

На правах рукописи

Кропотина Юлия Андреевна

**ГИБРИДНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНЫХ УДАРНЫХ
ВОЛН В МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ ПЛАЗМЕ
ОСТАТКОВ СВЕРХНОВЫХ, СКОПЛЕНИЙ
ГАЛАКТИК И СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА**

Специальность 01.03.02 —
«Астрофизика и звёздная астрономия»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург — 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук и в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого

Научный руководитель: **Быков Андрей Михайлович**,
д.ф.-м.н., проф., чл.-корр. РАН,
ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН,
руководитель отделения

Официальные оппоненты: **Петрукович Анатолий Алексеевич**,
д.ф.-м.н., проф., чл.-корр. РАН,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук,
директор

Глазырин Семён Игоревич,
к.ф.-м.н.,
Федеральное государственное унитарное предприятие “Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова”,
начальник лаборатории

Ведущая организация: **ФГБУН Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН**

Защита состоится 09 декабря 2021 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета 34.01.04 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук по адресу: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФТИ им. А.Ф. Иоффе и на сайте <http://www.ioffe.ru>.

Автореферат разослан _____ 2021 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
34.01.04, к.ф.-м.н.

Штернин П.С.

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Бесстолкновительные ударные волны (БУВ) могут возникать в целом ряде астрофизических объектов, где присутствуют сверхзвуковые потоки: в оболочках остатков сверхновых звёзд [1–3], на границе магнитосфер звёзд и планет [4; 5], в турбулентной межзвёздной и межпланетной среде [6; 7], при слиянии скоплений галактик [8; 9], в аккреционных дисках [10] и джетах радиогалактик [11]. За счёт разреженности среды кулоновская длина свободного пробега существенно превышает ширину фронта БУВ, а её структура полностью определяется коллективными взаимодействиями движущихся ионов и флуктуаций электромагнитного поля.

БУВ играют важную роль в астрофизике. Они нагревают вещество [12; 13], усиливают магнитные поля [14], приводят к возникновению неравновесных распределений частиц и плазменных неустойчивостей [15], ускоряют частицы до сверхвысоких энергий, являясь таким образом источником космических лучей (КЛ) [16–18]. Ускоренные и нагретые ударными волнами частицы излучают в диапазоне от радио- до жёсткого гамма-излучения и делают астрофизические объекты наблюдаемыми с орбиты Земли. КЛ ионизуют молекулярные облака, способствуя образованию молекул, в том числе, органических [19], влияют на процессы образования галактик [20] и динамику остатков сверхновых [21]. Учёт давления надтепловой компоненты может быть важен при оценке доли тёмной материи в скоплениях галактик. Таким образом, изучение структуры и свойств БУВ, в частности — эффективности ускорения частиц, играет ключевую роль в понимании многих астрофизических процессов. Отдельно отметим, что динамика ближайшей к нам БУВ — ударной волны (УВ) на границе магнитосферы Земли (*magnetospheric bow shock*) — оказывает влияние на геомагнитные явления, то есть непосредственно на среду обитания человека. Эта УВ вызывает большой интерес ещё и потому, что она доступна для прямых (*in situ*) наблюдений.

Сложные самосогласованные взаимодействия волн и частиц в БУВ можно моделировать при помощи кинетических кодов. Однако обычно рассматриваются БУВ в среде, состоящей исключительно из протонов и электронов. Значительно реже учитывается примесь гелия и более тяжёлых ионов. Например, в ранних работах [22; 23] авторам удалось воспроизвести наблюдаемые спектры ускоренных частиц в солнечном ветре, а в работах [24; 25] рассматривалось ускорение частиц нескольких сортов на УВ в остатках сверхновых. Тем не менее, кинетическое моделирование БУВ сложного состава — новое и мало разработанное направление. В частности, ранее не

исследовалось влияние сложного химического состава плазмы на микроструктуру обратных УВ остатков сверхновых и эффективность ускорения ими частиц. Решение этой задачи позволяет сделать выводы о вкладе обратных УВ в состав КЛ, а также из первых принципов найти форму распределений частиц по скоростям, что может быть важно для анализа спектроскопических данных об остатках сверхновых [1; 26]. Влияние состава вещества на форму спектральных линий важно также для интерпретации наблюдений УВ, возникающих при слиянии скоплений галактик. Отдельный интерес представляет исследование процессов переноса ускоренных ионов различного сорта в окрестности БУВ. Эти процессы играют важную роль в динамике ускорения КЛ и могут быть использованы в полуаналитических моделях в приложении к различным астрофизическим объектам. Ещё одна актуальная задача — исследование влияния разрывов в солнечном ветре на магнитосферу Земли. В частности, для предсказания магнитосферных явлений важно понимать, при каких условиях вращательный разрыв (ВР) после пересечения фронта головной УВ Земли станет неустойчивым к пересоединению магнитных линий. Пересоединение магнитных линий в магнитослое сопровождается быстрым энерговыделением, которое может спровоцировать магнитную суббурю. Взаимодействие разрывов с УВ может происходить и в других астрофизических объектах, например — пульсарных туманностях. Поэтому результаты моделирования, проверенные путём сравнения с непосредственными наблюдениями в солнечном ветре, могут иметь и более широкое применение. **Таким образом, все решаемые в диссертации задачи представляются актуальными.**

Цели и задачи работы. Целью диссертации является моделирование микроструктуры бесстолкновительных ударных волн в различных астрофизических объектах с учётом химического состава.

Перечислим основные задачи исследования:

- Исследовать влияние примеси тяжёлых ионов на структуру обратных ударных волн в остатках сверхновых и на инжекцию ионов различных сортов в процесс ускорения Ферми I порядка.
- Исследовать законы переноса ионов в турбулентном предвестнике ударной волны в плазме солнечного состава. Определить режимы диффузии ускоренных ионов различных сортов по мере удаления от фронта.
- Определить зависимость от химического состава плазмы распределений тяжёлых ионов за фронтом ударных волн, возникающих при слиянии скоплений галактик.

- Исследовать процесс прохождения вращательного разрыва через головную ударную волну на границе магнитосферы Земли. Определить условия эффективного усиления тока в разрыве.

Методы. Сложность аналитического описания БУВ, а также рост доступных вычислительных мощностей приводят к тому, что всё большее значение в изучении БУВ приобретает численное моделирование [5; 15; 27—29], в частности — так называемые гибридные коды [30; 31]. Это кинетические коды, основанные на разбиении пространства на ячейки с постоянным электромагнитным полем, в которых решается система уравнений Власова-Максвелла. При этом ионы рассматриваются как частицы, а электроны представлены в качестве нейтрализующей жидкости с нулевой плотностью. Это позволяет отслеживать динамику ионов и значительно экономит вычислительные ресурсы за счёт усреднения по быстрым электронным осцилляциям. Гибридный подход оптимален для моделирования нерелятивистских процессов на ионных масштабах и может быть использован для решения всех задач, поставленных в диссертации. Моделирование БУВ проводилось с помощью трёхмерного гибридного кода “Maximus”, существенный вклад в разработку которого внёс автор диссертации.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Нелинейное кинетическое моделирование структуры и функций распределения ионов в бесстолкновительных ударных волнах в космической плазме.
2. Установление механизма преимущественного ускорения тяжёлых ионов в обратных ударных волнах остатков сверхновых звезд. Исследование влияния тяжёлых ионов на инжекцию протонов в процесс ускорения Ферми I порядка.
3. Анализ режимов переноса ионов различных энергий в турбулентном предвестнике ударной волны в плазме солнечного состава. Определение режимов диффузии ускоренных ионов различных сортов по мере удаления от ударного фронта.
4. Демонстрация влияния локальной концентрации ионов гелия на форму функции распределения ионов железа за фронтами ударных волн в горячей плазме скоплений галактик. Предложение способа диагностики распределения гелия внутри скопления по наблюдениям рентгеновских линий ионов железа.
5. Установление существенного усиления тока вращательного разрыва при его прохождении через ударную волну с популяцией надтепловых частиц. Демонстрация способности вращательного разрыва задерживать надтепловые частицы в предвестнике ударной волны и переносить их к фронту.

Научная новизна. Автором впервые проведено гибридное моделирование БУВ в космической плазме с составом, существенно отличающимся от солнечного, и из первых принципов исследована инжекция частиц в процесс ускорения Ферми I порядка в таких средах. Впервые квазилинейная теория диффузии ускоренных частиц обобщена на различные сорта ионов и проверена из первых принципов в этом случае. Впервые обозначены пространственные границы применимости квазилинейной теории в предвестнике БУВ. Впервые созданы гибридные модели БУВ при слиянии скоплений галактик с учётом состава плазмы и предложена методика спектральной диагностики локального содержания гелия. Впервые показано влияние надтепловых частиц на усиление тока во вращательном разрыве при пересечении им БУВ на границе магнитосферы Земли, а также показано, что вращательный разрыв эффективно удерживает частицы и переносит их в область за фронтом.

Научная и практическая значимость. Результаты моделирования ускорения частиц на обратных УВ остатков сверхновых могут быть использованы для оценки вклада обратных УВ сверхновых в спектр и химический состав наблюдаемых в солнечной системе распределений КЛ. Кроме того, давление нетепловой компоненты может быть важным при создании гидродинамических моделей остатков сверхновых. Результаты моделирования процесса переноса частиц вблизи БУВ могут быть использованы при параметризации коэффициента диффузии в полуаналитических моделях ускорения КЛ. Форма смоделированных распределений ионов железа в БУВ в скоплениях галактик может использоваться при анализе спектроскопических данных будущих рентгеновских обсерваторий XRISM и ATHENA и послужить индикатором локального содержания гелия. Результаты моделирования взаимодействия ВР с головной УВ на границе магнитосферы Земли могут использоваться как для предсказаний магнитосферных явлений, так и в приложении к другим объектам с разрывными течениями, например — к пульсарным туманностям.

Достоверность полученных результатов. Достоверность результатов моделирования обоснована несколькими факторами:

1. В коде “Maximus” точно сохраняется нулевая дивергенция магнитного поля.
2. В коде “Maximus” использованы дискретные схемы второго порядка точности в пространстве и времени, а также реализовано несколько методик подавления численных осцилляций. Благодаря этому во всех решённых задачах закон сохранения полной энергии выполнялся с точностью не хуже 10% за всё время численного эксперимента, а закон сохранения импульса — с точностью не хуже 3%.

3. Результаты гибридного моделирования УВ в скоплениях галактик с хорошей точностью согласуются с результатами работы [32], независимо полученными с помощью PIC-кода “TRISTAN-MP”.
4. С помощью гибридного кода “Maximus” можно с высокой точностью воспроизвести решение ряда задач, допускающих аналитический подход.
5. Результаты, полученные с кодом “Maximus”, показали хорошее согласие с непосредственными наблюдениями спектров ускоренных частиц и структуры магнитных полей в солнечном ветре, а также с результатами полуаналитического кода Эллисона [22] и гибридного кода Шолера [23] по интерпретации тех же данных.

Апробация работы. Основные результаты работы опубликованы в 9 статьях в реферируемых журналах, а также представлены на всероссийских и международных конференциях: Международная молодёжная школа-конференция по астрофизике (Бюракан, Армения, 2017, 2018), “ФизикА.СПб” (Санкт-Петербург, 2017, 2018, 2019), “Cosmic rays and interstellar medium” (Гренобль, Франция, 2018), “Russian SuperComputer Days” (Москва, 2018), XMM-Newton Workshop “Astrophysics of Hot Plasma in Extended X-ray Sources” (Мадрид, Испания, 2019), “Advances and applications in plasma physics” (Санкт-Петербург, 2019), “Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра” (Москва, 2019).

Личный вклад автора. Исходная версия гибридного кода “Maximus” была создана М.Ю. Густовым в 2007 году [33]. Далее разработкой кода полностью занимался автор диссертации, который:

- усовершенствовал пользовательский интерфейс и адаптировал код для расчётов на многопроцессорных вычислительных комплексах с использованием технологии MPI (*Message Passing Interface*),
- добавил в код квадратичную интерполяцию и биномиальную фильтрацию токов, что на порядок уменьшило численные шумы, нарушавшие сохранение энергии,
- включил в модель давление электронов с возможностью задания их уравнения состояния,
- включил в модель возможность феноменологического учёта диссипативных процессов на электронных масштабах,
- сделал шаг по времени адаптивным, реорганизовал хранение больших массивов и оптимизировал алгоритм, что увеличило быстродействие кода примерно на порядок, в зависимости от конкретной задачи.

Автор диссертации активно участвовал в постановке задач, лично провёл все необходимые численные эксперименты, внёс определяющий вклад в подготовку раздела 3.1 обзорной работы А7 и в подготовку всех остальных публикаций по теме диссертации.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. Полный объём диссертации составляет 116 страниц с 26 рисунками и 2 таблицами. Список литературы содержит 157 наименований.

Содержание работы

Во введении аргументирована актуальность темы диссертации, сформулированы её цель и задачи, кратко изложена методика моделирования, изложены основные положения, выносимые на защиту, обоснована научная новизна проведённых исследований, их научно-практическая значимость и достоверность, перечислены публикации и выступления автора на конференциях по теме работы, указан личный вклад автора в работу.

В первой главе детально изложен алгоритм гибридного кода “Maximus”. Описана использованная нормировка физических величин, в которой длина задавалась в единицах инерционных длин протона $l_i = c/\omega_{pi} = c\sqrt{m_p/4\pi ne^2}$, время — в единицах обратных гирочастот протона $\Omega^{-1} = m_p c/eB_0$, плотность и магнитное поле — в единицах начальной плотности и магнитного поля (ρ_0 и B_0). Нормировочные параметры рассчитывались в невозмущённой области далеко перед фронтом УВ. Приведена решаемая в коде система уравнений Власова-Максвелла в заданной нормировке:

$$\frac{d\vec{r}_k}{dt} = \vec{v}_k, \quad (1)$$

$$\frac{d\vec{v}_k}{dt} = \frac{Z_k}{A_k} \left(\vec{E} + \vec{v}_k \times \vec{B} \right) - \nu(\vec{j}_i - \vec{j}_e)/\rho_c, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\nabla \times \vec{E}, \quad (3)$$

$$\vec{E} = -\frac{1}{\rho_c} (\vec{j}_e \times \vec{B} + \nabla P_e - \nu(\vec{j}_i - \vec{j}_e)), \quad (4)$$

$$\vec{j}_e = \vec{j}_i - \nabla \times \vec{B}, \quad (5)$$

$$\vec{j}_i = \sum_{\text{cell}} S(\vec{r}_k) Z_k \vec{v}_k, \quad \rho_c = \sum_{\text{cell}} S(\vec{r}_k) Z_k. \quad (6)$$

Здесь $\vec{r}_k$ и $\vec{v}_k$, A_k и Z_k — координаты и скорости, массовые и зарядовые числа отдельных ионов, $\vec{E}$ и $\vec{B}$ — электрическое и магнитное поле, ν — эффективная частота столкновений электронов с ионами, P_e — давление электронов, ρ_c и j_i — плотность заряда и тока ионов, усреднённые по ячейке сетки, $\vec{j}_e$ — плотность тока электронов, $S(\vec{r}_k)$ — весовая функция.

Описана реализация основных шагов гибридного алгоритма: вычисления токов, расчёта электромагнитных полей и перемещения частиц. Продемонстрирован метод сохранения нулевой $div\vec{B}$ за счёт сдвинутой декартовой сетки, в которой магнитное поле задаётся на гранях, а электрическое — на рёбрах. Описана схема TVD (*total variation diminishing*), использованная для подавления численных осцилляций на разрывах. Указано, что структура моделируемой плоской УВ с заданным химическим и зарядовым составом однозначно определяется тремя безразмерными параметрами: альвеновским числом Маха $M_a = V/V_a$, где $V_a = B_0/\sqrt{4\pi\rho_0}$; отношением теплового давления к магнитному $\beta = 8\pi nT/B_0^2$ (задавалось отдельно для каждого сорта частиц); углом наклона начального магнитного поля к нормали θ .

В конце первой главы приведены расчёты, обосновывающие корректность модели и кода: моделирование альвеновской волны, моделирование резонансной электромагнитной неустойчивости ионного потока, моделирование ускорения ионов водорода, гелия и кислорода на УВ в солнечном ветре, моделирование ускорения протонов на УВ в скоплениях галактик. Первые два теста демонстрируют адекватную работу кода для задач с известным решением, а два других показывают соответствие результатов моделирования ускорения частиц на БУВ наблюдательным данным и результатам, полученным другими авторами. На примере последнего теста подчёркнута роль корректного учёта уравнения состояния электронов в моделях слабых УВ в горячей среде.

Вторая глава посвящена моделированию БУВ с параметрами, характерными для УВ в оболочках остатков сверхновых.

В §2.1 описана гибридная модель микроструктуры обратной УВ остатка сверхновой SN 1987A, основанная на доступных наблюдательных данных и теоретических представлениях. Так, число Маха и параметр β выбирались с учётом известных из наблюдений температуры и плотности эжекты, а также из соображений об эффективном усилении магнитного поля перед фронтом. Угол наклона магнитного поля к нормали, который, предположительно, варьируется от точки к точке из-за неустойчивости Рэлея-Тейлора [34], мог задаваться произвольно. Для моделирования была выбрана квазипродольная конфигурация с $\theta = 10^\circ$, поскольку при $\theta < 50^\circ$ частицы могут эффективно инжектироваться в процесс ускорения Ферми I порядка [27]. Химический состав эжекты был взят из работы [35], а зарядовые состояния рассчитаны при помощи кода SUPREMNA [36], предоставленного С.И. Блинниковым и А.В. Ридной. Нейтральная компонента не учитывалась, поскольку она не влияет на динамику

БУВ. Таким образом, плазма эжекты в модельной УВ содержала 20% НII, 20% ОII, 25% SII и 35% FeII (по массе). Моделирование показало, что в среде с таким составом инжекция в процесс ускорения Ферми I порядка существенно подавлена для ионов водорода, но не для тяжёлых ионов. Характерные времена ускорения последних, однако, на 1-2 порядка больше. Это позволяет предположить, что в обратной УВ остатка сверхновой SN 1987A к настоящему моменту времени никакие ионы не достигли теравольтовых энергий, и гамма-излучение от обратной УВ остатка пренебрежимо мало.

Далее в том же разделе исследована структура БУВ, обогащённых тяжёлыми слабо заряженными ионами, в рамках упрощённой модели с двухкомпонентным составом: НII и ОII. Варьируя относительное содержание ионов, а также угол θ , удалось показать, что при 50% содержании ОII по массе (это соответствует 6% по числу частиц) период, длина и амплитуда волн вблизи фронта существенно возрастают. Преобладание неустойчивостей, порождаемых тяжёлыми ионами, объясняется незначительным обратным влиянием возникающих волн на инерционные слабо заряженные частицы, а значит — более высоким уровнем насыщения. Это приводит к более широкому и мощному фронту УВ, для пересечения которого и вступления в механизм ускорения Ферми ионам водорода нужно существенно предускориться, что достаточно маловероятно. Можно провести аналогию между подавленной инжекцией протонов в УВ сложного состава и известной проблемой затруднённой инжекции электронов в чисто протонной УВ.

Последняя часть §2.1 посвящена моделированию обратных УВ в сверхновых типа Ia, состоящих преимущественно из элементов тяжелее гелия. Показано, что гибридная модель допускает перенормировку на масштабы, связанные с произвольным сортом ионов. Это позволило провести моделирование УВ с различным углом θ в среде, состоящей в основном из OIV, с малой примесью SiII. Продемонстрировано диффузионное ускорение частиц при $\theta \leq 50^\circ$ и замедленная термализация ионов примеси при $\theta > 50^\circ$. Установлен механизм бесстолкновительной релаксации ионов примеси посредством раскачки альвеновской ионно-циклотронной неустойчивости.

В §2.2 второй главы исследованы особенности переноса ускоряющихся частиц в турбулентном предвестнике БУВ солнечного состава. При этом сравнивались смоделированные пространственные распределения надтепловых ионов различного сорта и энергии с распределениями, предсказываемыми боровской теорией диффузии и квазилинейной теорией Белла [18]. Предварительно теория Белла была обобщена на случай диффузии различных ионов в преимущественно водородной

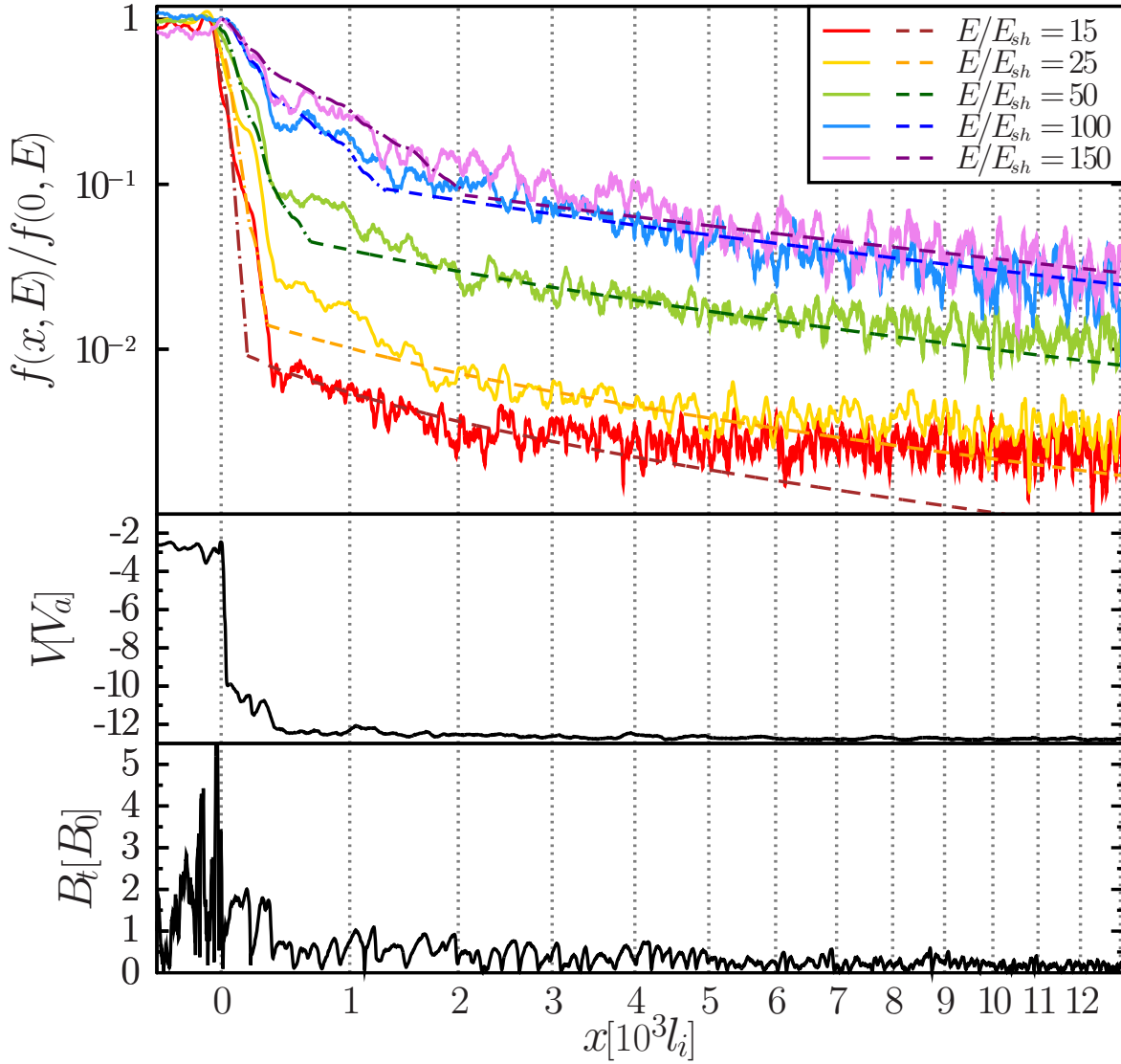


Рис. 1 — Вверху: смоделированные пространственные функции распределения надтепловых протонов с различной энергией в квазипродольной бесстолкновительной ударной волне. Распределения, полученные аналитическим путём в бомовском и белловском приближении, показаны штрихпунктирными и штриховыми линиями соответствующих цветов. В середине: средняя скорость потока в системе покоя ударного фронта. Внизу: турбулентная составляющая магнитного поля.

УВ. Пример сравнения теоретических и модельных распределений ионов водорода показан на рис. 1. В верхней части рисунка можно видеть, что функция распределения частиц резко спадает вблизи фронта. Это область бомовской диффузии, обусловленной сильной турбулентностью, которая видна в соответствующей области на графике турбулентной составляющей магнитного поля (нижняя часть рис. 1). Далее спад становится более плавным, в соответствии с предсказаниями теории Белла (штриховые кривые). Эта теория применима в широкой области перед фронтом (а для наиболее энергичных частиц — во всей области моделирования). Наконец, в удалённой от фронта области рассеяние частиц становится маловероятным, и функ-

ция распределения спадает очень слабо, стремясь к постоянному значению. Здесь диффузионное приближение, по-видимому, не применимо. Также в этой области возникает анизотропия распределений надтепловых частиц по компонентам скорости. Качественно такие же результаты были получены для ионов гелия и углерода в различных зарядовых состояниях. Моделирование проводилось для параметров головных УВ остатков сверхновых, но результат допускает обобщение на УВ в других средах. В качестве примера смоделирована УВ в солнечном ветре и показано, что полученные распределения ускоренных частиц соответствуют наблюдаемым. При этом происходит такая же смена режимов диффузии, как описано выше.

Третья глава посвящена моделированию БУВ с малым звуковым числом Маха ($M_s \lesssim 3$), возникающих в горячем межгалактическом газе при слиянии скоплений галактик. Приведены результаты моделирования квазипродольных УВ с $M_s = 2$ и $M_s = 3$. Состав вещества в обоих случаях варьировался: для каждого числа Маха была смоделирована референсная УВ с солнечным составом, а также УВ с 50% (по массе) содержанием HeIII. Во всех смоделированных УВ помимо водорода и гелия присутствовала небольшая примесь FeXXVI. Для корректного моделирования таких УВ уравнение состояния электронов задавалось феноменологически по результатам аналитических вычислений и PIC-моделирования. При этом температура электронов считалась пропорциональной взвешенной температуре всех сортов ионов. Перед фронтом УВ коэффициент пропорциональности был равен 1. За фронтом он зависел от звукового числа Маха: для $M_s = 2$ он был равен 1, для $M_s = 3$ он составлял 0,7. Положение фронта автоматически определялось из профиля плотности.

Ключевой результат заключается в том, что форма распределений ионов железа за фронтом УВ (нормировка нетепловой части спектра и аппроксимированная температура тепловой части) зависит от содержания гелия в среде (см. рис. 2). Этот эффект допускает возможность анализа локального состава вещества по распределениям частиц за фронтом УВ с $M_s \approx 3$. В случае тяжёлых ионов распределения могут быть восстановлены из спектральных линий, полученных при помощи спектрографов высокого разрешения, разрабатываемых для будущих рентгеновских телескопов XRISM и ATHENA.

Также по итогам моделирования подтверждён вывод работы [32] о том, что инжекция ионов в процесс ускорения Ферми I порядка не происходит при $M_s = 2$, но происходит при $M_s = 3$. Показано, что это верно для всех рассмотренных ионов как в плазме солнечного состава, так и в плазме с повышенным содержанием гелия

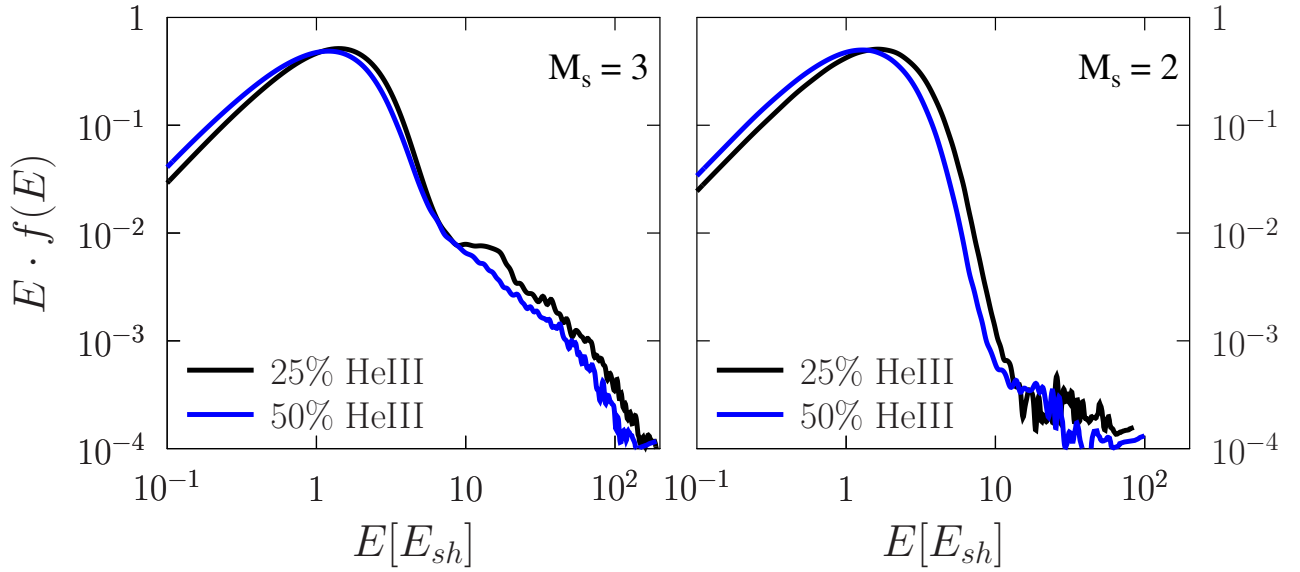


Рис. 2 — Сравнение функций распределения ионов железа по энергии за фронтом ударной волны с солнечным составом (25% гелия по массе) и ударной волны, обогащённой гелием (50% по массе), для звукового числа Маха $M_s = 3$ (слева) и $M_s = 2$ (справа).

(в исходной работе рассматривались чисто водородные УВ). Кроме того, приведены карты магнитного поля вблизи УВ с $M_s = 3$, свидетельствующие о большой амплитуде электромагнитных флуктуаций (порядка $5-7B_0$). Указано, что эффективная раскачка ряда неустойчивостей в горячей плазме (например, зеркальной, шланговой, альвеновской ионно-циклотронной) часто приводит к сильной турбулентности в среде с высоким β . В частности, это подтверждается наблюдениями в солнечном ветре [37].

В четвертой главе¹ приведено описание наблюдений и моделирования прохождения ВР через головную УВ на границе магнитосферы Земли. Из анализа двадцати событий, наблюдаемых спутниками THEMIS/ARTEMIS (выбор и обработку наблюдательных данных осуществляли А.В. Артемьев и И.Ю. Васько), сделан вывод, что усиление тока в разрыве при прохождении его через УВ слабо зависит от её числа Маха и угла θ , но, по-видимому, оказывается более эффективным при наличии в предфронте популяции надтепловых частиц. Показана роль утоньшения и усложнения структуры ВР в усилении тока. Описаны пять расчётов, сделанных для уточнения закономерностей и понимания механизма усиления тока во ВР. Моделирование было проведено в приближении плоского фронта УВ и совпадающих нормалей УВ и ВР. Исследовано влияние числа Маха, угла θ и угла поворота магнитного поля внутри разрыва на эффективность усиления тока.

¹Результаты этой главы получены при поддержке гранта РНФ 21-72-20020.

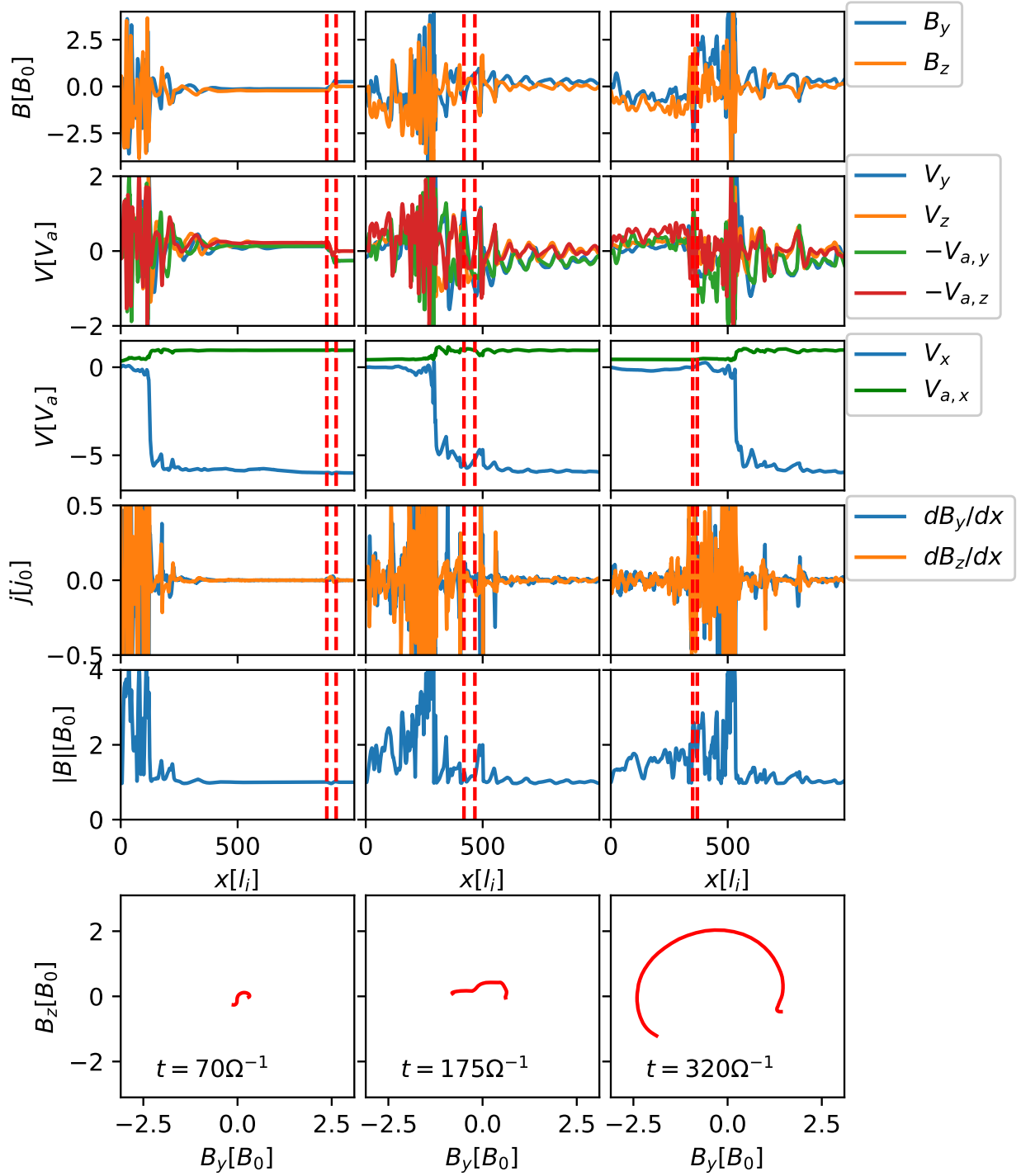


Рис. 3 — Взаимодействие вращательного разрыва с квазипродольной ударной волной в три последовательных момента времени: слева — разрыв далеко перед фронтом, посередине — разрыв в предвестнике, справа — разрыв за фронтом ударной волны. Сверху вниз: поперечная к нормали компонента магнитного поля; поперечная компонента скорости потока и локальной альвеновской скорости; продольная скорость и альвеновская скорость; плотность тока; модуль магнитного поля; годограммы $B_y - B_z$, построенные внутри выделенной красными штрихами области разрыва.

Пример моделирования взаимодействия ВР с УВ в квазипродольной конфигурации приведён на рис. 3. В этом случае УВ имеет протяжённый

предвестник, который заполнен надтепловыми частицами, отражёнными при первом взаимодействии с ударным фронтом. Эта популяция является стартовой для процесса ускорения Ферми I порядка. Моделирование показало, что она способна активно взаимодействовать с ВР: энергичные частицы задерживаются разрывом и сносятся им к фронту, в результате чего сам разрыв в предвестнике несколько замедляется. Кроме того, генерируемые ускоренными частицами неустойчивости в предвестнике приводят к усилению амплитуды поперечного поля, а значит — и плотности тока в разрыве (см. средний столбец рис. 3). Давление ускоренных частиц модифицирует фронт УВ, делая профиль скорости потока вблизи фронта более плавным (см. график продольной скорости потока в третьем ряду рис. 3). В итоге при прохождении фронта передний край разрыва всегда движется чуть медленнее заднего, и разрыв утоньшается. Этот эффект является причиной более мощного усиления тока при наличии у УВ предвестника с ускоренными частицами. В рамках гибридной модели плоского участка фронта такая ситуация возникала только в квазипродольной конфигурации, вследствие чего ток наиболее эффективно усиливался при $\theta < 45^\circ$. В наблюдательных данных такой закономерности нет, поскольку в реальности ускоренные частицы могут приходить на квазипоперечные участки фронта головной УВ Земли с квазипродольных (в том числе, вдоль самого разрыва, если он соединяется с квазипродольной частью УВ). При этом результаты моделирования подтвердили вывод, сделанный из наблюдений, что число Маха и угол θ мало влияют на усиление тока (в пределах квазипродольной конфигурации). Таким образом, сделан вывод, что ключевую роль в усилении тока при прохождении ВР через УВ играет его взаимодействие с надтепловыми частицами вблизи фронта.

В **заключении** приведены основные результаты работы:

При помощи авторского гибридного кода “Maximus” смоделированы астрофизические УВ с параметрами, характерными для оболочек остатков сверхновых, скоплений галактик, солнечного ветра. Получены следующие результаты:

1. Показано, что в квазипродольных ударных волнах в плазме с существенной примесью тяжёлых, слабо заряженных ионов инжекция ионов водорода в процесс ускорения Ферми I порядка существенно затруднена. Таким образом, обратные ударные волны остатков сверхновых ускоряют преимущественно тяжёлые ионы.
2. Установлено, что существенная примесь тяжёлых, слабо заряженных ионов полностью меняет динамику электромагнитных полей в сверхкритических

ударных волнах: поля эффективнее усиливаются и образуют более крупные структуры, а перестройка фронта идёт с меньшей частотой.

3. Квазилинейная теория диффузии аналитически обобщена на случай ионов с различными зарядом и массой. Установлено, что закон переноса надтепловых частиц в предвестнике ударной волны зависит от расстояния до фронта: непосредственно перед фронтом действует приближение бомовской диффузии, далее — квазилинейная теория. Далеко перед фронтом рассеяния становятся редкими, и применимость диффузионного приближения ограничена.
4. Показано, что в скоплениях галактик эффективность нагрева и инжекции в процесс ускорения Ферми ионов железа зависит от относительного содержания ионов гелия. Этот эффект может оказывать влияние на форму спектральных линий железа и открывает теоретическую возможность определения локального состава вещества по спектрам. Однако при любом составе инжекция ионов эффективна только для $M_s > 2$.
5. Показано, что при взаимодействии вращательного разрыва с ударной волной ток в разрыве наиболее эффективно усиливается при наличии надтепловых частиц. Эффект исследован на примере головной ударной волны Земли, но применим также к другим астрофизическим объектам с разрывными течениями, таким как пульсарные туманности.

Список публикаций по теме диссертации

- A1. Гибридное моделирование бесстолкновительных ударных волн в космической плазме / Ю. А. Кропотина [и др.] // ЖТФ. — 2015. — т. 85, No 2. — с. 73–81.
- A2. Релаксация тяжелых ионов в бесстолкновительных ударных волнах в космической плазме / Ю. А. Кропотина [и др.] // ЖТФ. — 2016. — т. 86, No 4. — с. 40–46.
- A3. Нагрев и неравновесные распределения ионов в обратной ударной волне остатка сверхновой SN 1987A / Ю. А. Кропотина [и др.] // Ядерная физика. — 2018. — т. 81, No 1. — с. 125–131.
- A4. Evolution of anisotropic distributions of weakly charged heavy ions downstream collisionless quasiperpendicular shocks / J. A. Kropotina [et al.] // J. Phys. Conf. Ser. — 2018. — Vol. 1038, Id 012014.
- A5. Maximus: a Hybrid Particle-in-Cell Code for Microscopic Modeling of Collisionless Plasmas / J. A. Kropotina [et al.] // Communications in Computer and Information Science. — 2019. — Vol. 965. — P. 242–253.
- A6. J. A. Kropotina, K. P. Levenfish, A. M. Bykov. Simulation of collisionless shocks in plasmas with high metallicity // J. Phys. Conf. Ser. — 2019. — Vol. 1400, Id 022002.
- A7. Shocks and non-thermal particles in clusters of galaxies / A. M. Bykov, F. Vazza, J. A. Kropotina [et al.] // SSR. — 2019. — Vol. 215, no. 1. — P. 14.

- A8. Моделирование диффузии ускоренных частиц в бесстолкновительных ударных волнах с примесью ионов тяжелее водорода / Ю. А. Кропотина [и др.] // ЖТФ. — 2020. — т. 90, No 1. — с. 18–25.
- A9. Solar Wind Discontinuity Transformation at the Bow Shock / J. A. Kropotina [et al.] // ApJ. — 2021. — June. — Vol. 913, no. 2. — P. 142.

Список литературы

1. *Raymond J. C.* Shock Waves in Supernova Ejecta // SSR. — 2018. — Vol. 214, no. 1. — P. 28.
2. Cosmic Ray Production in Supernovae / A. M. Bykov [et al.] // SSR. — 2018. — Vol. 214, no. 1. — P. 41.
3. *Bell A. R.* Cosmic ray origins in supernova blast waves // MNRAS. — 2015. — Vol. 447, no. 3. — P. 2224–2234.
4. *Burgess D., Möbius E., Scholer M.* Ion Acceleration at the Earth's Bow Shock // SSR. — 2012. — Vol. 173, no. 1–4. — P. 5–47.
5. *Balogh A., Treumann R. A.* Physics of Collisionless Shocks: Space Plasma Shock Waves. — New York : Springer, 2013. — (ISSI Scientific Report Series).
6. *McKee C. P., Hollenbach D. J.* Interstellar Shock Waves // Ann. Rev. Astron. Astrophys. — 1980. — Vol. 18, no. 1. — P. 219–262.
7. *Bykov A. M., Toptygin I. N.* Effect of Shocks on Interstellar Turbulence and Cosmic-Ray Dynamics // Astrophysics and Space Science. — 1987. — Vol. 138, no. 2. — P. 341–354.
8. Structures and Components in Galaxy Clusters: Observations and Models / A. M. Bykov [et al.] // SSR. — 2015. — Vol. 188, no. 1–4. — P. 141–185.
9. *Markevitch M., Vikhlinin A.* Shocks and cold fronts in galaxy clusters // Physics Reports. — 2007. — Vol. 443, no. 1. — P. 1–53.
10. *Shirakawa K., Hoshino M.* Asymmetric evolution of magnetic reconnection in collisionless accretion disk // Physics of Plasmas. — 2014. — Vol. 21, no. 5. — P. 052903.
11. Ultrahigh energy cosmic rays from shocks in the lobes of powerful radio galaxies / J. H. Matthews [et al.] // MNRAS. — 2019. — Vol. 482, no. 4. — P. 4303–4321.
12. *Bykov A. M., Paerels F. B. S., Petrosian V.* Equilibration Processes in the Warm-Hot Intergalactic Medium // SSR. — 2008. — Vol. 134, no. 1–4. — P. 141–153.
13. *Balikhin M., Gedalin M., Petrukovich A.* New mechanism for electron heating in shocks. // Phys. Rev. Lett. — 1993. — Vol. 70, no. 9. — P. 1259–1262.
14. Magnetic Field Amplification in Nonlinear Diffusive Shock Acceleration Including Resonant and Non-resonant Cosmic-Ray Driven Instabilities / A. M. Bykov [et al.] // ApJ. — 2014. — Vol. 789, no. 2. — P. 137.
15. Nonstationarity of strong collisionless quasiperpendicular shocks: Theory and full particle numerical simulations / V. V. Krasnoselskikh [et al.] // Physics of Plasmas. — 2002. — Vol. 9. — P. 1192–1209.
16. *Krymskii G. F.* A regular mechanism for the acceleration of charged particles on the front of a shock wave // Soviet Physics Doklady. — 1977. — Vol. 22. — P. 327.
17. *Skilling J.* Cosmic ray streaming - III. Self-consistent solutions. // MNRAS. — 1975. — Vol. 173. — P. 255–269.

18. *Bell A. R.* The acceleration of cosmic rays in shock fronts. I // MNRAS. — 1978. — Vol. 182. — P. 147–156.
19. *Nesterenok A. V.* Chemical evolution of cold dark clouds in the vicinity of supernova remnants // Jour. Phys. Conf. Ser. Vol. 1400. — 2019. — P. 022025.
20. *Salem M., Bryan G. L., Hummels C.* Cosmological simulations of galaxy formation with cosmic rays // ApJ. — 2014. — Vol. 797, no. 2. — P. L18.
21. The effect of cosmic ray acceleration on supernova blast wave dynamics / M. Pais [et al.] // MNRAS. — 2018. — Vol. 478, no. 4. — P. 5278–5295.
22. *Ellison D. C., Moebius E., Paschmann G.* Particle Injection and Acceleration at Earth’s Bow Shock: Comparison of Upstream and Downstream Events // ApJ. — 1990. — Vol. 352. — P. 376.
23. *Scholer M., Trattner K. J., Kucharek H.* Ion Injection and Fermi Acceleration at Earth’s Bow Shock: The 1984 September 12 Event Revisited // ApJ. — 1992. — Vol. 395. — P. 675.
24. *Caprioli D., Zhang H., Spitkovsky A.* Diffusive shock re-acceleration // Journal of Plasma Physics. — 2018. — Vol. 84, no. 3. — P. 715840301.
25. *Hanusch A., Liseykina T. V., Malkov M.* Acceleration of Cosmic Rays in Supernova Shocks: Elemental Selectivity of the Injection Mechanism // ApJ. — 2019. — Vol. 872, no. 1. — P. 108.
26. Probing Multiple Sight Lines through the SN 1006 Remnant by Ultraviolet Absorption Spectroscopy / P. F. Winkler [et al.] // ApJ. — 2005. — Vol. 624. — P. 189–197.
27. *Caprioli D., Spitkovsky A.* Simulations of Ion Acceleration at Non-relativistic Shocks. I. Acceleration Efficiency // ApJ. — 2014. — Vol. 783. — P. 91.
28. *Caprioli D., Spitkovsky A.* Simulations of Ion Acceleration at Non-relativistic Shocks. II. Magnetic Field Amplification // ApJ. — 2014. — Vol. 794, no. 1. — P. 46.
29. *Caprioli D., Spitkovsky A.* Simulations of Ion Acceleration at Non-relativistic Shocks. III. Particle Diffusion // ApJ. — 2014. — Vol. 794, no. 1. — P. 47.
30. Re-forming supercritical quasi-parallel shocks. II - Mechanism for wave generation and front re-formation / D. Winske [et al.] // JGR. — 1990. — Vol. 95. — P. 18821–18832.
31. *Lipatov A. S.* The Hybrid Multiscale Simulation Technology. — Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2002.
32. Proton Acceleration in Weak Quasi-parallel Intracluster Shocks: Injection and Early Acceleration / J.-H. Ha [et al.] // ApJ. — 2018. — Vol. 864, no. 2. — P. 105.
33. Многопроцессорный трёхмерный гибридный код для моделирования микроскопических явлений в космической плазме / Ю. А. Кропотина [и др.] // ИТВ СПбГПУ. — 2011. — т. 1. — с. 99–105.
34. *Blondin J. M., Ellison D. C.* Rayleigh-Taylor Instabilities in Young Supernova Remnants Undergoing Efficient Particle Acceleration // ApJ. — 2001. — Vol. 560, no. 1. — P. 244–253.
35. *Woosley S. E.* SN 1987A: After the Peak // ApJ. — 1988. — Vol. 330. — P. 218.
36. Dynamics and Radiation of Young Type-Ia Supernova Remnants: Important Physical Processes / E. I. Sorokina [et al.] // Astronomy Letters. — 2004. — Vol. 30, no. 11. — P. 737–750.
37. *Petrukovich A. A., Chugunova O. M., Shustov P. I.* Low-frequency magnetic variations at the high- β Earth bow shock // Annales Geophysicae. — 2019. — Vol. 37, no. 5. — P. 877–889.