

ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
Горностаева Михаила Игоревича
на тему: «Моделирование переноса излучения и гидродинамических
процессов в высокотемпературной астрофизической плазме»
по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия
(01.03.02 – Астрофизика и звездная астрономия)

Наблюдения аккрецирующих нейтронных звезд несут уникальную информацию о структуре магнитосферы звезды, конфигурации магнитного поля и физических процессах, происходящих в условиях недостижимых в земных лабораториях. Накоплен большой объем данных рентгеновских наблюдений спектров нейтронных звезд с высоким временным разрешением. Адекватная интерпретация полученных спектров и формулировка программы новых наблюдений с обсерваторией Спектр Рентген-Гамма требуют построения теоретических моделей, описывающих структуру аккреционных течений и процессы формирования наблюдаемых спектров излучения. В условиях высокого темпа аккреции течение плазмы в магнитном поле звезды становится радиационно-доминированным и процессы комптоновского рассеяния играют существенную роль в динамике потоков плазмы и формировании спектров излучения. Комптоновские взаимодействия играют важную роль и в исследовании скоплений галактик – крупнейших гравитационно-связанных объектов во вселенной, которые, в частности, представляют собой уникальную лабораторию для изучения природы темной материи и физической космологии. Современные наблюдения эффекта Сюняева-Зельдовича, основанного на комптоновском рассеянии микроволнового излучения горячей плазмой, позволяют определить важные космологические параметры. Поэтому, **оригинальные исследования** влияния различных конфигураций магнитного поля на формирование спектров аккрецирующих замагниченных нейтронных звезд и особенностей углового распределения комптонизованных квантов реликтового излучения, выполненные в диссертации М.И.Горностаева с учетом реалистичной геометрии источников, **являются актуальными.**

В представленной диссертации построены численные модели спектров стационарных аккреционных радиационно-доминированных течений плазмы на замагниченные нейтронные звезды, в которых ось магнитного диполя не проходит через центр звезды. Такие эффекты, как возможные отклонения от аксиально-симметричных полей? необходимо учитывать для корректной интерпретации профилей наблюдаемых импульсов рентгеновского излучения. Моделирование распространения излучения в облаках горячей плазмы конечного размера с различными распределениями источников квантов выполненное М.И.Горностаевым методом Монте Карло существенно дополняет широко используемые аналитические решения задачи в упрощенной постановке. Это дает возможности интерпретации наблюдений и, таким образом, определяет существенную **практическую значимость** работы.

Диссертация объёмом 120 страниц, включая четыре главы основного текста (число цитированных публикаций составляет 115 наименований), 30 рисунков и 4 таблицы, представляет собой законченное оригинальное научное исследование, посвящённое процессам формирования и переноса излучения в аккреционных течениях сильно замагниченных нейтронных звезд и горячей космической плазме скоплений галактик.

Введение к диссертации посвящено краткому описанию постановки задач и содержания диссертации, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В Главе 1 на основе обзора наблюдательных данных об излучении замагниченных нейтронных звезд автор дает критический анализ теоретических моделей аккреции на звезды с различными темпами аккреции и локальными конфигурациями магнитного поля в области торможения падающего вещества.

Глава 2 посвящена рассмотрению конкретных моделей спектров излучения аккреционных колонок. Построение последовательной теории излучения предполагает учет реальной конфигурации магнитного поля звезды и, особенно в случае высоких темпов аккреции, самосогласованное рассмотрение нелинейной динамики радиационно-доминированного течения в трехмерной геометрии. Сложность системы и отсутствие детальных данных о структуре магнитного поля предполагают построение упрощенных моделей с ограниченным учетом перечисленных выше факторов. Поэтому, автором диссертации изучены некоторые важные частные задачи, демонстрирующие влияние отклонения от аксиально-симметричных конфигураций магнитного

поля на профили импульсов излучения рентгеновских пульсаров. Автор выполнил численное моделирование для демонстрации количественного влияния отклонения формы трехмерных ударных волн от решений аксиально-симметричной модели на распределение потока излучения, выходящего с боковой поверхности аккреционной колонки. Расчеты выполнены для случаев заполненной и незамкнутой полой аккреционных колонок. Обсуждается важная роль поперечной по отношению к магнитному полю диффузии излучения и выполнено сравнение ограниченной трехмерной модели с известными одномерными и двумерными моделями.

В главе 3 обсуждаются модели радиационно-доминированных течений плазмы в аккреционных колонках и расчеты спектров выходящего излучения. Модель предусматривает одновременный расчет переноса излучения в приближении двумерного уравнения диффузии, температуры и профиля скорости плазмы в колонке. Автор исследовал эффекты модификации формы фронта ударной волны в согласованной модели течения с анизотропной диффузией фотонов в радиационно-доминированной колонке. Выполнен анализ формы спектра выходящего излучения аккреционной колонки в зависимости от структуры течения, и, в частности, от значений дивергенции скорости и температуры, достигаемых в ударной волне.

В Главе 4 рассмотрены спектры и угловые распределения фотонов, формирующиеся в облаках конечного размера, заполненных горячим газом, посредством комптоновских процессов. Формирование распределения фотонов в облаке исследовано с использованием модели переноса квантов методом Монте-Карло с учетом многократных комптоновских рассеяний в облаках с произвольной оптической толщиной. Задача решена для равновесных релятивистских распределений Максвелла-Ютнера электронов в облаке плазмы и допускает различные возможные источники исходных фотонов. Результаты расчетов спектров и угловые распределения интенсивности излучения, выходящего из облаков полезны для интерпретации результатов наблюдений теплового эффекта Сюняева-Зельдовича в широких диапазонах температур и частот.

Достоверность и надёжность результатов диссертационной работы подтверждаются использованием адекватных аналитических и численных методов, а также сравнением, где возможно, полученных данных с результатами других научных групп. Основные результаты диссертации в 2016-2021 годах прошли проверку на авторитетных международных и

всероссийских конференциях и были опубликованы в статьях в журналах MNRAS, Astronomy & Astrophysics.

Диссертация содержит ряд результатов, важных для астрофизики и космологии, однако не лишена отдельных недостатков. Часть недостатков связана с продолжением достоинств работы – выбором автором задач, допускающих в значительной степени аналитические подходы к решению. Это обстоятельство позволяет выполнить качественный анализ влияния отдельных физических параметров, но ограничивает использование результатов при анализе данных наблюдений реальных астрофизических объектов. В качестве замечаний и пожеланий можно отметить следующие:

1. Автор предложил интерпретацию наблюдений циклотронной линии в спектре источника GX 304-1. В модели этого источника формирование линии связано с резонансным рассеянием фотонов, рожденных у основания аккреционной колонки, на электронах в gyro-резонансном слое в окрестности бесстолкновительной ударной волны. Магнитное поле за фронтом ударной волны сильно флуктуирует, с высокой амплитудой флуктуаций, и для продольной волны область пространства, охваченная флуктуациями может быть широкой. Хотя оцененная оптическая толщина gyro-резонансного слоя велика (см. уравнение 58), представляется интересным понять возможное влияние флуктуаций магнитного поля на характеристики циклотронной линии.
2. Важное для моделей, описанных в главе 3, уравнение (98) для средних чисел заполнения в диффузионном приближении включает “динамическую комптонизацию”, т.е. влияние сжимаемости течения плазмы на функцию распределения фотонов. Для неоднородного профиля скорости плазмы с конечным значением коэффициента диффузии квантов, следует оценить тогда и возможную роль эффектов вязкого взаимодействия фотонов с течением.
3. В четвертой главе, посвященной численному моделированию эффекта Сюняева-Зельдовича, решен ряд задач с различными распределениями источников чернотельных фотонов по однородному облаку плазмы. По мнению оппонента, аппарат моделирования искажения спектров фотонов, описанный в диссертации, следует также применить к более реалистичным астрофизическим задачам, учитывающим сильные неоднородности плазмы в скоплениях галактик. Влияние неоднородности распределения плотности и температуры газа в скоплениях, на

искажения спектра чернотельного излучения, а также роль эффектов энерговыделения в активных галактиках представляют существенный интерес.

Следует подчеркнуть, что вышеперечисленные замечания носят, в основном, характер пожеланий и не снижают высокой общей оценки результатов автора диссертации.

Диссертация представляет собой законченное оригинальное научное исследование, в котором выполнено моделирование процессов формирования и переноса излучения в горячей астрофизической плазме, представляющее существенный интерес для построения детальных моделей аккрецирующих нейтронных звезд и скоплений галактик.

Результаты, полученные в диссертационной работе Горностаева М.И., 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, ГАИШ МГУ им. М.В. Ломоносова, АКЦ ФИАН, СПбГУ и др.

Основное содержание диссертации опубликовано в ведущих журналах и цитируется в научных изданиях. Автореферат полностью отвечает содержанию диссертации.

Вместе с тем, указанные выше замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия (01.03.02 – Астрофизика и звездная астрономия) (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена, согласно приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Горностаев Михаил Игоревич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия (01.03.02 – Астрофизика и звездная астрономия).

Официальный оппонент:

доктор физ.-мат. наук, профессор, член.-корр. РАН,

Руководитель отделения физики плазмы, атомной физики и астрофизики
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук
Быков Андрей Михайлович

Контактные данные:

тел.: +7(812) 2927160; e-mail: byk@astro.ioffe.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация: 01.03.02, астрофизика и радиоастрономия

Адрес места работы:

194223, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26,

ФТИ им. А.Ф.Иоффе,

Тел.: 812 2927160; e-mail: byk@astro.ioffe.ru

Подпись сотрудника ФТИ им. А.Ф.Иоффе

Быкова А.М. удостоверяю:

Ученый секретарь ФТИ им. А.Ф.Иоффе


Патров М.И.

05.05.2022