



Утверждаю:
Директор ИКИ РАН
академик Зеленый Л. М.
" " _____ года

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

Диссертация "Физические процессы в горячей астрофизической плазме: диффузия элементов в межгалактической и межзвездной среде, рентгеновское излучение джетов микроквазаров" выполнена в отделе "астрофизики высоких энергий" Федерального государственного бюджетного учреждения науки "Институт космических исследований РАН".

В период подготовки диссертации соискатель Павел Сергеевич Медведев работал в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки "Институт космических исследований РАН" в должности младшего научного сотрудника. С 2012 г. по 2016 г. обучался в очной аспирантуре Федерального государственного бюджетного учреждения науки "Институт космических исследований РАН" по специальности "астрофизика и звездная астрономия".

Удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов выдано в 2015 г. Федеральным государственным бюджетным учреждением науки "Институт космических исследований РАН".

Научные руководители - член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук Марат Равильевич Гильфанов, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки "Институт космических исследований РАН" и профессор РАН, доктор физико-математических наук Сергей Юрьевич Сазонов, заведующий сектором Федерального государственного бюджетного учреждения науки "Институт космических исследований РАН".

По результатам рассмотрения диссертации "Физические процессы в горячей астрофизической плазме: диффузия элементов в межгалактической и межзвездной среде, рентгеновское излучение джетов микроквазаров" принято следующее заключение:

Актуальность темы и направление исследования.

Целью первой части работы (главы диссертации 2-5) является комплексное изучение роли процессов диффузии в формировании распределения элементов внутри вириального радиуса в галактиках, галактических группах и скоплениях галактик с вириальными массами от 10^{12} до $10^{15} M_{\text{sun}}$. Рассмотренные задачи для широкого класса объектов должны помочь в понимании значения диффузии среди других физических процессов, протекающих в горячей космической плазме.

В главе диссертации 3 исследуется влияние диффузии на химический состав межгалактической среды в скоплениях галактик. В частности, в этой главе рассматривается роль эффекта термодиффузии в скоплениях с холодными ядрами. Термодиффузия в плазме межгалактической среды приводит к движению элементов тяжелее водорода в направлении градиентов температуры, поэтому в холодных ядрах скоплений термодиффузия противодействует гравитационной седиментации, а во внешних частях, наоборот, усиливает ее эффект. Градиенты температуры в центральных областях таких объектов оказываются достаточными для того, чтобы в результате действия термодиффузии обилие тяжелых элементов было значительно подавлено в центре скопления (внутри области ~ 20 кпк). Исследование механизмов, способных формировать такое распределение металлов, актуально, так как в скоплениях с холодными ядрами действительно наблюдают уменьшение металличности газа вблизи центра скоплений, причины которого остаются неясными.

В главах диссертации 3 и 4 рассчитывается темп увеличения обилия гелия в областях скоплений (~ 1 Мпк) и эллиптических галактик (~ 10 эффективных радиусов), которые доступны для наблюдений в рентгеновском диапазоне длин волн. Этот эффект может быть важен при анализе наблюдательных данных, в особенности для скоплений галактик, так как отклонения обилия гелия от его солнечного значения может являться источником систематических ошибок в важных для наблюдательной космологии измерениях. Исследование максимально возможного влияния диффузии на состав космической плазмы является важным также с точки зрения поиска наблюдательных проявлений эффектов диффузии.

Результаты, полученные в главах 3 и 4, потенциально дают возможность для изучать степень подавления коэффициентов диффузии в горячей замагниченной турбулентной плазме. Эта область исследований активно развивается как в плане теоретических оценок и численных симуляций, так и в плане наблюдательной техники, с помощью которой можно получить информацию о эффективности процессов переноса.

Целью главы 5 диссертации является получение надежных ограничений на амплитуду возможного влияния диффузии на химический состав газа внутри гало темной материи в период, предшествующий эпохе реионизации. Исследование даже малейших отклонений от первичного состава газа является актуальным, так как прямые измерения первичного обилия гелия-4 сейчас достигают уровня точности $\sim 1\%$. Нужно полагать, что

дальнейший прогресс в технике наблюдений позволит улучшить точность прямых измерений еще на один порядок величины и, таким образом, подойти к уже достигнутому уровню точности $\sim 0.1\%$ космологических предсказаний. В таком случае станет доступна прямая проверка стандартной теории первичного нуклеосинтеза, а рассмотрение эффектов диффузии - необходимым.

Целью второй части работы (глава 6 диссертации) является разработка спектральной модели теплового рентгеновского излучения барионных джетов. В этой работе основное внимание уделяется возможности воспроизвести излучение барионных релятивистских джетов для широкого диапазона параметров, которые могут встречаться в рентгеновских двойных системах. Предложенная модель может быть использована как для анализа данных рентгеновской спектроскопии высокого разрешения SS 433, так и для поиска компонент, связанных с излучением барионных джетов в спектрах других рентгеновских двойных. Так, например, уже сейчас доступны для исследований наблюдения SS 433 в жестком рентгеновском диапазоне обсерватории нового поколения *NuSTAR*. Число кандидатов, для которых потенциально возможен запуск барионных джетов, быстро растет, поэтому предложенная модель должна быть полезна для мирового сообщества рентгеновской астрономии.

Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации.

По теме диссертации опубликовано 4 работы в рецензируемых научных изданиях, из которых в 3 определяющую роль в подготовке и написании сыграл автор диссертации, в том числе в плане выполнения аналитических расчетов, численного моделирования, обработки данных, а также интерпретации полученных результатов. Некоторые идеи методики моделирования и расчетов диффузии были предложены М. Р. Гильфановым и С. Ю. Сазоновым (численный код частично предоставлен П. Е. Штыковским). В работе, посвященной моделированию излучения релятивистских барионных джетов в рентгеновских двойных системах, автором диссертации полностью выполнены численные расчеты и техническая реализация модели, а также выполнены частично аналитические расчеты и написание текста.

Степень достоверности результатов проведенных исследований.

Достоверность полученных в диссертации результатов основана на:

- 1) четырех публикациях в рецензируемых журналах ВАК;
- 2) представлении результатов работы (в том числе устные доклады) на российских и международных конференциях
- 3) полученные результаты расчетов диффузии показывают уменьшение обилия металлов в ядрах скоплений, что хорошо согласуется с наблюдаемыми профилями металличности межгалактического газа в таких объектах. Предсказания разработанной спектральной модели излучения

барионных джетов хорошо согласуются с наблюдаемыми спектрами системы SS433.

Научная новизна результатов исследований.

В работе впервые показано, что термодиффузия в наиболее горячих скоплениях галактик способна полностью удалить из ядра скоплений элементы тяжелее водорода за 5-7 млрд лет. Впервые показано, что термодиффузия вызванная градиентами температуры на периферии скоплений ускоряет гравитационную седиментацию гелия, в результате этого эффекта среднее обилие гелия, внутри наблюдаемой в рентгеновском диапазоне области скоплений, возрастает с темпом ~5% за 1 млрд лет.

Впервые рассмотрена роль диффузии в эллиптических галактиках. Впервые показано, что эффект диффузии элементов в межзвездном газе должен быть больше в маломассивных галактиках с разреженным окружением, чем в гигантских галактиках, окруженных горячей межгалактической средой.

В работе впервые показано, что умеренный и ожидаемый прогрев газа во Вселенной на начальной стадии ее реионизации мог привести к усилению эффекта диффузии примерно в 4 раза, таким образом обилие гелия могло возрасти на фактор $\sim 5 \times 10^{-4}$ для гало с массами $10^6 M_{\text{sun}}$. Степень увеличения обилия первичных элементов зависит от температуры и степени ионизации газа и, следовательно, потенциально может дать уникальную информацию о первых этапах реионизации Вселенной.

В работе впервые разработана спектральная модель теплового рентгеновского излучения умеренно релятивистских барионных джетов. Модель охватывает широкий диапазон физических параметров джетов, которые могут встречаться в рентгеновских двойных системах.

Практическая значимость исследований.

В работе показано, что возможное отклонение обилия гелия от его солнечного значения в межгалактической среде вызванные диффузией должно приводить к ошибкам определения параметров скоплений по рентгеновским наблюдениям и наблюдениям эффекта Сюняева-Зельдовича: меры эмиссии, химического состава и температуры газа, а также угломерного расстояния до скопления. Этот результат может быть важным для планирования космических миссий, предназначенных для решения космологических задач с помощью наблюдений скоплений галактик.

Представленная в работе модель излучения релятивистских барионных джетов полностью адаптирована для применения в таких широко используемых пакетах программного обеспечения для обработки данных рентгеновских наблюдений, как **xspec** и **sherpa**. Модель доступна для общего пользования и может быть загружена по веб-адресу: <http://hea133.iki.rssi.ru/public/bjet/>

Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем.

Основные результаты диссертации отражены в следующих статьях:

1. Impact of thermal diffusion and other abundance anomalies on cosmological uses of galaxy clusters
Medvedev P., Gilfanov M., Sazonov S., Shtykovskiy P.,
2014, MNRAS, 440, 2464
2. Thermal X-ray emission from a baryonic jet: a self-consistent multicolour spectral model
I. Khabibullin, Medvedev P., Sazonov S.,
2016, MNRAS, 455, 1414
3. Helium diffusion during formation of the first galaxies
Medvedev, P., Sazonov, S., Gilfanov, M.,
2016, MNRAS, 459, 431
4. Диффузия элементов в межзвездной среде в галактиках раннего типа
Медведев П., Сазонов С., Гильфанов М., 2017,
Письма в Астрономический Журнал, 43, 5, 321-340

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 Павла Сергеевича Медведева "Физические процессы в горячей астрофизической плазме: диффузия элементов в межгалактической и межзвездной среде, рентгеновское излучение джетов микроквazarов" соответствует "Положению о порядке присуждения ученых степеней".

Диссертация "Физические процессы в горячей астрофизической плазме: диффузия элементов в межгалактической и межзвездной среде,

рентгеновское излучение джетов микроквазаров" Павла Сергеевича Медведева 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 2017 г.

Ученый секретарь НТС отд. 52



Арефьев В.А.