

ОТЗЫВ

официального оппонента -Быкова Андрея Михайловича, доктора физико-математических наук, профессора, руководителя Отделения физики плазмы, атомной физики и астрофизики федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук
на диссертацию Комарова Сергея Вячеславовича
«Теплопроводность в горячем газе скоплений галактик»,
представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 - Астрофизика и звездная астрономия

Скопления галактик – крупнейшие гравитационно-связанные объекты во вселенной, представляют собой уникальную лабораторию для изучения природы темной материи и физических процессов в горячей плазме межгалактической среды.

Наблюдения скоплений галактик, выполнены во всем диапазоне электромагнитного спектра и принесли уникальную информацию об их структуре и физических характеристиках. Радио изображения и спектры скоплений галактик продемонстрировали наличие крупномасштабных структур с нетепловыми распределениями электронов и магнитных полей с амплитудами порядка нескольких мкГ. Наблюдения эффекта Сюняева-Зельдовича в микроволновом диапазоне, совмещенные с рентгеновскими данными, позволяют получить уникальные космологические параметры. Рентгеновские изображения и спектры скоплений галактик, полученные в последние годы космическими обсерваториями Chandra, XMM-Newton рентгеновским спектрометром SXS Hitomi, позволили получить информацию о распределении плотности и обилии химических элементов в горячей плазме скоплений, оценить скорости движений плазмы и открыть интересные структуры - холодные фронты. Адекватная интерпретация полученных прецизионных данных, и перспективы новых наблюдений с обсерваторией Спектр Рентген-Гамма требуют построения теоретических моделей, описывающих устойчивость структур и процессы переноса тепла и частиц в горячей плазме межгалактической среды и гало галактик.

В представленной диссертации С.В.Комарова выполнены важные **оригинальные исследования, в актуальных** областях астрофизики, посвященные изучению и моделированию влияния кинетических плазменных процессов переноса тепла на обмен энергией холодных плотных ядер и горячего газа в вращающихся гало массивных галактик, групп и скоплений галактик. Представлены **новые** результаты моделирования распределения флуктуаций магнитного поля и температуры в крупномасштабных турбулентных вихрях в межгалактической среде скоплений галактик. Дан анализ влияния зеркальной неустойчивости горячей плазмы с анизотропным давлением на теплопроводность и устойчивость плазменных структур в скоплениях. Выполнено исследование перспектив наблюдений малой поляризации тормозного рентгеновского излучения с целью их использования для оценки транспортного пробега тепловых электронов.

Детальные исследования развития зеркальной неустойчивости и кинетических процессов редукции электронной теплопроводности в плазме скоплений галактик, выполненные автором диссертации, являются, в частности, существенным элементом, необходимым

для адекватной интерпретации наблюдаемых плазменных структур (например, «холодных фронтов») в рентгеновских изображениях скоплений галактик, что определяет существенную **практическую значимость** работы.

Диссертация объемом 118 страниц, включая пять глав основного текста (число цитированных публикаций составляет 213 наименований), 36 рисунков и 1 таблицы, представляет собой **законченное оригинальное научное исследование**, посвящённое процессам переноса в горячей космической плазме скоплений галактик и моделированию излучения оптически тонкой тепловой плазмы.

В *Главе 1 (Введение)* автор на основе обзора наблюдательных результатов и имеющихся теоретических моделей формулирует основные задачи диссертации, обосновывает актуальность поставленных задач и приводит основные положения, выносимые на защиту диссертации.

Глава 2 посвящена детальному рассмотрению локального и глобального теплообмена в межгалактической среде и факторов его определяющих. Автором исследованы локальные корреляции магнитного поля и градиентов поля температуры в крупномасштабном турбулентном поле скоростей межгалактической среды. Продемонстрированы эффекты локального подавления теплового потока в областях с сильными градиентами температуры, за счет одновременного роста локального магнитного поля, поперечного градиенту температуры. Рассмотрены упрощенные аналитические модели турбулентности с коротким временем корреляции и полем скоростей Казанцева-Крейчнана. Это позволяет иметь качественную картину сложных процессов переноса для понимания результатов расчета численных моделей с конечным временем корреляции, выполненных в работе. Автор получил соотношения между скоростью релаксации флуктуаций температуры и ростом средней плотности магнитного поля. Результаты анализа находятся в разумном согласии с численными моделями глобальной турбулентности в скоплениях.

В *Главе 3* подробно обсуждаются эффекты подавления электронной теплопроводности, связанные с развитием зеркальной неустойчивости с характерными масштабами флуктуаций несколько десятков гирорадиусов теплового иона (кинетические флуктуации), что на много порядков меньше масштабов глобальной МГД-турбулентности. Зеркальная неустойчивость наблюдалась в магнитосферной плазме. В случае системы с давлением плазмы существенно превышающим магнитное давление, что имеет место в скоплениях галактик, зеркальная неустойчивость имеет достаточную скорость роста для формирования. Анизотропия давления тепловой плазмы здесь обусловлена сдвиговым течением (широм). Структуры магнитного поля, связанные с развитием зеркальной неустойчивости, формируют ловушки с магнитными зеркалами для тепловых электронов. Наличие случайных ловушек может приводить к заметному уменьшению (примерно в пять раз) локального коэффициента электронной теплопроводности.

В *Главе 4* рассмотрен эффект поляризации тормозного рентгеновского излучения, связанный с анизотропией давления электронов, обусловленной развитием кинетических неустойчивостей в горячей разреженной плазме. Подобная ситуация имеет место в солнечных вспышках. Автор рассмотрел модель поляризации тормозного рентгеновского

излучения в окрестности ударных волн и холодных фронтов в межгалактической среде. Получены весьма малые степени поляризации, порядка 0.1%, что может быть детектировано только рентгеновскими поляриметрами весьма далекого будущего.

Достоверность и надёжность результатов диссертационной работы подтверждаются использованием адекватных аналитических и численных методов, а также сравнением, где возможно, полученных данных с результатами других научных групп. Результаты диссертации в 2014-2018 годах прошли проверку на авторитетных международных и всероссийских конференциях и были опубликованы в 3 статьях в журнале MNRAS, входящего в Перечень ВАК.

Диссертация содержит целый ряд результатов, важных для астрофизики и космологии, она написана живо и интересно, однако не лишена отдельных недостатков, число которых, впрочем, минимально. В качестве замечаний и пожеланий можно отметить следующие:

1. Автор отмечает на стр. 75 (параграф 3.3.3) отсутствие диффузии в пространстве энергий при рассеянии частиц магнитными зеркалами. Рассеяние частиц движущимися стохастическими магнитными зеркалами (ловушками) могут менять энергии электронов и сопровождаться диффузией в пространстве энергий. Движение ловушек, в частности, обусловлено крупномасштабными градиентами скорости плазмы. Представляется целесообразным дать оценку величины данного эффекта.
2. В непосредственной окрестности бесстолкновительных ударных волн с числом Маха порядка нескольких единиц можно ожидать существенной разницы температур ионов и электронов. Стоит оценить эффективность электронного переноса тепла в таких областях, с учетом подавления электронной теплопроводности, изученной автором.
3. Работа написана четко и хорошим языком, с удачным набором иллюстраций и относительно небольшим числом опечаток к которым можно отнести:
(а) невозможность восстановить ссылки на статьи в сноске на стр. 56.
(б) можно отметить использование несколько нестандартных обозначений ":" для свертки в уравнениях (1.4), (1.8) и др.

Следует подчеркнуть, что вышеперечисленные замечания не имеют принципиального характера и не снижают высокой общей оценки результатов автора диссертации.

Диссертация представляет собой законченное оригинальное научное исследование, вносящее существенный вклад в решение важных проблем астрофизики скоплений галактик.

Результаты, полученные в диссертационной работе Комарова С.В., могут быть использованы в научных учреждениях, в которых ведутся работы по астрофизике и астрономии: ИКИ РАН, ФТИ им. Иоффе, ИЯИ РАН, ФИАН им П.Н. Лебедева, ИЗМИРАН, ИТЭФ, МГУ им. М.В. Ломоносова, АКЦ ФИАН, СПбГУ и др.

Основное содержание диссертации опубликовано в ведущем журнале и цитируется в научных изданиях. Автореферат полностью отвечает содержанию диссертации.

Диссертационная работа полностью отвечает требованиям. Положения о присуждении учёных степеней, утверждённого Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842, а Сергей Вячеславович Комаров, **безусловно, заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук** по специальности 01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия.

Официальный оппонент

Руководитель отделения физики плазмы, атомной физики и астрофизики ФГБУН ФТИ им. А.Ф.Иоффе, заведующий лабораторией астрофизики высоких энергий доктор физ.-мат. наук, профессор

Быков А.М.

Подпись Быкова А.М. заверяю,
ученый секретарь ФГБУН ФТИ им. А.Ф.Иоффе
доктор физ.-мат. наук, профессор

Шергин А.П.

Адрес: 194021, Санкт-Петербург,
Политехническая 26,
ФТИ им. Иоффе РАН,
Телефон: +7(812)2927160
Эл. адрес: byk@astro.ioffe.ru



15.11.2018