплекса трехмерных программ были получены распределения температуры нейтронной звезды с несоосной суперпозицией дипольного и квадрупольного магнитных полей, а также синтетические спектры и кривые блеска для них. Проведен качественный анализ полученных кривых блеска, а также их сравнение с чисто дипольной конфигурацией поля.
- 2) Для многомерного исследования астрофизических магнитогидродинамических течений разработан комплекс программ. Разработаны программы как для стандартных явных по времени конечно-объемных схем, так и для полунеявных алгоритмов, накладывающих более мягкое условие устойчивости на шаг по времени. Для обоих подходов реализована возможность использования подвижной сетки при наличии крупномасштабного вращения.
- 3) На основе серии расчетов коллапса ядра и взрыва сверхновой для массивной звезды с магнитным полем, имеющим нарушения зеркальной симметрии различной природы, получены оценки скорости протонейтронной звезды в зависимости от начальной конфигурации магнитного поля, соответствующие наблюдательным данным для быстролетающих нейтронных звезд.

Обоснованность научных положений

Обоснованность научных положений подтверждается согласием полученных результатов с результатами теоретических и расчетных работ по теме, имеющихся на данный момент в литературных источниках.

Личное участие соискателя ученой степени в получении результатов, изложенных в диссертации

Все результаты, представленные в настоящей работе, получены соискателем совместно с соавторами при непосредственном участии соискателя. В диссертацию включены результаты, для получения которых вклад соискателя был основным. Результаты, представленные в диссертации, согласованы с соавторами.

Степень достоверности результатов, проведенных соискателем ученой степени исследований

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием хорошо зарекомендовавших себя численных подходов, сравнением полученных результатов с известными численными и аналитическими расчетами, а также согласием с опубликованными результатами других авторов.

Научная новизна работы

Научная новизна диссертационной работы заключается в рассмотрении процессов анизотропной теплопроводности в нейтронных звездах в трех измерениях. Впервые разработаны полунейные схемы для моделирования гидродинамических уравнений при наличии подвижных сеток. Также впервые были систематически рассмотрены и сравнены между собой различные способы нарушений зеркальной симметрии магнитного поля в массивной звезде, приводящие к генерации асимметрии магниторотационного взрыва сверхновой и формированию скорости протонейтронной звезды.

Теоретическая значимость

Показано, что наличие даже относительно слабого по отношению к дипольному (в два раза слабее) несоосного квадрупольного магнитного поля в нейтронной звезде может существенно изменить наблюдаемую кривую блеска, искривляя профили пиков и увеличивая пульсации регистрируемого излучения до 4 раз. С ростом квадрупольной компоненты магнитного поля в кривой блеска возникает характерный перекосяк, по наличию которого можно судить о присутствии старших мультиполей в коре нейтронной звезды.

Показано, что при магниторотационном взрыве сверхновой, в силу генерации экваториально асимметричного тороидального поля, могут генерироваться высокие (до 500 км/с) линейные скорости нейтронных звезд при наличии нарушений зеркальной симметрии магнитного поля различной природы в ядре массивной звезды-предсверхновой – в форме суперпозиции мультиполей, смещенного дипольного поля и/или присутствия симметричной тороидальной компоненты.

Практическая значимость результатов, проведенных соискателем ученой степени исследований

В ходе выполнения работы были получены результаты, имеющие важную практическую значимость. Разработанные для исследований комплексы программ для моделирования трехмерной теплопроводности во внешних слоях замагниченных

нейтронных звездах могут быть использованы для сравнения наблюдательных данных от одиночных замагниченных нейтронных звезд с теоретическими моделями с целью восстановления конфигурации магнитного поля одиночных нейтронных звезд. Разработанный комплекс программ для многомерного моделирования МГД-уравнений может быть использован для исследования широкого класса замагниченных течений лабораторной и космической плазмы при наличии самогравитации и уравнения состояния вещества произвольного вида.

Апробация работы

Основные положения и результаты, вошедшие в диссертацию, докладывались на российских и международных конференциях и научных семинарах научно-образовательных организаций, в том числе:

- Международная школа-конференция XXXI Canary Islands Winter School of Astrophysics (Испания, Канарские острова, 2019). Доклад “Anisotropic heat transfer in outer layers of neutron stars”.
- Международная конференция The Modern Physics of Neutron Stars and Relativistic Gravity (Армения, Ереван, 2021). Доклад “Three - dimensional simulation of stationary heat transfer in magnetized neutron star”.
- Международная конференция Sixteenth Marcel Grossmann Meeting-MG16 (online, 2021). Доклад “A semi - implicit multidimensional unstructured gas dynamical solver for astrophysical applications”.
- Международная конференция Fifth Workshop on Numerical Modeling in MHD and Plasma Physics: Methods, Tools, and Outcomes (online, 2022). Доклад “Semi-implicit numerical method for differentially rotating compressible astrophysical flows”.
- Международная конференция Sixth Workshop on Numerical Modeling in MHD and Plasma Physics: Methods, Tools, and Outcomes (Москва, 2023). Доклад “Magnetorotational supernova explosions: jets and mirror symmetry violation”.
- Международная конференция “Challenges and Innovations in computational astrophysics - V (ChaICA-V)” (online, 2023). Доклад “2D simulations of magnetorotational supernova explosions with violated mirror symmetry”.
- Астрофизический семинар Института Астрономии РАН (Москва, сентябрь 2024) «Магниторотационные процессы в коллапсирующих сверхновых и нейтронных звездах».

Полнота изложения материалов диссертации в публикациях

Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 7 работах общим объемом 5.5 п.л.; личный вклад автора составляет 3.6 п.л.

Научная публикация	Личный вклад	Публикация входит в		
		международные базы данных и системы цитирования (Web of	Список рекомендованных журналов НИУ ВШЭ**	Перечень рецензируемых научных журналов, рекомендо

		Science/ Scopus/ MathSciNet ...)		ванных БАК
1. 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. — no. 012069	в соавт., личный вклад - 0,4 п.л.	Web of Science Q4, Scopus Q4	нет	нет
2. 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. — no. 012006	в соавт., личный вклад - 0,4 п.л.	Web of Science Q4, Scopus Q4	нет	нет
3. 3D simulation of anisotropic heat transfer in outer layers of magnetized neutron stars/ I. A. Kondratyev [et al.] // Astronomy reports. — 2020. — T. 64, — C. 226—243	в соавт., личный вклад - 0,7 п.л.	Web of Science Q3, Scopus Q3	да, список С	да
4. 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	в соавт., личный вклад - 0,4 п.л.	Web of Science Q1, Scopus Q1	да, список А	да
5. 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	в соавт., личный вклад - 0,5 п.л.	Web of Science Q3, Scopus Q2	да, список С	да
6. Kondratyev, I. A. Magnetorotational Supernova Explosions: Jets and Mirror Symmetry Violation/ I. A.	в соавт., личный вклад - 0,5 п.л.	Web of Science Q3, Scopus Q2	да, список С	да

Kondratyev, S. G. Moiseenko, G. S. Bisnovaty-Kogan // Lobachevskii Journal of Mathematics. — 2024. — Vol. 45, no. 1. — P. 50—59				
7. Kondratyev, I. A. Magnetorotational neutron star kicks/ I. A. Kondratyev, S. G. Moiseenko, G. S. Bisnovaty-Kogan// Physical Review D. — 2024 – Vol. 110, no. 8. – 083025	в соавт., личный вклад - 0,7 п.л.	Web of Science Q1, Scopus Q1	да, список А	да

Публикации полностью соответствуют теме диссертационного исследования и раскрывают её основные положения.

Ценность научных работ соискателя ученой степени

Ценность научных работ соискателя подтверждается публикациями в ведущих международных рецензируемых изданиях.

Диссертация Кондратьева Ильи Алексеевича на тему: «Магниторотационные процессы в коллапсирующих сверхновых» — это законченная научно-квалификационная работа, которая соответствует требованиям пунктов 9, 10, 11, 13, 14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а также Паспорту научной специальности 1.3.1 «Физика космоса, астрономия».

Диссертация Кондратьева Ильи Алексеевича на тему: «Магниторотационные процессы в коллапсирующих сверхновых» рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1 «Физика космоса, астрономия».

Заключение принято на заседании базовой кафедры физики космоса Института космических исследований Российской академии наук факультета физики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» 8 октября 2024 г., протокол № 3.

Присутствовало на заседании 7 человек. Участвовало в голосовании 5.

Результаты голосования: «за» — 5 человек, «против» — 0 человек, «воздержалось» — 0 человек.

Профессор базовой кафедры физики космоса
Института космических исследований Российской академии наук
факультета физики НИУ ВШЭ,
доктор физико-математических наук,
профессор

 Попель Сергей Игоревич

Подпись заверяю

СПЕЦИАЛИСТ
ЦЕНТРА ПО
УПРАВЛЕНИЮ
ГОНЧАРЕНКО
6





УТВЕРЖДАЮ

Директор ИКИ РАН

А. А. Петрукович

«29» октября 2024 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного учреждения науки Института космических исследований
Российской академии наук

Диссертация «Магниторотационные процессы в коллапсирующих сверхновых» выполнена на базовой кафедре физики космоса при Институте космических исследований Российской академии наук федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» и в отделе «Прикладной и теоретической астрономии и радиоинтерферометрии» Федерального государственного учреждения науки Института космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН). В период подготовки диссертации соискатель Кондратьев Илья Алексеевич работал в ИКИ РАН в должности инженера.

В 2019 году Кондратьев Илья Алексеевич окончил магистратуру Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» по направлению 03.04.01 «Прикладные математика и физика».

В 2023 г. И. А. Кондратьев окончил очную аспирантуру Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ) по направлению подготовки 03.06.01 «Физика и астрономия», направленность (профиль) «Физика космоса, астрономия».

Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана в НИУ ВШЭ.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук Моисеенко Сергей Григорьевич является заведующим отделом Прикладной и теоретической астрономии и радиоинтерферометрии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института космических исследований Российской академии наук, а также профессором базовой кафедры физики космоса Института космических исследований Российской академии наук Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики».

По результатам рассмотрения диссертации «Магниторотационные процессы в коллапсирующих сверхновых» принято следующее заключение:

Актуальность темы и направление исследования

Диссертационная работа Кондратьева Ильи Алексеевича посвящена численному моделированию процессов, связанных с наличием магнитного поля и вращения при взрывах коллапсирующих сверхновых и при остывании одиночных нейтронных звезд.

Изучение физического механизма вспышек коллапсирующих сверхновых остается одной из ключевых нерешенных задач фундаментальной астрофизики. На сегодняшний день

наиболее разработаны нейтринный и магниторотационный механизмы, которые обычно исследуются с помощью многомерных численных (магнито)гидродинамических расчетов при наличии самогравитации и процессов с излучением/поглощением нейтрино. Процессы, происходящие при рождении нейтронных звезд во время взрыва сверхновых, влияют на многие их свойства. Одним из таких свойств является эффект отдачи нейтронной звезды (так называемый "kick"), возникающий вследствие асимметрии выбросов при взрыве сверхновой, что придает нейтронной звезде высокую линейную скорость порядка нескольких сотен километров в секунду. Хотя исследования эффекта отдачи в рамках нейтринного механизма проводятся достаточно активно, для магниторотационного механизма такие исследования практически отсутствуют, что делает эту тему особенно актуальной.

Некоторые одиночные нейтронные звезды наблюдаются как тусклые рентгеновские источники, демонстрирующие периодические изменения спектра. Это связано с тем, что за период вращения компактного объекта наблюдателю становятся видны участки ее поверхности с разной температурой. Вариации температуры вызваны тем, что магнитное поле в верхних слоях нейтронной звезды подавляет перенос тепла поперек его линий. Моделирование тепловых процессов с учетом тензорных свойств теплопроводности в магнитном поле позволяет создавать карты температуры поверхности, которые зависят от величины и конфигурации магнитного поля. Сравнение наблюдательных данных с моделями теплопроводности может помочь лучше понять структуру сильного магнитного поля в нейтронных звездах. В ряде случаев источники демонстрируют сильно асимметричные кривые блеска, что может быть связано с неосесимметричными магнитными полями в них. Актуальной задачей является трехмерное моделирование распределения температуры поверхности замагниченной нейтронной звезды без предположения о симметрии конфигураций магнитного поля и соответствующих им кривых блеска, что может позволить выявить такие структуры в наблюдаемых источниках.

Личный вклад автора при получении результатов, представленных в диссертации

Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами. Все представленные в диссертации результаты получены автором в результате совместных исследований.

Степень достоверности результатов проведенного исследования

Достоверность, полученных в диссертационной работе результатов, подтверждается 7 публикациями, 7 из которых опубликованы в рецензируемых журналах из перечня ВАК, а также докладами на российских и международных конференциях, в том числе таких как "Challenges and innovations in computational astrophysics", "Workshop on Numerical Modeling in MHD and Plasma Physics: Methods, Tools, and Outcomes", "High-Energy Phenomena in Relativistic Outflows", "Marcel Grossmann Meeting".

Научная новизна полученных результатов

В ходе исследований получен ряд новых астрофизических результатов. Научная новизна диссертационной работы заключается в рассмотрении процессов анизотропной теплопроводности во внешних слоях замагниченных нейтронных звезд в трех измерениях. Впервые разработаны полунейные схемы для моделирования гидродинамических уравнений при наличии подвижных сеток. Впервые были систематически рассмотрены и сравнены между собой различные способы нарушений зеркальной симметрии магнитного поля в массивной

звезде, приводящие к генерации асимметрии магниторотационного взрыва сверхновой и формированию скорости протонейтронной звезды.

Научная и практическая значимость результатов исследования

Проведенные численные расчёты показали, что даже относительно слабое несоосное квадрупольное магнитное поле в коре нейтронной звезды (в два раза слабее дипольной компоненты) может значительно изменить наблюдаемую кривую блеска, искажая пики и увеличивая пульсации регистрируемого излучения до четырех раз. По мере усиления квадрупольной компоненты в кривой блеска появляется характерный перекосяк, по которому можно судить о присутствии старших мультиполей в коре нейтронной звезды. Кроме того, установлено, что при магниторотационном взрыве сверхновой из-за генерации в окрестности дифференциально вращающейся протонейтронной звезды асимметричного по отношению к экваториальной плоскости тороидального поля могут возникать высокие линейные скорости нейтронных звезд (до 500 км/с), если в ядре предсверхновой нарушена зеркальная симметрия магнитного поля, вызванная суперпозицией дипольного и квадрупольного полей, смещением дипольного поля и/или наличием симметричной тороидальной компоненты.

Разработанные в ходе работы комплексы программ имеют практическую ценность. Программный комплекс для моделирования трехмерной теплопроводности во внешних слоях нейтронных звезд с магнитным полем может использоваться для сравнения наблюдательных данных от одиночных нейтронных звезд с теоретическими предположениями о структуре магнитного поля в них, что может позволить точнее оценивать конфигурацию магнитных полей наблюдаемых нейтронных звезд. Созданный комплекс программ для многомерного моделирования уравнений магнитной гидродинамики может применяться для исследования широкого спектра замагниченных течений в лабораторной и астрофизической плазме, где присутствует самогравитация и используется уравнение состояния вещества в произвольной форме.

Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем

Основные результаты диссертации отражены в следующих работах автора:

1. 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. — no. 012069
2. 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. — no. 012006
3. 3D моделирование анизотропной теплопроводности во внешних слоях замагниченных нейтронных звезд/ И. А. Кондратьев [и др.] // *Астрономический журнал*. — 2020. — Т. 97, № 3. — С. 206—224
4. 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
5. 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

6. 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
7. 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 — 083025

Все работы опубликованы в журналах, входящих в перечень ВАК и индексируемых в системах РИНЦ, Web of Science и Scopus. Все основные положения исследования опубликованы в указанных статьях.

Соответствие содержания диссертации паспорту специальности «1.3.1 – Физика космоса, астрономия»

Задачи, рассмотренные в диссертации, относятся к классу, заявленному в паспорте специальности 1.3.1 - «Физика космоса, астрономия»: «Изучение происхождения, структуры, движения и эволюции космических объектов на базе физических теорий, астрономических наблюдений и физических измерений»; «Экспериментальные методы, научные приборы, методы вычислительной астрофизики и алгоритмы обработки данных для космических и астрономических исследований».

ВЫВОД. Кандидатская диссертация Кондратьева Ильи Алексеевича «Магниторотационные процессы в коллапсирующих сверхновых» соответствует «Положению о порядке присуждения учёных степеней».

Диссертация рекомендуется к защите на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1 – Физика космоса, астрономия.

Заключение принято на заседании НТС отдела «Прикладной и теоретической астрономии и радиоинтерферометрии» Института космических исследований РАН. Присутствовало на заседании 10 членов НТС отдела. Результаты голосования: «за» - 10 чел., «против» - 0 чел., «воздержалось» - 0 чел., протокол от 10 октября 2024 г.

Председатель НТС отдела 64 ИКИ РАН

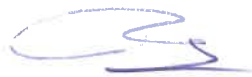
д.ф.-м.н.

Секретарь НТС отдела 64 ИКИ РАН

к.ф.-м.н,



С. Г. Моисеенко



М. В. Глушихина