

Отзыв на диссертационную работу *Медведева Павла Сергеевича*

«Физические процессы в горячей астрофизической плазме: диффузия элементов в межгалактической и межзвёздной среде, рентгеновское излучение джетов микроквазаров»,

**представленную на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.03.02 — Астрофизика и звёздная астрономия**

Диссертация посвящена распространению тепловых частиц в галактических и внегалактических объектах и интерпретации генерируемого в них теплового рентгеновского излучения. Прежде, чем переходить к обсуждению диссертации, следует отметить, что Павел Сергеевич Медведев является членом команды из ИКИ, которая является лидером не только в России, но и в мире по исследованию космического рентгеновского излучения. На протяжении нескольких десятков лет членами этой группы были получены фундаментальные результаты, ставшие впоследствии классическими. Члены группы являются экспертами в области рентгеновской астрономии, и как никто в мире лучше разбираются в проблемах, обсуждаемых в диссертации. В этой связи можно быть уверенным, что анализ проблем, представленных в диссертации, был проведен под контролем экспертов высочайшего уровня. Работа Павла Сергеевича представляют собой относительно небольшой фрагмент всей совокупности исследований, проводимых в этой области в ИКИ. Важно отметить, что базисом для диссертации П. С. Медведева служили результаты его старших коллег, которые ясно понимают необходимость и актуальность исследований Павла Сергеевича даже с учетом ограниченности используемых в диссертации приближений.

В первой части работы анализируется распределение элементов фоновой плазмы в массивных астрофизических объектах, начиная с галактик и заканчивая скоплениями галактик. В первой главе автор приводит систему уравнений, где описываются процессы, определяющие распространение частиц в указанных объектах. В качестве таковых рассматриваются диффузия за счет градиента плотности фоновых частиц, гравитационного оседания и термодиффузии, которая возникает в объектах с неоднородным распределением температур. Учет последнего процесса важен по той причине, что, например, в скоплениях температура в центре существенно ниже, чем на периферии. В то же время во многих работах анализ проводится в приближении постоянной температуры, когда эффектом термодиффузии пренебрегается. Эффективная скорость каждого из этих процессов определяется из баланса диффузии и силы торможения, связанной с кулоновскими столкновениями. Как показано в диссертации, совместное действие указанных выше процессов приводит к достаточно сложному распределению различных элементов в астрофизических объектах, обусловленному обогащением или, напротив, обеднением гелия и более тяжелых элементов в центральных областях. Это приводит к вариациям химсостава фоновой плазмы в зависимости от расстояния от центра. Такой вывод представляется важным, поскольку во многих исследованиях химсостав фоновой плазмы предполагается однородным и (иногда) равным солнечному. В диссертации показано, что подобное утверждение не всегда является верным, что в принципе может приводить к неточностям в оценках параметров исследуемых объектов. Расчеты корректного распределения относительно тяжелых ядер в

объектах представляются важными в связи с тем, что тепловое рентгеновское излучение фоновой плазмы в этом случае определяется не только классическими процессами тормозного излучения протонов и электронов. Обогащение тяжелыми ядрами приводит к существенному увеличению тормозного излучения, поскольку оно пропорционально Z^2 , а также к дополнительному механизму излучения, обусловленного захватом свободных электронов тяжелыми ядрами. В целом все указанные механизмы необходимо учитывать при интерпретации диффузного рентгеновского излучения из различных астрофизических объектов, а также эффекта Сюняева-Зельдовича, наблюдаемого в направлении скоплений галактик. Как показано в первой части диссертации неучет термодиффузии может приводить к значительным ошибкам в оценке распределения химсостава и угломерного расстояния скоплений галактик, вычисляемого с использованием эффекта Сюняева-Зельдовича. Как показано в диссертации, эффект термодиффузии приводит к концентрации тяжелых элементов на периферии скоплений. В то же время обогащение тяжелыми элементами в эллиптических галактиках происходит в их центральных областях за счет процессов гравитационной седиментации. В последней шестой главе рассматривается тепловое рентгеновское излучение джетов в предположении, что оно формируется как суммарный поток из тонких слоев джета, имеющих разную температуру. Температура при этом рассчитывается из совместного учета эффектов адиабатического охлаждения и теплового тормозного излучения. В работе вычисляются излучение в континууме и линиях в предположении чисто тепловой природы этого излучения. Разработанная модель применяется для интерпретации излучения источников типа SS 433. В процессе работы диссертантом разработана библиотека спектров для широкого диапазона параметров джетов, которая находится в открытом доступе. Предполагается, что результаты расчетов могут быть в скором времени подтверждены наблюдениям на рентгеновском телескопе NuSTAR.

Переходя к замечаниям по диссертации, я не вижу очевидных ошибок или неверных утверждений в диссертации. Это неудивительно, поскольку, как я отмечал выше, работа проводилась «под присмотром» руководителей диссертанта, которые являются лучшими специалистами в данной области. Диссертант ясно отмечает в тексте те приближения, которые он использует в анализе (пренебрежение турбулентным перемешиванием, учетом магнитного поля и тд.). Например, такое пренебрежение, как отмечает диссертант, дает верхний предел для оценки эффекта, связанного с термодиффузией. Тем не менее, было бы интересно понять, насколько отказ от термодинамического равновесия сможет поменять полученные результаты. Кроме того, в астрофизических объектах помимо тепловой плазмы имеются нетепловые частицы, влияние которых, например, на амплитуду эффекта Сюняева-Зельдовича может быть значительным. Наличие сторонних источников рентгеновского излучения в двойных источниках, как мне кажется, может существенно исказить картину излучения в линиях и континууме от джетов. Я не могу исключить, что эти вопросы, возникшие у меня при прочтении диссертации, являются несущественными. Оценивая диссертацию в целом, отмечу, что это добротное научное исследование, сделанное на высоком уровне.

В заключение следует отметить, что все результаты, представленные в диссертации, основаны на четырех статьях, опубликованных в ведущих астрофизических журналах с высоким уровнем цитируемости. Эти результаты получены при непосредственном участии П.С.Медведева. Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации. Текст диссертации написан ясным грамотным языком с минимальным числом опечаток. Диссертация П.С.Медведева соответствует всем требованиям ВАК,

предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 01.03.02 — Астрофизика и звёздная астрономия, а ее автор, Павел Сергеевич Медведев, вполне заслуживает присуждении ему степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент:
доктор физико-математических наук,
профессор

В. А. Догель

05.12.2017

Адрес: 119991 Москва, Ленинский пр. 53
Отделение теоретической физики им. И. Е. Тамма
Физического института им. П. Н. Лебедева РАН

06.12.2017

Подпись В.А.Догеля удостоверяю

Ученый секретарь ФИАН

к.ф.-м.н.



А. В. Колобов