

на правах рукописи

Медведев Павел Сергеевич

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

01.03.02 Астрофизика и звездная астрономия

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва, 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН)

Научные руководители:

доктор физико-математических наук, профессор
Российской академии наук, ИКИ РАН

САЗОНОВ Сергей Юрьевич

доктор физико-математических наук, член-корреспондент
Российской академии наук, ИКИ РАН

ГИЛЬФАНОВ Марат Равильевич

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор
заведующий лабораторией астрофизики высоких энергий
ФГБУН Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе
Российской академии наук (ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

БЫКОВ Андрей Михайлович

доктор физико-математических наук, профессор
главный научный сотрудник
ФГБУН Физического института им. П.Н.Лебедева
Российской академии наук (ФИАН)

ДОГЕЛЬ Владимир Александрович

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Федеральный исследовательский центр Институт прикладной
физики Российской академии наук» (ИПФ РАН)

Защита диссертации состоится **22 декабря 2017 года в 11 часов**
на заседании диссертационного совета Д 002.113.02 при Институте
космических исследований РАН по адресу: Москва, ул. Профсоюз-
ная, 84/32, ИКИ РАН, подъезд 2 (конференц-зал).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИКИ РАН.
и на сайте <http://www.iki.rssi.ru/diss/2017/medvedev.htm>

Автореферат разослан 13 ноября 2017 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 002.113.02

кандидат физико-математических наук

А.Ю.Ткаченко

Общая характеристика работы

Актуальность и цели работы

Несмотря на большое количество теоретических работ и наблюдательных данных, понимание физических процессов, протекающих в горячей плазме межгалактической и межзвездной среды, остается далеко неполным. Особый интерес представляет изучение процессов переноса. Хорошо известно, что теплопроводность, вязкость и диффузия частиц в скоплениях галактик могут быть подавлены магнитными полями (см. Чандрен & Коули, 1998). Тем не менее, конкретный механизм и величина подавления остаются существенно неопределенными. Как было показано в ряде работ, хаотический характер изменений магнитных полей, порождаемых турбулентным перемешиванием газа, вызывает лишь умеренное подавление глобальных коэффициентов переноса (Нараян & Медведев, 2001; Малышкин, 2001; Чандрен & Марон, 2004). Большая неопределенность, однако, остается в понимании роли неустойчивостей, которые могут развиваться в неоднородной замагниченной горячей космической плазме (см. Рикельме и др., 2016; Комаров и др., 2016).

Целью первой части диссертационной работы является комплексное изучение степени влияния процессов диффузии на формирование распределения элементов внутри вириального радиуса в галактиках, галактических группах и скоплениях галактик с вириальными массами от 10^{12} до $10^{15} M_{\odot}$. Рассмотрение такого рода задач для широкого класса объектов должно помочь в понимании роли диффузии среди других физических процессов, протекающих в горячей космической плазме.

Первая часть диссертационной работы начинается с изучения амплитуды эффектов диффузии в межгалактической среде скоплений галактик. В частности, 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 ~ 50 кпк). Исследование механизмов, способных формировать ком-

плексное распределение металлов, актуально, так как в скоплениях с холодными ядрами действительно наблюдаются уменьшение металличности газа вблизи центра скоплений, причины которого остаются неясными (например, Панагулия, Сандерс & Фабиан, 2015).

В первой части диссертации представлены расчеты темпа 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 (или, что почти тоже самое, первичного) значения может являться источником систематических ошибок в важных для наблюдательной космологии измерениях.

В завершение первой части диссертации, посвященной исследованию диффузии, мы рассчитываем ограничения 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. В настоящее время существует лишь небольшое количество работ, посвященных диффузии первичных элементов (например, Поспелов & Афшорди, 2012; Медвижи & Лоеб, 2001). Однако, полученные в этих работах амплитуды эффекта сильно различаются — от долей процента до нескольких раз. Поэтому необходимо провести детальный расчет перераспределения легких химических элементов в гало разных масс в ранней Вселенной — на красных смещениях $z \sim 100-20$. Именно в эту эпоху диффузионные эффекты могли быть наиболее сильными. Полученные результаты могут быть полезными также для понимания начальных условий, в которых формировались первые звезды в эпоху реионизации.

Целью второй части диссертации является построение спектральной модели теплового рентгеновского излучения релятивистских струйных выбросов вещества (барионных джетов) в рентгеновских двойных системах. Запуск барионных джетов является одним из фунда-

ментальных предсказаний теории дисковой аккреции в сверхкритическом режиме. Однако, единственным объектом, в котором постоянно наблюдаются барионные джеты до недавнего времени был галактический микроквазар SS 433. В последние годы были открыты сразу несколько новых источников, для которых есть указания на наличие барионных джетов: это, например, объект S26 в Галактике NGC 7793 (Сория и др., 2010) или ультраяркий сверхмягкий рентгеновский источник ULS-1 в галактике M81 (Уолтон и др., 2015). Однако условия формирования (и наблюдаемости) барионных джетов по-прежнему неясны. Детальное изучение свойств джетов в SS 433, а также поиск и исследование похожих объектов, должны помочь в прояснении этого вопроса, а следовательно и определении конкретных физических механизмов запуска и коллимации таких джетов.

На примере SS 433 известно, что ближайшая к аккреционному диску область барионных джетов производит оптически тонкое рентгеновское излучение, изучение спектральных свойств которого позволяет определить ключевые параметры джетов: кинетическую энергию, скорость, угол коллимации и др. Для этого необходимо детальное моделирование этого излучения в зависимости от параметров джета с учетом характеристик существующих и планируемых рентгеновских обсерваторий.

Научная новизна

Все результаты, представленные к защите, являются новыми.

Впервые представлено комплексное исследование влияния процессов диффузии на формирование профиля обилия элементов внутри вириального радиуса для широкого класса объектов с вириальными массами от 10^{12} до $10^{15} M_{\odot}$. Диффузия химических элементов впервые рассчитывается на основе наблюдаемых характеристик таких объектов, путем решения полной системы кинетических уравнений Бюргера (Бюргерс, 1969).

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.

Впервые представлено детальное исследование возможного влияния диффузии на химический состав газа внутри гало темной материи в период, предшествующий эпохе реионизации.

Впервые представлена общедоступная спектральная модель теплового рентгеновского излучения барионного джета, рассчитанная

для широкого диапазона физических параметров джетов, которые могут встречаться в рентгеновских двойных системах.

Научная и практическая ценность

Изучение максимально возможного влияния диффузии на состав космической плазмы важно с точки зрения поиска наблюдательных проявлений таких эффектов. Хотя наблюдательные проявления диффузии частиц в межгалактической и межзвездной средах пока не обнаружены, нет никаких сомнений, что дальнейший прогресс в наблюдательной технике (главным образом, рентгеновских экспериментов и наблюдений эффекта Сюняева-Зельдовича в скоплениях галактик) позволит найти жесткие ограничения на амплитуду эффектов связанных с диффузией (см. Маркевич, 2007). В этом случае, обнаружение таких эффектов (или обнаружение их отсутствия), а также сопоставление наблюдательных данных с теоретическими расчетами, должны дать чрезвычайно важную информацию о степени подавления коэффициентов диффузии в турбулентной замагниченной 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.

Разработанная во второй части диссертации спектральная 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 систем. Число подобных кандидатов быстро растет, поэтому предложенная модель должна быть полезна для мирового сообщества рентгеновской астрономии. Спектральная модель 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/>

Основные положения, выносимые на защиту

1. Показано, что эффект термодиффузии в наиболее горячих скоплениях галактик с холодными ядрами может принципиально изменить картину гравитационного оседания элементов в межгалактическом газе. Термодиффузия в межгалактической

плазме 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. Для скопления Abell 2029 показано, что термодиффузия может полностью удалить элементы тяжелее водорода из холодного ядра скопления за 5–7 миллиардов лет.

2. Показано, что возможное отклонение обилия гелия от его солнечного значения в межгалактической среде должно привести 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. Показано, что из-за перераспределения гелия под действием диффузии в скоплении Abell 2029 обилие металлов в нем может быть недооценено на 30 %, а угломерное расстояние на 10–25 %.
3. Показано, что в результате действия процессов термодиффузии и гравитационной седиментации на периферии массивных скоплений галактик среднее по объему скопления обилие гелия должно возрасть с течением времени. Показано, что в скоплении Abell 2029 интегральное обилие гелия внутри радиуса 1.5 Мпк растет с темпом 5 % за один миллиард лет.
4. Исследована роль диффузии элементов в межзвездной среде эллиптических галактик. 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.
5. На основе выборки из 11 эллиптических галактик, для которых имеются рентгеновские данные обсерваторий *Chandra* и *XMM-Newton* высокого качества, показано, что в результате гравитационной седиментации обилие гелия может возрасть

внутри эффективного радиуса галактики в среднем на 60 % за 1 миллиард лет.

6. Показано, что диффузия элементов в холодном и практически нейтральном первичном газе могла привести к увеличению содержания гелия и дейтерия по отношению к водороду на уровне $\delta X/X \sim 10^{-4}$ внутри минигало с массами 10^5 – $10^6 M_{\odot}$ на заре эпохи космологической реионизации ($z \sim 10$).
7. Показано, что умеренный и ожидаемый прогрев газа во Вселенной на начальной стадии ее реионизации мог привести к усилению эффекта диффузии примерно в 4 раза, на уровне $\delta X/X \sim 4 \times 10^{-4}$ для гало с массами $\sim 10^6 M_{\odot}$. Степень увеличения обилия первичных элементов зависит от температуры и степени ионизации газа и, следовательно, потенциально может дать уникальную информацию о первых этапах реионизации Вселенной.
8. Разработана спектральная модель теплового рентгеновского излучения умеренно релятивистских ($\beta = v_b/c \sim 0.03$ – 0.3) барионных джетов в рентгеновских двойных системах. Показано, что такая модель позволяет описать спектр высокого разрешения микроквазара SS 433, полученный с помощью телескопа *Chandra* во время прецессионной фазы системы, близкой к кроссоверу, когда вклад несвязанных с излучением джетов компонент в энергетический спектр ожидается минимальным.

Список публикаций по теме диссертации

Результаты работы полностью содержатся в статьях опубликованных в реферируемых журналах:

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
(*Element diffusion in the interstellar medium in early-type galaxies*
Medvedev, P., Sazonov, S., Gilfanov, M., 2017,
Astronomy Letters, 43, 5, 285-303)

Апробация работы

Основные результаты диссертации были представлены на семинарах отдела астрофизики высоких энергий ИКИ РАН 2012–2016 г., международных конференциях: “*Cosmology and relativistic astrophysics, Zeldovich-100*”, 2014 г., Москва, Россия; “*Astrophysical Jets*”, 2016 г., Кардженс, Франция; “*Galaxy Clusters 2017*”, 2017 г., Сантандер, Испания; Астрофизическом коллоквиуме летнего семестра университета Тюбинген, 2017 г., Тюбинген, Германия. А также на Всероссийских конференциях “*Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра*”, “*Физика плазмы в солнечной системе*” и “*Фундаментальные и прикладные космические исследования*”, 2012-2017 г., Москва.

Объем диссертации

Диссертация состоит из шести глав, общий объем которых составляет 137 страниц, включая 39 рисунков и 5 таблиц. Главы 2–6 имеют отдельные списки цитируемой литературы представленные в конце каждой главы. Общее количество цитируемой литературы составляет 190 публикаций.

Содержание работы

В первой главе (Введение) описаны решаемые в диссертации научные задачи, их научный контекст и актуальность. В конце первой главы приведены выносимые на защиту положения диссертационной работы, список публикаций по теме диссертации, апробация работы и описан личный вклад автора.

Во второй главе описывается метод расчета диффузии, используемый в главах диссертации 3–5. Процесс диффузии условно разделяется на три составляющих: диффузию, обусловленную градиентом концентрации; гравитационное оседание (седиментация) тяжелых элементов; и термодиффузию. Первый процесс стремится восстановить однородный в пространстве химический состав газа. Второй процесс распределяет частицы пропорционально Больцман-фактору: $n_s(r) \propto e^{-m_s\phi(r)/kT(r)}$, где $\phi(r)$ — потенциал гравитационного поля. Поэтому более тяжелые частицы стремятся сосредоточиться плотнее к центру скоплений или галактик. Третий процесс возникает из-за зависимости частоты столкновений частиц от температуры газа. Для полностью ионизованной плазмы, частота столкновений уменьшается с ростом температуры, легкие частицы в результате термодиффузии стремятся двигаться против градиента температуры, в то время как диффузия более тяжелых и более заряженных частиц направлена из холодной области в горячую. Для решения задач диффузии в диссертации используется система усредненных кинетических уравнений для многокомпонентной плазмы, полученная в приближениях описанных в работе (Бюргерс, 1969).

В третьей главе рассмотрено влияние аномалий (отклонений от солнечного обилия) распределения гелия в межгалактической среде скоплений галактик на интерпретацию данных наблюдений в рентгеновском и микроволновом диапазонах длин волн. В частности, исследована роль диффузии элементов в межгалактическом газе скоплений. Хорошо известно (Гильфанов & Сюняев, 1984; Чужой & Нуссер, 2003; Чужой & Лоеб, 2004; Эттори & Фабиан, 2006; Штыковский & Гильфанов, 2010), что процесс гравитационной седиментации может существенно перераспределять гелий и другие тяжелые элементы во всем объеме газа скоплений, увеличивая их обилие в ядре. Так как относительное содержание гелия не может быть получено напрямую из рентгеновской спектроскопии, то на практике, как правило, предполагается солнечное обилие гелия во всем объеме межгалактического газа. Поэтому отклонения действительного содержания гелия от солнечного значения приводят к ошибкам

при определении основных параметров газа: меры эмиссии, полной массы, температуры и обилия металлов (см. Дрейк 1998; Эттори & Фабиан 2006).

Роль и эффективность диффузии в межгалактической среде скоплений галактик все еще остается спорным вопросом. Хорошо известны по крайней мере два физических явления, способных существенно подавить процессы переноса в газе скоплений — магнитные поля и турбулентное крупномасштабное перемешивание газа. Степень влияния этих явлений остается предметом дискуссий, а их учет многократно усложняет рассмотрение уравнений диффузии. Поэтому в этой главе диссертации была решена модельная задача диффузии без учета магнитных полей и турбулентностей газа, тем самым оценен максимально возможный эффект диффузии на важные для космологии измерения. Решение задачи диффузии было получено с помощью метода подробно описанного в главе 2. Для этого используются численные гидродинамические симуляции, основанные на решении полной системы кинетических уравнений Бюргера для многокомпонентной плазмы.

Мы рассмотрели диффузию в двух моделях скоплений: (а) скопление с холодным ядром, описанное наблюдаемыми профилями температуры и массы скопления A2029 (модели наилучшей аппроксимации из работы Вихлинин и др., 2006) и (б) изотермическое скопление, профиль плотности массы которого аналогичен A2029, а температура равна $T = 3$ кэВ или 6 кэВ. Диффузия элементов в изотермической модели происходит по каноническому сценарию, согласно которому все элементы тяжелее водорода оседают в центральной области скопления. Так, увеличение обилия гелия здесь достигает фактора ~ 5 –10 на временном промежутке ~ 3 –7 миллиардов лет. Градиенты температуры в скоплениях с холодными ядрами принципиально меняют картину диффузии. Связанная с этими градиентами термодиффузия противодействует гравитационному оседанию элементов, вымещая в результате тяжелые элементы из центрального ядра скопления, $r \leq 10$ –20 кпк. Наши расчеты показали значительное, в ~ 1.5 –2 раза, увеличение обилия тяжелых элементов на промежуточных радиусах ~ 100 –500 кпк в модели скопления A2029 (см. рис. 1).

Важным результатом расчетов является постепенное увеличение среднего по объему симмуляции обилия гелия в модели с холодным ядром (внешний радиус модельных скоплений фиксируется на расстоянии 1.5 Мпк от центра). Этот эффект вызван взаимным усилением гравитационной седиментации и термодиффузии во внешних

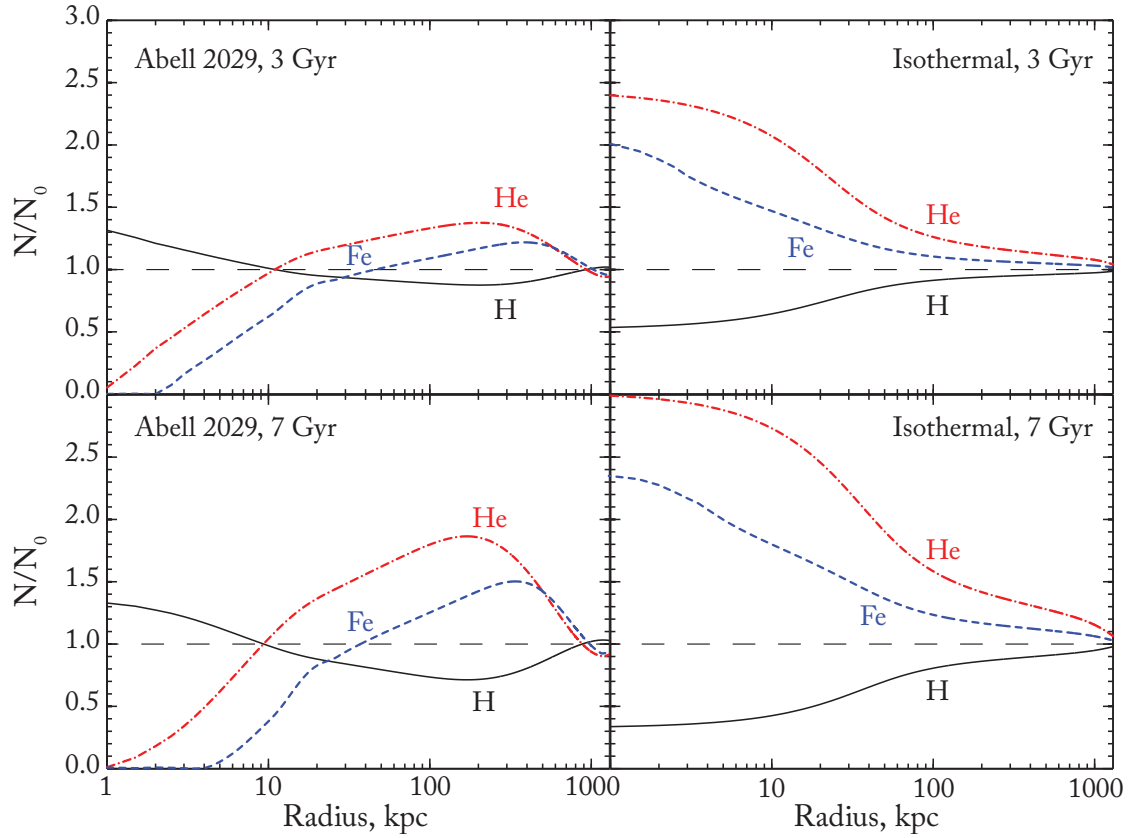


Рис. 1: Распределения элементов в межгалактическом газе после 3 млрд. лет (верхние панели) и 7 млрд. лет (нижние панели) диффузии, нормированные на соответствующие распределения в начальный момент времени. Водород, гелий и железо показаны черными сплошными линиями, красным штрих-пунктиром и голубым пунктиром, соответственно. Левые панели изображают результат для модели A2029, правые — для изотермического скопления с $T = 6$ кэВ.

частях скоплений. Для модели A2029 мы получили возрастание обилия гелия на $\sim 5\%$ за один миллиард лет диффузии.

Приведены оценки влияния перераспределения элементов в A2029 и изотермической модели на параметры скопления, определяемые из рентгеновских и микроволновых данных. Так определяемое обилие металлов может быть недооцененным на $\approx 10\text{--}40\%$, а полная масса газа в скоплении оказывается меньше действительной на $\approx 7\%$. Ошибки в угломерном расстоянии могут достигать $\sim 10\text{--}15\%$ при определении расстояния из комбинации рентгеновских и C3 наблюдений с апертурой порядка r_{500} . Для изотермической модели такие ошибки несколько больше и существенно возрастают (до $\approx 20\text{--}25\%$) при малых значениях апертуры $\sim 100\text{--}200$ кпк.

В четвертой главе представлены расчеты диффузии элементов в межзвездной среде для 13 галактик раннего типа, имеющих разные типы окружения и охватывающих широкий диапазон рентгеновских светимостей. Как и в предыдущей главе, мы рассмотрели полную систему уравнений Бюргера в приближении незамагниченной космической плазмы, что позволило получить оценку максимально возможных эффектов диффузии. Для расчетов использовались радиальные распределения плотности и температуры межзвездного газа, полученные на основе наблюдательных данных обсерваторий *Chandra* и *XMM-Newton*.

Расчет показал, что возможна существенная гравитационная седиментация гелия и других тяжелых элементов. Для ярких в рентгеновском диапазоне галактик, имеющих возрастающий радиальный профиль температуры, средний относительный прирост массы гелия составляет 23% внутри $1 r_{\text{eff}}$ за 1 млрд. лет. Для менее массивных галактик, имеющих спадающий профиль температуры, соответствующий прирост гелия равен 60%. Эффект термодиффузии существенно ускоряет седиментацию элементов для галактик такого типа, в то время как для галактик с холодными ядрами термодиффузия приводит к уменьшению темпа седиментации.

Мы сравнили полученные результаты с амплитудой гравитационной седиментации гелия в скоплениях галактик с холодными ядрами. Оказалось, что в межзвездном газе обилие гелия может меняться столь же существенным образом, как и в межгалактической плазме. Это происходит несмотря на то, что температура межзвездной среды значительно меньше температуры межгалактического газа. Высокий темп диффузии в межзвездной среде связан с меньшей массовой долей газа и сложной зависимостью температура–масса для галактик раннего типа.

Пятая глава посвящена исследованию влияния диффузии на среднее обилие гелия и других первичных элементов внутри формирующихся первых структур в ранней Вселенной. Рассмотрено две стадии формирования и эволюции структур: рост возмущений плотности до момента их коллапса и последующая космологическая аккреция вещества на вириализованные гало.

Наши расчеты показали, что к концу “темной эпохи”, когда барионная материя еще оставалась холодной и нейтральной, диффузия могла увеличить обилие гелия, дейтерия и лития относительно их первичных значений в первых вириализованных минигало: максимальный эффект прироста обилия гелия определен на уровне $\delta Y_p / Y_p \sim 10^{-4}$ для объектов с массами $\sim 10^5 - 10^6 M_\odot$. Умеренный и ожидаемый прогрев межгалактической среды первыми рентгеновскими источниками или другими возможными механизмами на ранних стадиях эпохи космологической реионизации мог значительно увеличить эффективность диффузии, которая должна возникать в аккреционном потоке вещества для химических элементов с разной массой. Увеличение обилия гелия за счет рассмотренного типа диффузии могло достигать $\delta Y_p / Y_p \sim 3 \times 10^{-4}$ для минигало с массами $\sim 10^6 M_\odot$ и температуры прогрева $T_{\text{prei}} \sim 100$ К. Объекты с такими массами потенциально могли формировать первые звезды во Вселенной. Для более массивных гало $\sim 10^9 M_\odot$ и температуры прогрева $T_{\text{prei}} \sim 10^4$ К соответствующий эффект достигает $\delta Y_p / Y_p \sim 3 \times 10^{-5}$, если допустить, что газ остается при этом умеренно ионизованным, $x_e \lesssim 40\%$. Такие гало, предположительно, могли формировать первые галактики, а некоторые из протогалактик, сформированных в рассмотренный период эволюции Вселенной, вероятно, могут существовать и в настоящее время в виде карликовых галактик. Возможно, такие объекты являются лучшими кандидатами для поиска предсказанных в этой главе диссертации эффектов диффузии первичных элементов.

Следует отметить, что обилие элементов, в том числе гелия, наблюдаемые в настоящее время в большинстве регионов Вселенной, были сформированы под влиянием звездной эволюции. Считается, что эффекты звездной эволюции должны быть минимальны для обедненных металлами карликовых галактик. Основываясь на измеряемых регрессиях можно сделать вывод, что звездная эволюция в таких объектах способна изменять обилие гелия лишь на уровне $\delta Y_p / Y_p \sim 10^{-3}$, в то время как для галактик с солнечной металличностью $\delta Y_p / Y_p \gtrsim 10^{-2}$ (Изотов, Стасинска & Гусева, 2013). Это сопоставимо, но все же несколько больше, чем полученная амплитуда

эффектов диффузии. Отметим также, что для измерений первичного обилия гелия влияние звездной эволюции обычно корректируется с помощью процедуры экстраполяции регрессии обилия гелия от металличности газа к нулевой величине металличности (Изотов, Стасинска & Гусева, 2013) (в качестве триггера звездной эволюции обычно используется обилие кислорода).

Получены оценки эффектов диффузии для космологической аккреция горячего газа на вириализованные гравитационно-связанные объекты в течение и после завершения эпохи реионизации Вселенной. Результаты расчетов показали, что диффузия не могла увеличить обилие гелия, дейтерия и лития относительно их первичных значений более чем в $\sim 10^{-5}$, если межгалактическая среда имела температуру $\sim 10^4$, которая ожидаема для периода времени $z \lesssim 6$. Однако существенно большие отклонения обилия гелия могли возникать в случае аккреции горячей плазмы с температурой $T \sim 10^6$ К на массивные гало ($\sim 10^{13} M_{\odot}$), тогда соответствующий эффект можно ожидать на уровне $\delta Y_p / Y_p \sim 10^{-3}$. Такие массивные объекты могут соответствовать протогруппам галактик. Предполагается, что основная амплитуда эффекта диффузии набирается вблизи $z \sim 2$.

В шестой главе произведен расчет и представлена общедоступная спектральная модель теплового рентгеновского излучения барионных газовых струй (джетов) в рентгеновских двойных системах, основанная на свойствах хорошо изученного Галактического микроквазара SS 433. Барионный джет рассматривается в виде сильно коллимированного (угол раскрытия $\Theta \sim 1^\circ$) и умеренно релятивистского (скорость течения $\beta \sim 0.03 - 0.3$) потока плазмы.

Тепловое рентгеновское излучение джета находится путем суммирования вкладов тонких поперечных слоев постоянной температуры, при этом температурный профиль находится самосогласованно с учетом охлаждения за счет адиабатического расширения и потерь энергии на излучение. Набор параметров модели включает: 1) кинетическую светимость джета; 2) температуру газа у основания джета; 3) оптическую толщину по томсоновскому рассеянию в основании джета; 4) металличность газа, 5) угол раскрытия джета, 6) баллистическую скорость газа. Поскольку модель предсказывает не только форму, но и светимость выходящего излучения барионного джета, нормировочный коэффициент модели не является свободным параметром, а однозначно определяется из связи параметров модели, если известно расстояние до источника. Модель представлена в виде *fits*-библиотеки спектров, рассчитанных

для широкого диапазона параметров джета, которые могут иметь место в рентгеновских двойных системах. Модель доступна по адресу: <http://hea133.iki.rssi.ru/public/bjet/> и может быть использована в программных системах для анализа спектральных данных, таких как *xspec*, *sherpa* и др.

При помощи построенной модели, нами проведено исследование возможности использования простых наблюдаемых характеристик рентгеновского излучения (таких как наклон спектра, отношение потоков в различных энергетических полосах, отношение потоков в линиях и в континууме) для диагностики физических параметров джетов (температуры и плотности у основания) без использования сложного анализа широкополосного спектра высокого разрешения. Наша модель показала, что наклон рентгеновского спектра в полосе от 3 до 6 кэВ, наиболее чувствителен к температуре основания джета и практически очень слабо зависит от других параметров модели. За счет ярких линий группы железа в области 6–7 кэВ, отношение потоков в полосах 6–9 / 3–6 кэВ позволяет оценить металличность газа в джете. Дополнительную информацию о плотности газа в джете можно получить анализируя отношения потоков в линиях наиболее ярких триплетов гелий-подобных ионов тяжелых элементов (неона, кремния, серы и железа).

Исследована возможность применения модели для описания наблюдаемых рентгеновских спектров SS 433 высокого качества. В качестве наблюдательного материала были выбраны данные, полученные с помощью прибора HETGS обсерватории *Chandra* во время фазы прецессии объекта близкой к кроссоверу (от англ. “crossover” — момент времени, когда лучевые скорости линий джетов совпадают, то есть джеты лежат в картинной плоскости наблюдателя). Ожидается, что в таких фазах вклад несвязанных с барионными джетами компонент в рентгеновское излучение системы должен быть минимальным. Показано, что модель способна хорошо воспроизводить спектр в диапазоне 1–3 кэВ, с разумными параметрами наилучшей аппроксимации (см. рис. 2). Полученные параметры в целом хорошо согласуются с параметрами найденными из анализа простых наблюдаемых характеристик рентгеновского излучения.

Представленная модель может быть использована не только для анализа данных рентгеновской спектроскопии высокого разрешения SS 433, но также и для поиска компонент, связанных с излучением барионных джетов, в спектрах Галактических рентгеновских двойных (например, 4U 1630-47, Диас Триго и др. (2013)), ультраярких рентгеновских источников (например, Holmberg II X-1, Уолтон и др.

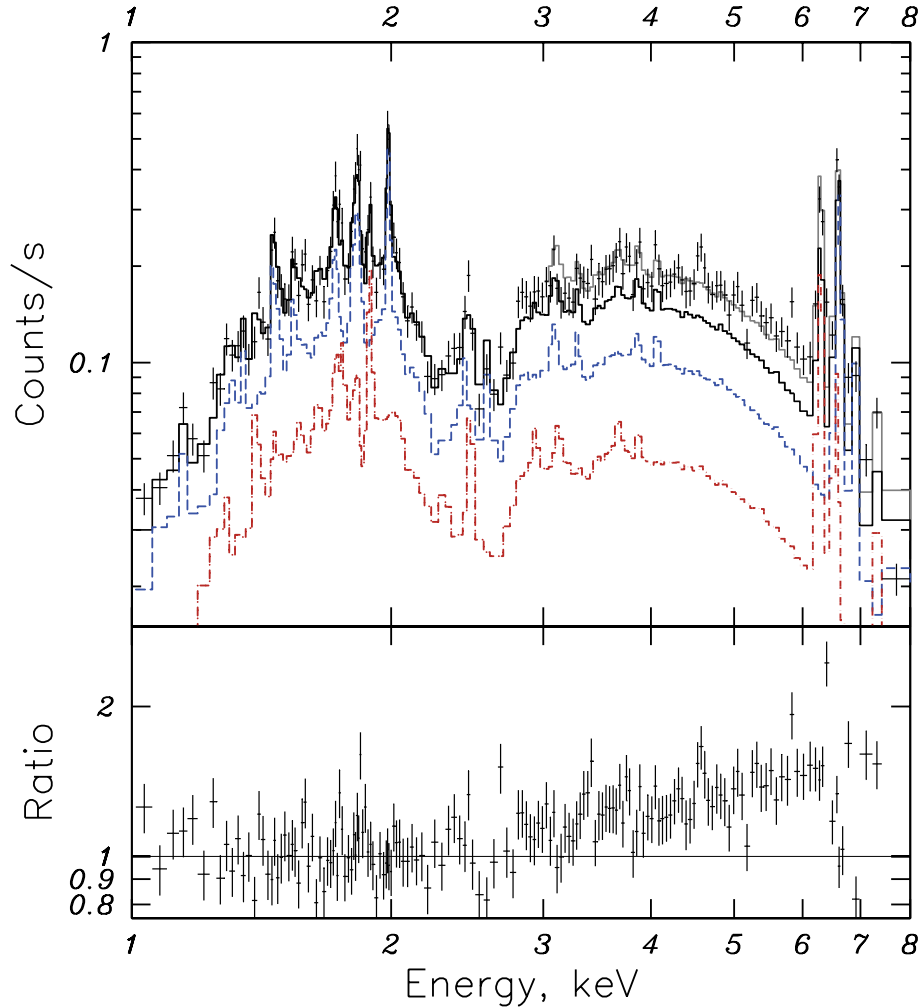


Рис. 2: Спектр SS 433, снятый прибором HEG обсерватории *Chandra* во время прецессионной фазы, близкой к кроссоверу (ObsId 1019, данные ре-биннированы для лучшей видимости). Черной сплошной линией показана модель с параметрами наилучшей одновременной аппроксимации данных HEG & MEG в диапазоне 1–3 кэВ (для расстояния до системы $d_{SS4333} = 5.5$ кпк). Голубой (верхняя) и красной (нижняя) штриховыми линиями показан вклад голубого и красного джетов, соответственно.

(2015)), а также возможного аналога SS 433 в галактике NGC 7793 (S26) (Сория и др., 2010) . Новые данные космической обсерватории *NuSTAR* (Харрисон и др., 2013) в жесткой рентгеновской области в скором времени также помогут определить точность построенной нами модели и направления ее дальнейшего развития.

Список литературы

- Бюргерс (Burgers, J. M.), Flow Equation for Composite Gases. New York: Academic Press., 1969
- Вихлинин и др.(Vikhlinin, A., Kravtsov, A., Forman, W., Jones, C., Markevitch, M., Murray, S. S., Van Speybroeck, L.), *ApJ*, 2006, 640, 691
- Гильфанов & Сюняев (Gilfanov, M. R., Syunyaev, R. A.), *Soviet Astronomy Letters*, 1984, 10, 137
- Диас Триго и др.(Díaz Trigo, M., Miller-Jones, J. C. A., Migliari, S., Broderick, J. W., Tzioumis, T.), 2013, *Natur*, 504, 260
- Дрейк (Drake, J.), *ApJ*, 1998, 496, L33
- Изотов, Стасинска & Гусева (Izotov, Y. I., Stasińska, G., Guseva, N. G., 2013), *A&A*, 558, A57
- Комаров и др.(Komarov, S., Churazov, E., Kunz, M., Schekochihin, A.), *MNRAS*, 460, 467, 2016
- Малышкин (Malyshkin, L.), 2001, *ApJ*, 554, 561
- Маркевич (Markevitch, M.), eprint arXiv:0705.3289, 2007
- Медвижи & Лоеб (Medvigu, D., Loeb, A.), eprint arXiv:0110014, 2001
- Нараян & Медведев (Narayan, R., Medvedev, M. V.), *ApJ*, 2001, 562, L129
- Панагулия, Сандерс & Фабиан (Panagoulia, E. K., Sanders, J. S., Fabian, A. C.), *MNRAS*, 2015, 447, 417
- Поспелов & Афшорди (Pospelov, M., Afshordi, N.), eprint arXiv:1208.0793, 2012

- Рикельме и др.(Riquelme, M., Quataert, E., Verscharen, D.) ApJ, 2016, 824, 123
- Сория и др.(Soria, R., Pakull, M. W., Broderick, J. W., Corbel, S., Motch, C.), 2010, MNRAS, 409, 541
- Уолтон и др.(Walton, D. J., et al.), 2015, arXiv, arXiv:1504.00023
- Харрисон и др.(Harrison, F. A., et al.), 2013, ApJ, 770, 103
- Чандран & Коули (Chandran, B.D.G., Cowley, S.C.), Phys. Rev. Lett., 1998, 80, 3077
- Чандран & Марон (Chandran, B.D.G., Maron, J.L.) ApJ, 2004, 602, 170
- Чужой & Нуссер (Chuzhoy, L., Nusser, A.), MNRAS, 2003, 342, L5
- Чужой & Лоеб (Chuzhoy, L., Loeb, A.), MNRAS, 2004, 349, L13
- Штыковский & Гильфанов (Shtykovskiy, P., Gilfanov, M.), MNRAS, 2010, 401, 1360
- Эттори & Фабиан (Ettori, S., Fabian, A. C.), ApJ, 2006, 369, L42