



Утверждаю:
Директор ИКИ РАН
Чулков И. В.
"23" марта 2018 года

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института космических исследований РАН (ИКИ РАН)

Диссертация "Теплопроводность в горячем газе скоплений галактик" выполнена в отделе "астрофизики высоких энергий" Федерального государственного бюджетного учреждения науки "Институт космических исследований РАН".

В период подготовки диссертации соискатель Сергей Вячеславович Комаров работал в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки "Институт космических исследований РАН" в должности младшего научного сотрудника. С 2013 г. по 2018 г. обучался в заочной аспирантуре Федерального государственного бюджетного учреждения науки "Институт космических исследований РАН" по специальности "астрофизика и звездная астрономия".

Удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов выдано в 2018 г. Федеральным государственным бюджетным учреждением науки "Институт космических исследований РАН".

Научный руководитель - член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук Евгений Михайлович Чуразов, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки "Институт космических исследований РАН".

По результатам рассмотрения диссертации "Теплопроводность в горячем газе скоплений галактик" принято следующее заключение:

Актуальность темы и направление исследования.

Изучение скоплений галактик позволяет проверить множество физических теорий в крайне широком диапазоне астрофизических масштабов. На больших масштабах скопления играют роль космологических объектов, функция масс которых накладывает независимые ограничения на

космологические параметры. На малых масштабах, более чем на десять порядков величин меньше размеров скоплений, происходят сложные процессы кинетики плазмы, которые, несмотря на свой масштаб, способны влиять на крупномасштабные свойства скоплений за счет модификации коэффициентов переноса в межгалактической плазме. Изучение процессов переноса в скоплениях приносит двойную пользу. С одной стороны, оно помогает объяснить некоторые нетривиальные свойства скоплений: форму радиальных профилей температуры, устойчивость холодных ядер скоплений, сильные долгоживущие градиенты температуры в холодных фронтах, а также разнообразие субструктур, наблюдаемых в рентгене. С другой стороны, соотнесение наблюдений с теоретическими результатами способно улучшить понимание нетривиальной кинетики турбулентной замагниченной плазмы.

Полная задача о теплопроводности в турбулентной замагниченной плазме скоплений галактик крайне сложна. В диссертации она разбивается на несколько подзадач, каждую из которых можно решать отдельно.

В первой части работы изучается корреляция между градиентами температуры и магнитными полями, устанавливающаяся в ходе их эволюции в турбулентном поле скоростей межгалактической среды. Этот эффект может приводить к локальному подавлению тепловых потоков на масштабе турбулентных вихрей. Он способен объяснить по-видимому долгоживущие структуры, наблюдаемые на картах температуры скоплений. С помощью аналитических методов демонстрируется, что случайное поле скоростей статистически стремится ориентировать градиенты температуры перпендикулярно силовым линиям магнитного поля, подавляя тепловой поток в направлении градиента, несмотря на то, что сами градиенты температуры испытывают усиление.

Во второй части рассматривается эффект подавления параллельного коэффициента теплопроводности магнитными зеркалами. На малых масштабах ионного ларморовского радиуса они создаются зеркальной неустойчивостью, которая генерирует относительные вариации магнитной индукции порядка единицы, способные играть роль магнитных зеркал.

Для определения характерных свойств неустойчивости используются данные численного моделирования. Эффективный коэффициент теплопроводности в магнитном поле зеркальной неустойчивости определяется с помощью моделирования распространения электронов вдоль силовой линии методом Монте-Карло. Полученный фактор подавления $\sim 1/5$ оказывается не зависящим от крупномасштабных свойств межгалактической среды.

В последней части работы исследуется возможное наблюдательное проявление анизотропии электронного давления в межгалактической среде в форме поляризации теплового тормозного излучения. Анизотропия давления вызывается растяжением магнитных силовых линий движениями плазмы в результате сохранения адиабатических инвариантов плазмы, а также тепловыми потоками. Уровень анизотропии определяется столкновительностью электронов. Рассматривается случай

крупномасштабного потока плазмы, который приводит к образованию упорядоченного магнитного поля, и, следовательно, для которого поляризация не оказывается нулевой после интегрирования вдоль луча зрения. Получена оценка степени поляризации $\sim 0.1\%$ в холодных фронтах и на ударных волнах скоплений галактик. Хотя эта величина поляризации слишком мала для грядущего поколения рентгеновских поляриметров, она, тем не менее, является независимым индикатором эффективности столкновительных процессов в межгалактической среде, которая определяется кинетикой плазмы на крайне малых, не разрешимых в наблюдениях масштабах.

Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации.

По теме диссертации опубликовано три работы в рецензируемых научных изданиях, во всех из которых определяющую роль в подготовке и написании сыграл автор диссертации, включая аналитические расчеты, основную часть численного моделирования и интерпретацию полученных результатов.

Данные численного моделирования скоплений галактик в статье, посвященной локальному подавлению теплопроводности, были предоставлены J. ZuHone. Некоторые идеи методики теоретического расчета тепловых потоков в турбулентном газе были предложены А. А. Щекочихиным и Е. М. Чуразовым. В работе, посвященной зеркальной неустойчивости, использовались результаты кинетического моделирования, выполненного M. Kunz.

Степень достоверности результатов проведенных исследований.

Достоверность полученных в диссертации результатов основана на:

- 1) трех публикациях в рецензируемых журналах ВАК;
- 2) представлении результатов работы (в том числе устные доклады) на российских и международных конференциях

Научная новизна результатов исследований.

В работе впервые показано, что турбулентность в скоплениях галактик приводит к корреляции магнитных полей и градиентов температуры, выражающейся в их преимущественно ортогональной ориентации. Этот эффект способен значительно уменьшить темп релаксации флуктуаций температуры на масштабах 10-100 килопарсек.

Впервые проанализирован возможный эффект зеркальной неустойчивости на теплопроводность в межгалактической плазме и оценен фактор ее подавления.

Связь между поляризацией тормозного излучения, анизотропией давления электронов и их темпом рассеяния впервые была рассмотрена в контексте скоплений галактик.

Практическая значимость исследований.

Описанный эффект корреляции магнитных полей и градиентов температуры способен объяснить наблюдаемые долгоживущие флуктуации температуры в межгалактической среде.

Подавление теплопроводности зеркальной неустойчивостью может частично объяснить форму радиальных профилей температуры, а также, в совокупности с другими эффектами подавления, наличие долгоживущих флуктуаций и больших градиентов в скоплениях галактик.

Полученная небольшая величина рентгеновской поляризации, возникающая вследствие анизотропии давления температуры, означает, что будущее поколение рентгеновских поляриметров может использовать скопления как неполяризованные калибровочные источники в пределах точности из измерений.

Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем.

Основные результаты диссертации отражены в следующих статьях:

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

Все работы опубликованы в журналах, входящих в перечень ВАК. Все основные положения исследований изложены в данных статьях.

Соответствие содержания диссертации паспорту специальности 01.03.02 -- "Астрофизика и звездная астрономия". Задачи, рассмотренные в диссертации, относятся к классу, заявленному в паспорте специальности 01.03.02 -- "Астрофизика и звездная астрономия", как "Исследования физических свойств космических объектов (планет, звезд, галактик и их

систем) межпланетной, околозвездной, межзвездной и межгалактической среды, базирующиеся на астрономических наблюдениях" и "Исследование физических процессов, связанных с генерацией излучения (электромагнитного, нейтринного, гравитационного), распространения и поглощения излучения в космических средах; разработка методов анализа электромагнитного излучения в различных спектральных диапазонах в применении к астрономическим наблюдениям".

ВЫВОД. Кандидатская диссертация Сергея Вячеславовича Комарова "Теплопроводность в горячем газе скоплений галактик" соответствует "Положению о порядке присуждения ученых степеней".

Диссертация "Теплопроводность в горячем газе скоплений галактик" Сергея Вячеславовича Комарова рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 – астрофизика и звёздная астрономия.

Заключение принято на заседании НТС отдела «Астрофизики высоких энергий» Института космических исследований РАН. Присутствовало на заседании 15 членов НТС отдела. Результаты голосования: «за» - 15 чел., «против» - 0 чел., «воздержалось» - 0 чел., протокол от « 23 » марта 2018 г.

Ученый секретарь НТС отд. 52



Арефьев В.А.