

ОТЗЫВ

**официального оппонента на диссертационную работу
Данра Владимировича Бадмаева**

**«Нетепловые процессы при столкновении ветров массивных звезд
и остатков сверхновых»,**

**представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

по специальности 1.3.1 – Физика космоса, астрономия

Диссертация Д.В. Бадмаева посвящена исследованию нетепловых процессов в ядрах молодых массивных звездных скоплений с использованием трехмерного магнитогидродинамического моделирования. Работа включает глубокий анализ взаимодействий звездных ветров и остаточных вспышек сверхновых, а также моделирование теплового и нетеплового излучения в условиях массивных звездных скоплений. В исследовании разрабатываются модели, описывающие процессы формирования коллективных плазменных течений, усиления магнитных полей и термализации энергии ветров, что важно для понимания астрофизических наблюдений.

Диссертация состоит из Введения, четырёх Глав и Заключения. Список литературы включает 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 представлена трехмерная магнитогидродинамическая модель ядра молодого массивного звездного скопления (ММЗС), в котором сталкиваются мощные ветры десятков массивных звезд. Описывается методика построения модели и основные характеристики плазменных потоков, такие как плотность, температура и распределение магнитных полей. Особое внимание уделено усилению магнитного поля и его морфологии. 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. Сравнительный анализ результатов наблюдений и детального моделирования указывает на наличие нетепловой составляющей наблюдаемого рентгеновского излучения, которая может быть связана с лептонами, ускоренными до энергий порядка тераэлектронвольт.

В Главе 3 автор исследует эволюцию и влияние остатка сверхновой на структуру вещества и магнитного поля в пределах ММЗС. Для этого строится отдельная численная модель вспышки сверхновой, которая затем добавляется в имеющуюся модель скопления. В результате удастся проследить формирование и распространение ударной волны на временном масштабе до десяти тысяч лет после вспышки. Результаты численного моделирования демонстрируют количественно, как выбросы плазмы и ударная волна остатка влияют на окружающую среду, изменяя распределение вещества, температуры и напряжённости магнитного поля. Показано, что после прохождения ударной волны исходная структура скопления восстанавливается через несколько тысяч лет. Моделирование показывает, что остаток сверхновой может усиливать магнитное поле до значений близких к миллигаусс, создавая благоприятные условия для генерации космических лучей высоких энергий.

Глава 4 посвящена изучению столкновения ударной волны, вызванной взрывом сверхновой, с одиночным ветром соседней массивной звезды. Рассмотрены два типа систем: компактное ММЗС и разреженная ОВ-ассоциация. Моделирование показывает, что при столкновении ударной волны сверхновой с ветром звезды формируются зоны сжатия и усиления магнитных полей, которые могут способствовать ускорению частиц до петаэлектронвольтных энергий в течение нескольких сотен лет. Полученные результаты подчёркивают важность таких взаимодействий для понимания процессов генерации космических лучей и высокоэнергетического излучения.

В Заключение кратко подводятся итоги работы.

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. Текст автореферата полно и правильно отражает содержание диссертации.

Я не нашел в работе каких-либо ошибок или некорректных утверждений. Поэтому я в отзыв включил скорее мои предложения на будущее:

1. Можно ли разъяснить подробнее, как задается турбулентность и термализации плазмы в окрестности бесстолкновительных ударных волн? Какими уравнениями они описываются? Я не нашел или не понял ясно объяснение (для меня) в тексте диссертации;
2. Не очень понятны параметры Рэлей-Телоровской неустойчивости в модели контактного разрыва, при которых они работают: вариации плотности, при которых генерируются условия РТ неустойчивости, и необходимые параметры ускорения/замедления и тд.

В Заключение я хочу отметить, что Данр Владимирович представил прекрасные результаты своей работы. В диссертации были получены реально важные результаты для астрофизики. Д.В. Бадмаев владеет обширной базой математического аппарата, хорошо

понимает теорию процессов в космических явлениях и разбирается в интерпретации наблюдательных данных. Текст диссертации написан ясным, и что важно, хорошим русским языком. Все результаты диссертации, выносимые на защиту, являются новыми и актуальными. Достоверность и обоснованность результатов диссертации, которая, обуславливается 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. Использован апробированный МГД-код PLUTO, основанный на численных методах высокой точности, что обеспечивает достоверность расчетов. Точность результатов и корректность выбора параметров модели подтверждаются сопоставлением данных моделирования с наблюдательными данными. 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, безусловно, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1 — физика космоса, астрономия.

Отзыв составил:

доктор физико-математических наук, профессор,
главный научный сотрудник
Отделение теоретической физики им. И.Е. Тамма
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН
119991 Москва, Ленинский пр. 53
Тел. +7 499 132 6235
dogiel@td.lpi.ru

Догель В.А.