

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 **Медведева Павла Сергеевича**

**«Физические процессы в горячей астрофизической плазме:
диффузия элементов в межгалактической и межзвездной среде,
рентгеновское излучение джетов микроквazarов»**,

представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.03.02 - Астрофизика и звездная астрономия

Исследования физических процессов в скоплениях галактик – крупнейших гравитационно-связанных объектов во вселенной, в последние десятилетия получили существенное развитие, связанное с получением новых уникальных наблюдательных данных во всем диапазоне электромагнитного спектра. Наблюдения скопления галактик в Персее, выполненные в начале 2016 года рентгеновским спектрометром SXS Hitomi, убедительно продемонстрировали потенциал прецизионных наблюдений горячей плазмы в таких объектах. На основе этих наблюдений выполнены оценки скорости крупномасштабных движений плазмы в скоплении и установлено обилие элементов в плазме. В свою очередь, проблемы интерпретации полученных прецизионных данных, и перспективы новых наблюдений с обсерваторией Спектр Рентген-Гамма требуют построения новых теоретических моделей для объяснения свойств скоплений галактик и межгалактической среды и проведения детального компьютерного моделирования физических процессов в этих объектах. Моделирование процессов в горячей космической плазме существенно для интерпретации наблюдений джетов в рентгеновских двойных, таких как SS 433 и недавно открытого источнике S 26 в галактике NGC 7793 и в сверхмягком рентгеновском источнике ULS-1 в галактике M81.

В представленной диссертации П.С. Медведева выполнены важные **оригинальные исследования**, в актуальных областях астрофизики, посвящённые проблемам влияния процессов диффузии на распространённость гелия и других элементов в массивных вириализованных гало массивных галактик, групп и скоплений галактик. Представлены **новые** результаты моделирования спектров теплового рентгеновского излучения барионных джетов, важные для понимания процессов аккреции в рентгеновских двойных системах.

Детальные исследования процессов диффузии и седиментации гелия в скоплениях галактик, выполненные автором диссертации, являются, в частности, существенным элементом, необходимым для адекватной интерпретации совместных микроволновых и рентгеновских наблюдений эффекта Сюняева-Зельдовича в скоплениях галактик, а также корректного определения полной массы газа в таких скоплениях. Особенность проблемы заключается в невозможности прямого наблюдения гелия методами рентгеновской спектроскопии, что требует привлечения модельных гипотез об относительном обилии гелия. Важность этих результатов для космологии определяет большую **практическую значимость** работы.

Диссертация объемом 139 страниц, включая шесть глав основного текста (число цитированных публикаций составляет 190 наименований), 39 рисунков и 5 таблиц, представляет собой законченное оригинальное научное исследование, посвященное процессам переноса в горячей космической плазме скоплений галактик и моделированию излучения оптически тонкой тепловой плазмы умеренно релятивистских джетов двойных рентгеновских систем.

В *Главе 1 (Введение)* автор формулирует основные задачи диссертации, обосновывает актуальность поставленных задач и приводит основные положения, выносимые на защиту диссертации.

В *Главе 2* дано описание проблемы диффузионного переноса химических элементов в многокомпонентной немагнитной космической плазме при наличии градиентов концентрации, температуры, а также гравитации. На основе приближения Бюргерса сформулирована система уравнений для корректного описания переноса частиц в горячей кулоновской плазме с учетом эффектов седиментации и термодиффузии.

В *Главе 3* подробно обсуждаются возможная роль эффектов диффузии химических элементов в двух возможных моделях гидростатических релаксировавших скоплений галактик. Первая модель представляет скопление галактик с холодным ядром и наблюдаемыми в скоплении A2019 профилями массы и температуры газа. Вторая модель отличается предположением об изотермическом распределении газа с возможными температурами 3 и 6 кэВ. Автор продемонстрировал существенные отличия в значениях обилий элементов, восстановленных из наблюдений с учетом и без учета эффектов диффузионного переноса частиц в горячей плазме скоплений.

В *Главе 4* рассмотрены процессы диффузии в межзвездной среде галактик раннего типа (линзовидных и эллиптических). Автор выбрал 13 галактик с хорошей статистикой рентгеновских наблюдений (более 12 тысяч отсчетов детекторов обсерватории XMM-Newton для каждой галактики). Выполнен анализ структуры галактик с различными радиальными профилями распределения температуры газа. Для галактик с падающим к периферии профилем температуры, эффект седиментации усиливается за счет термодиффузии, тогда как для ярких галактик с растущей к периферии температурой термодиффузия уменьшает гравитационную седиментацию гелия.

В *Главе 5* представлены результаты моделирования процессов диффузии химических элементов в ранней Вселенной. Рассмотрена диффузия дейтерия, гелия и лития в первых вириализованных маломассивных гало как до эпохи реионизации, так и на фазе реионизации. Вариации обилия гелия в ранних гало оценены как величины порядка 0.1%, что может оказаться существенным при анализе сравнении обилия гелия в областях НII в карликовых галактиках с низким содержанием металлов с предсказаниями модели первичного нуклеосинтеза.

В *главе 6 диссертации* представлена модель теплового излучения оптически тонкой горячей астрофизической плазмы джета микроквара с высокой степенью коллимации, доминированного барионной плазмой с умеренно релятивистскими скоростями. Особенность модели связана с последовательным учетом охлаждения газа в джете и отклонений от коронального приближения. Автор построил модельный спектр горячей плазмы джета для широкого диапазона энергий рентгеновских фотонов и широкого

пространства возможных параметров. Это позволило создать удобный публичный численный код с плотной сеткой значений исходных параметров джета для детальной интерпретации наблюдательных данных, совместимый с широко распространенным пакетом спектрального анализа *XSPEC*. Показано, что диагностика, основанная на наблюдении линий гелиеподобных ионов, позволяет определять термодинамические параметры плазмы при задании поперечной оптической толщи по электронному рассеянию у основания джета.

Достоверность и надёжность результатов диссертационной работы подтверждаются использованием адекватных математических методов, а также согласованностью полученных данных с результатами других научных групп.* Численный код для моделирования теплового излучения джетов рентгеновских двойных систем, разработанный автором, опубликован в свободном доступе в сети интернет и пользуется интересом со стороны научного сообщества. Результаты диссертации в 2012-2017 годах прошли проверку на авторитетных международных и всероссийских конференциях и были опубликованы в 4 статьях в международных журналах, входящих 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 невелико. В качестве замечаний и пожеланий можно выделить следующие:

1. Автор отмечает неопределенности возможностей определения вариаций обилия, в рамках спитцеровской модели диффузии, связанные с возможной ролью плазменных неустойчивостей плазмы, и указывает, что данная модель дает максимальные возможные значения диффузии. Работа бы выиграла, если бы вопрос о роли неустойчивостей был рассмотрен детально, поскольку в межзвездной среде бесстолкновительные процессы переноса во многих случаях доминируют. Важно также иметь оценки роли крупномасштабных течений (масштабы, превышающие кулоновские пробеги частиц) в переносе частиц.
2. При обсуждении оценки роли диффузии на формирование вариаций обилия гелия и других элементов в процессе аккреции на массивные гало (раздел 5.3.3) желательно иметь оценку роли магнитных полей на оценку величины вариации, даже с учетом большой неопределенности оценки величины магнитных полей. Оценки вклада данного фактора безусловно повысят надежность выводов автора.
3. Выражение “гелиоподобные ионы”, использованное в параграфе 6.2.3 не соответствует принятому ранее в классических книгах по спектроскопии выражению “гелиеподобные ионы”, обозначающее ионы тяжелых элементов с двумя электронами. Термин “гелиоподобные ионы”, по мнению оппонента, заметно искажает смысл выражения.

Следует подчеркнуть, что вышеперечисленные недостатки 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 галактик и скоплений. Результаты, полученные в диссертационной работе Медведева П.С., 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 ведущих отечественных и зарубежных журналах 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 Павел Сергеевич Медведев, **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,
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.

4.12.2017

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