

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Д.В. 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 изучению нетепловых процессов, происходящих в ядрах молодых массивных звездных скоплений, с использованием методов трехмерного магнитогидродинамического моделирования. Исследование включает детальный анализ взаимодействий звездных ветров и остатков вспышек сверхновых, а также моделирование теплового и нетеплового излучения в условиях таких скоплений. В работе разработаны модели, описывающие формирование коллективных плазменных течений, усиление магнитных полей и процессы термализации энергии ветров, что имеет важное значение для интерпретации астрофизических наблюдений.

Диссертация состоит из Введения, четырёх Глав и Заключения. Библиографический список включает 185 наименований. Общий объём работы — 115 страниц, содержащих 42 рисунка и 6 таблиц.

Во **Введении** представлен обзор современного состояния исследуемой темы, обоснована её актуальность, сформулированы цели, задачи и ключевые положения, выносимые на защиту, а также отмечена новизна и достоверность полученных результатов.

Глава 1 описывает трёхмерную магнитогидродинамическую модель ядра молодого массивного звездного скопления (ММЗС), где сталкиваются мощные звездные ветры десятков массивных звезд. Подробно изложена методика построения модели и рассмотрены основные характеристики плазменных потоков: плотность, температура и распределение магнитных полей. Особое внимание уделено усилению магнитного поля, его морфологии и эффективности термализации энергии звездных ветров.

Глава 2 посвящена применению модели для интерпретации наблюдений звёздного скопления Westerlund 2. Для этого использованы данные, полученные рентгеновскими телескопами *Chandra* и ART-XC им. М. Павлинского обсерватории *Спектр-РГ*. Сравнительный анализ наблюдений и результатов моделирования указывает на присутствие нетепловой составляющей рентгеновского излучения, связанной с ускорением электронов 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 удается 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.

В **Главе 4** рассмотрено столкновение ударной волны от вспышки сверхновой с одиночным ветром соседней массивной звезды. Расчеты выполнены для двух масштабов, характерных для компактных ММЗС и разреженных ОВ-ассоциаций. Результаты моделирования показывают, что в таких взаимодействиях возникают протяженные области с усиленным магнитным полем, потенциально способных ускорять частицы до энергий порядка петаэлектронвольт в течение нескольких сотен лет.

В **Заключении** подведены основные итоги работы.

Результаты исследования опубликованы в 5 статьях в рецензируемых научных журналах, индексируемых в Web of Science, включая 3 публикации в изданиях первого квартала. Текст автореферата адекватно отражает содержание диссертации.

Результаты диссертации, выносимые на защиту, являются **новыми**. **Актуальность** проведенного Бадмаевым Д. В. исследования обусловлена большим количеством научных данных полученных современными гамма-обсерваториями H.E.S.S., LHAASO, HAWC, Ковер-2. Построенная в диссертации трехмерная магнитогидродинамическая модель ядра молодого массивного звездного скопления (ММЗС) важна для интерпретации имеющихся наблюдений, особенно излучения с энергиями выше 100 ТэВ в направлении на известные галактические ММЗС.

Достоверность и обоснованность результатов диссертации обеспечивается применением известных, хорошо аргументированных аналитических и современных численных методов. Использован апробированный МГД-код PLUTO, основанный на численных методах высокого порядка точности с применением современных вычислительных технологий, что обеспечивает надежность и достоверность результатов моделирования. При построении модели использованы стандартные и проверенные модели звездных ветров, структуры остатков сверхновых, звездной эволюции. Точность результатов и корректность выбора параметров модели подтверждается сопоставлением данных и моделирования с наблюдательными данными. Достоверность полученных результатов не вызывает сомнения.

Представленная диссертационная работа выполнена на стыке двух важных направлений: вычислительная физика и астрофизика, что, безусловно, делает проведенное исследование уникальным. Автор диссертации, безусловно, в одинаковой степени владеет навыками в обоих направлениях. Именно такая разносторонность позволила Бадмаеву Д. В. получить очень содержательные и интересные результаты в области астрофизики. В качестве **замечания** хотел бы отметить, что в диссертации отсутствует описание кода PLUTO и

использованных в этом коде алгоритмов. Такое описание сделало бы диссертационную работу более доступной молодым исследователям, начинающим работать в такой междисциплинарной области физики.

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

Отзыв составил:

доктор физико-математических наук, профессор,
зав. сектором Института космических исследований РАН

Петросян А.С.
29.11.2024

Подпись Петросяна А.С. заверяю

Ученый секретарь ИКИ РАН

А. М. Садовский