

Основная часть отчета по теме

«Исследование нестационарных физических процессов в окрестностях релятивистских звезд и наблюдательных проявлений белых карликов, нейтронных звезд и черных дыр»

Руководитель: Шакура Н.И.

Были построены функции рентгеновской светимости аккрецирующих нейтронных звезд и черных дыр в диапазоне $10^{35} \leq L_X \leq 10^{41}$ эрг с⁻¹ в звездообразующих галактиках и галактиках с начальной вспышкой звездообразования. В галактиках обоих типов функция рентгеновской светимости в целом воспроизводится с использованием

стандартных допущений эволюции двойных звезд.

(Опубликовано: "X-ray luminosity function of accreting neutron stars and black holes"

Postnov K., Kuranov A., Yungelson L., Gil'fanov M. 2022aems.conf..296P)

Производились расчеты по моделированию современной галактической популяции ультракомпактных

катаклизмических переменных звезд типа AM CVn с донорами He-звезд.

Модель предсказывает, что в настоящее время рождаемость звезд He-донора AM CVn в Галактике составляет $4,6 \times 10^{-4}$ в год, и в Галактике может находиться около 112000 объектов этого класса с орбитальными периодами менее 42-43 минут.

Предсказано, что около 500 He-star AM CVN могут быть обнаружены детектором космических гравитационных волн LISA с отношением сигнал/шум $(S/N) > 5$ в течение 4-летней миссии. В пределах 1 Кпк от Солнца может существовать

до 130 He-звездных AM CVN с периодами в том же диапазоне,

которые могут служить проверочными двойными звездами, если они обнаружены в электромагнитном спектре.

В Млечном Пути также насчитывается около 14800 непосредственных предшественников звезд AM CVn.

Они представляют собой отдельные системы с разделенной He-звездой малой массы и компаньоном-белым карликом, из которых около 75 потенциально могут быть обнаружены LISA во время ее миссии.

(Опубликовано: "He-star donor AM CVn stars and their progenitors as LISA sources",

Liu, W. M.; Yungelson, L.; Kuranov, A. 2022A&A...668A..80L)

В 2022 г. выполнено две работы по изучению эволюции нейтронных с изменяющимся магнитным полем. В работе Игошев и др. (2022), одним из соавторов которой является С.Б. Попов, исследовались распределения нейтронных звезд по начальным периодам и магнитным полям, а также рассматривалась ранняя эволюция магнитного поля.

Рассматриваются молодые нейтронные звезды, связанные с остатками сверхновых. В работе представлен компилятивный каталог из 56 пар "нейтронная звезда - остаток сверхновой". Далее проводится подробный анализ этой выборки и сопутствующее моделирование.

Показано, что начальные распределения по периодам вращения и по магнитным полям хорошо описываются нормальными распределениями в логарифмическом масштабе. С.Б. Поповым критически рассмотрена недавняя гипотеза Cui et al. (Cui X.-H., et al., 2021,

MNRAS, 508, 279) о происхождении значительной части пульсаров, идентифицируемых в качестве молодых объектов без остатков сверхновых, во взрывах с захватом электронов (e-capture SN). Предложена альтернативная интерпретация, основанная на начальных параметрах и свойствах ранней эволюции нейтронных звезд.

Во второй работе по эволюции нейтронных звезд рассмотрены наиболее старые из наблюдаемых нейтронных звезд, которые относятся к миллисекундным пульсарам и родственным объектам. К последним можно отнести HOFNARs (HOtand Fast Non Accreting Rotators) - гипотетические источники, предложенные в работе Чугунов и др. (Chugunov, A.I.; Gusakov, M.E.; Kantor, E.M. 2014, MNRAS, 445, 385). Нами (А.Д. Хохрякова, С.Б. Попов) при участии авторов гипотезы было проведено детальное исследование наблюдаемости HOFNARs с помощью телескопа eROSITA на борту спутника Спектр-РГ. Построена популяционная модель для галактических HOFNARs, включающая в себя пространственное распределение источников, распределение межзвездной среды и т.д. Показано, что при реалистичных параметрах (в первую очередь, это температура поверхности нейтронных звезд) можно ожидать регистрации нескольких десятков источников в обзоре eROSITA. Если же обнаружить источники не удастся, то это даст важные ограничения на температуру поверхности, что существенно для понимания физики нейтронных звезд. Результаты опубликованы в статье Хохрякова и др. (2022).

В 2022 г. начата работа по моделированию эволюции одиночных нейтронных звезд на большом масштабе времени с учетом ранее неисследованных эффектов (эффект гистерезиса при возвратной аккреции, новые модели эволюции магнитных полей, новые аспекты в моделях магнитовращательной эволюции) с прицелом на расчет числа потенциально наблюдаемых объектов на стадии аккреции из межзвездной среды. Эта задача актуальна в свете наблюдений приборов на борту спутника Спектр-РГ. На данный момент построена базовая упрощенная модель эволюции и базовая популяционная модель. Результаты будут представлены в виде постера на конференции HEA-2022 и в виде доклада на Коуровской школе.

По теме транзиентов в работе Барков, Попов (2022) исследовались быстрые радиовсплески. Непосредственно в работе рассмотрена модель для источников, показывающих периодичность в эпизодах активности. Предполагается, что такое поведение определяется нахождением нейтронной звезды (магнитара) в двойной системе с массивным компаньоном. Построена численная модель генерации радиоизлучения на внешней ударной волне (мазерное циклотронное излучение). Удастся объяснить относительно узкие спектры источников и наличие частотного дрейфа в зависимости от фазы активности. Статья также содержит подробный обзор современного состояния дел в изучении быстрых радиовсплесков. Эта часть работы целиком написана С.Б.Поповым.

Проведено исследование свойств потока вещества в магнитосфере НЗ, где плазма следует силовым линиям магнитного поля. Аккреционный поток, входящий в магнитосферу, ускоряется под действием силы тяжести звезды, а затем резко тормозится в ударной волне, расположенной над поверхностью звезды. При достаточно больших темпах аккреции большая часть излучения исходит из области с преобладанием радиационного давления ниже ударной волны, известной как аккреционная колонка. Авторами работы рассмотрена глобальная динамика такой радиационно-доминированной аккреционной колонки. Используя консервативную численную схему, мы выполнили одномерное нестационарное моделирование идеального радиационно-доминированного потока внутри магнитосферы нейтронной звезды с дипольным полем. Полученное нестационарное решение позволило проверить устойчивость существующего стационарного аналитического решения (Баско-Сюняев 1976, MNRAS, 175, 395), а также возможные режимы его переменности и проверить выполнение предполагаемых граничных условий. В аналитическом решении предполагается, что вещество выталкивается через бока колонки у основания НЗ. Оказалось, что, действительно, при учете в численном коде стокового члена, который включается при локальном превышении тепловым давлением магнитного, сток вещества реализуется

непосредственно у поверхности НЗ. При этом условии на сток положение ударной волны хорошо согласуется с теоретическими предсказаниями. Механизм протекания, скорее всего, связан с работой перестановочной неустойчивости, как предлагается в работе Кулсруда и Сюняева (2020, *Journal of Plasma Physics*, 86, 905860602). Далее, было показано, что если менее $1/3$ высвобождаемой мощности излучается, колонка начинает “протекать” на конечной высоте (что не соответствует предположениям, в которых было получено аналитическое решение). В зависимости от геометрии, эта “протечка” может увеличить сечение колонки, нагрузить силовые линии массой или произвести умеренно релятивистский выброс вещества. При приближении к положению равновесия фронт ударной волны испытывает затухающие колебания с частотой, близкой к обратной времени распространения звука. Статья послана в печать и находится на этапе рецензирования (Аболмасов, Липунова <https://arxiv.org/pdf/2207.12312.pdf>).

По теме физики аккреции в рентгеновских источниках проведен модальный анализ малых возмущений кеплеровского течения идеального газа, приводящих к магниторотационной неустойчивости в аккреционном диске и турбулентной вязкости, которая должна обеспечивать наблюдаемые темпа аккреции. Показано, что моды магниторотационных возмущений описываются дифференциальным уравнением типа уравнения Шрёдингера с некоторым эффективным потенциалом, включающим в простом случае, когда альфвеновская скорость постоянна по радиусу, «отталкивающий» и «притягивающий» члены. Учет радиальной зависимости фоновой альфвеновской скорости приводит к качественному изменению формы эффективного потенциала. Показано, что в «неглубоких» потенциалах (для мод с малыми волновыми числами) нет стационарных уровней энергии, соответствующих неустойчивым модам. В тонких аккреционных дисках, длина волны возмущения меньше полутолщины диска только в «глубоких» потенциалах (для мод с большими волновыми числами). Найдена предельная величина фоновой альфвеновской скорости, выше которой магниторотационная неустойчивость не возникает. В тонких аккреционных дисках при малой фоновой альфвеновской скорости инкремент магниторотационной неустойчивости подавлен по сравнению со значением, получаемым в локальном анализе возмущений.

Подготовлена рукопись статьи об анализе магниторотационной неустойчивости (Шакура, Постнов, Колесников, Липунова, <https://arxiv.org/pdf/2210.15337.pdf> и http://xray.sai.msu.ru/sciwork/preprints/RNF21-12-00141/Shakura_et_al_2022.pdf). Результаты были доложены в приглашенных докладах на конференциях а) ”Bursting Universe by Robots Eyes 2022. Multichannel search of high energy astrophysics sources.” Москва 15-20 августа 2022 г., б) Успехи Российской астрофизики - 2022, теория и эксперимент, Москва 16 декабря 2022г., в) HEA - 2022, IKI RAN, Москва 18-22 2022г.

Проведено исследование взаимодействия вещества диска и магнитосферы нейтронной звезды с наклоненной осью магнитного диполя в рамках модели частичного проникновения магнитного поля нейтронной звезды в диск. Предположено, что в диске появляется наведенное тороидальное магнитное поле, которое влияет на вертикальную и радиальную структуру диска. Для описания этого наведенного поля из первых принципов было детально исследовано решение уравнения индукции магнитного поля в рамках гипотезы об ограничении роста наведенного поля внутри диска из-за турбулентной диффузии поля. Эффективная проводимость диска также связана с наличием турбулентной диффузии. Были поставлены условия: угловая скорость вращения вещества в диске равна кеплеровской, а над диском - скорости вращения нейтронной звезды; коэффициент магнитной диффузии отличается в диске и снаружи на некий фактор, а в диске пропорционален коэффициенту турбулентной диффузии альфа-диска. Анализ уравнения индукции для суммарного

магнитного поля показал, что для того, чтобы решение было ограничено на бесконечности, необходимо сделать предположение, что существует радиус, на котором наведенное поле становится равным нулю. Очевидно, что этот радиус не может быть больше радиуса светового цилиндра. Также мы получили, что наведенное поле зависит от азимута в случае наклонного диполя НЗ. Азимутальные составляющие вносят вклад в уравнения движения вещества в аккреционном диске, даже если диск осесимметричный.

Было показано, что получающееся из уравнения индукции уравнение типа Гельмгольца с зависящим от координат коэффициентом в предположении стационарности может быть сведено к системе $3N$ обыкновенных дифференциальных уравнений (N — заданное число гармоник по вертикальной координате). Было получено численное решение - то есть построена вертикальная и радиальная структура наведенного поля в диске.

Для сравнения полученного решения были рассмотрены две ранее предложенных Вангом (1995, ApJ, 449, L153) и Кэмпбелл (1992; Geophysical and Astrophysical Fluid Dynamics, 63, 179) феноменологических модели наведенного магнитного поля в диске, - из-за турбулентной диффузии магнитного поля и из-за пересоединения над диском. Было показано, что компонента наведенного поля, которая не зависит от азимута, при нормировке хорошо согласуется с одной из феноменологических моделей Ванга, для соответствующего механизма ограничения роста поля. Азимутально-постоянная компонента наведенного поля антисимметрична по вертикали.

Результаты были представлены в виде доклада на конференции Ломоносов-2022 и будут представлены в декабре 2022 г. виде постера на конференции HEA-2022 и в виде доклада и на Коуровской школе в 2023. (Кузин)

Для моделирования эволюции физических параметров аккреционного диска во время рентгеновских вспышек в системах с нейтронными звездами была использована разработанная модель взаимодействия проникающего в диск магнитного поля нейтронной звезды с наклоненным диполем и вещества аккреционного диска. Для этого получен момент магнитных сил, действующий на диск наряду с вязкими силами, определяемый из выражения для наведенного поля в диске. На внутренней границе диска принято условие равенства нулю вязкого момента сил. Это условие определяет положение внутреннего радиуса диска, которое в самых простых моделях обычно полагается равным альфвеновскому радиусу, умноженному на некий фактор.

В рамках разработанной модели также получены аналитические выражения для тепловой светимости диска (из-за вязкого тепла) и скорости изменения частоты вращения нейтронной звезды. Эта модель была реализована в коде FREDDI для моделирования кривых блеска. Также проведены расчеты модельной эволюции частоты вращения НЗ. Модельные результаты были качественно соотнесены с данными наблюдений. Надо отметить, что мы столкнулись с трудностями адаптации численной схемы для новой модели, в которой для расчета движения внутреннего радиуса диска требуется установка переменного внутреннего граничного условия, для чего представляется необходимым ввести дополнительный этап итераций на каждом шаге по времени. Так как мы получили удовлетворительный результат сравнений, то есть совпадение графиков по форме и порядку величин для миллисекундного аккрецирующего рентгеновского пульсара Aql X-1 (рентгеновская кривая блеска вспышки 2013 г.) и рентгеновского пульсара A 0535+262 (эволюция частоты вращения нейтронной звезды во время вспышки 1994 г., M. H. Finger, et al 1996, ApJ. v.459, p.288) (см. Рис 12 и 13; 15 и 16; 18 и 19 в курсовой работе Лисицина Д.Д.

<https://xray.sai.msu.ru/sciwork/preprints/RNF21-12-00141/Lisitcin.pdf>), то было решено провести необходимую доработку программного кода в начале следующего года.

Результаты были представлены в виде доклада на конференции Ломоносов-2022 и будут представлены в декабре 2022 г. виде постера на конференции HEA-2022 и в виде доклада и на Коуровской школе в 2023. (Лисицин и Липунова)

Завершена работа по отбору вспышек для моделирования с помощью кода FREDDI. Начата работа по спектральному моделированию отобранных вспышек (список <https://xray.sai.msu.ru/sciwork/preprints/RNF21-12-00141/2022/data>).

Для части наблюдаемых вспышек источника Aql X-1 из списка проведено спектральное моделирование данных наблюдения спутника SWIFT (года 2011, 2016, 2018, 2021; год 2013 был нами обработан ранее). В результате получены временные зависимости параметров спектров для вспышек, в частности, кривые блеска в рентгеновских диапазонах. Начато моделирование наблюдений, полученных на инструментах RXTE и MAXI (Липунова).

Проведена работа по созданию необходимых инструментов фитирования наблюдаемых кривых блеска моделью FREDDI. Написаны скрипты на Python для фитирования параметров аккреционного диска (параметра турбулентности альфа-диска и параметра самооблучения) по данным вспышек миллисекундных аккрецирующих рентгеновских пульсаров. Получены первые результаты для сравнения вспышек Aql X-1 (см. примеры для вспышек 2013 и 2016 гг. для двух углов наклона магнитного диполя по ссылке <https://xray.sai.msu.ru/sciwork/preprints/RNF21-12-00141/2022/figures/Aql/>). (Кузин)

По теме моделирования вертикальной структуры дисков в рентгеновских транзиентах закончена работа, в которой исследованы условия тепловой устойчивости аккреционных дисков и построены так называемые кривые устойчивостей, рассчитаны критические значения поверхностной плотности и эффективной температуры диска (точки поворота), при которых диск совершает переходы между типами решения вертикальной структуры: устойчивый-неустойчивый. При этом в открытый код включена возможность построения кривых устойчивостей для произвольного химического состава дисков. Точки поворота для дисков с солнечным химсоставом выложены в открытый доступ (<https://doi.org/10.5281/zenodo.7361425>). Далее, в том же коде реализована схема расчета структуры диска, облученного снаружи рентгеновским излучением. Эта схема, предложенная в работе Мещерякова и др (2011; Mescheryakov A. V., Shakura N. I., Suleimanov V. F., 2011, *Astronomy Letters*, 37, 311), опирается на решение уравнения переноса излучения в толще диска в рентгеновском диапазоне. В результате использования этого самосогласованного подхода рассчитаны параметры самооблучения диска, обычно задаваемые как константы из общих соображений, а также зависимость этого параметра от радиуса и темпа аккреции в диске. Из сравнения рассчитанного параметра облучения с его оценкой по наблюдениями сделан вывод, что в реальных дисках происходит дополнительный перехват облучающего потока самыми верхними слоями атмосферы диска. Также исследовано влияние облучения диска внешним рентгеном на тепловую устойчивость его вертикальной структуры. Подтверждено наличие критического значения облученного потока (в абсолютных единицах), при превышении которого диск никогда не теряет устойчивости в результате частичной рекомбинации. Получена зависимость этого критического значения от отношения облучающего потока излучения к потоку собственного излучения диска. Статья послана в журнал (Тавлеев, Липунова, Маланчев http://xray.sai.msu.ru/sciwork/preprints/RNF21-12-00141/Tavleev_etal_2022.pdf).

В 2022 г. в рамках изучения рентгеновского пульсара Her X-1 была построена геометрическая модель аккреционного диска с произвольным профилем толщины как функции радиуса и произвольным распределением температуры по поверхности. Параметры такой модели определяются результатами численного моделирования вертикальной структуры диска с самооблучением. Параметры изгиба диска определяются взаимодействием магнитного поля нейтронной звезды с внутренними частями диска. Для этого построена более детальная модель взаимодействия магнитосферы нейтронной звезды с внутренними частями аккреционного диска. В модель также добавлены горячие пятна от взаимодействия диска с

аккреционными струями. Модель реализована и отлажена в программе синтеза кривых блеска Discostar (<http://xray.sai.msu.ru/sciwork/>). С помощью этой программы начато моделирование минимумов кривых блеска на различных фазах 35-дневного цикла HZ Her/Her X-1.

Проведен анализ динамики аккреционного диска с учётом данных, получаемых из моделирования главных минимумов орбитальных кривых блеска HZ Her/Her X-1. Определение динамики аккреционного диска необходимо для решения вопроса о механизме синхронизации свободной прецессии нейтронной звезды Her X-1 и периода прецессии аккреционного диска. Работа этого механизма может быть обусловлена модуляцией вектора начальной скорости вещества вблизи точки Лагранжа из-за переменной областью рентгеновской тени, формируемой диском, на звезде-доноре. Разработка модели, описывающей орбитальную модуляцию потока, проведена в модульном формате, чтобы в следующем году добавить в модель результаты численного гидродинамического моделирования. Публикация находится на стадии подготовки (Колесников, Шакура).