

**ОТЗЫВ официального оппонента**  
**на диссертацию Кропотиной Юлии Андреевны**  
**«Гибридное моделирование бесстолкновительных ударных волн в**  
**многокомпонентной плазме остатков сверхновых, скоплений галактик и**  
**солнечного ветра»,**  
**представленной на соискание ученой степени**  
**кандидата физико-математических наук**  
**по специальности 01.03.02 - Астрофизика и звездная астрономия**

Диссертация посвящена изучению свойств астрофизических бесстолкновительных ударных волн посредством численного моделирования и в сравнении с наблюдениями. Ударные волны – один из основных типов магнитоплазменных объектов в космосе, ответственный за ускорение космических лучей, нагрев плазмы, отчасти за усиление магнитного поля. Они образуются в совершенно разнообразных условиях от обтекания планет звездным ветром, до взрывов сверхновых и столкновений кластеров галактик. В последние годы появилось большое количество наблюдательных данных, детально описывающих временной профиль ударных волн при их пересечении спутниками в околоземной плазме, либо демонстрирующих пространственную структуру в удаленных астрофизических объектах. Одновременно, прогресс в вычислительных средствах позволил проводить достаточно правдоподобное численное моделирование. Данные обстоятельства обуславливают высокую актуальность выбранной темы диссертационной работы.

Главной особенностью работы, обуславливающей ее новизну и значимость, является использование собственного численного гибридного кода и акцент на исследовании роли тяжелых ионов в формировании структуры ударной волны. Диссертант, являясь одним из авторов кода, тщательно проверяет его, а также применяет для решения нескольких знаковых задач астрофизики.

В главе 1 автор детально описывает применяемый гибридный код, а также успешно валидирует его на нескольких модельных и известных наблюдательных примерах. Необходимо особо отметить высокую конкурентоспособность созданного гибридного кода на международном уровне и его уникальность в России. Гибридное (то есть, кинетическое для ионов и жидкостное для электронов) моделирование – мощный инструмент исследования среднемасштабной динамики плазмы позволяющий выявить, с разумными вычислительными затратами, собственную динамику фронта ударной волны в достаточных деталях, необходимых для описания ускорения и термализации ионов.

Во второй главе проведено и детально описано моделирование звездных ударных волн со значимым присутствием тяжелых ионов. Определено преимущественное ускорение тяжелых ионов в обратных ударных волнах в остатках сверхновых. Определены режимы диффузии (постепенно спадающих потоков) ионов различных сортов по мере удаления от фронта волны. Полученные результаты в целом подтверждаются имеющимися наблюдениями и хорошо ложатся в парадигму более значимых кинетических эффектов для более тяжелых ионов, генерации на фронте больших колебаний магнитного поля, и как следствие, более эффективного ускорения заряженных частиц.

Третья глава посвящена моделированию ударных волн с относительно малым числом Маха, характерным для нагретого газа в скоплениях галактик. Получены интересные результаты как о стабильности некоторых характеристик структуры при изменении массового состава плазмы, так и о зависимости от него, например, спектров по энергии ускоренных ионов железа. Последнее оставляет надежду на возможность определения скрытого от наблюдения массового состава по рентгеновскому излучению в линиях железа.

Наконец, в главе 4 рассматривается отдельная интересная задача о прохождении вращательного разрыва межпланетного магнитного поля через околоземную ударную волну. Для волн такого типа имеется огромное количество наблюдательных данных, позволяющих изучить и классифицировать их структуру, составить обширную статистику различных динамических явлений. Показано, например, что структура разрыва динамически изменяется при прохождении через фронт волны, в частности, в терминах электрического тока (градиента магнитного поля), разрыв интенсифицируется. В ходе моделирования подтверждены все основные наблюдательные факты, в том числе о наиболее сильном влиянии на интенсификацию тока в разрыве надтепловых частиц, способствующих его подтормаживанию (более медленному движению передней кромки) перед фронтом ударной волны.

На основании вышеизложенного можно заключить, что все сформулированные результаты достаточно достоверны и представляют научный интерес. Особенно необходимо отметить создание действующего гибридного кода, который еще хорошо послужит и автору и его российским коллегам. Уровень этой разработки, а так же результатов ее применения к конкретным задачам, соответствуют таковым у зарубежных коллег. Характеристики публикаций превосходят формальные требования к кандидатским диссертациям. Работы хорошо представлены на российских и международных конференциях. Также необходимо отметить хороший литературный стиль изложения, который в последнее время становится редкостью в диссертациях.

На мой взгляд, в работе отсутствуют серьезные недостатки или ошибки, могущие повлиять на ее общую оценку. Из общих замечаний, я бы отметил, что естественное желание автора продемонстрировать применимость численной

модели на возможно более широком спектре примеров, привело к несколько скомканному описанию части полученных результатов, особенно их осмысления в более широком контексте. Прежде всего, это относится к главе 3, где очень интересный результат о косвенной диагностике ионного состава не был раскрыт так, как он этого заслуживает. Следствием этой же проблемы стало отсутствие подробных обзоров по каждой из обсуждаемых задач, и, эпизодически, не вполне адекватные цитирования других авторов, вырванные из контекста, который может оценить только специалист (например, о влиянии вращательных разрывов на суббури). Наконец, было бы целесообразно обсудить ограничения кода, в частности по диапазону уверенно реализуемых параметров плазмы, так как это напрямую затрагивает его применимость для описания крайне широкого разнообразия астрофизических объектов.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Подводя итог, можно с уверенностью констатировать, что диссертация Кропотиной Юлии Андреевны «Гибридное моделирование бесстолкновительных ударных волн в многокомпонентной плазме остатков сверхновых, скоплений галактик и солнечного ветра» соответствует всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук действующим Положением о присуждении учёных степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук. Поставленные в диссертации задачи и полученные результаты соответствуют специальности 01.03.02 - астрофизика и звездная астрономия, а автор, безусловно, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 - астрофизика и звездная астрономия за проведенные исследования свойств ударных волн и приложение полученных результатов к данным наблюдений.

Официальный оппонент

Анатолий Алексеевич Петрукович  
д.ф.-м.н., проф., чл.-корр. РАН,  
директор  
Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки  
Институт космических исследований  
Российской академии наук

Адрес: 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная 84/32

эл. почта: iki@cosmos.ru

тел.: +7(495) 333-20-23

Подпись директора ИКИ РАН А.А. Петруковича  
заверяю

08 ноября 2021 года

Начальник отдела кадров ИКИ РАН

А.Б. Махова