

«УТВЕРЖДАЮ»
Директор
Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Института ядерных исследований
Российской академии наук
член-корр. РАН М. В. Либанов
« » ноября 2024 г.

ОТЗЫВ
ведущей организации
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института ядерных исследований Российской академии наук
на диссертацию Бадмаева Данра Владимировича
«Нетепловые процессы при столкновении ветров массивных звезд и остатков
сверхновых»,
представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.1 — физика космоса, астрономия

Диссертационная работа Д.В. Бадмаева посвящена построению и использованию трехмерной магнитогидродинамической модели взаимодействия остатка сверхновой и ветров молодых массивных звезд в компактных молодых массивных звездных скоплениях, исследованию связанных с этим особенностей формирования коллективных плазменных течений, магнитных полей, теплового и нетеплового излучения.

Диссертация состоит из Введения, четырёх глав, Заключения и списка литературы из 185 наименований. Полный объём работы составляет 115 страниц и включает в себя 42 рисунка и 6 таблиц.

Во Введении даётся обзор текущего состояния темы исследования, обосновывается её актуальность, формулируются цели и задачи диссертации и выносимые на защиту положения, подтверждается новизна и достоверность полученных результатов.

В Главе 1 построена трехмерная МГД модель центральной области компактного молодого массивного скопления звезд. В таком скоплении сталкиваются мощные ветра десятков молодых массивных звезд. Описано построение и численная реализация модели, приведены впечатляющие результаты расчетов, относящиеся к структуре плазменных потоков и магнитных полей. Представлено обсуждение эффективности термализации механической энергии звездного ветра.

Глава 2 посвящена применению построенной модели к интерпретации наблюдательных данных, касающихся звездного скопления Westerlund 2 и полученных недавно современными рентгеновскими телескопами – Chandra и работающим на борту обсерватории Спектр-РГ телескопом ART-XC имени М. Павлинского. Сравнение результатов наблюдения и детального моделирования указывает на наличие нетепловой составляющей рентгеновского излучения, которая может быть связана с лептонами, ускоренными до энергий порядка тераэлектронвольт. Этот результат имеет далеко идущие

следствия для моделей ускорения частиц в молодых звездных скоплениях, которые могут обеспечивать гамма- и нейтринное излучение высоких энергий.

В Главе 3 автор изучает влияние взрыва сверхновой в центральной части скопления на структуру вещества и магнитного поля вокруг него. Для этого строится отдельная численная модель вспышки сверхновой, которая затем добавляется в имеющуюся модель скопления. В результате удается проследить формирование и распространение ударной волны на временном масштабе от нескольких дней до десятков лет после вспышки. Результаты численного моделирования не только выглядят завораживающе, но и дают количественные описания процессов, происходящих с магнитным полем, предсказывают наблюдательные характеристики системы, которые в разделе 3.4 сравниваются с реальными данными.

Глава 4 посвящена изучению столкновения ударной волны, вызванной взрывом сверхновой, с ветром соседней массивной звезды. Именно в таких условиях можно ожидать явления, наиболее интересные для астрофизики частиц и многоканальной астрономии. Автор использует здесь двумерную магнитогидродинамическую модель, в которой описываются два изолированных объекта – ветер O-звезды и ударная волна остатка сверхновой. Численное моделирование демонстрирует формирование условий для ускорения частиц до петаэлектронвольтных энергий в течение нескольких сотен лет.

В Заключении кратко подводятся итоги работы.

Все результаты диссертации, выносимые на защиту, являются новыми и актуальными. Действительно, в диссертации впервые выполнен расчет сложной трехмерной магнитогидродинамической модели плазменных течений и магнитных полей внутри молодых массивных звездных скоплений. Новая магнитогидродинамическая модель, построенная автором, позволила впервые изучить усиление магнитных полей в звездных скоплениях до миллигауссовых значений и филаментарную структуру этих полей. Впервые удалось смоделировать влияние коллапса ядра массивной звезды в скоплении на структуру вещества и магнитного поля в скоплении, изменение и релаксацию системы с течением времени после вспышки этой сверхновой.

Достоверность и обоснованность результатов диссертации обеспечивается применением современных аналитических и численных методов, использованием при построении модели стандартных и проверенных составляющих – моделей звездных ветров горячих вращающихся звезд и структуры остатков сверхновых, последних данных о звездной эволюции.

Недостатки работы являются продолжением ее достоинств: необходимость изложить огромный объем фактического научного материала в рамках кандидатской диссертации привела к определенной краткости изложения в отдельных разделах, например, в главе 4. Это замечание ни в коей мере не снижает научной ценности диссертационного исследования. В качестве рекомендаций для будущих исследований можно предложить – при наличии требуемых вычислительных ресурсов – учет влияния вылета сформировавшейся после коллапса нейтронной звезды и формирования остатка сверхновой

на структуру магнитного поля, а также изучение столкновения звездного ветра и ударной волны в трехмерном случае.

Обсуждаемая диссертация содержит решение задачи моделирования и теоретического анализа процессов, протекающих при столкновении ветров массивных звезд и остатков сверхновых, свидетельствующее о высокой профессиональной подготовке соискателя и его научной самостоятельности. Основные научные результаты диссертации опубликованы в 5 статьях в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базе данных Web of Science, в том числе в 3 статьях в журнале первого квартиля. Полученные в диссертации результаты имеют разносторонние приложения, а развитые методы компьютерного моделирования могут быть применены для решения широкого круга теоретических и практических задач.

Диссертация Д.В. Бадмаева полностью соответствует специальности 1.3.1 — физика космоса, астрономия. Текст автореферата полно и правильно отражает содержание диссертации. Результаты диссертации опубликованы в высокорейтинговых международных журналах, что отражает высокий научный уровень диссертации. Результаты диссертации Д.В. Бадмаева были доложены автором, обсуждены и одобрены на 1208-м семинаре «Нейтринная и ядерная астрофизика» имени Г.Т. Зацепина ИЯИ РАН 1 ноября 2024 года.

Диссертация Бадмаева Данра Владимировича «Нетепловые процессы при столкновении ветров массивных звезд и остатков сверхновых» удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении учёных степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте имени А.Ф. Иоффе Российской академии наук», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор Д.В. Бадмаев бесспорно заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1 — физика космоса, астрономия.

Отзыв составил:

доктор физико-математических наук,
член-корреспондент РАН,
главный научный сотрудник ИЯИ РАН

Троицкий С.В.

Тел.: +7 (499) 135-21-69

E-mail: st@ms2.inr.ac.ru

Подпись С.В. Троицкого удостоверяю:
учёный секретарь ИЯИ РАН, к.ф.-м.н.

А.В. Вересникова

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН)
Адрес: 117312, Россия, г. Москва, проспект 60-летия Октября, д. 7А
Телефон: +7 (499) 135-77-60
E-mail: inr@inr.ru