

О Т З Ы В

официального оппонента д.ф.-м.н. Кузина Сергея Вадимовича
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук Комарова Сергея Вячеславовича
на тему: «Теплопроводность в горячем газе скоплений галактик»
по специальности 01.03.02 Астрофизика и звездная астрономия

Скопления галактик – это самые массивные сформировавшиеся объекты во Вселенной, состоящие на 85% из темной материи и на 15% из обычного вещества, главным образом из горячего и разреженного газа, заполняющим пространство между галактиками. Благодаря высокой температуре газа (десятки миллионов градусов), скопления являются мощными источниками рентгеновского излучения и могут быть исследованы с помощью современных орбитальных телескопов. Этот же газ может наблюдаться по рассеянию фотонов микроволнового фона – так называемый эффект Сюняева-Зельдовича. Благодаря большой светимости, скопления могут наблюдаться с космологических расстояний и, таким образом, использоваться в интересах космологии. Другим важным аспектом является изучение плазмы в скоплениях, которая по своим свойствам напоминает плазму в солнечном ветре, но еще более горячая и менее плотная.

Несмотря на то, что исследования газа скоплений галактик насчитывают уже более 50-и лет, несколько вопросов до сих пор остаются открытыми. Среди них – вопрос о теплопроводности горячего газа в скоплениях. Для плазмы, в которой Кулоновские столкновения происходят очень часто, хорошо известны формулы Спитцера, которые предсказывают очень высокую теплопроводность для малоплотного и горячего газа скоплений. Однако, в скоплениях частота кулоновских столкновений на много порядков ниже ларморовских частот электронов и протонов в магнитном поле порядка нескольких мкГаусс. В результате, частицы совершают много оборотов вокруг силовой линии, прежде чем кулоновские рассеяния изотропизируют функцию распределения. Более того, плотность энергии магнитного поля в плазме скоплений много меньше, чем плотность тепловой энергии плазмы. Такая плазма может быть подвержена зеркальной и шланговой неустойчивостям, модифицирующим поле на малых масштабах. Для такой плазмы нет готового рецепта вычисления коэффициента теплопроводности, что не позволяет учесть эффекты переноса тепла в численных расчетах формирования и эволюции скоплений. Это, в свою очередь, не позволяет добиться высокой точности, необходимой для космологических исследований, например, по определению уравнения состояния темной энергии во Вселенной. В диссертации С.В. Комарова выполнены *новые оригинальные исследования*, которые рассматривают проблему переноса тепла в газе скоплений галактик путем теоретического анализа и численного моделирования

турбулентной плазмы. *Актуальность* проблемы связана, прежде всего, с необходимостью более точного моделирования термодинамических свойств газа в скоплениях и измерений полных масс скоплений в интересах космологии, а также развитием кинетической теории плазмы. Особую *важность* эти исследования имеют в связи с планирующимся запуском обсерватории Спектр-Рентген-Гамма, которая должна обнаружить около 100 000 скоплений в видимой Вселенной.

Диссертация состоит из пяти глав текста (118 страниц, 36 рисунков, 1 таблица, 213 цитированных публикаций) и представляет собой *законченное оригинальное научное исследование*, посвящённое процессам переноса тепла в горячей плазме скоплений.

Глава 1 (Введение) содержит сводку основных наблюдательных фактов и теоретических моделей, описывающих скопления галактик и межгалактический газ. В этой главе обсуждается важность процессов переноса тепла и актуальность проблемы.

В Главе 2 рассматривается задача о корреляции градиентов температуры и направления магнитного поля в турбулентной плазме. В частности, показано, что в пределе, когда магнитное поле не оказывает обратного действия на движения газа, естественным образом возникает ситуация, когда направление магнитного поля оказывается почти перпендикулярным направлению градиента температуры. Поскольку перенос тепла в плазме скоплений происходит вдоль направления поля, то возникает подавление эффективной теплопроводности. Этот эффект продемонстрирован на аналитической модели, а также в серии численных расчетов.

Глава 3 посвящена анализу возможного подавления теплопроводности вдоль поля за счет развития зеркальной неустойчивости в турбулентной плазме скоплений. Эта неустойчивость характерна для плазмы со слабым магнитным полем, в областях, где движения газа вызывают увеличение поля со временем. При этом на масштабах, гораздо меньших, чем длина свободного пробега по кулоновским соударениям, возникает модуляция силы поля, приводящая к появлению магнитных зеркал. Используя результаты численных расчетов модуляции поля, автор провел детальный анализ движения электронов в таком поле. Показано, что зеркальная неустойчивость приводит к подавлению теплопроводности в несколько (~ 5) раз. Интересно, что более сильного подавления не возникает, что является специфическим свойством модуляции поля зеркальной неустойчивостью.

В Главе 4 обсуждается новая возможность наблюдательной проверки возникновения зеркальной неустойчивости в плазме скоплений. В качестве примера рассмотрен случай слияния двух скоплений, при котором естественно возникают сдвиговые течения, которые могут приводить к зеркальной неустойчивости. Формирующаяся при этом анизотропия функции распределения электронов должна приводить к поляризации рентгеновского (тормозного)

излучения этих электронов, причем, степень и направление плоскости поляризации зависят от энергии излучаемых фотонов. Ожидаемая степень поляризации не очень велика, но сам эффект интересен и представляет уникальную возможность оценить степень анизотропии тепловых электронов. С другой стороны, данная работа позволяет оценить перспективы использования скоплений как калибровочных (неполяризованных) источников для создающихся рентгеновских поляриметров.

В Главе 5 (Заключение) обобщены результаты исследования и кратко представлены полученные научные результаты.

Результаты диссертации были опубликованы в 3 статьях в журнале MNRAS, входящем в Перечень ВАК. Достоверность научных положений подтверждается обсуждением полученных автором результатов на 10 международных конференциях.

Диссертация содержит целый ряд новых важных результатов для физики плазмы и астрофизики. Среди замечаний можно отметить следующие:

1. Было бы интересно обсудить более подробно вопрос о корреляции обсуждаемых явлений с процессами, наблюдаемыми в плазме Солнечного ветра, и возможности их экспериментальной проверки с помощью спутников.

2. В диссертации указано, что измерение эффекта поляризации рентгеновского излучения является крайне важным для наложения ограничений на столкновительность электронов, но при этом указывается, что требуемая для этого точность находится за пределами обнаружительной способности современных инструментов. Хотелось бы понимать, какая величина измерения поляризации может быть достигнута в действующих и планируемых экспериментах, а также, какие оценочные параметры должны быть у поляриметра для измерения подобных явлений.

3. В заключении можно было бы обсудить, как полученные результаты могут быть использованы в численных расчетах формирования скоплений галактик. Например, можно ли просто использовать "эффективный коэффициент теплопроводности" вдоль и поперек направления поля, или необходимо более сложное описание?

Вышеперечисленные замечания не имеют принципиального характера и не снижают общей высокой оценки результатов автора диссертации.

Диссертация 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 ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 астрофизика и звездная астрономия.

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук

Кузин Сергей Вадимович

27.11.2018

Контактные данные:

Тел.: +7(499)1326949, e-mail: kuzin@lebedev.ru

Адрес места работы:

119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинский пр-т., 53, ФИАН

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук,

Отделение Оптики,

Лаборатория рентгеновской астрономии Солнца

Телефон: +7(499) 1354264

Факс: +7(499)1357880

e-mail: postmaster@lebedev.ru

Подпись сотрудника Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук Кузина Сергея Вадимовича удостоверяю:



Савинов С.Ю.