

Санкт-Петербургский политехнический университет  
Петра Великого  
Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций

На правах рукописи

Кропотина Юлия Андреевна

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

Направление подготовки 03.06.01 — «Физика и астрономия»

Направленность 03.06.01\_01 — «Астрофизика и звёздная астрономия»

**НАУЧНЫЙ ДОКЛАД**

об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)

Автор работы: Кропотина Ю.А.

Научный руководитель:

д.ф.-м.н., проф., чл.-корр. РАН

Быков Андрей Михайлович

Санкт-Петербург — 2021

Научно-квалификационная работа выполнена в Высшей инженерно-физической школе Института физики, нанотехнологий и телекоммуникаций федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Директор ВШ: *Журихина Валентина Владимировна,*  
*д.ф.-м.н., проф.*

Научный руководитель: *Быков Андрей Михайлович,*  
*д.ф.-м.н., проф., чл.-корр. РАН,*

Рецензент: *Уваров Юрий Александрович,*  
*к.ф.-м.н.*  
*старший научный сотрудник ФТИ*  
*им. А.Ф. Иоффе РАН*

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу: <http://elib.spbstu.ru>

## Оглавление

	Стр.
<b>Общая характеристика работы</b> . . . . .	<b>4</b>
<b>Содержание работы</b> . . . . .	<b>10</b>
Гибридный код “Maximus” . . . . .	10
Моделирование ударных волн в оболочках остатков сверхновых . . . . .	12
Моделирование ударных волн в скоплениях галактик . . . . .	16
Моделирование взаимодействия вращательного разрыва с головной ударной волной на границе магнитосферы Земли . . . . .	17
<b>Основные результаты работы и заключение</b> . . . . .	<b>20</b>
<b>Список литературы</b> . . . . .	<b>22</b>

## 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 [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. КЛ ионизуют молекулярные облака, способствуя образованию органических молекул [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 нашу среду обитания. Эта УВ вызывает большой интерес не только по указанной причине, но и потому, что она доступна для прямых (*in situ*) наблюдений и является природной лабораторией по изучению БУВ.

Сложные самосогласованные взаимодействия волн и частиц в БУВ лучше всего воспроизводятся 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. На-

пример, в ранних работах [22; 23] авторам удалось воспроизвести наблюдаемые спектры ускоренных частиц в солнечном ветре, а в работах [24; 25] рассматривалось ускорение нескольких сортов частиц на УВ в остатках сверхновых. Тем не менее, кинетическое моделирование БУВ сложного состава можно считать относительно новым и мало разработанным направлением. 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 по остаткам 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 одной актуальной задачей является 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 резким 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 в дальнейшем более широкое применение. **Таким образом, все решаемые в рамках данной работы задачи представляются актуальными.**

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

Основные поставленные задачи были следующие:

- Исследовать влияние существенной примеси тяжёлых ионов на структуру возвратных ударных волн в остатках сверхновых и на инжекцию различных ионов в процесс ускорения Ферми I порядка.
- Исследовать законы переноса различных 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 растущая мощность компьютеров 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 данной работы. Поэтому моделирование БУВ проводилось с помощью трёхмерного гибридного кода “Maximus”, существенный вклад в разработку которого внёс автор работы.

### **Представление научного доклада: основные положения**

1. Нелинейное кинетическое моделирование структуры и функций распределения ионов в бесстолкновительных ударных волнах в космической плазме.
2. Установление механизма преимущественного ускорения тяжёлых ионов в возвратных ударных волнах остатков сверхновых звезд. Тяжёлые ио-

- ны раскачивают сильные магнитные неустойчивости, что существенно подавляет 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 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 спектрометрами с высоким разрешением.
  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 была обобщена на различные сорта ионов и проверена из первых принципов в этом случае, а также обозначены пространственные границы её применимости в предвестнике БУВ. Впервые были 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.

**Теоретическая 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 КЛ. Кроме того, давление нетепловой компоненты может учитываться при создании гидродинамических моделей остатков сверх-

новых. Результаты моделирования законов 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 спектрографов 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 — пульсарным туманностям.

**Достоверность полученных результатов.** Достоверность результатов моделирования обоснована несколькими факторами:

1. В коде точно сохраняется нулевая дивергенция магнитного поля.
2. В коде 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 менее 10% за всё время численного эксперимента, а закон сохранения импульса — с точностью не менее 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. Гибридный код “Maximus” многократно воспроизводил решение задач, допускающих аналитический подход.
5. Результаты работы кода 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 работы, который:

- усовершенствовал пользовательский интерфейс и адаптировал код для счёта на многопроцессорных кластерах с использованием технологии MPI (*Message Passing Interface*),
- добавил квадратичную интерполяцию и биномиальную фильтрацию токов, что на порядок уменьшило численные шумы, нарушавшие сохранение энергии,
- включил в код давление электронов с возможностью задания их уравнения состояния,
- включил в код искусственное сопротивление (силу трения между электронами и ионами) для 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 работы 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 работы.

## Содержание работы

### Гибридный код “Maximus”

В этом разделе кратко изложен алгоритм используемого в работе гибридного кода “Maximus”. Гибридные коды являются разновидностью кинетических кодов, в которых на пространственной сетке методом характеристик решается система уравнений Власова-Максвелла. Характеристиками уравнения Власова являются т.н. макрочастицы — участки фазового пространства, движущиеся как единое целое. Физически одна макрочастица соответствует большому количеству реальных частиц. Для учёта этого фактора вводится понятие веса макрочастицы, который учитывается при подсчёте токов и плотностей. Для подавления численных шумов, связанных с малым числом макрочастиц в ячейке (ppc — *particles per cell*), используют макрочастицы конечного размера и вместо числа, обозначающего вес, вводят весовую функцию координаты, чаще всего полиномиальную [31; 34]. Макрочастицы в программе движутся под действием силы Лоренца. Их траектории определяются отношением заряда к массе, при этом вес частицы сокращается и на траекторию не влияет. В дальнейшем для краткости макрочастицы мы будем называть просто частицами.

В коде “Maximus” используется стандартная для гибридных кодов нормировка физических величин, в которой длина задаётся 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 ( $\rho_0$  и  $B_0$ ). Нормировочные параметры рассчитываются в невозмущённой области далеко перед фронтом УВ. В этой нормировке система уравнений Власова-Максвелла выглядит следующим обра-

ЗОМ:

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

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

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

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

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

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

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,  $\nu$  — эффективная частота столкновений электронов с ионами (искусственное сопротивление),  $P_e$  — давление электронов,  $\rho_c$  и  $j_i$  — плотность заряда и тока ионов, усреднённые по ячейке сетки,  $\vec{j}_e$  — плотность тока электронов,  $S(\vec{r}_k)$  — весовая функция.

Гибридный алгоритм включает три основных шага:

- Вычисление токов и плотностей в ячейках, исходя из текущих положений и скоростей частиц.
- Расчёт электромагнитных полей, исходя из найденных токов.
- Ускорение и перемещение частиц в найденных полях.

Одним из важных преимуществ гибридного кода “Maximus” является точное сохранение нулевой  $div \vec{B}$ . Это достигается за счёт сдвинутой декартовой сетки, в которой магнитное поле задаётся на гранях, а электрическое — на рёбрах. Также в коде реализована схема TVD (*total variation diminishing*) для подавления численных осцилляций на разрывах. Схема включает в себя ограничители производной, параболическую реконструкцию магнитного поля в ячейках и решение задачи Римана на границах между ячейками [35–37].

Ударные волны в коде инициализируются методом отражения сверхзвукового потока от проводящей стенки на одной из границ области моделирования. При этом структура 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  $\beta = 8\pi nT/B_0^2$  (задаётся отдельно для каждого сорта частиц); углом наклона начального магнитного поля к нормали  $\theta$ .

Для того, чтобы убедиться в корректности работы кода, было проведено четыре теста: 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 показали адекватную работу кода для задач с известным решением, а два других показали соответствие результатов моделирования ускорения частиц на БУВ наблюдательным данным и результатам работы других кодов. Последний тест интересен тем, что при помощи специально подобранного уравнения состояния электронов удалось добиться корректного результата при моделировании слабых УВ в горячей плазме скоплений галактик.

## Моделирование ударных волн в оболочках остатков сверхновых

Этот раздел посвящён моделированию БУВ с параметрами, характерными для УВ в оболочках остатков сверхновых.

В качестве одного из объектов исследования была выбрана обратная УВ известного остатка сверхновой SN 1987A. Была создана гибридная модель, основанная на доступных наблюдательных данных и теоретических представлениях. Так, число Маха и параметр  $\beta$  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 [38], 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 [39], а зарядовые состояния рассчитаны при помощи кода SUPREMNA [40], предоставленного С.И. Блинниковым и А.В. Ридной. Нейтральная компонента не учитывалась, поскольку она не влияет на динамику БУВ. Таким образом, плаз-

ма эжекты в модельной УВ содержала 20% НII, 20% ОII, 25% SiII 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 ТэВ-ных энергий, и обратная УВ не вносит вклад в гамма-излучение остатка.

Для уточнения закономерностей ускорения частиц в БУВ, обогащённых тяжёлыми слабо заряженными ионами, была разработана упрощённая модель обратной УВ с двухкомпонентным составом: НII и ОII. Варьируя относительное содержание ионов, а также угол  $\theta$ , 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, порожденных тяжёлыми ионами, можно объяснить слабым 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.

Исследованные выше УВ имеют состав, характерный для обратных УВ остатков сверхновых II типа. Отдельный интерес представляет моделирование обратных УВ в сверхновых типа Ia, состоящих преимущественно из элементов тяжелее гелия. Можно показать, что гибридная модель допускает масштабирование, то есть перенормировку на масштабы, связанные с основным элементом. Это позволило провести моделирование УВ с различным углом  $\theta$  в среде, состоящей в основном из OIV, с малой примесью SiII. Было получено, что при угле  $\theta \leq 50^\circ$  происходит диффузионное ускорение частиц обоих сортов. При  $\theta > 50^\circ$  распределения ионов примеси за фронтом УВ оказываются существенно анизотропны и имеют форму, отличную от максвелловской. Этот эффект возникает только в случае малой концентрации примеси (не более 1% по массе). Релаксация ионов примеси к изотропному максвелловскому распре-

делению происходит далее за фронтом УВ посредством раскачки альвеновской ионно-циклотронной неустойчивости.

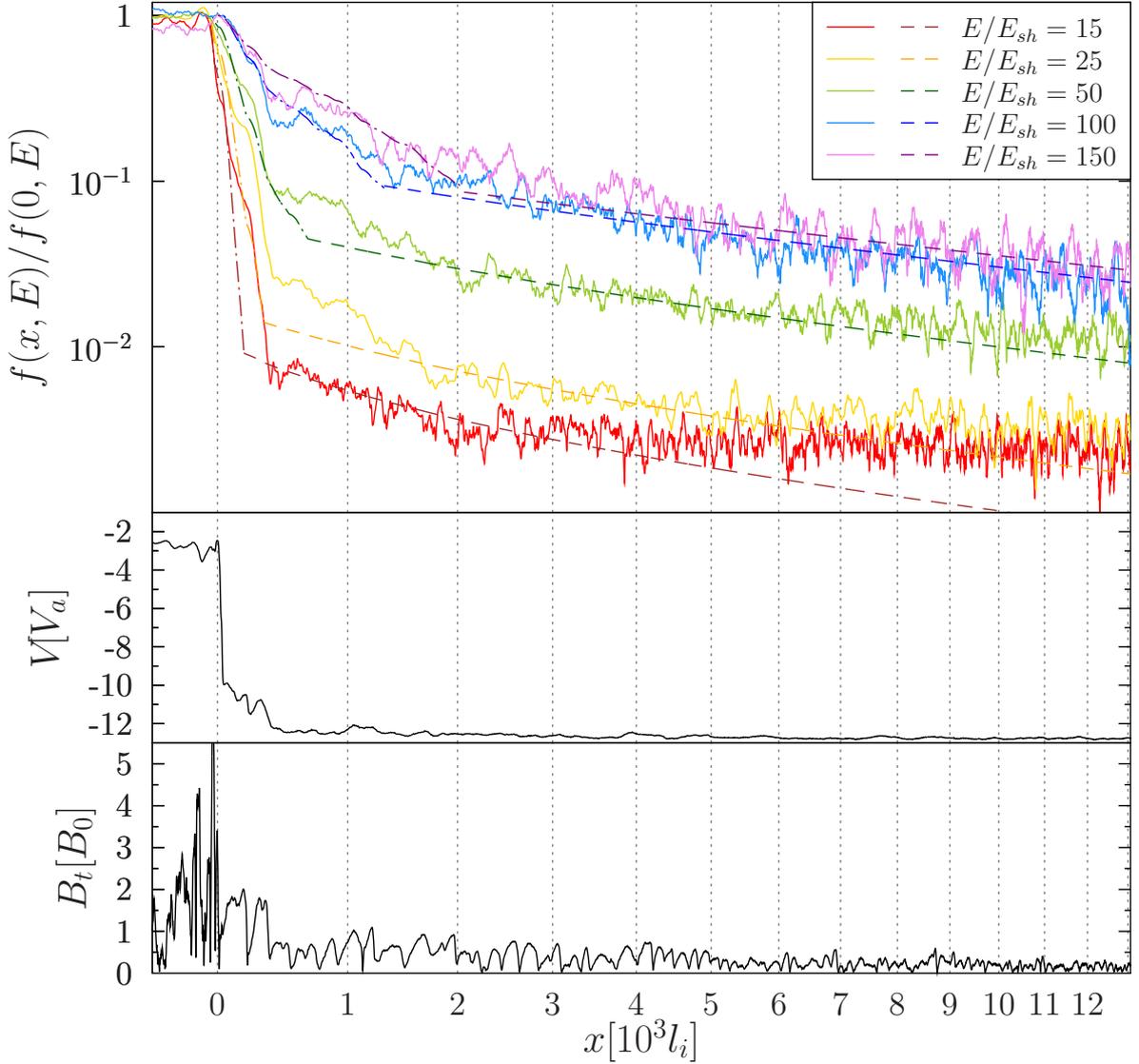


Рисунок 1 — Вверху: смоделированные пространственные функции распределения надтепловых протонов с различной энергией в квазипродольной БУВ. Распределения, полученные в бомовском и белловском приближении, показаны штрих-пунктирными и штриховыми линиями соответствующих цветов. В середине: средняя скорость потока в системе покоя фронта. Внизу: турбулентная составляющая магнитного поля.

Ещё одной задачей, решённой в рамках данной работы, является исследование законы переноса ускоряющихся частиц в турбулентном предвестнике БУВ солнечного состава. Поскольку ресурсоёмкие кинетические коды неспособны проследить ускорение частиц от тепловых до ультрарелятивистских энергий, при моделировании ускорения КЛ часто используются полуаналитические

методы, такие как метод Монте-Карло [14; 22; 41]. Важную роль в полуаналитических моделях играет коэффициент пространственной диффузии, который может быть определён в рамках кинетического моделирования. Так, в работе [29] было проведено гибридное моделирование УВ в чисто водородной плазме. Результирующие распределения ускоренных частиц в пространстве использовались для вычисления коэффициента диффузии протонов с различной энергией  $D(E)$ , однако только в предположении его пространственной однородности, которое выполняется весьма приближённо. Кроме того, авторы не включали в рассмотрение диффузию других сортов частиц. Поэтому их работа допускает уточнение и обобщение.

В данной работе было проведено гибридное моделирование УВ с параметрами, характерными для головной УВ остатка сверхновой. Далее 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 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 боровской 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 функция 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. Сделанные выводы могут быть обобщены на УВ не только в остатках сверхновых, но и в других средах. В качестве примера была также смоделирована УВ в солнечном ветре и показано, что полученные распреде-

ления ускоренных частиц соответствуют наблюдаемым. При этом происходит такая же смена режимов диффузии, как описано выше.

### Моделирование ударных волн в скоплениях галактик

Этот раздел посвящён моделированию БУВ с малым звуковым числом Маха ( $M_s \lesssim 3$ ), возникающих в горячем межгалактическом газе при слиянии скоплений галактик. Было проведено моделирование 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 также 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 результат значим только для чисел Маха, при которых инжекция происходит, но допускает возможность анализа локального состава вещества по распределениям частиц за фронтом УВ. В случае тяжёлых ионов распределения могут быть восстановлены из спектральных линий, полученных при помощи спектрографов высокого разрешения, таких как в будущих миссиях XRISM и ATHENA.

Также по итогам моделирования подтверждён вывод работы [32], 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 содержа-

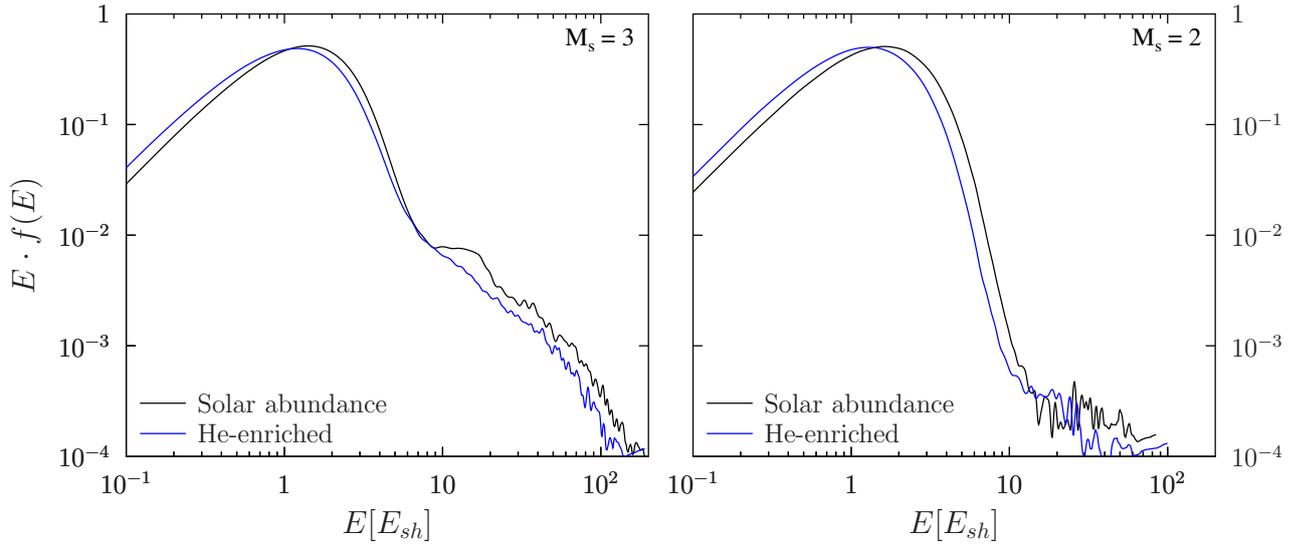


Рисунок 2 — Сравнение функций распределения ионов железа по энергиям за фронтом УВ с солнечным составом и УВ, обогащённых гелием (50% по массе), для звукового числа Маха  $M_s = 3$  (слева) и  $M_s = 2$  (справа).

нием гелия (в исходной работе рассматривались чисто водородные УВ). Кроме того, были построены 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, зеркальная, шланговая, альвеновская ионно-циклотронная) часто приводит к сильной турбулентности в среде с высоким  $\beta$ . В частности, это подтверждается наблюдениями в солнечном ветре [42].

## Моделирование взаимодействия вращательного разрыва с головной ударной волной на границе магнитосферы Земли

В данном разделе приведено описание наблюдений и моделирования прохождения ВР через головную УВ на границе магнитосферы Земли. Взаимодействие различных структур солнечного ветра с головной УВ Земли может вызывать магнитные бури и суббури, приводить к появлению аномалий горячего потока и пересоединению магнитных линий. Наиболее часто с магнитосферой взаимодействуют ВР, приходящие примерно раз в 10-20 минут. ВР представляет собой относительно стабильный токовый слой, внутри которого происходит

поворот поперечных к нормали компонент магнитного поля и скорости потока. При пересечении УВ ток в разрыве может усиливаться, что делает его неустойчивым к пересоединению магнитных линий. Последнее, в свою очередь, может привести к быстрому энерговыделению в магнитосфере и вызвать магнитную суббурю.

Анализ двадцати событий, наблюдаемых спутниками THEMIS/ARTEMIS (выбор и обработку наблюдательных данных осуществляли А.В. Артемьев и И.Ю. Васько), показал, что усиление тока в разрыве при прохождении его через УВ слабо зависит от её числа Маха и угла  $\theta$ , но, по-видимому, эффективнее при наличии в предфронте популяции надтепловых частиц. При этом важную роль в наадиабатическом усилении тока играет утоньшение и усложнение структуры ВР. Для уточнения закономерностей и понимания механизма усиления тока во ВР было проведено пять запусков гибридного кода. Моделирование было проведено в приближении плоского фронта УВ и совпадающих нормалей УВ и ВР. Исследовалось влияние числа Маха, угла  $\theta$  и угла поворота магнитного поля внутри разрыва на эффективность усиления тока.

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 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 УВ, 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 рисунка 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  $\theta < 45^\circ$ .

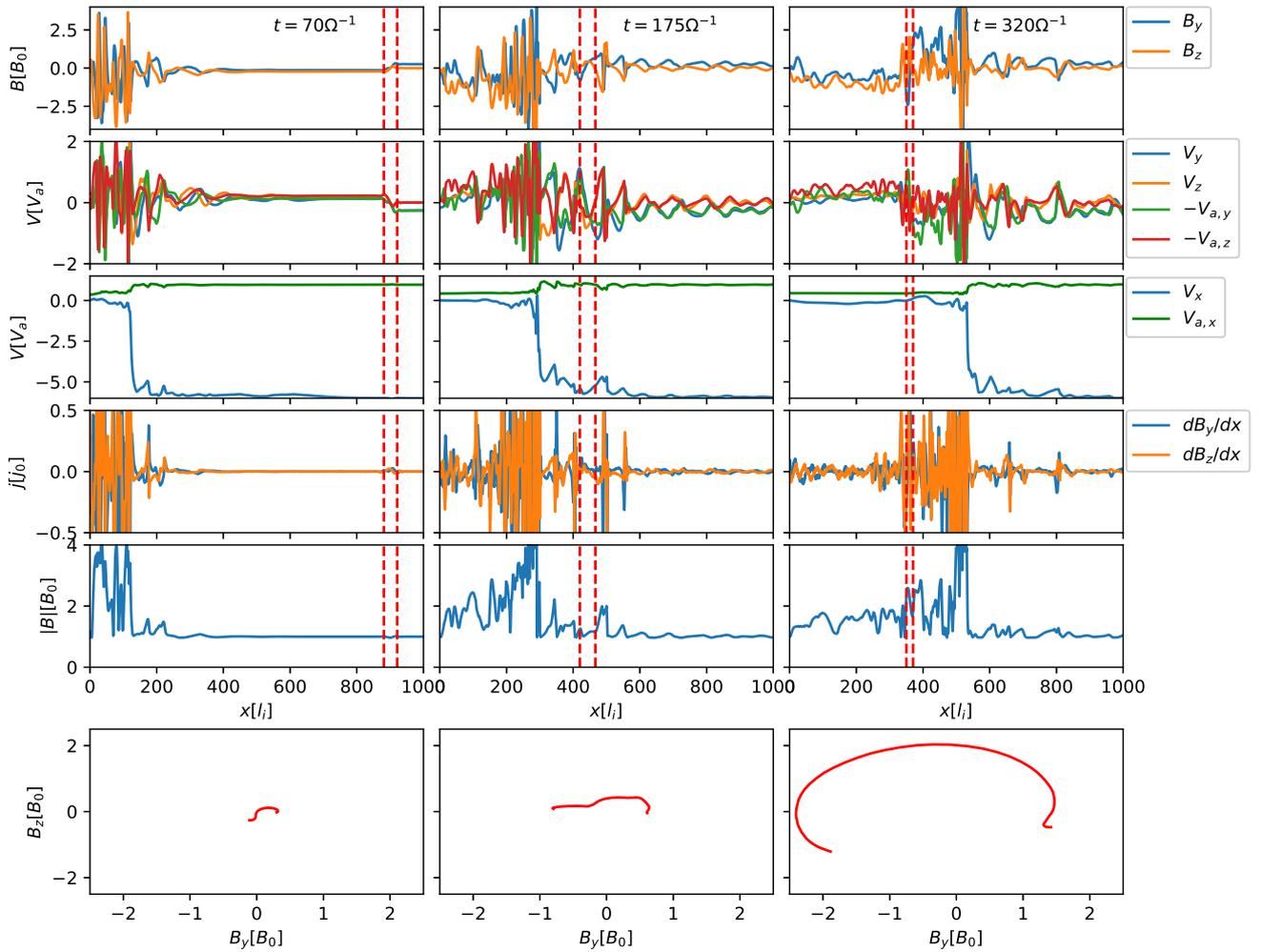


Рисунок 3 — Взаимодействие ВР с квазипродольной УВ в три последовательных момента времени: слева — разрыв далеко перед фронтом УВ, посередине — разрыв в предвестнике, справа — разрыв за фронтом. Сверху вниз: поперечная к нормали компонента магнитного поля, поперечная компонента скорости потока и локальной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

В наблюдательных данных такой закономерности не возникало, поскольку в реальности ускоренные частицы могут приходить на квазиперпендикулярные 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  $\theta$  мало влияют на усиление тока (в пределах квазипродольной конфигурации). Таким образом, можно сделать вывод, что ключевую роль в усилении тока при прохождении ВР через УВ играет его взаимодействие с надтепловыми частицами вблизи фронта.

## Основные результаты работы и заключение

При помощи авторского гибридного кода “Maximus” смоделированы астрофизические УВ с параметрами, характерными для оболочек остатков сверхновых, скоплений галактик, солнечного ветра и 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. Отсюда можно сделать вывод, что обратные ударные волны остатков сверхновых ускоряют преимущественно тяжёлые ионы.
2. Установлено, что существенная (50% по массе, т.е. 6% по числу частиц) примесь тяжёлых, слабо заряженных ионов полностью меняет динамику электромагнитных полей в сверхкритических УВ: поля эффективнее усиливаются и образуют более крупные структуры, а перестройка фронта идёт с меньшей частотой.
3. Квазилинейная теория диффузии аналитически обобщена для ионов с различными зарядом и массой. Установлено, что закон переноса надтепловых частиц в предвестнике фронта УВ 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 был исследован на примере головной ударной волны Земли, но применим также к другим астрофизическим объектам с разрывными течениями, таким как пульсарные туманности.

В процессе работы были существенно улучшены быстродействие и точность гибридного кода, а также оптимизирован и дополнен его интерфейс. Это позволит эффективно продолжить работу по исследованию физики бесстолкновительных ударных волн, ускоренных частиц и неустойчивостей в космической плазме.

## 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.] // *НТВ СПбГПУ*. — 2011. — т. 1. — с. 99–105.
34. *Birdsall C. K., Langdon A. B.* Plasma Physics via Computer Simulation. — 1991.
35. Computational Methods for Astrophysical Fluid Flow / R. Le Veque [et al.]. — Berlin, Heidelberg : Springer, 1998.

36. *Balsara D. S.* Linearized Formulation of the Riemann Problem for Adiabatic and Isothermal Magnetohydrodynamics // *ApJs.* — 1998. — Vol. 116. — P. 119–+.
37. *Balsara D. S.* Second-Order-accurate Schemes for Magnetohydrodynamics with Divergence-free Reconstruction // *ApJs.* — 2004. — Vol. 151. — P. 149–184.
38. *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.
39. *Woosley S. E.* SN 1987A: After the Peak // *ApJ.* — 1988. — Vol. 330. — P. 218.
40. 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.
41. *Ellison D. C., Baring M. G., Jones F. C.* Nonlinear Particle Acceleration in Oblique Shocks // *ApJ.* — 1996. — Vol. 473. — P. 1029–+.
42. *Petrukovich A. A., Chugunova O. M., Shustov P. I.* Low-frequency magnetic variations at the high- $\beta$  Earth bow shock // *Annales Geophysicae.* — 2019. — Vol. 37, no. 5. — P. 877–889.

## Список публикаций по теме диссертации

- A1. Гибридное моделирование бесстолкновительных ударных волн в космической плазме / Ю. А. Кропотина [и др.] // ЖТФ. — 2015. — т. 85, № 2. — с. 73–81.
- A2. Релаксация тяжелых ионов в бесстолкновительных ударных волнах в космической плазме / Ю. А. Кропотина [и др.] // ЖТФ. — 2016. — т. 86, № 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, № 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, no. 012014. — P. 1–6.
- 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. *Kropotina J. A., Levenfish K. P., Bykov A.* Simulation of collisionless shocks in plasmas with high metallicity // J. Phys. Conf. Ser. — 2019. — Vol. 1400, no. 022002. — P. 1–8.
- A7. Shocks and non-thermal particles in clusters of galaxies / A. Bykov [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. Кропотина [и др.] // ЖТФ. — 2020. — т. 90, № 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.