

УТВЕРЖДАЮ
Директор ФГБУН Главная (Пулковская)
астрономическая обсерватория РАН
доктор физ.-мат. наук Н.Р. Ихсанов

«_____» ноября 2021 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации о диссертации Кропотиной Юлии Андреевны

«Гибридное моделирование бесстолкновительных ударных волн в многокомпонентной плазме остатков сверхновых, скоплений галактик и солнечного ветра», представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 –«Астрофизика и звёздная астрономия»

Актуальность тематики диссертации несомненна: ударные волны играют исключительно важную роль в астрофизике, являясь ускорителем заряженных частиц до сверхвысоких энергий, причиной нагрева вещества и усиления магнитных полей Вселенной. В скоплениях галактик, в межзвёздной и межпланетной средах сверхзвуковые потоки формируют в основном бесстолкновительные ударные волны (БУВ), с размером фронта, существенно меньшим длины свободного пробега частиц среды. Структура фронта БУВ определяется коллективным взаимодействием заряженных частиц, в частности, плазменными неустойчивостями и электромагнитными полями.

Несмотря на сотни статей, посвящённых проблеме БУВ в астрофизике, структура фронта БУВ и, следовательно, особенности ускорительных механизмов, в достаточной степени не установлены. Целью диссертационной работы Ю.А. Кропотиной является моделирование микроструктуры БУВ с учётом химического состава астрофизических объектов. Диссертантом впервые выполнено гибридное моделирование БУВ не только в астрофизических объектах далёкого Космоса, (оболочки сверхновых, горячий межгалактический газ), но и в магнитосфере Земли, обдуваемой солнечным ветром.

В первой главе диссертации представлен модифицированный гибридный код “Maximus”, с помощью которого решается система уравнений Власова-Максвелла, привлекаемая для моделирования структуры БУВ и ускорения частиц. Гибридность кода, т.е. кинетическое описание для тяжёлых частиц и гидродинамическое для электронов, позволяет успешно преодолеть

ряд вычислительных проблем при адекватности физических результатов, что подтверждено четырьмя тестами кода. Следует отметить интересный тест резонансной электромагнитной неустойчивости ионного потока, позволивший определить уровень турбулентности возбуждаемых волн и образование распадающегося турбулентного каскада.

Во второй главе исследованы БУВ в оболочках остатков сверхновых, которые являются источниками галактических космических лучей с энергиями до тысяч ТэВ и более. Проведено гибридное моделирование обратной ударной волны остатка сверхновой SN 1987A. Учтено искривление фронта ударной волны вследствие неустойчивости Рэля-Тейлора. При выбранных параметрах БУВ и среды (плазменное бэта $= 0,002$ и альвеновское число Маха ≥ 10) показано, что тяжёлые ионы инжектируются в ускорительный процесс значительно эффективнее ионов водорода. Важной частью главы является гибридное моделирование диффузии надтепловых тяжёлых ионов и ионов водорода. Показано, что распределение частиц вблизи фронта БУВ можно описать бомовской диффузией, вызванной сильной турбулентностью. В более далёких областях распределение частиц соответствует квазилинейной теории Белла.

В третьей главе моделируются БУВ в горячем межгалактическом газе (параметр бэта > 1) со звуковыми числами Маха, равными 2 и 3. При моделировании, кроме водорода и гелия, была учтена примесь FeXXVI, наблюдаемая в скоплениях галактик. Интересным результатом является зависимость распределения ионов железа за фронтом ударной волны от содержания гелия в среде. Это открывает возможность оценивать химический состав плазмы в скоплениях по рентгеновскому излучению в линиях железа.

Четвёртая глава посвящена моделированию прохождения вращательного разрыва через головную ударную волну на границе магнитосферы Земли. В диссертации выполнен анализ двадцати событий, наблюдаемых спутниками THEMIS/ARTEMIS. Наиболее интересна таблица 2, из которой видно усиление тока в разрыве за фронтом ударной волны, а также то, что это усиление более сильно выражено для квазипараллельной ударной волны. Важно, что результаты по вращательному разрыву можно привлекать для понимания процессов, происходящих в пульсарном ветре и остатков сверхновых.

Таким образом, в диссертации убедительно продемонстрирована высокая эффективность гибридного кода, усовершенствованного Ю.А. Кропотиной для широкого класса астрофизических задач, от ударных волн от вспышек сверхновых до магнитосферы Земли, обтекаемой солнечным ветром.

Тем не менее, следует заметить, что для обоснования генерации турбулентности, влияющей на структуру бесстолкновительных ударных волн и особенности ускорения частиц, в диссертации предлагается целый ряд неустойчивостей (резонансная электромагнитная, зеркальная, шланговая, альфвеновская ионно-циклотронная) без достаточного пояснения природы таких неустойчивостей. Например, в формуле (2.2) не пояснено как формируется температурная анизотропия. Вызывает сомнение возможность генерации суббури уединенным вращательным разрывом. Все ли здесь хорошо с энергетикой при магнитных полях на разрыве порядка 10^{-5} гаусс?

Указанные замечания не нарушают благоприятного впечатления о диссертационной работе, основные результаты которой достаточно убедительны и представляют несомненный научный интерес. Основные результаты диссертации опубликованы в ведущих астрономических и физических журналах и были представлены на российских и международных конференциях. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертационной работы. Результаты диссертации могут быть применены в ИНАСАН, АКЦ ФИАН, ИКИ РАН, ИЗМИРАН, ГАО РАН, САО РАН, ИСЗФ СО РАН, ИПФ РАН и ряде других научных учреждений.

В целом диссертация «Гибридное моделирование бесстолкновительных ударных волн в многокомпонентной плазме остатков сверхновых, скоплений галактик и солнечного ветра» полностью соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук Положением о присуждении учёных степеней ФГБУН Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН. Поставленные в диссертации задачи и полученные результаты соответствуют специальности 01.03.02 – астрофизики и звёздная астрономия, а её автор, Юлия Андреевна Кропотина, несомненно заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук.

Содержание диссертации было представлено Ю.А. Кропотиной на заседании объединенного семинара научных подразделений ГАО РАН 10 ноября 2021 г. и одобрено единогласно.

Заместитель директора ГАО РАН
по научной работе доктор физ.-мат. наук
Ю.А. Наговицын