

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М. В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Горностаев Михаил Игоревич

**Моделирование переноса излучения и
гидродинамических процессов в
высокотемпературной астрофизической плазме**

01.03.02 — Астрофизика и звездная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2021

Работа выполнена на кафедре астрофизики и звездной астрономии физического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова

Научный руководитель — *Постнов Константин Александрович, доктор физико-математических наук, профессор*

Официальные оппоненты — *Барков Максим Владимирович, доктор физико-математических наук, ИНАСАН, отдел физики и эволюции звезд, ведущий научный сотрудник*
Быков Андрей Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор, ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, отделение физики плазмы, атомной физики и астрофизики, руководитель
Гребенев Сергей Андреевич, доктор физико-математических наук, ИКИ РАН, отдел астрофизики высоких энергий, лаборатория рентгеновской и гамма-астрономии, заведующий

Защита диссертации состоится «9» декабря 2021 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета МГУ.01.02 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119234, г. Москва, Университетский проспект, дом 13, конференц-зал.

E-mail: mgornost@gmail.com

Диссертация находится на хранении в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27). С информацией о регистрации участия в защите и с диссертацией в электронном виде можно ознакомиться на сайте ИАС «ИСТИНА»: <http://istina.msu.ru/dissertations/388814729/>.

Автореферат разослан «20» октября 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук

М. В. Пружинская

Общая характеристика работы

Построение теоретических моделей излучающих областей аккрецирующих сильнозамагниченных нейтронных звезд (причем моделей достаточно точных) почти всегда оказывается весьма нетривиальным в силу сложности рассматриваемых физических процессов. В рамках настоящей диссертации основное внимание уделено анализу свойств формирующихся над магнитными полюсами нейтронных звезд аккреционных колонок с бесстолкновительными и радиационно-доминированными ударными волнами.

Высота бесстолкновительной ударной волны, предположительно формирующейся при относительно низких темпах аккреции, уменьшается с ростом рентгеновской светимости исследованных источников GX 304–1 и Ser X-4. Это обстоятельство является основанием для проведения интерпретации насыщения средней энергии циклотронной линии в спектрах обоих источников в рамках указанной модели. Согласие с наблюдениями демонстрирует и модель, описывающая жесткость непрерывного рентгеновского спектра источника Ser X-4 как функцию темпа аккреции.

Радиационно-доминированные волны исследуются численными методами в диффузионном приближении, причем газовым давлением пренебрегается. Основные численные модели строятся из соображений, связанных с учетом как геометрических, так и физических свойств излучающих областей при будущих расчетах профилей импульсов рентгеновского излучения. Понятна необходимость появления теоретических профилей, которые были бы рассчитаны с применением наиболее реалистичных пространственных распределений интегрального и (или) спектрального потока излучения колонки, ге-

нерируемого при преобразовании в энергию излучения кинетической энергии аккрецируемого вещества. Трехмерные заполненные и незамкнутые полые колонки моделируются численно. Продолжение расчетов может быть интересным ввиду естественным образом возникающих вопросов о влиянии на результат изменения тех или иных параметров задачи. Результатом самосогласованных расчетов пространственно двумерных колонок являются спектры выходящего излучения, которые получены в предположениях, представляющихся разумными в рассматриваемой физической ситуации.

Межгалактический газ скоплений галактик может считаться примером астрофизического объекта, демонстрирующего влияние процесса комптонизации на спектральный перенос проходящего через среду излучения. В результате рассеяний на тепловых электронах (температура может составлять десятки кэВ) средняя частота фотонов микроволнового излучения увеличивается вследствие эффекта Доплера. Интенсивность фона уменьшается в рэлей-джинсовской области спектра и возрастает в виновской. Основными результатами настоящих расчетов являются спектральные распределения усредненной по внешней относительно границы облака полусфере интенсивности модифицированного комптонизацией микроволнового фона и угловые распределения спектральной интенсивности выходящего излучения.

Предмет и объекты исследования

Рассматриваются формирование излучающих областей замагниченных аккрецирующих нейтронных звезд, процессы, определяющие свойства этих областей, а также комптонизация реликтового излу-

чения на тепловых электронах горячего газа скоплений галактик. Указанные явления определяют предмет настоящего исследования.

При построении моделей генерации излучения рентгеновских пульсаров изучены различные режимы остановки вещества при аккреции на замагниченную нейтронную звезду: остановка в атмосфере за счет кулоновских взаимодействий, торможение в бесстолкновительной и радиационно-доминированной ударных волнах. Моделируются параметры циклотронных линий, изменяющиеся с темпом аккреции (с рентгеновской светимостью). Предполагается, что линии формируются в изотермической однородной атмосфере с магнитным полем, приближенно описывающей излучающую область под бесстолкновительной ударной волной. Исследуется поведение жесткости непрерывного спектра, формирующегося в такой области (также в зависимости от темпа аккреции).

Две главы диссертации посвящены расчетам радиационно-доминированных аккреционных колонок. Последние исследуются численно на основе конечно-разностных схем, приводящих к решениям систем уравнений радиационной гидродинамики.

Комптонизация реликтового излучения на тепловых электронах горячего межгалактического газа исследуется численно в модели однородных сферических облаков.

Перечисленные астрофизические системы являются объектами исследования.

Цели и задачи

Целью работы является достижение теоретических результатов, согласующихся с фидируемыми наблюдениями и не противоречащих основным рассматриваемым уравнениям.

Решены следующие задачи.

- Проведено моделирование характеристик циклотронной линии (энергии, ширины, глубины и относительного потока излучения) в спектре источника GX 304–1 (по данным обсерватории RXTE) в рамках модели аккреционной колонки с бесстолкновительной ударной волной. Теоретически описываются эффект насыщения зависимости энергии линии от принимаемого рентгеновского потока и, кроме того, поведение других параметров циклотронной особенности. При помощи этой же модели интерпретируются зависимость энергии циклотронной линии и зависимость рентгеновской жесткости непрерывного спектра от светимости для источника Ser X-4 (по данным обсерватории NuSTAR). Для обоих источников, GX 304–1 и Ser X-4, строится зависимость высоты бесстолкновительной ударной волны от темпа аккреции.
- Численно решены трехмерные задачи о структуре и интегральном по частотам излучении радиационно-доминированных аккреционных колонок, не имеющих аксиальной симметрии. Показано, что уравнение энергии, входящее в систему рассматриваемых уравнений, выводится из фоккер-планковского кинетического уравнения для фотонных чисел заполнения в предположении о локальном комптоновском равновесии в среде. Численное моделирование осуществлено для заполненных и незамкнутых

полых излучающих областей (коэффициент диффузии анизотропен). Приводятся распределения интегрального потока излучения по боковым поверхностям колонок.

- Разработана самосогласованная модель пространственно двумерных радиационно-доминированных аккреционных колонок с учетом процессов тепловой и динамической комптонизации излучения (ускорением силы тяжести пренебрегается). В рамках этой модели, в основе которой лежит кинетическое уравнение для фотонов, рассчитываются двумерная аксиально-симметричная структура возникающих в колонке радиационно-доминированных ударных волн, распределение комптоновской температуры внутри колонки и спектр выходящего излучения. Построены и исследованы явные и неявные устойчивые численные схемы, обеспечивающие решение рассматриваемой системы уравнений (исследован случай не зависящих от частоты анизотропных коэффициентов диффузии).
- Численно решена задача о комптонизации излучения в отсутствие магнитного поля в однородных сферических облаках плазмы постоянной температуры методом Монте-Карло. Рассчитаны формируемые тепловой комптонизацией спектры для случаев монохроматического и планковского источника мягкого излучения. Осуществлено моделирование теплового эффекта Сюняева-Зельдовича, в ходе которого рассчитаны угловые распределения интенсивности выходящего из облаков излучения.

Актуальность темы и степень ее разработанности

Физическая интерпретация наблюдений требует развития существующих моделей излучающих областей аккрецирующих замагниченных нейтронных звезд. Создание самосогласованных моделей, которые бы подразумевали получение непротиворечивых решений, описывающих распределения характеристик вещества и поля излучения, является, по-видимому, основным направлением в теоретическом исследовании процесса формирования спектров рентгеновских пульсаров. За время, прошедшее после экспериментального открытия этих объектов [1], достигнут существенный прогресс в понимании соответствующих физических процессов. В 1978 г. была открыта циклотронная линия в спектре источника Her X-1 [2], указывающая на значение магнитного поля вблизи поверхности нейтронной звезды. Необходимость точных расчетов переноса излучения в областях формирования спектра вызывала появление теоретических исследований взаимодействия вещества и излучения в сверхсильных магнитных полях [3, 4, 5, 6, 7, 8]. Продолжались работы, связанные с расчетами структуры аккреционных колонок [9, 10, 11, 12, 13, 14]. В последние десятилетия интерес к моделированию спектральных свойств излучающих областей аккрецирующих замагниченных нейтронных звезд возрос в связи с неизбежным появлением новых наблюдательных данных.

В содержащих циклотронную линию спектрах рентгеновских пульсаров при изменении рентгеновской светимости источников наблюдаются вариации энергии центра линии. Отрицательная корреляция между энергией линии и рентгеновской светимостью ха-

рактерна для спектров двух источников, V 0332+53 и 4U 0115+63 [15, 16]. Положительная корреляция свойственна семи источникам, среди которых, к примеру, Her X-1 [17]. В обзоре [18] собраны современные данные о наблюдениях корреляций между энергией линии и рентгеновской светимостью. В настоящей работе исследованы закономерности в поведении параметров циклотронной линии, связанные с изменением рентгеновской светимости, на примере наблюдений источников GX 304–1 (данные обсерватории RXTE) [19] и Ser X-4 (данные обсерватории NuSTAR) [20]. В последней работе по данным NuSTAR произведено исследование изменений в жесткости непрерывного спектра источника Ser X-4, наблюдающихся с темпом аккреции.

В условиях радиационно-доминированных колонок перенос излучения обычно описывается уравнениями, записывающимися на основе фоккер-планковского кинетического уравнения для чисел заполнения в фазовом пространстве фотонов, выведенного в [21] (см., например, [22, 23, 24, 25]). В работах [26, 27] численно моделируется одномерная структура аккреционной колонки с учетом давления излучения и давления электронной и ионной компонент газа. Строится итерационный алгоритм, осуществляющий на каждом шаге решение пространственно одномерного кинетического уравнения для фотонных чисел заполнения (аналогичного рассмотренному в [23]) и системы гидродинамических уравнений и приводящий к согласующемуся с наблюдательными данными решению для спектров выходящего излучения. Решаемая система уравнений является непротиворечивой с точки зрения учитываемых в уравнениях процессов.

В настоящей работе система уравнений радиационной гидродинамики, включающая полученное в [21] кинетическое уравнение для

фотонов, решалась численно в пространственно двумерных областях. В предыдущих исследованиях двумерная структура колонок моделировалась на основе интегрального по частотам уравнения энергии (см., например, [13, 28]). Результатами настоящих расчетов являются непротиворечивые распределения скорости, электронной (комптоновской) температуры и спектральной плотности энергии излучения, определяющие спектр излучения, выходящего из колонки.

В 1969 г. был теоретически предсказан эффект искажения спектра реликтового излучения в направлениях на скопления галактик [29, 30]. После обнаружения эффекта в 1972 г. [31] при наблюдениях скопления галактик в созвездии Волосы Вероники проблема нахождения модифицированного комптонизацией на тепловых электронах межгалактического газа спектра реликтового излучения неоднократно решалась аналитически. Основным направлением развития задачи стал поиск решений, пригодных для высоких электронных температур порядка 0.1 энергии покоя электрона. Релятивистские поправки к найденным в [29, 30] на основе уравнения Компанейца [32, 33] решениям можно получить путем фоккер-планковских разложений кинетического уравнения высших порядков [34, 35, 36]. При сравнении собственных результатов с полученными в предыдущих исследованиях в настоящей работе воспроизводятся решения для дисторсии интенсивности, найденные в [34, 35]. Указанные разложения, однако, сходятся слишком медленно с ростом температуры ввиду уширения комптоновского ядра рассеяния, что подтверждается численными расчетами. Поэтому в случае высоких температур решение обычно получают численным интегрированием уравнения Больцмана для фотонов (как это сделано, например, в [37, 38]) или путем моделирования переноса излучения методом Монте-Карло [39, 40]. Анализ

влияния многократных рассеяний в рамках фоккер-планковского подхода проведен в работе [41].

В ходе настоящего исследования (см. [40]) для численного моделирования переноса излучения написан и применяется код, в основе которого лежит алгоритм, описанный в работе [42]. Скорости электронов описываются релятивистским максвелловским распределением. Численно исследуется проблема зависимости спектра выходящего из облака излучения от пространственного распределения источников фотонов чернотельного излучения.

Научная новизна

Изменения геометрических и физических параметров аккреционной колонки с бесстолкновительной ударной волной рассмотрены в качестве причин возникновения наблюдательных особенностей конкретных рентгеновских пульсаров. К интерпретации поведения циклотронной линии применена теория резонансного рассеяния в гирорезонансном слое, толщина которого сравнима с высотой ударной волны над поверхностью нейтронной звезды (см., например, [43]).

Наблюдаемая рентгеновская жесткость источника Сер X-4 фитируется в модели ненасыщенной комптонизации в ограниченной среде.

Осуществлены трехмерные и самосогласованные численные расчеты аккреционных колонок с преобладанием давления излучения.

Проведены численные исследования теплового эффекта Сюняева-Зельдовича в моделях с различными пространственными распределениями источников фотонов по облаку плазмы. Рассчитаны высокочастотная область спектра и угловые распреде-

ления выходящего излучения.

Научная новизна исследования определяется оригинальностью результатов, выводов, разработанных алгоритмов и программ. В случаях заимствования методов использование последних приводит к получению ранее не публиковавшихся результатов. Воспроизведение отдельных решений, не характеризующихся теоретической новизной, комментируется со ссылками на источники.

Методология диссертационного исследования

Теоретические модели, соответствующие указанным выше объектам исследования, разработаны с применением общих методов астрофизики и вычислительной математики. Основным методологическим приемом является вычислительный эксперимент. Модели радиационно-доминированных аккреционных колонок строятся на основе конечно-разностных схем для уравнений в частных производных. Взаимодействие реликтового излучения с электронами межгалактического газа моделируется методом Монте-Карло с весами. Часть работы, не связанная с разработкой численных схем, основана на предположении о реалистичности моделей, приводящих к удовлетворительному согласию с наблюдательными данными и не содержащих очевидных физических противоречий.

Положения, выносимые на защиту

1. Изменения параметров циклотронной линии (энергии, ширины, глубины и относительного потока излучения) в спектрах рентгеновских источников со светимостями $\sim 10^{36}$ эрг с^{-1} и вариации рентгеновской жесткости непрерывных спектров таких источников (указанные явления наблюдаются при вариациях принимаемого рентгеновского потока) можно интерпретировать как следствия изменений геометрических и физических свойств аккреционной колонки с бесстолкновительной ударной волной.
2. Разработанные разностные схемы и программы приводят к решениям для трехмерной структуры радиационно-доминированной аккреционной колонки в случаях заполненного и незамкнутого полого канала. Поток выходящего с боковой поверхности излучения, вычисленный на одном и том же расстоянии от поверхности нейтронной звезды, меняется вдоль рассматриваемой кривой. Для определения степени влияния несимметричности распределений потока по поверхностям колонок и геометрии последних на профили импульсов излучения требуются расчеты угловых распределений характеристик выходящего из колонок излучения и учет отражения этого излучения от поверхности нейтронной звезды.
3. Разработанный численный алгоритм самосогласованного моделирования радиационно-доминированных колонок приводит к трехмерному решению для спектральной плотности энергии излучения. Проинтегрированное по частоте в каждой точке, это решение описывает двумерную пространственную структуру ко-

лонки в терминах полной плотности энергии излучения, одно-значно связанной со скоростью вещества. Двумерные распределения электронной (комптоновской) температуры показывают, что при каждом значении вертикальной координаты (не превышающем максимальную высоту области торможения) температура меняется вдоль радиуса, в несколько раз возрастая в ударной волне по сравнению со значениями, характерными для зоны медленного оседания вещества под ударной волной. Рентгеновские цвета выходящего из колонки излучения (интегрального по поверхности) при фиксированном радиусе колонки и компонентах коэффициента диффузии уменьшаются с ростом темпа аккреции (в рассматриваемом диапазоне параметров задачи).

4. Численное рассмотрение теплового эффекта Сюняева-Зельдовича в ограниченной среде приводит к результатам, которые согласуются с решениями уравнений Фоккера-Планка, учитывающих релятивистские поправки. Указанные аналитические решения успешно воспроизводятся численно в модели точечного источника и источников, распределенных по поверхности сферического однородного облака газа. Спектральный индекс искаженных спектров, соответствующий высоким частотам, может быть найден аналитически известными методами. Рассчитанные в модели поверхностного источника угловые распределения интенсивности выходящего из облака излучения показывают, что спектральная зависимость интенсивности не является одной и той же для различных направлений. Линейность дисторсии интенсивности по оптической толщине облака (в рассмотренных диапазонах параметров) имеет место для

каждого направления.

Личный вклад автора

В диссертационной работе описываются расчеты, сделанные автором с использованием самостоятельно разработанных компьютерных программ. Разработка физических моделей, описанных во второй и третьей частях работы [44], осуществлена автором самостоятельно с использованием цитируемой литературы, численный алгоритм построения самосогласованных моделей обсуждался на конференциях [3, 4, 5], указанных в первом из приведенных ниже списков. Из работ [19, 20, 45] в диссертацию (гл. 1) включена лишь часть исследований, личный вклад автора в работу над которой составляет не менее половины. Вклад автора в исследование и моделирование эффекта Сюняева-Зельдовича [40], описанные в гл. 4, составляет не менее половины. Заимствованный материал снабжен ссылками на источники. Прочий (неопубликованный) материал принадлежит автору.

Теоретическая и практическая значимость результатов исследования

Моделирование вариаций параметров циклотронной линии в рамках модели аккреционной колонки с бесстолкновительной ударной волной является основой теоретической интерпретации соответствующих наблюдательных данных, анализ которых приводит к приближенным количественным зависимостям (для конкретных рентге-

новских источников) высоты ударной волны над поверхностью нейтронной звезды.

Трехмерные модели радиационно-доминированных аккреционных колонок могут послужить основой для проведения реалистичного моделирования профилей импульсов интегрального по частотам излучения рентгеновских пульсаров.

Двумерные самосогласованные модели радиационно-доминированных аккреционных колонок важны для получения реалистичных пространственных и спектральных распределений потока выходящего излучения. Разработанная модель одновременно с расчетом спектрального переноса излучения приводит к двумерным распределениям скорости потока и комптоновской температуры в среде и демонстрирует, таким образом, физические свойства колонки, не описываемые решениями двумерных и трехмерных задач для интегрального по частоте уравнения энергии [9, 13, 28, 44]. Предыдущие исследования (например, [24, 25, 26, 27]) основаны на пространственно одномерных моделях, приближенно учитывающих выход фотонов с боковой границы (итерационная процедура, построенная в [26, 27], подразумевает решение системы уравнений радиационной гидродинамики).

Численные релятивистские расчеты комптонизации реликтового излучения позволяют фитировать наблюдательные данные вне зависимости от значений параметров горячего межгалактического газа. Расчет угловых распределений интенсивности выходящего из облаков межгалактической среды важен для анализа пространственно разрешенных спектральных наблюдений скоплений галактик.

Степень достоверности и апробация результатов

Численные расчеты протестированы в ходе сопоставления с известными результатами и являются достоверными. В случае отсутствия решений для прямого сравнения проводится приблизительное количественное тестирование с использованием наиболее близких по физическим параметрам решений.

По результатам работы самостоятельно сделаны доклады на следующих конференциях.

1. XIII конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования» (2016, ИКИ РАН, Москва).
2. «Успехи российской астрофизики: теория и эксперимент» (2016, ГАИШ МГУ, Москва).
3. Международная конференция «Physics of neutron stars» (2017, ФТИ им. Иоффе, Санкт-Петербург).
4. «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра» (2017, ИКИ РАН, Москва).
5. XV конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования» (2018, ИКИ РАН, Москва).
6. XIII съезд международной общественной организации «Астрономическое общество» (2018, ИНАСАН ГАИШ МГУ, Москва).
7. «Успехи российской астрофизики: теория и эксперимент» (2019, ГАИШ МГУ, Москва).

8. «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра» (2019, ИКИ РАН, Москва).

Принято участие в подготовке докладов, представлявших со-авторами на следующих конференциях.

1. «HEAD Fifteenth Divisional Meeting» (2016, Нейплс, Флорида).
2. «INTEGRAL 2016 Conference: Gamma-Ray Astrophysics in Multi-Wavelength Perspective» (2016, Амстердам).
3. XIV конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования» (2017, ИКИ РАН, Москва).
4. Международный семинар «16th INTEGRAL/BART Workshop» (2019, Карловы Вары).
5. Международный семинар «XCalibur» (2019, Винчестер).
6. «European Astronomical Society Annual Meeting» (2020, Лейден).

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, основной части, содержащей 4 главы, заключения и библиографического списка, который включает 115 наименований. В работе 30 рисунков и 4 таблицы. Объем диссертации составляет 120 страниц.

В первой главе рассматриваются кулоновское торможение и излучающая область с бесстолкновительной ударной волной, на качественном уровне описывается радиационно-доминированный режим.

Обсуждаются способы моделирования наблюдательных проявлений аккрецирующих рентгеновских пульсаров.

Во второй главе рассматривается трехмерное моделирование радиационно-доминированных аккреционных колонок, не обладающих аксиальной симметрией.

В третьей главе описываются алгоритм и результаты самосогласованных расчетов пространственно двумерных радиационно-доминированных аккреционных колонок.

В четвертой главе рассматривается моделирование комптонизации в отсутствие магнитного поля методом Монте-Карло.

Список публикаций

Основные результаты по теме диссертации изложены в 4 научных статьях, 4 из которых опубликованы в рецензируемых печатных изданиях, индексируемых в базе данных Web of Science/Scopus и рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности:

1. Discovery and modelling of a flattening of the positive cyclotron line/luminosity relation in GX 304–1 with RXTE / Richard E. Rothschild, Matthias Kuhnel, Katja Pottschmidt et al. // Monthly Notes of the Royal Astronomical Society. — 2017. — Apr. — Vol. 466, no. 3. — P. 2752. — 1610.08944. Импакт-фактор WoS: 4.957 (5 лет), 5.287 (2020);
2. Luminosity-dependent changes of the cyclotron line energy and spectral hardness in Cepheus X-4 / V. Vybornov, D. Klochkov, M. Gornostaev et al. // Astronomy & Astrophysics. — 2017. —

May. — Vol. 601. — P. A126. — 1702.06361. Импакт-фактор WoS: 5.203 (5 лет), 5.802 (2020);

3. Gornostaev M. I., Lipunova G. V. Comptonization of CMB in galaxy clusters. Monte Carlo computations // Monthly Notes of the Royal Astronomical Society. — 2020. — Dec. — Vol. 499, no. 2. — P. 2994. — 2009.14698. Импакт-фактор WoS: 4.957 (5 лет), 5.287 (2020);
4. Gornostaev M. I. Three-dimensional modelling of accretion columns: spatial asymmetry and self-consistent simulations // Monthly Notes of the Royal Astronomical Society. — 2021. — Feb. — Vol. 501, no. 1. — P. 564. — 2012.10501. Импакт-фактор WoS: 4.957 (5 лет), 5.287 (2020).

Часть результатов описана в 7 тезисах докладов.

Список литературы

- [1] Discovery of Periodic X-Ray Pulsations in Centaurus X-3 from UHURU / R. Giacconi, H. Gursky, E. Kellogg et al. // ApJL. — 1971. — Jul. — Vol. 167. — P. L67.
- [2] Evidence for strong cyclotron line emission in the hard X-ray spectrum of Hercules X-1 / J. Truemper, W. Pietsch, C. Reppin et al. // ApJL. — 1978. — Feb. — Vol. 219. — P. L105.
- [3] Photon Splitting in a Strong Magnetic Field / S. L. Adler, J. N. Bahcall, C. G. Callan, M. N. Rosenbluth // Phys. Rev. L. — 1970. — Oct. — Vol. 25, no. 15. — P. 1061.
- [4] Canuto V., Lodenquai J., Ruderman M. Thomson Scattering in a Strong Magnetic Field // Phys. Rev. D. — 1971. — May. — Vol. 3, no. 10. — P. 2303.
- [5] Photon Opacity in Surfaces of Magnetic Neutron Stars / J. Lodenquai, V. Canuto, M. Ruderman, S. Tsuruta // ApJ. — 1974. — May. — Vol. 190. — P. 141.
- [6] Ventura J. Scattering of light in a strongly magnetized plasma // Phys. Rev. D. — 1979. — Mar. — Vol. 19, no. 6. — P. 1684.
- [7] Kirk J. G. The propagation of high frequency waves in a strongly magnetized plasma // Plasma Physics. — 1980. — Jul. — Vol. 22. — P. 639.
- [8] Meszaros P., Nagel W. X-ray pulsar models. I - Angle-dependent cyclotron line formation and comptonization // ApJ. — 1985. — Nov. — Vol. 298. — P. 147.

- [9] Davidson K. Accretion at a Magnetic Pole of a Neutron Star // Nature Physical Science. — 1973. — Nov. — Vol. 246. — P. 1.
- [10] Shapiro S. L., Salpeter E. E. Accretion onto neutron stars under adiabatic shock conditions // ApJ. — 1975. — Jun. — Vol. 198. — P. 671.
- [11] Tsygan A. I. Mechanism of X-ray and soft gamma-ray radiation from accreting neutron stars // A&A. — 1977. — Aug. — Vol. 60, no. 1. — P. 39.
- [12] Basko M. M., Sunyaev R. A. The limiting luminosity of accreting neutron stars with magnetic fields // MNRAS. — 1976. — May. — Vol. 175. — P. 395.
- [13] Wang Y.-M., Frank J. Plasma infall and X-ray production in the magnetic funnel of an accreting neutron star // A&A. — 1981. — Jan. — Vol. 93. — P. 255.
- [14] Langer S. H., Rappaport S. Low-luminosity accretion onto magnetized neutron stars // ApJ. — 1982. — Jun. — Vol. 257. — P. 733.
- [15] V0332+53 in the outburst of 2004-2005: luminosity dependence of the cyclotron line and pulse profile / S. S. Tsygankov, A. A. Lutovinov, E. M. Churazov, R. A. Sunyaev // MNRAS. — 2006. — Sep. — Vol. 371, no. 1. — P. 19. — astro-ph/0511237.
- [16] Pulse-amplitude-resolved spectroscopy of bright accreting pulsars: indication of two accretion regimes / D. Klochkov, R. Staubert,

- A. Santangelo et al. // A&A. — 2011. — Aug. — Vol. 532. — P. A126. — 1107.2202.
- [17] Discovery of a flux-related change of the cyclotron line energy in Hercules X-1 / R. Staubert, N. I. Shakura, K. Postnov et al. // A&A. — 2007. — Apr. — Vol. 465. — P. L25. — astro-ph/0702490.
- [18] Cyclotron lines in highly magnetized neutron stars / R. Staubert, J. Trümper, E. Kendziorra et al. // A&A. — 2019. — Feb. — Vol. 622. — P. A61. — 1812.03461.
- [19] Discovery and modelling of a flattening of the positive cyclotron line/luminosity relation in GX 304-1 with RXTE / Richard E. Rothschild, Matthias Kühnel, Katja Pottschmidt et al. // MNRAS. — 2017. — Apr. — Vol. 466, no. 3. — P. 2752. — 1610.08944.
- [20] Luminosity-dependent changes of the cyclotron line energy and spectral hardness in Cepheus X-4 / V. Vybornov, D. Klochkov, M. Gornostaev et al. // A&A. — 2017. — May. — Vol. 601. — P. A126. — 1702.06361.
- [21] Blandford R. D., Payne D. G. Compton scattering in a converging fluid flow. I - The transfer equation. II - Radiation-dominated shock // MNRAS. — 1981. — Mar. — Vol. 194. — P. 1033.
- [22] Любарский Ю. Э., Сюняев Р. А. Комптонизация в радиационно-доминированной ударной волне и спектры излучения рентгеновских пульсаров // Письма в АЖ. — 1982. — Окт. — Т. 8, № 10. — С. 612.

- [23] Becker P. A., Wolff M. T. Thermal and Bulk Comptonization in Accretion-powered X-Ray Pulsars // *ApJ*. — 2007. — Jan. — Vol. 654. — P. 435. — astro-ph/0609035.
- [24] Numerical solution of the radiative transfer equation: X-ray spectral formation from cylindrical accretion onto a magnetized neutron star / R. Farinelli, C. Ceccobello, P. Romano, L. Titarchuk // *A&A*. — 2012. — Feb. — Vol. 538. — P. A67. — 1111.6851.
- [25] A new model for the X-ray continuum of the magnetized accreting pulsars / R. Farinelli, C. Ferrigno, E. Bozzo, P. A. Becker // *A&A*. — 2016. — Jun. — Vol. 591. — P. A29. — 1602.04308.
- [26] West B. F., Wolfram K. D., Becker P. A. A New Two-fluid Radiation-hydrodynamical Model for X-Ray Pulsar Accretion Columns // *ApJ*. — 2017. — Feb. — Vol. 835, no. 2. — P. 129. — 1612.02411.
- [27] West B. F., Wolfram K. D., Becker P. A. Dynamical and Radiative Properties of X-Ray Pulsar Accretion Columns: Phase-averaged Spectra // *ApJ*. — 2017. — Feb. — Vol. 835, no. 2. — P. 130. — 1612.01935.
- [28] On the dependence of the X-ray continuum variations with luminosity in accreting X-ray pulsars / K. A. Postnov, M. I. Gornostaev, D. Klochkov et al. // *MNRAS*. — 2015. — Sep. — Vol. 452. — P. 1601. — 1506.07082.
- [29] Zeldovich Y. B., Sunyaev R. A. The Interaction of Matter and Radiation in a Hot-Model Universe // *Astroph. Sp. Sci.* — 1969. — Jul. — Vol. 4, no. 3. — P. 301.

- [30] Sunyaev R. A., Zeldovich Y. B. Distortions of the Background Radiation Spectrum // *Nature*. — 1969. — Aug. — Vol. 223, no. 5207. — P. 721.
- [31] Парийский Ю. Н. Обнаружение горячего газа в скоплении галактик «Волосы Вероники» // *АЖ*. — 1972. — Дек. — Т. 49. — С. 1322.
- [32] Компанец А. С. Об установлении теплового равновесия между квантами и электронами // *ЖЭТФ*. — 1956. — Т. 31. — С. 876.
- [33] Weymann R. Diffusion Approximation for a Photon Gas Interacting with a Plasma via the Compton Effect // *Physics of Fluids*. — 1965. — Nov. — Vol. 8, no. 11. — P. 2112.
- [34] Itoh N., Kohyama Y., Nozawa S. Relativistic Corrections to the Sunyaev-Zeldovich Effect for Clusters of Galaxies // *ApJ*. — 1998. — Jul. — Vol. 502, no. 1. — P. 7. — astro-ph/9712289.
- [35] Challinor A., Lasenby A. Relativistic Corrections to the Sunyaev-Zeldovich Effect // *ApJ*. — 1998. — May. — Vol. 499, no. 1. — P. 1. — astro-ph/9711161.
- [36] Sazonov S. Y., Sunyaev R. A. Cosmic Microwave Background Radiation in the Direction of a Moving Cluster of Galaxies with Hot Gas: Relativistic Corrections // *ApJ*. — 1998. — Nov. — Vol. 508, no. 1. — P. 1.
- [37] Spectral Distortion of Cosmic Microwave Background Radiation by Scattering on Hot Electrons: Exact Calculations / A. D. Dolgov,

- S. H. Hansen, S. Pastor, D. V. Semikoz // ApJ. — 2001. — Jun. — Vol. 554, no. 1. — P. 74. — astro-ph/0010412.
- [38] A fast and accurate method for computing the Sunyaev-Zel'dovich signal of hot galaxy clusters / Jens Chluba, Daisuke Nagai, Sergey Sazonov, Kaylea Nelson // MNRAS. — 2012. — Oct. — Vol. 426, no. 1. — P. 510. — 1205.5778.
- [39] Molnar S. M., Birkinshaw M. Inverse Compton Scattering in Mildly Relativistic Plasma // ApJ. — 1999. — Sep. — Vol. 523, no. 1. — P. 78. — astro-ph/9903444.
- [40] Gornostaev M. I., Lipunova G. V. Comptonization of CMB in galaxy clusters. Monte Carlo computations // MNRAS. — 2020. — Dec. — Vol. 499, no. 2. — P. 2994. — 2009.14698.
- [41] Relativistic corrections to the multiple scattering effect on the Sunyaev-Zel'dovich effect in the isotropic approximation / Naoki Itoh, Youhei Kawana, Satoshi Nozawa, Yasuharu Kohyama // MNRAS. — 2001. — Oct. — Vol. 327, no. 2. — P. 567. — astro-ph/0105519.
- [42] Pozdnyakov L. A., Sobol I. M., Syunyaev R. A. Comptonization and the shaping of X-ray source spectra - Monte Carlo calculations // Astrophysics and Space Physics Reviews. — 1983. — Jan. — Vol. 2. — P. 189.
- [43] Lyutikov M., Gavriil F. P. Resonant cyclotron scattering and Comptonization in neutron star magnetospheres // MNRAS. — 2006. — May. — Vol. 368, no. 2. — P. 690. — astro-ph/0507557.

- [44] Gornostaev M. I. Three-dimensional modelling of accretion columns: spatial asymmetry and self-consistent simulations // MNRAS. — 2021. — Feb. — Vol. 501, no. 1. — P. 564. — 2012.10501.
- [45] X-ray emission from magnetized neutron star atmospheres at low mass-accretion rates. I. Phase-averaged spectrum / E. Sokolova-Lapa, M. Gornostaev, J. Wilms et al. // A&A. — 2021. — Jul. — Vol. 651. — P. A12. — 2104.06802.