

На правах рукописи

**Комаров Сергей Вячеславович**

Теплопроводность в горячем газе скоплений  
галактик

01.03.02 Астрофизика и звездная астрономия

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва, 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН)

**Научный руководитель:**

доктор физико-математических наук, член-корреспондент Российской академии наук, ИКИ РАН

**ЧУРАЗОВ Евгений Михайлович**

**Официальные оппоненты:**

доктор физико-математических наук, профессор  
заведующий лабораторией астрофизики высоких энергий  
ФГБУН Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе  
Российской академии наук (ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

**БЫКОВ Андрей Михайлович**

доктор физико-математических наук  
заведующий лабораторией Рентгеновской астрономии Солнца,  
главный научный сотрудник  
ФГБУН Физического института им. П.Н. Лебедева  
Российской академии наук (ФИАН)

**КУЗИН Сергей Вадимович**

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение  
«Государственный астрономический институт имени П.К. Штерн-  
берга Московского государственного университета имени М.В. Ло-  
моносова» (ГАИШ МГУ)

Защита диссертации состоится **17 декабря 2018 года в 15 часов**  
на заседании диссертационного совета Д 002.113.02 при Институте  
космических исследований РАН по адресу: Москва, ул. Профсоюз-  
ная, 84/32, ИКИ РАН, подъезд 2 (конференц-зал)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИКИ РАН  
и на сайте <http://www.iki.rssi.ru/diss/2018/komarov.htm>

Автореферат разослан

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 002.113.02

кандидат физико-математических наук

А.Ю. Ткаченко

# Общая характеристика работы

## Актуальность и цели работы

Существенную долю массы скоплений галактик составляет горячая межгалактическая плазма, которая во многом определяет облик скоплений в рентгеновском диапазоне. Физика межгалактической среды оказывается крайне сложной за счет наличия в плазме магнитных полей и разнообразной динамики газа в виде турбулентности, ударных волн и активности ядер центральных галактик. При этом характерные масштабы различных физических процессов различаются на многие порядки величин. Кинетические явления физики плазмы на масштабах ларморовских радиусов заряженных частиц регулируют процессы переноса: диффузию, теплопроводность и вязкость. В свою очередь, процессы переноса определяют крупномасштабные свойства скоплений, такие как, например, устойчивость холодных ядер скоплений, структура турбулентного каскада, радиальные профили температуры и распределение химических элементов за счет гравитационной седиментации.

Данная работа концентрируется на задаче о теплопроводности межгалактической плазмы. Важная роль теплопроводности в скоплениях галактик была впервые идентифицирована, когда выяснилось, что стремительное охлаждение плотных ядер скоплений за счет тормозного излучения может приводить к гравитационной неустойчивости и образованию так называемых потоков охлаждения (Ruszkowski & Begelman, 2002; Zakamska & Narayan, 2003; Voigt & Fabian, 2004; Dennis & Chandran, 2005). Последующие наблюдения скоплений продемонстрировали, что температура холодных ядер существенно превышает теоретические оценки, и возник вопрос о механизмах нагрева центров скоплений. Теплопроводность межгалактической плазмы, определяемая кулоновскими столкновениями электронов, достаточно высока из-за высокой температуры плазмы (тепловые скорости частиц в скоплениях порядка вириальных). Поэтому в случае, если теплопроводность не подавлена, например, плазменными неустойчивостями, теплообмен между ядрами и более горячими внешними частями скоплений способен разрешить проблему отсутствия потоков охлаждения. Тем не менее, в межгалактической среде наблюдается многообразие структур с существенными флуктуациями температуры на различных масштабах: как плавные вариации порядка 10-15% на масштабах 100 кпк (Markevitch *et al.*, 2003; Wang *et al.*, 2016), так и резкие градиен-

ты на шкалах, короче кулоновской длины свободного пробега (1-10 кпк; Markevitch *et al.* 2000; Ettore & Fabian 2000; Vikhlinin *et al.* 2001; Markevitch & Vikhlinin 2007; Ichinohe *et al.* 2015). Подобные структуры могли сохраниться в скоплениях лишь если теплопроводность в них существенно подавлена по сравнению с кулоновской. В данной работе рассматривается несколько эффектов физики плазмы, приводящих к такому подавлению.

В первой части работы рассматривается магнитогидродинамический эффект, связанный с вмороженностью силовых линий магнитного поля в турбулентную плазму. Адвективный перенос силовых линий наряду с переносом пространственного распределения температуры движениями газа приводит к их взаимной корреляции. В случайном турбулентном поле скоростей корреляция проявляется в статистически наиболее вероятной перпендикулярной ориентации градиентов температуры и силовых линий, которая препятствует обмену тепла вдоль градиента. Такой эффект помогает объяснить наблюдаемые флуктуации температуры на масштабах турбулентных вихрей (100 кпк). Основные вычисления проводятся аналитически на основе упрощенной модели поля скоростей, затем результаты сравниваются с численным моделированием турбулентности в скоплениях и демонстрируется качественное согласие с теоретической моделью.

На ларморовских масштабах плазма скоплений подвержена ряду кинетических неустойчивостей, которые за счет производимых ими магнитных полей способны повлиять на перенос тепловых электронов. Одной из таких неустойчивостей является зеркальная неустойчивость, которая возникает, если степень анизотропии давления плазмы достаточно велика (Hasegawa, 1969). Подобная анизотропия создается, когда турбулентные движения локально приводят к растяжению силовых линий магнитного поля и его усилению (например, Schekochihin & Cowley, 2006). Так как ларморовская частота обращения электронов в магнитных полях крайне велика по сравнению с частотой кулоновских соударений электронов, частицы должны сохранять свой магнитный момент, а значит их компонента скорости, перпендикулярная магнитному полю, должна расти с ростом магнитной индукции, что и приводит к анизотропии давления. Во второй части диссертации изучается влияние зеркальной неустойчивости на теплопроводность плазмы. Магнитные флуктуации, создаваемые зеркальной неустойчивостью, имеют вид магнитных бутылок, поэтому они способны на долгое время запирают электроны между областями сильного магнитного поля посредством магнит-

ного зеркалирования (Klepach & Ptuskin, 1995; Chandran & Cowley, 1998; Chandran *et al.*, 1999; Malyshkin & Kulsrud, 2001; Albright *et al.*, 2001), что приводит к уменьшению эффективной теплопроводности вдоль силовых линий магнитного поля. В работе на основе данных численного моделирования рассчитана степень подобного подавления.

В последней части работы обсуждается возможное наблюдательное проявление процессов микрофизики плазмы скоплений в виде поляризации тормозного излучения горячих тепловых электронов. Поляризация возникает в случае, если распределение электронов анизотропно. Небольшая анизотропия давления электронов возникает за счет сохранения адиабатических инвариантов плазмы в процессе турбулентных движений газа. Наличие в плазме тепловых потоков также вносит вклад в анизотропию давления. На основе численного моделирования холодных фронтов в работе делается оценка максимально возможной поляризации тормозного излучения. Наблюдение подобного эффекта позволит произвести независимую оценку эффективной длины свободного пробега электронов в скоплениях — одного из ключевых параметров плазмы, измерение которого из наблюдений представляет собой значительную трудность.

## Научная новизна

Все результаты, представленные к защите, являются новыми.

Впервые на основе аналитической модели показано, что случайное турбулентное поле скоростей в идеально проводящей плазме в среднем приводит к локально ортогональной ориентации силовых линий магнитного поля и градиентов температуры и подавлению тепловых потоков вдоль градиентов. Продемонстрировано, что подобный эффект также воспроизводится при глобальном численном моделировании скоплений галактик.

Впервые проанализировано влияние зеркальной неустойчивости на теплопроводность в плазме скоплений галактик. Продемонстрирована универсальность эффекта подавления теплопроводности неустойчивостью в слабостолкновительной замагниченной турбулентной плазме.

Впервые предложен способ оценки длины свободного пробега электронов из наблюдений поляризации теплового тормозного излучения в скоплениях галактик.

## Научная и практическая ценность

Понимание степени эффективности процессов теплообмена в скоплениях галактик важно с точки зрения как интерпретации наблюдательных данных, так и построения теоретических или численных моделей скоплений. Демонстрация существенного подавления теплопроводности межгалактической плазмы позволит исключить роль теплообмена в поддержании устойчивости холодных ядер скоплений, позволив сконцентрироваться на альтернативных сценариях: в первую очередь, на нагреве ядер за счет активности центральных галактик. В то же время низкая эффективность теплопроводности может объяснить наличие в межгалактическом газе существенных флуктуаций температуры в широком диапазоне пространственных масштабов.

Величина коэффициента теплопроводности непосредственно влияет на радиальные профили температуры скоплений. Правильное моделирование радиальных профилей температуры скоплений необходимо для подсчета масс скоплений — одного из методов оценки космологических параметров.

Ограничения на эффективный коэффициент теплопроводности также необходимы для более точного глобального численного моделирования скоплений: например, моделирования космологического формирования скоплений или взаимодействия центральных галактик и межгалактической среды.

В работе также демонстрируется важная роль кинетических эффектов физики плазмы в скоплениях на основе рассмотрения переноса электронов в присутствии магнитных флуктуаций, создаваемых зеркальной неустойчивостью. Показывается связь микрофизики плазмы с крупномасштабными параметрами скоплений, такими как глобальное распределение температуры.

Учитывая недоступность рентгеновских наблюдений пространственных масштабов, существенно меньших длины свободного пробега тепловых частиц, предложенный метод оценки столкновительности электронов по степени поляризации тормозного излучения тепловых электронов представляет собой существенную ценность.

## Основные положения, выносимые на защиту

1. Показано, что в турбулентном поле скоростей межгалактической плазмы на пространственных масштабах турбулентных

вихрей возникает корреляция между градиентами температуры и замороженным магнитным полем за счет одновременного переноса как температуры, так и силовых линий магнитного поля турбулентными движениями газа. За характерное время оборота турбулентных вихрей ортогональная ориентация градиентов температуры и силовых линий становится наиболее вероятной, что препятствует локальному теплообмену, несмотря на одновременный рост средней величины градиентов. Продемонстрировано, что в областях с наибольшими градиентами температуры локальное подавление теплового потока также должно быть наибольшим. Получена связь между темпом роста средней плотности магнитной энергии и темпом релаксации флуктуаций температуры теплопроводностью. Основные теоретические выводы демонстрируют качественное согласие с результатами численного моделирования турбулентности в скоплениях галактик.

2. На основе анализа результатов гибридного кинетического численного моделирования зеркальной неустойчивости в плазме с высоким  $\beta$ , характерной для межгалактической среды, показано, что неустойчивость приводит к подавлению коэффициента теплопроводности в  $\sim 5$  раз. Подавление происходит за счет адиабатического взаимодействия тепловых электронов с продольными флуктуациями индукции магнитного поля (магнитными зеркалами), создаваемыми неустойчивостью. Полученный результат не зависит от крупномасштабных свойств межгалактической среды и, вероятно, является универсальным для любой турбулентной замагниченной плазмы с  $\beta \gg 1$ .
3. Показано, что упорядоченные крупномасштабные движения межгалактической плазмы могут приводить к наличию малой поляризации теплового тормозного излучения плазмы за счет возникающей в ходе движений малой анизотропии давления электронов. Подобная анизотропия давления неизбежно возникает при сохранении адиабатических инвариантов плазмы. С помощью кода, написанного автором работы, выполнено магнитогидродинамическое моделирование холодных фронтов в скоплениях галактик. По результатам моделирования произведена оценка величины анизотропии давления электронов,

созданной обтеканием холодного плотного облака газа горячей разряженной плазмой. Затем построена карта поляризации теплового тормозного излучения. Хотя полученная характеристическая степень поляризации довольно мала ( $\sim 0.1\%$ ), она является независимой мерой столкновительности электронов в плазме скоплений, одного из ключевых параметров плазмы, прямые измерения которого на данный момент невозможны.

## Список публикаций по теме диссертации

Результаты работы полностью содержатся в статьях, опубликованных в рецензируемых журналах:

1. *Suppression of local heat flux in a turbulent magnetized intracluster medium*  
S. Komarov, E. Churazov, A. Schekochihin, J. ZuHone, 2014, MNRAS, 440, 1153
2. *Thermal conduction in a mirror-unstable plasma*  
S. Komarov, E. Churazov, A. Schekochihin, M. Kunz, 2016, MNRAS, 460, 467
3. *Polarization of thermal bremsstrahlung emission due to electron pressure anisotropy*  
S. Komarov, I. Khabibullin, E. Churazov, A. Schekochihin, 2016, MNRAS, 461, 2162

## Апробация работы

Основные результаты диссертации были представлены на семинарах отдела астрофизики высоких энергий ИКИ РАН 2013–2018 гг., международных конференциях:

1. *9th Plasma Kinetics Working Group Meeting*, Институт им. Вольфганга Паули, Вена, 1–10 августа 2016 г.
2. *Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра*, ИКИ РАН, Москва, 21–24 декабря 2015 г.

3. *8th Plasma Kinetics Working Group Meeting*, Институт им. Вольфганга Паули, Вена, 19–29 июля 2015 г.
4. *MPA Institute Seminar*, Институт им. Макса Планка, Мюнхен, 20 июля 2015 г.
5. *Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра*, ИКИ РАН, Москва, 22–25 декабря 2014 г.
6. *Cosmic Magnetic Fields*, Астрономическая обсерватория Ягеллонского университета, Краков, 17–21 октября, 2014 г.
7. *Cosmology and relativistic astrophysics (Zeldovich-100)*, ИКИ РАН, Москва, 16–20 июня 2014 г., постерный доклад
8. *7th Plasma Kinetics Working Group Meeting*, Институт им. Вольфганга Паули, Вена, 22–30 марта 2014 г.
9. *Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра*, ИКИ РАН, Москва, 23–26 декабря 2013 г.
10. *High Energy Astrophysics Group Seminar*, Институт им. Макса Планка, Мюнхен, 7 июня 2013 г.

## Объем диссертации

Диссертация состоит из пяти глав, общий объем которых составляет 118 страниц, включая 36 рисунков и одну таблицу. Первые четыре главы имеют отдельные списки цитируемой литературы, представленные в конце каждой главы. Общее количество цитируемой литературы составляет 213 публикаций.

## Содержание работы

**В первой главе (Введение)** описывается актуальность работы, общие сведения о скоплениях галактик, а также рассматриваются основные физические процессы, связанные с тематикой работы. Сначала объясняется роль скоплений галактик в космологии. Затем обсуждаются наблюдательные свойства скоплений в различных диапазонах длин электромагнитных волн. Описываются основные

источники турбулентности в скоплениях. После этого описывается роль магнитных полей в скоплениях: их наблюдательные проявления и влияние на физику межгалактического газа. Объясняются трудности чисто магнитогидродинамического описания межгалактического газа: в процессе турбулентного перемешивания происходит генерация анизотропии давления газа, что, в свою очередь, приводит к развитию ряда неустойчивостей на ларморовских масштабах. Описываются механизмы развития шланговой и зеркальной неустойчивостей и их возможное влияние на динамику газа и процессы переноса частиц. Затем в общих чертах обсуждается теплопроводность в горячей плазме: кулоновские соударения, спитцеровская теплопроводность (Spitzer, 1962) и теплопроводность Брагинского (Braginskii, 1965), диффузия частиц в запутанных магнитных полях. В конце первой главы приведены выносимые на защиту положения диссертационной работы, список публикаций по теме диссертации, апробация работы и описан личный вклад автора.

**Во второй главе** описывается эффект локального подавления теплопроводности в турбулентной плазме с замороженным магнитным полем. Вначале предлагается качественное описание задачи на примере эволюции локального градиента температуры и силовой линии магнитного поля в постоянном двухмерном сходящемся потоке и показывается, что эффект постепенной ориентации силовых линий магнитного поля перпендикулярно градиенту температуры преобладает над усилением градиента температуры по мере сближения изотемпературных плоскостей, приводя в итоге к уменьшению теплообмена между плоскостями. После этого демонстрируется аналогия с драпировкой магнитных полей вдоль холодных фронтов в скоплениях галактик (см., например, Asai *et al.*, 2007; Churazov & Inogamov, 2004; Roediger *et al.*, 2011; Lyutikov, 2006). Затем приводится численный пример: моделирование эволюции силовых линий магнитного поля и пассивного скаляра, описывающего температуру, в двухмерном несжимаемом дельта-коррелированном по времени поле скоростей. Наглядно демонстрируется ориентация магнитных полей преимущественно вдоль контуров постоянной температуры.

После качественной части строится аналитическая модель, в которой производится усреднение теплового потока по различным случайным реализациям поля скоростей. Для описания поля скоростей используется модель Казанцева-Крайчнана (Kazantsev, 1968): линейное изотропное несжимаемое поле скоростей с нулевым временем корреляции. Эффекты влияния магнитных полей на поле скоростей пренебрегаются, т.е. поле считается достаточно слабым. Такое мак-

симально упрощенное стохастическое поле скоростей позволяет решить задачу до конца аналитически. В процессе решения задачи устанавливается степенная зависимость среднеквадратичного потока тепла вдоль магнитного поля (параллельного) от средней плотности энергии магнитного поля: по мере усиления магнитного поля турбулентностью постепенная ортогонализация силовых линий и градиентов температуры приводит к уменьшению теплового потока. В результате расчета статистики магнитных полей и градиентов температуры показывается, что областям плазмы с наибольшими градиентами соответствуют наибольшие углы (стремящиеся к прямым) между градиентами и магнитными полями, а подавление локального параллельного теплового потока в областях с существенными градиентами температуры оказывается максимальным. Такой контринтуитивный результат, вероятно, способен объяснить долговременное существование флуктуаций температуры на масштабах порядка 100 кпк в скоплениях галактик (вне плотных ядер).

С помощью численных расчетов обосновывается справедливость приближения нулевого времени корреляции поля скоростей: конечное время корреляции не меняет общую картину описанного эффекта.

Приводится сравнение результатов теоретических расчетов с данными современного крупномасштабного численного моделирования турбулентности в скоплениях из работы ZuHone *et al.* (2013). По данным моделирования строятся аналогичные совместные функции распределения магнитных полей и градиентов температуры и демонстрируется их качественное сходство с аналитической моделью: в областях с большими градиентами температур по-прежнему обнаруживается преимущественно перпендикулярная ориентация градиентов и магнитных полей и существенное подавление теплообмена (рис. 1).

В конце второй главы обсуждается справедливость используемых в теоретической модели приближений: несжимаемости газа, отсутствия стратификации, определенного соотношения характерных пространственных и временных масштабов, пренебрежения силами Лоренца. Затем подводятся промежуточные выводы. В приложении к главе приводится полный расчет совместной функции распределения магнитных полей и градиентов температуры.

**В третьей главе** рассматривается влияние зеркальной неустойчивости на теплопроводность в межгалактической среде. Зеркальная неустойчивость возникает вследствие анизотропии давления плазмы (Hasegawa, 1969). Подобная анизотропия развивается, ес-

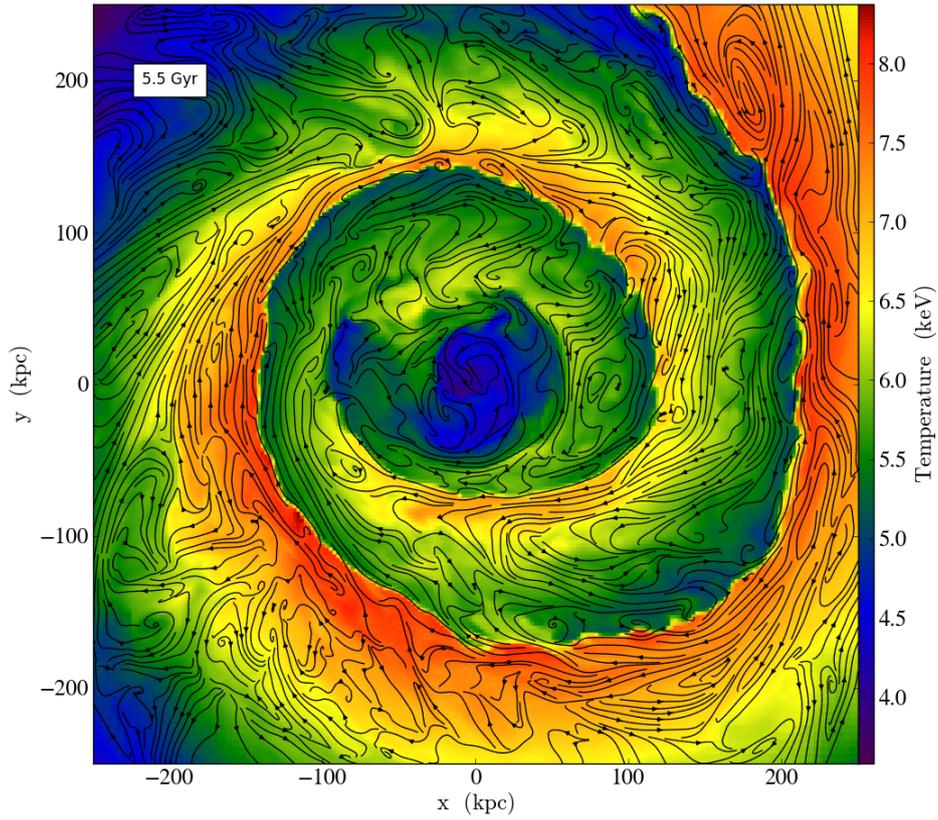


Рис. 1: Результаты численного моделирования турбулентности в скоплениях галактик из статьи *ZuHone et al. (2013)*, используемые для сравнения с теоретическими результатами, полученными в работе. Цветом показана температура газа, конурами — силовые линии магнитного поля. Хорошо видно, что силовые линии преимущественно ориентированы вдоль поверхностей постоянной температуры.

ли в турбулентной плазме ларморовский радиус ионов оказывается существенно меньше кулоновской длины свободного пробега (в межгалактической среде они различаются более чем на 10 порядков величины). В этом случае сохранение адиабатических инвариантов приводит к образованию дисбаланса между перпендикулярной и параллельной (относительно направления магнитного поля) тепловыми энергиями ионов, что, в свою очередь, приводит к развитию зеркальной неустойчивости, если разница этих энергий положительна (это происходит, когда локальное магнитное поле усиливается турбулентностью). Во введении к третьей главе объясняется, что зеркальная неустойчивость развивается на масштабах, крайне малых по сравнению с кулоновской длиной свободного пробега тепловых электронов, и образует продольные магнитные флуктуации, имеющие форму «магнитных бутылок» (Kunz *et al.*, 2014). Такие магнитные возмущения способны запирают часть электронов между областями сильного поля («магнитными зеркалами»), частично подавляя теплопроводность (Klepach & Ptuskin, 1995; Chandran & Cowley, 1998; Chandran *et al.*, 1999; Malyshkin & Kulsrud, 2001; Albright *et al.*, 2001).

Далее описывается одномерная модель диффузии электронов в магнитных зеркалах при наличии небольшого изотропного рассеяния, связанного с кулоновскими соударениями (такого, что кулоновская длина свободного пробега много больше расстояния между магнитными зеркалами), выводится соответствующее кинетическое уравнение Больцмана и эквивалентные ему уравнения движения частиц, необходимые для решения кинетического уравнения методом Монте-Карло. В уравнениях движения столкновения описываются белым шумом с нулевым временем корреляции, т.е. угол орбиты частицы за счет кулоновского рассеяния меняется плавно. Показывается, что в подавление теплопроводности вносят вклад два эффекта. Во-первых, часть электронов оказывается захвачена в магнитных ловушках. Во-вторых, свободные частицы в конусе потерь за счет столкновений постепенно диффундируют из конуса потерь и становятся захваченными, меняя направление своего движения, за время, существенно меньшее времени пролета кулоновской длины свободного пробега (т.е. времени, за которое частица разворачивается за счет столкновений в отсутствие зеркал). Таким образом, эффективная длина свободного пробега свободных частиц оказывается значительно меньше кулоновской.

Затем описывается численное моделирование зеркальной неустойчивости гибридным кинетическим кодом из работы Kunz *et al.* (2014).

Из данных моделирования извлекается несколько характерных силовых линий магнитного поля достаточной длины. Приводятся ключевые свойства зеркальных флуктуаций вдоль силовых линий, в первую очередь их негауссовость — функция распределения величины магнитного поля имеет ограниченный носитель. Благодаря тому, что функция распределения не обладает длинным «хвостом», в котором находятся самые сильные магнитные зеркала, а вид флуктуаций скорее напоминает синусоиду, эффективность запыриания электронов оказывается умеренной, как впоследствии подтвердят численные расчеты.

После этого описываются результаты решения уравнения Больцмана методом Монте-Карло. Для наиболее характерной для межгалактической среды стадии развития зеркальной неустойчивости итоговое подавление коэффициента диффузии электронов в пределе больших (по сравнению с характерным размером магнитных зеркал) кулоновских длин свободного пробега оказывается порядка  $1/10$ . Демонстрируется согласие полученной в данном пределе оценки с результатом Chandran & Cowley (1998). Затем обсуждается физический механизм подавления диффузии. Анализ траекторий частиц с помощью автокорреляционной функции и формулы Тэйлора-Кубо показывает, что подавление обеспечивается двумя процессами: захватом части электронов между магнитными зеркалами и уменьшением эффективной длины свободного пробега пролетных частиц за счет постепенного рассеяния из конуса потерь.

Важно отметить, что теплопроводность подавляется магнитными зеркалами в меньшей степени, чем диффузия, так как теплопроводность представляет собой совокупность пространственного переноса частиц и энергетической диффузии в результате того, что частицы обмениваются энергией при столкновениях. Магнитные зеркала подавляют лишь пространственный перенос. С помощью некоторых упрощений в работе получено, что теплопроводность подавлена примерно в два раза слабее диффузии, т.е. итоговый коэффициент подавления теплопереноса оказывается порядка  $1/5$ .

Также делается оценка эффективности подавления теплопроводности крупномасштабными магнитными зеркалами, образуемыми турбулентными движениями межгалактического газа. Показано, что такие зеркала неэффективны, потому что их характерный масштаб существенно превышает кулоновскую длину свободного пробега электронов.

В заключительной части третьей главы обсуждаются основные результаты, а также справедливость некоторых упрощений, исполь-

зованных при решении задачи.

**В четвертой главе** обсуждается одно из возможных наблюдательных проявлений микрофизики межгалактической плазмы — поляризация теплового тормозного излучения, вызванная анизотропией давления электронов. Источником анизотропии может быть либо эволюция магнитных полей в некотором поле скоростей за счет сохранения адиабатических инвариантов (Chew *et al.*, 1956; Kulsrud, 1964), либо тепловые потоки. Анизотропия электронов приводит к ненулевой поляризации тормозного излучения (см. пример солнечных вспышек в Haug, 1972), если поле скоростей вдоль луча зрения является упорядоченным, иначе различные направления поляризации, вызванные случайными движениями газа, взаимоуничтожатся после интегрирования вдоль луча зрения. Степень анизотропии давления линейно связана с длиной свободного пробега электронов, что может позволить по наблюдениям поляризации оценить столкновительность электронов или, по крайней мере, установить верхний предел на их длину свободного пробега в случае отсутствия наблюдаемой поляризации для заданной чувствительности прибора.

Одним из подходящих примеров упорядоченных потоков газа в скоплениях галактик являются холодные фронты, в которых по мере движения холодного плотного облака газа (связанного с крупной галактикой или группой галактик) сквозь горячую межгалактическую среду происходит обтекание холодного газа горячей межгалактической плазмой (см., например, Markevitch & Vikhlinin, 2007). В результате обтекания на границе раздела горячей и холодной плазмы силовые линии магнитного поля испытывают растяжение. Усиление магнитного поля, в свою очередь, приводит к росту перпендикулярных (локальному магнитному полю) компонент скоростей электронов в результате сохранения их магнитных моментов и образованию анизотропии.

Сначала описывается теоретическая модель задачи: выводятся уравнения на степень анизотропии давления электронов и ионов в слабостолкновительной плазме в присутствии движений газа и тепловых потоков, делается качественная оценка соответствующих членов уравнения, обсуждается роль неустойчивостей. В отличие от ионов, электронная анизотропия оказывается слишком мала для развития электронных неустойчивостей. Таким образом, для ее оценки возможно использовать магнитогидродинамическое моделирование холодных фронтов, а затем вычислить анизотропию электронов, зная поле скоростей и распределение тепловых потоков. Далее выводится связь анизотропии функции распределения и поляризации

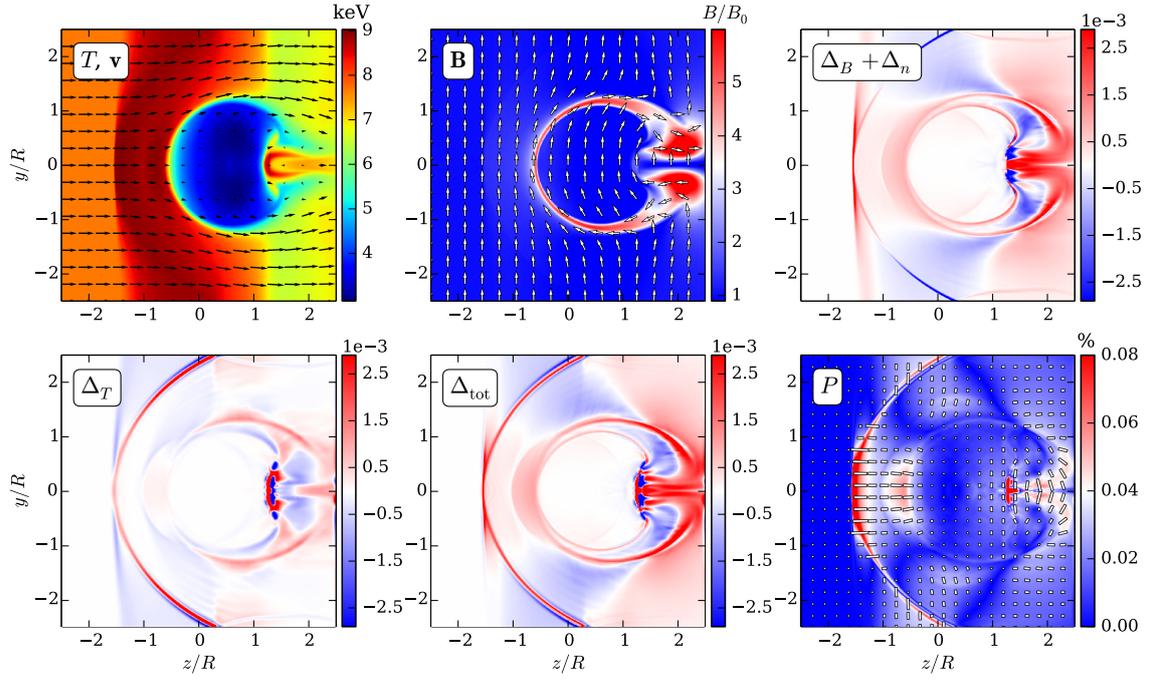


Рис. 2: Симуляция холодного фронта с однородным начальным магнитным полем вдоль оси  $y$ . Все части рисунка, за исключением нижней правой, представляют собой центральные  $yz$  поперечные сечения вычислительной области в момент времени  $t \approx 0.3$  гигалет. Вверху слева показана карта температуры (цвет) и поле скоростей (стрелки). Магнитное поле  $\mathbf{B}$  показано в верхней центральной части рисунка, где цветом указана его величина, стрелками — направление. Различные компоненты анизотропии электронного давления и полная электронная анизотропия показаны в верхней правой, нижней левой и центральной нижней частях рисунка. Нижняя правая часть изображает карту поляризации для наблюдателя вдоль луча зрения (ось  $x$ ).

тормозного излучения, показывается, что максимальная поляризация достигается для надтепловых электронов. Качественные оценки дают малую степень поляризации порядка 0.1%.

После этого делается оценка поляризации тормозного излучения на основе аналитической модели драпировки магнитного поля в процессе обтекания плазмой твердой сферы без учета вклада тепловых потоков. Результат согласуется с полученной ранее качественной оценкой.

В основной части главы 4 выполняется магнитогидродинамическое моделирование холодных фронтов для разных начальных конфигураций магнитного поля: однородного поля, ориентированного

перпендикулярно направлению движения холодного облака, и случайного поля с характерным масштабом в несколько раз меньше размера облака. Демонстрируется, что основной вклад в поляризацию вносит растяжение силовых линий магнитного поле потоком газа, в то время как вклад тепловых потоков мал. Идентифицируется несколько областей пространства, в которых наблюдается поляризация: на границе раздела холодного и горячего газов, позади холодного облака за счет растяжения силовых линий турбулентными вихрями, а также на ударной волне перед холодным облаком за счет сжатия газа (и соответствующего усиления тангенциальной компоненты магнитного поля). Характерная степень поляризации в каждой области оказывается порядка 0.1% (рис. 2).

**Глава 5** представляет собой заключение, в котором резюмируются основные результаты работы.

## Список литературы

- ALBRIGHT, B. J., CHANDRAN, B. D. G., COWLEY, S. C. & LOH, M. 2001 Parallel heat diffusion and subdiffusion in random magnetic fields. *Phys. Plasmas* **8**, 777–787.
- ASAI, N., FUKUDA, N. & MATSUMOTO, R. 2007 Three-dimensional Magnetohydrodynamic Simulations of Cold Fronts in Magnetically Turbulent ICM. *ApJ* **663**, 816–823.
- BRAGINSKII, S. I. 1965 Transport Processes in a Plasma. *Reviews of Plasma Physics* **1**, 205.
- CHANDRAN, B. D. G. & COWLEY, S. C. 1998 Thermal Conduction in a Tangled Magnetic Field. *Phys. Rev. Lett.* **80**, 3077–3080.
- CHANDRAN, B. D. G., COWLEY, S. C., IVANUSHKINA, M. & SYDORA, R. 1999 Heat Transport Along an Inhomogeneous Magnetic Field. I. Periodic Magnetic Mirrors. *ApJ* **525**, 638–650.
- CHEW, G. F., GOLDBERGER, M. L. & LOW, F. E. 1956 The Boltzmann Equation and the One-Fluid Hydromagnetic Equations in the Absence of Particle Collisions. *Proc. R. Soc. A* **236**, 112–118.
- CHURAZOV, E. & INOGAMOV, N. 2004 Stability of cold fronts in clusters: is magnetic field necessary? *MNRAS* **350**, L52–L56.

- DENNIS, T. J. & CHANDRAN, B. D. G. 2005 Turbulent Heating of Galaxy-Cluster Plasmas. *ApJ* **622**, 205–216.
- ETTORI, S. & FABIAN, A. C. 2000 Chandra constraints on the thermal conduction in the intracluster plasma of A2142. *MNRAS* **317**, L57–L59.
- HASEGAWA, A. 1969 Drift mirror instability of the magnetosphere. *Phys. Fluids* **12**, 2642–2650.
- HAUG, E. 1972 Polarization of Hard X-Rays from Solar Flares. *Sol. Phys.* **25**, 425–434.
- ICHINOHE, Y., WERNER, N., SIMIONESCU, A., ALLEN, S. W., CANNING, R. E. A., EHLERT, S., MERNIER, F. & TAKAHASHI, T. 2015 The growth of the galaxy cluster Abell 85: mergers, shocks, stripping and seeding of clumping. *MNRAS* **448**, 2971–2986.
- KAZANTSEV, A. P. 1968 Enhancement of a Magnetic Field by a Conducting Fluid. *Soviet Phys. JETP* **26**, 1031.
- KLEPACH, E. G. & PTUSKIN, V. S. 1995 Propagation of cosmic rays in a medium with magnetic traps. *Astron. Lett.* **21**, 411–417.
- KULSRUD, R. 1964 General Stability Theory in Plasma Physics. In *Advanced Plasma Theory* (ed. M. N. Rosenbluth), p. 54. Proceedings of the International School of Physics "Enrico Fermi Course XXV, Academic Press, New York.
- KUNZ, M. W., SCHEKOCHIHIN, A. A. & STONE, J. M. 2014 Firehose and Mirror Instabilities in a Collisionless Shearing Plasma. *Physical Review Letters* **112** (20), 205003.
- LYUTIKOV, M. 2006 Magnetic draping of merging cores and radio bubbles in clusters of galaxies. *MNRAS* **373**, 73–78.
- MALYSHKIN, L. & KULSRUD, R. 2001 Transport Phenomena in Stochastic Magnetic Mirrors. *ApJ* **549**, 402–415.
- MARKEVITCH, M., MAZZOTTA, P., VIKHLININ, A., BURKE, D., BUTT, Y., DAVID, L., DONNELLY, H., FORMAN, W. R., HARRIS, D., KIM, D.-W., VIRANI, S. & VRTILEK, J. 2003 Chandra Temperature Map of A754 and Constraints on Thermal Conduction. *ApJ* **586**, L19–L23.

- MARKEVITCH, M., PONMAN, T. J., NULSEN, P. E. J., BAUTZ, M. W., BURKE, D. J., DAVID, L. P., DAVIS, D., DONNELLY, R. H., FORMAN, W. R., JONES, C., KAASTRA, J., KELLOGG, E. & KIM, D.-W. 2000 Chandra Observation of Abell 2142: Survival of Dense Subcluster Cores in a Merger. *ApJ* **541**, 542–549.
- MARKEVITCH, M. & VIKHLININ, A. 2007 Shocks and cold fronts in galaxy clusters. *Phys. Rep.* **443**, 1–53.
- ROEDIGER, E., BRÜGGEN, M., SIMIONESCU, A., BÖHRINGER, H., CHURAZOV, E. & FORMAN, W. R. 2011 Gas sloshing, cold front formation and metal redistribution: the Virgo cluster as a quantitative test case. *MNRAS* **413**, 2057–2077.
- RUSZKOWSKI, M. & BEGELMAN, M. C. 2002 Heating, Conduction, and Minimum Temperatures in Cooling Flows. *ApJ* **581**, 223–228.
- SCHEKOCHIHIN, A. A. & COWLEY, S. C. 2006 Turbulence, magnetic fields, and plasma physics in clusters of galaxies. *Phys. Plasmas* **13** (5), 056501.
- SPITZER, L. 1962 *Physics of Fully Ionized Gases*. Interscience, New York.
- VIKHLININ, A., MARKEVITCH, M. & MURRAY, S. S. 2001 A Moving Cold Front in the Intergalactic Medium of A3667. *ApJ* **551**, 160–171.
- VOIGT, L. M. & FABIAN, A. C. 2004 Thermal conduction and reduced cooling flows in galaxy clusters. *MNRAS* **347**, 1130–1149.
- WANG, Q. H. S., MARKEVITCH, M. & GIACINTUCCI, S. 2016 The Merging Galaxy Cluster A520—A Broken-up Cool Core, A Dark Subcluster, and an X-Ray Channel. *ApJ* **833**, 99.
- ZAKAMSKA, N. L. & NARAYAN, R. 2003 Models of Galaxy Clusters with Thermal Conduction. *ApJ* **582**, 162–169.
- ZUHONE, J. A., MARKEVITCH, M., RUSZKOWSKI, M. & LEE, D. 2013 Cold Fronts and Gas Sloshing in Galaxy Clusters with Anisotropic Thermal Conduction. *ApJ* **762**, 69.