


«УТВЕРЖДАЮ»
Директор Центра
ДЬЯКОВА Ю.А.
«17» 02 2025 года

ОТЗЫВ

ведущей организации о диссертации Кондратьева Ильи Алексеевича на тему «Магниторотационные процессы в коллапсирующих сверхновых», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1. – Физика космоса, астрономия

Актуальность темы диссертации

Данная диссертация посвящена численному моделированию астрофизических процессов, связанных с наличием сильного магнитного поля в веществе. В первой части диссертации исследуется влияние магнитного поля на процессы теплопереноса в коре нейтронных звезд (НЗ). Нейтронные звезды являются уникальными объектами Вселенной: в них вещество находится в самом экстремальном из всех возможных состояний (за исключением первых моментов после Большого Взрыва). Проблема их строения всё ещё далека от решения, а исследование распределения поверхностной температуры НЗ – один из немногих источников информации об их устройстве. Поэтому тема диссертации, безусловно, важна и актуальна.

Вторая часть диссертации посвящена исследованию магниторотационного механизма (МРМ) взрыва сверхновых. Данный механизм является одним из нескольких возможных путей, приводящих к успешному взрыву звезды с наблюдаемыми характеристиками. Однако, уже само наличие нескольких конкурирующих механизмов взрыва, указывает на то, что данная проблема далека от однозначного решения. Результаты данной диссертации, показывающие, в частности, что в рамках МРМ возможно не только объяснение характерной величины энергии взрыва (порядка 10^{51} эрг), но и - главное: объяснение существования больших собственных скоростей НЗ (порядка сотен км/сек), тем самым, чрезвычайно актуальны.

Научная новизна данной диссертации заключается в следующем: впервые было проведено исследование распространения тепла во внешних слоях нейтронных звезд в различных предположениях о напряженности и структуре магнитного поля. Также был разработан комплекс программ для исследования МГД-течений, который был протестирован и опробован на задаче о взрыве сверхновой в рамках МРМ. С его помощью было проведено исследование процесса ускорения родившейся при взрыве сверхновой НЗ (получения ею т.н. кика (kick)) в различных предположениях о структуре

магнитного поля. Полученные результаты представляют значительный научный интерес.

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.

В первой главе исследована проблема теплопроводности во внешних слоях замагниченных НЗ при наличии магнитных полей разных топологий. Построена модель внешних слоев НЗ, в рамках которой решается трехмерное уравнение теплопроводности. Приведены данные сравнения рассчитанной модели с дипольным полем с аналогичными двумерными моделями. Также приведены результаты осесимметричных распределений температуры при наличии квадрупольного поля. Полученные распределения температуры поверхности напоминают те, что имеются в источнике RX J0720.4–3125 из «Великолепной семерки». Также представлены результаты построения синтетических кривых блеска для рассчитанных распределений температуры с приближенным учетом эффектов Общей Теории Относительности. Возникающая асимметрия пиков похожа на свойства источников RXJ0420 и RXJ0806.

Во второй главе исследуется вопрос построения многомерных численных схем для моделирования уравнений гравитационной газовой динамики и магнитной гидродинамики. Рассматривается как схема, построенная на приближенном методе Годунова (для явных схем), так и метод расщепления для полунявных. Проводится развитие этих методов на криволинейные геометрии, широко используемые в астрофизике. В главе также содержатся способы уточнения решения по пространству. Методы дают возможность использования подвижной вращающейся сетки для учета возможного крупномасштабного вращения. Тут же представлены результаты тестовых расчетов.

В третьей главе систематически исследован эффект отдачи нейтронной звезды в рамках магниторотационного механизма взрыва коллапсирующих сверхновых. Рассмотрены модели коллапса и взрыва сверхновой при наличии различных полей с нарушенной зеркальной симметрией. Рассмотрено три сценария нарушения зеркальной симметрии поля в ядре массивной звезды: с суперпозицией дипольного и квадрупольного полей, со смещенным дипольным полем и с комбинацией дипольного и симметричного тороидального магнитных полей. Для всех трех моделей получены зависимости скорости компактного объекта от магнитного поля. Полученные в расчетах скорости протонейтронных звезд (порядка 100–500 км/с) хорошо согласуются с данными наблюдений пульсаров.

В Приложении А представлены выражения для используемых уравнения состояния и коэффициентов непрозрачности для модели внешней оболочки замагниченной НЗ.

В Приложении Б приведено описание трехмерного метода опорных операторов, тестовые расчеты и применение данного подхода к решению трехмерной задачи о теплопроводности в коре НЗ.

В заключении приведены результаты диссертационной работы, которые состоят в следующем:

1. С использованием разработанного комплекса программ были проведены расчеты теплопроводности во внешних слоях замагниченной нейтронной звезды. По рассчитанным распределениям температуры были построены синтетические кривые блеска. Получено, что включение даже относительно слабого 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. Разработанный комплекс программ можно применять для сравнения наблюдательных данных с теоретическими предсказаниями о структуре магнитного поля во внешних слоях нейтронных звезд.
2. Был разработан комплекс программ на основе конечно-объемной численной схемы для выполнения многомерных численных МГД-расчетов. Рассмотрены случаи криволинейных геометрий и учет крупномасштабного вращения на подвижной сетке.
3. Был исследован эффект отдачи протонейтронной звезды при взрывах коллапсирующих сверхновых в рамках магниторотационного механизма. Систематически рассмотрены различные виды нарушения экваториальной симметрии выбросов в зависимости от начального магнитного поля звезды перед коллапсом. Найдено, что возможно формирование асимметричных выбросов, вследствие чего образуются быстролетающие нейтронные звезды со скоростями в несколько сотен километров в секунду, в прекрасном согласии с наблюдениями.

Достоверность изложенных в работе результатов гарантируется использованием хорошо разработанных численных методов, сравнением тестовых расчетов с известными аналитическими и численными результатами. Полученные распределения температуры поверхности НЗ напоминают те, что имеются в источнике RX J0720.4–3125, а асимметрия пиков похожа на свойства источников RXJ0420 и RXJ0806. Полученные в расчетах скорости протонейтронных звезд (порядка 100–500 км/с) хорошо согласуются с данными наблюдений пульсаров.

Практическая значимость диссертации заключается в том, что полученные распределения температуры на поверхности нейтронной звезды, а также синтетические кривые блеска, позволяют объяснить качественные

особенности наблюдаемых кривых блеска одиночных вращающихся нейтронных звезд. Разработанный комплекс программ для решения трехмерного уравнения теплопроводности в коре нейтронной звезды может быть использован для сравнения реальных спектров и кривых блеска теплового излучения нейтронных звезд с предсказаниями теоретических моделей. 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, в полном согласии с данными наблюдений. Разработанный комплекс программ для решения многомерных уравнений магнитной гидродинамики может быть использован для моделирования различных астрофизических явлений.

Замечания по работе

1. Диссертация написана ясно, четко и грамотно. Можно отметить лишь следующие досадные опечатки: «полуневная» вместо «полунеявная» (оглавление, стр. 3, стр. 14); «Не смотря» (стр. 8); «силы, приводящие к МР-взрыву» (стр. 91). Встречаются также несогласованности различных членов предложения: «...реализована вращающаяся сетка.., в котором» (стр. 15); «мы использовали двумерных... уравнения» (стр. 87); «наличием симметричного компоненты» (стр. 105).
2. Замечания к рисункам: часть рисунков (например, 1.1, 2.2) хорошо было бы растянуть во всю ширину страницы для удобства восприятия. Подпись к Рис. 1.7 гласит: «То же, что на Рис. 1.6...» однако речь идёт только про левую панель Рис. 1.6. На Рис. 1.10 и 1.12 хорошо было бы добавить оси, показывающие взаимную ориентацию диполя и квадруполья. Цветовые панели на Рис. 3.9 сделаны в слишком мелком, практически нечитаемом формате.
3. Опечатки в формулах: в формуле (1.18) для устранения неопределенности не хватает скобок. Встречается сбой в формулах (1.20, 1.22, A.13): вместо $\exp(a)$ или e^a написано $\exp^a$. Два уравнения (2.13) являются, фактически, одним уравнением с переставленными индексами i и j . В уравнениях (2.20) и (2.22) величины r и R обозначают одно и то же. В нумерованной формуле внизу стр. 73 не хватает множителя r при члене $v^2/2$. В формулах (1.20) и (1.22) справа стоит дифференциал времени, которого быть не должно: поток dF (слева) это энергия на ед. площадь в ед. времени. В первой из формул (2.43) следовало бы использовать другие обозначения для члена $vB - Bv$. Текущие выглядят как разница скалярных произведений, дающих в результате ноль.
4. Недостатки в терминах и обозначениях: в тексте диссертации (см. например, стр. 8) стандартный нейтрино-конвективный механизм взрыва называется просто «нейтринным». На стр. 12 впервые встречается обозначение ($PF > 0.1-0.3$), однако как определяется PF ,

не поясняется. В первой главе (стр. 32-33) упоминаются «внешняя оболочка», «внешняя граница коры», вводятся их радиусы R_{in} и т.д., однако указаний, как конкретно определяются эти границы, не приводится. На стр. 13 написано: «В каждой ячейке получается постоянное состояние среды» - не «получается», а предполагается. В начале стр. 79 написано: «сила f в уравнениях среды (2.20) равна...». Здесь f – ускорение, а не сила.

5. На стр. 8 утверждается, что метод «SPH... используется в настоящее время... в силу... сохранения углового момента, а также достаточно быстрого и эффективного учета самогравитации». Тут следует отметить, что и с самогравитацией и с сохранением углового момента у SPH есть значительные проблемы, см., например, D.C. Marcelllo, ApJ, 154, 3, p. 92, (2017).
6. На стр. 14 утверждается «...для улучшения качества метода можно перейти в неинерциальную систему отсчета [81], однако в этом случае консервативность уравнений нарушается». Естественно, что консервативность уравнений не зависит от системы отсчёта, речь может идти только о нарушении консервативности какого-то конкретного численного метода решения этих уравнений. Аналогичное замечание к тексту, предваряющему формулу (2.20), который гласит: «Уравнения Эйлера... в форме, сохраняющей угловой момент, могут быть записаны в следующем виде». Естественно, что уравнения Эйлера сами по себе в любой форме сохраняют угловой момент.
7. Тензор теплопроводности (1.2) зависит от трёх параметров: $\kappa^{(1-3)}$, однако коэффициенты теплопроводности вдоль и поперёк поля (1.3) зависят только от $\kappa^{(1)}$ и $\kappa^{(3)}$, куда исчез $\kappa^{(2)}$ не поясняется.
8. На стр. 24 утверждается: «Плотность ρ явным образом входит в тензор теплопроводности (1.2) и в эффективную массу электрона», а затем тут же приводятся стандартные уравнения Толмена-Оппенгеймера-Волкова, содержащие ρ . Важно подчеркнуть, что здесь участвуют две разные плотности. Плотность, входящая в теплопроводность и т.п. – это барионная плотность $\rho_b = m_u n_b$ (m_u – атомная единица массы, n_b – концентрация барионов), именно она, в частности, входит и в уравнения термодинамики. Плотность же ρ , входящая в уравнения ТОВ – это плотность массы-энергии. Они связаны соотношением $\rho = \rho_b(1+E/c^2)$, где E – удельная (на единицу массы) энергия вещества.
9. На стр. 26 приводится формула (без номера) для оптической толщины τ , как интеграла от минус бесконечности до z , а должно быть от нуля (поверхность звезды) до z .
10. В заключении к Главе 1 (стр. 50) написано: «В данной главе изложено развитие численного метода опорных операторов на трехмерный случай», однако метод опорных операторов изложен не в главе 1, а в приложении Б.

11. На графиках, показывающих зависимости энергии взрыва и скорости НЗ от времени (3.1, 3.6, 3.8, 3.11) видно, что к моменту окончания расчётов рост этих величин далёк от насыщения. Однако этот вопрос в тексте не обсуждается, кроме констатации на стр. 104: «В большинстве промоделированных случаев скорость ПНЗ не насыщается и может увеличиться до более высоких значений на более поздних временах». Было бы правильно написать о причине остановки расчётов до насыщения и/или о том, как всё-таки оценить итоговые значения этих важнейших величин. Приведённые значения являются, таким образом, оценкой снизу.
12. В списке литературы наблюдается разноречивость: часть ссылок начинается с фамилий авторов, часть – с названия публикации.

Заключение

Сделанные замечания не влияют на общую высокую оценку работы. Диссертационная работа Кондратьева И.А. является законченным научным исследованием и полностью соответствует специальности 1.3.1. - Физика космоса, астрономия. Рассмотренная диссертация показывает, что её автор в совершенстве владеет как теоретическими, так и численными методами астрофизики. Данная диссертация вносит важный вклад сразу в две области: проблему моделирования замагниченных нейтронных звезд и вопрос о природе наблюдаемых больших скоростей движения некоторых нейтронных звезд. В первой особенно впечатляющим выглядит качественное совпадение рассчитанных синтетических кривых блеска с наблюдательными профилями источников RX J0420.0-5022, RX J0806.4-4123 и RX J0720. Кроме того, важно, что работа в каждой области вылилась в создание целого комплекса программ для моделирования соответствующих явлений, которые могут быть (и, надеемся, будут) использованы в дальнейших исследованиях.

Основные результаты по теме диссертации изложены в 7 печатных изданиях, из них 7 печатных работ изданы в журналах, рекомендованных ВАК. Эти результаты были доложены на 6 российских и международных конференциях.

Диссертация полностью соответствует паспорту специальности 1.3.1.

Результаты диссертации Кондратьева И.А. были заслушаны на Тематическом семинаре ККТЭФ (НИЦ «Курчатовский институт») «Экспериментальная физика высоких энергий, физика ускорителей заряженных частиц и физико-химические исследования материалов», протокол №10 от 12 декабря 2024 г. Отзыв обсуждён и одобрен на заседании Лаборатории Физики Плазмы и Астрофизики НИЦ «Курчатовский Институт» - ККТЭФ 14.02.2025, протокол №1.

Диссертация Кондратьева Ильи Алексеевича «Магниторотационные процессы в коллапсирующих сверхновых» удовлетворяет всем критериям «Положения о присуждении ученых степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842 (в действующей редакции), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее

автор, безусловно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1. - Физика космоса, астрономия.

Отзыв составили:

Главный научный сотрудник лаборатории физики плазмы и астрофизики НИЦ «Курчатовский институт», доктор физико-математических наук
Блинников Сергей Иванович



Начальник лаборатории физики плазмы и астрофизики НИЦ «Курчатовский институт», кандидат физико-математических наук
Юдин Андрей Викторович



Подписи А.В. Юдина и С.И. Блинникова заверяю.
Главный учёный секретарь НИЦ «Курчатовский институт»
Алексеева Ольга Анатольевна



Почтовый адрес:

123182 Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

НИЦ «Курчатовский институт»

Телефон: +7 (499) 196–95–39 Факс: +7 (499) 196–17–04

Электронная почта: nrcki@nrcki.ru