

«УТВЕРЖДАЮ»

Исполняющий обязанности директора  
Федерального государственного бюджетного  
научного учреждения «Федеральный  
исследовательский центр Институт прикладной  
физики Российской академии наук»,



Г.Г. Денисов

« 6 » декабря 2017 г.

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» о диссертации Медведева Павла Сергеевича «Физические процессы в горячей астрофизической плазме: диффузия элементов в межгалактической и межзвездной среде, рентгеновское излучение джетов микроквazarов», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 - астрофизика и звездная астрономия

Диссертация посвящена двум проблемам: изменению химического состава межзвездного и межгалактического газа под влиянием различных связанных с диффузией эффектов и моделированию спектров излучения аккрецирующих объектов с околорелятивистскими струйными выбросами горячей плазмы.

Во второй главе изложены методы расчета диффузионных процессов, которые рассмотрены в диссертации.

Третья глава посвящена изучению термодиффузии и гравитационного оседания гелия и более тяжелых элементов в межгалактическом газе скоплений галактик. Показано, что гравитационное оседание гелия может в несколько раз увеличивать его относительную долю в центрах скоплений. Однако, для скоплений с холодным ядром и более горячей периферией определяющим становится эффект термодиффузии, который в случае положительного градиента температуры противодействует гравитационному оседанию тяжелых элементов и пересиливает его. Полученные результаты важны как при изучении первичного обилия химических элементов (которое, таким образом, может не соответствовать фактически наблюдаемому), так и при интерпретации эффекта Сюняева-Зельдовича. Все результаты получены для коэффициентов диффузии, вычисленных для немагнитной плазмы. В случае, когда плазменная турбулентность порождает магнитное поле и препятствует диффузии, результаты диссертации должны

рассматриваться как предел сверху на величину эффектов фракционирования. Соответственно, проделанные расчеты не могут дать вполне определенных предсказаний в ситуации, когда есть неопределенность в коэффициентах диффузии, но отработанная методика расчетов будет давать все более точные результаты по мере уточнения характеристик диффузии частиц в турбулентной плазме.

В четвертой главе эффекты термодиффузии и гравитационного оседания исследуются для межзвездного газа в отдельных галактиках. Ее основное отличие от предыдущей главы состоит в использовании других модельных профилей температуры и плотности газа, отвечающих имеющемуся наблюдательному материалу. Полученные результаты показывают (тоже в виде верхнего предела) достаточно большой разброс в предсказываемом профиле относительной доли гелия и тяжелых элементов. Поскольку химический состав газа, из которого формируются звезды, влияет на их эволюцию, то полученные результаты важны для понимания различий в эволюции звезд в разных галактиках (или даже в разных частях одной галактики).

Пятая глава посвящена оценке роли термодиффузии и гравитационного оседания в эволюции первых массивных объектов во Вселенной — минигало с массой от миллионов до сотен миллионов солнечных масс. В этом случае диффузия происходит на фоне постоянной аккреции со значительной гидродинамической скоростью, а газ не полностью ионизованный, как в случае галактик и скоплений галактик, а почти полностью нейтральный. Результаты расчетов предсказуемо показали, что диффузионные потоки вещества малы по сравнению с гидродинамическими, даже несмотря на большую величину коэффициентов диффузии в нейтральном газе по сравнению с плазмой. Изложенные в главе 5 результаты, в силу малости эффектов (на уровне  $\sim 10^{-4}$ ), представляются скорее работой на перспективу в расчете на значительное увеличение точности наблюдений.

Наконец, шестая глава посвящена стоящей особняком задаче — моделированию спектров излучения узконаправленных истечений плазмы, которые формируются аккрецирующими нейтронными звездами или черными дырами. Диссертант использовал стандартный инструментарий для расчета спектров в корональном приближении (вносились также поправки, связанные со столкновительным возбуждением и девозбуждением ионных уровней), который в качестве параметров принимает химический состав плазмы и ее температуру. Именно нахождение зависимости температуры от расстояния вдоль джета и является целью использованной в диссертации физической модели джета — одномерной струи, где градиент температуры определяется адиабатическим охлаждением и локальными потерями на излучение. Как показано в диссертации на примере фактически единственного известного в своем классе объекта, результаты расчета неплохо согласуются с наблюдательными данными. Следует отметить, что в последней главе диссертации пройдены все стадии пути от качественного понимания физических процессов до интерпретации наблюдений, то есть сформулированы физические модели, обоснованы методы их численного расчета, проведены соответствующие вычисления, а их результаты в виде конкретных спектров протестированы на согласие с наблюдениями с учетом функций отклика используемых для наблюдений инструментов.

Диссертация написана ясно, неплохим языком, сделанные выводы в достаточной мере обоснованы и имеют важное значение для интерпретации наблюдений и понимания физических процессов в межзвездном газе и в джетах от аккрецирующих источников. В то же время по диссертации имеется ряд замечаний.

Во-первых, — это замечания по построению диссертации.

1) Диссертация состоит из двух разнородных частей. Первая часть посвящена газу в галактиках и скоплениях галактик, вторая — джетам, формируемым аккрецирующими компактными объектами (нейтронными звездами и черными дырами). Рассматриваемые физические процессы тоже различны: в первой части это процессы диффузии, а во второй — радиационные процессы в континууме и в линиях в оптически тонкой плазме с меняющейся температурой. Объединение двух настолько различных частей в одной диссертации требует обоснования или хотя бы пояснения, которое в диссертации отсутствует.

2) Вторая глава посвящена описанию методов расчета, которые в дальнейшем используются для получения результатов в главах 3 – 5, однако в ней не приводится ни полная система уравнений, ни описание численной схемы их решения.

3) Изложение неоднородно по степени детализации. Физическая и техническая (расчетная) стороны проблемы в главах 3 и 4 излагаются довольно схематично, а в главах 5 и 6 — весьма подробно. Правда, результаты исследований во всех главах изложены довольно основательно.

Во-вторых, некоторые аспекты рассматриваемых в диссертации физических явлений оставлены без должного внимания.

1) В диссертации не раз отмечается, что наличие в плазме магнитных полей почти наверняка сильно замедляет диффузию, однако соответствующие теоретические представления находятся в зачаточном состоянии и для расчетов не годятся. С таким положением дел предложено справиться, вводя в расчеты заданный эмпирический коэффициент, уменьшающий скорость диффузии. Однако не объяснено, почему этот коэффициент не должен зависеть от температуры, ведь конкретный вид температурной зависимости важен для термодиффузии и, в принципе, может даже изменить ее знак.

2) Диссертант упоминает возможность турбулентного перемешивания газа, однако этот вопрос никак не обсуждается. В отсутствие хотя бы грубых оценок по порядку величины, трудно судить, может ли (и при каких условиях) турбулентное перемешивание противодействовать процессам разделения на фракции в результате термодиффузии и гравитационного осаждения.

3) Гравитационное осаждение гелиевой фракции (или напротив — ее выталкивание наружу в результате термодиффузии) сопровождается при фиксированном профиле давления значительным изменением гравитационной энергии газа. Этот вопрос никак не обсуждается в диссертации, хотя величина такого изменения энергии сопоставима с полной тепловой энергией газа, а мощность (при отнесении изменения энергии к хаббловскому времени) — с мощностью самых сильных активных ядер.

4) Время установления теплового равновесия между электронами и ионами в межгалактическом газе скоплений может достигать десятков миллионов лет, что сопоставимо с временами, на которых могут меняться характеристики газа (например, из-за включения и выключения мощных активных ядер галактик). В диссертации не обсуждается вопрос о том, в какой мере отклонение от приближения изотермической плазмы может повлиять на результаты проведенных расчетов.

5) Предложенная в диссертации модель джетов в аккрецирующих источниках является фактически одномерной, а мощность испускаемого излучения как функция расстояния вдоль джета — результатом интегрирования излучательной способности плазмы по поперечному сечению джета. Результат такого интегрирования зависит не только от температуры и средней плотности плазмы, но и от поперечного профиля плотности, который, к тому же, может меняться вдоль джета. Также может меняться и угол раскрытия джета, что приведет к иному виду слагаемого, отвечающего за адиабатическое охлаждение в уравнении теплового баланса. Оба эти вопроса в диссертации не обсуждаются.

Проведенный анализ показывает, что представленная диссертация является добротной работой, выполненной по актуальной проблематике современной астрофизики. В диссертации достигнут значительный прогресс в определении величины эффектов разделения химических компонент в плазме галактик, скоплений галактик и первых формирующихся во Вселенной гравитационно-связанных объектов, а также разработана простая физическая модель джетов, порождаемых аккрецирующими нейтронными звездами и черными дырами. Достоверность результатов обоснована сочетанием хорошо апробированных методов решения задач по кинетике плазмы с использованием наиболее современных баз данных. Замечания по диссертации, сделанные выше, не влияют на высокую оценку диссертации и представленных в ней результатов.

Текст автореферата правильно отражает содержание диссертации.

Результаты работы были представлены на многочисленных авторитетных отечественных и международных конференциях.

Результаты диссертации могут быть использованы в работе Института прикладной физики РАН, Физического института РАН им. П.Н. Лебедева, ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга МГУ, Специальной астрофизической обсерватории РАН, Крымской астрофизической обсерватории РАН.

Диссертация соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (пунктам 9-11, 13, 14), утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, является законченным научным исследованием и удовлетворяет требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор Медведев Павел Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 - астрофизика и звездная астрономия.

Доклад Медведева П.С., отражающий основные результаты диссертации, был заслушан на научном семинаре отдела астрофизики и физики космической плазмы

Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» 23 июня 2017 г. Работа получила положительную оценку участников семинара.

Отзыв составили:

Заведующий отделом астрофизики и физики космической плазмы, член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук по специальности 05.27.03 – квантовая электроника, Институт прикладной физики РАН, 603950, г. Нижний Новгород, БОКС - 120, ул. Ульянова, 46  
тел: 7(831)4164894,  
эл. почта: kochar@appl.sci-nnov.ru

В. В. Кочаровский

Старший научный сотрудник отдела астрофизики и физики космической плазмы, кандидат физико-математических наук по специальностям 01.04.08 – физика и химия плазмы и 01.03.02 – астрофизика, радиоастрономия, Институт прикладной физики РАН, 603950, г. Нижний Новгород, БОКС - 120, ул. Ульянова, 46  
тел: 7(831)4164894,  
эл. почта: derishev@appl.sci-nnov.ru

Е. В. Дерисhev

Отзыв утвержден на Ученом совете отделения Физики плазмы и электроники больших мощностей, протокол № 4 от « 5 » декабря 2017 г.

Председатель совета,

член-корр. РАН

Секретарь совета, к.ф.-м.н.

Г.Г. Денисов

О.С. Моченева