

1) *Список авторов*

М.В. Глушихина, И.А. Кондратьев

2) *Название*

цикл работ, выполненный коллективом молодых ученых «Трехмерное численное моделирование анизотропной теплопроводности и её наблюдательных проявлений в замагниченных нейтронных звездах» (Номинация: «Лучшая научная работа молодого ученого»)

3) *Ссылки на публикации*

А) I A Kondratyev and S G Moiseenko “Application of 3D basic operators method extension to astrophysical problems” IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1163 (2019) 012069 doi:10.1088/1742-6596/1163/1/012069

Б) I A Kondratyev, S G Moiseenko, G S Bisnovatyi-Kogan, M V Glushikhina “Numerical simulation of an anisotropic heat transfer in magnetized neutron stars with 3D basic operators method” IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1336 (2019) 012006 doi:10.1088/1742-6596/1336/1/012006

В) И. А. Кондратьев, С. Г. Моисеенко, Г. С. Бисноватый-Коган, М. В. Глушихина «3D моделирование анизотропной теплопроводности во внешних слоях замагниченных нейтронных звезд» *Астрономический Журнал*, 2020, том 97, № 3, с. 206–224 DOI: 10.31857/S0004629920020036

Г) Ilya A. Kondratyev, Sergey G. Moiseenko, Gennady S. Bisnovatyi-Kogan and Maria V. Glushikhina “Three-dimensional heat transfer effects in external layers of a magnetized neutron star” *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*, 497, 2883–2892 (2020) doi:10.1093/mnras/staa2154

4) *Общая формулировка научной проблемы и ее актуальность*

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 Семёрка — это неформальное название группы из одиночных, остывающих нейтронных звезд, которые находятся на расстоянии от 120 до 150 парсек от Земли (Turolla 2009). Эти объекты также называются XDINS (X-ray Dim Isolated Neutron Stars). Долгое время их оставалось только семь, однако недавние наблюдения на XMM-Newton (Rigoselli et al. 2019) показали, что радиопульсар PSR J0726-2612 также имеет тепловое рентгеновское излучение и может быть похож на объекты Семерки. В будущем возможно открытие большего количества подобных объектов, что делает изучение одиночных, замагниченных нейтронных звезд актуальным. Эти объекты интересны также тем, что на основе данных теплового излучения от них можно изучать структуру сильного магнитного поля в нейтронных звездах. 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, что является причиной пульсаций их теплового излучения.

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 определяется наличием недипольного магнитного поля в них (Zane & Turolla 2006). Многомерное численное моделирование процессов переноса тепла во внешних слоях нейтронных звезд и сравнение его результатов с наблюдательными данными теплового излучения от них позволит лучше прояснить структуру магнитного поля на поверхности нейтронной звезды.

5) *Конкретная решаемая в работе задача и ее значение*

А) Развитие численного метода опорных операторов на трехмерные задачи на нерегулярных сетках

Б) Разработка локальной одномерной модели замагниченной оболочки нейтронной звезды с использованием нового выражения для тензора теплопроводности вырожденной замагниченной плазмы в ней

В) Моделирование трехмерного распределения температуры в коре и на поверхности замагниченной нейтронной звезды с учетом наличия тонкой замагниченной оболочки

Г) Исследование наблюдательных проявлений от полученных распределений температуры для разных магнитных полей

Значимость данной задачи определяется тем, что ее решение позволит углубить понимание о структуре магнитного поля в коре и на поверхности нейтронных звезд, а также тепловой эволюции нейтронной звезды на протяжении ее жизни. Разработанный и протестированный комплекс программ позволяет рассчитывать распределение температуры в коре нейтронной звезды и на её поверхности для магнитного поля произвольной конфигурации, позволяет рассчитывать кривые блеска и тепловые спектры от вращающейся одиночной нейтронной звезды. Данный комплекс программ может быть использован наблюдателями для восстановления структуры магнитного поля нейтронной звезды по наблюдательной кривой блеска.

б) *Используемый подход, его новизна и оригинальность*

А) Для численного решения задачи был использован операторный подход в теории разностных схем (Самарский, Попов 1992). Такой подход позволяет записывать начально-краевые задачи для уравнений математической физики в компактной операторно-разностной форме, используя разностные аналоги дифференциальных операторов. Полученные таким образом операторно-разностные схемы будут обладать «хорошими» свойствами, такими, как консервативность. На основе операторного подхода нами был разработан операторно-разностный метод на неструктурированной трехмерной сетке, состоящей из тетраэдров.

Б) Как можно более точный учет степени подавления теплового потока в вырожденной замагниченной плазме поперек магнитного поля очень важен для сравнения результатов моделирования теплопроводности в нейтронных звездах с наблюдательными данными, и, соответственно, для выяснения

структуры магнитного поля в них. Теплопроводность в коре и оболочке нейтронной звезды определяется, в основном сильно вырожденными электронами, и в рамках цикла работ мы использовали тензорный коэффициент теплопроводности электронов из набора кинетических коэффициентов вырожденных электронов, полученный ранее в работе (Г. С. Бисноватый-Коган, М. В. Глушихина, Физика Плазмы 2018, т. 44, №4, 355-374) в виде аналитического решения уравнения Больцмана.

В) Для моделирования наблюдательных проявлений теплового излучения от полученных распределений температуры – спектров и кривых блеска – использовалась хорошо зарекомендовавшая себя локально-чернотельная модель с учетом эффектов общей теории относительности (Page 1995; Beloborodov 2002).

7) Полученные результаты и их значимость

Разработано трехмерное обобщение численного метода опорных операторов, позволяющее формулировать разные сеточные краевые задачи на неструктурированной сетке, состоящей из тетраэдров. Данный метод был применен для численного решения нелинейного уравнения теплопроводности с тензорным коэффициентом теплопроводности с учетом граничных условий первого и третьего рода.

Для корректного учета физических процессов в тонком приповерхностном слое была построена локальная одномерная модель тонкой замагниченной оболочки нейтронной звезды, с использованием упомянутых коэффициентов электронной теплопроводности, а также с учетом вырождения электронов на коэффициентах лучистой теплопроводности.

Используя разработанный нами метод, впервые получено трехмерное самосогласованное распределение температуры в коре нейтронной звезды и её оболочке. Результаты моделирования переноса тепла в коре нейтронной звезды и ее оболочке трехмерным кодом представлены при наличии соосных и несоосных конфигураций дипольных и квадрупольных магнитных полей. Разработанный нами комплекс программ позволяет провести расчет температуры при наличии магнитного поля произвольной пространственной формы.

По полученным трехмерным распределениям температуры на поверхности нейтронной звезды получены кривые блеска с учетом эффектов общей теории относительности.

Результаты трехмерных расчетов позволили получить качественные отличия наблюдательных проявлений (кривых блеска) при наличии трехмерных магнитных полей по сравнению с осесимметричными конфигурациями. Показано, что пульсации потока излучения, регистрируемые детектором телескопа, могут заметно усилиться, а форма кривой блеска может качественно отличаться от кривых блеска при наличии дипольного и/или квадрупольного соосных полей даже при не слишком больших значениях углов между магнитными осями и амплитуд

квадрупольного магнитного поля.

Представлены, полученные нами впервые в мире, трехмерные самосогласованные распределения температуры в коре и на поверхности нейтронных звезд. По полученным распределениям температуры построены кривые блеска. Наблюдатель, используя наш комплекс программ, может восстановить структуру магнитного поля нейтронной звезды по тепловому излучению от неё (кривой блеска). Полученные разностные аналоги дифференциальных операторов могут также найти свое применение при построении эффективных разностных схем для численного решения трехмерных систем уравнений газовой и магнитной газовой динамики.