

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М. В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Колесников Дмитрий Алексеевич

**Моделирование 35-дневного цикла рентгеновской
двойной системы HZ Her/Her X-1**

01.03.02 — Астрофизика и звёздная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2021

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

Научные руководители: *Шакура Николай Иванович,*
д.ф.-м.н., проф.
Постнов Константин Александрович,
д.ф.-м.н., проф.

Официальные оппоненты: *Бисикало Дмитрий Валерьевич,*
д.ф.-м.н., проф., чл.-корр. РАН; Институт
астрономии РАН, директор
Лутовинов Александр Анатольевич,
д.ф.-м.н., проф. РАН; Институт космиче-
ских исследований РАН, зам. директора по
научной работе; Институт космических ис-
следований РАН, зав. лабораторией отдела
Астрофизики высоких энергий
Шибанов Юрий Анатольевич,
д.ф.-м.н., с.н.с.; ФТИ им. А. Ф. Иоффе, вед.
науч. сотрудник лаборатории Прикладной
математики и математической физики;
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого, Физико-
механический институт, проф. Высшей
школы фундаментальных физических иссле-
дований

Защита 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: kolesnikovkda@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»: <https://istina.msu.ru/dissertations/395192430/>

Автореферат разослан 20 октября 2021 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
МГУ.01.02,
кандидат физ.-мат. наук

Пружинская Мария Викторовна

Общая характеристика работы

Рентгеновская двойная система HZ Her/Her X-1 до появления рентгеновской астрономии была известна как неправильная переменная звезда HZ Her 13–15^m в фильтре *B*. В стеклянной библиотеке ГАИШ имеются снимки этой системы начиная с 1907 г. Значительный интерес к этой системе возник после открытия в 1972 г. рентгеновского источника Her X-1 [1] и его отождествления с HZ Her [2; 3].

HZ Her/Her X-1 — рентгеновская двойная система промежуточной массы, состоящая из звезды-субгиганта массой 1.8–2.4 $M_{\odot}$ и нейтронной звезды, наблюдаемой как рентгеновский пульсар. Орбитальный период системы 1.7 дня, период вращения пульсара 1.24 секунды. Оптическая звезда заполняет свою полость Роша [4], в системе идёт дисковая аккреция на нейтронную звезду. Орбитальные кривые блеска HZ Her демонстрируют классический эффект рентгеновского прогрева, Рис. 1, что было впервые показано по архивным фотопластинкам ГАИШ [5].

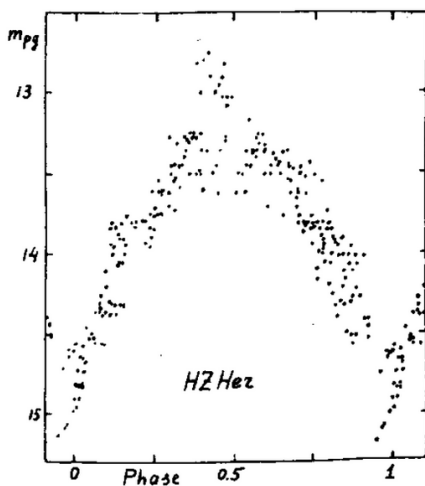


Рис. 1 — Первая орбитальная кривая блеска HZ Her по архивным фотопластинкам стеклянной библиотеки ГАИШ [5]

Рентгеновский поток Her X-1 дополнительно модулирован с периодом приблизительно 35 дней [6]. Большинство 35-дневных циклов имеет продолжительность от 20 до 21 орбитального периода [7–9]. Цикл состоит из главного включения продолжительностью примерно 7 орбитальных периодов, и вторичного включения продолжительностью около 4 орбитальных периодов, см. Рис. 2. Главное и вторичное включение разделены интервалами времени продолжительностью около 4 орбитальных периодов, в течение

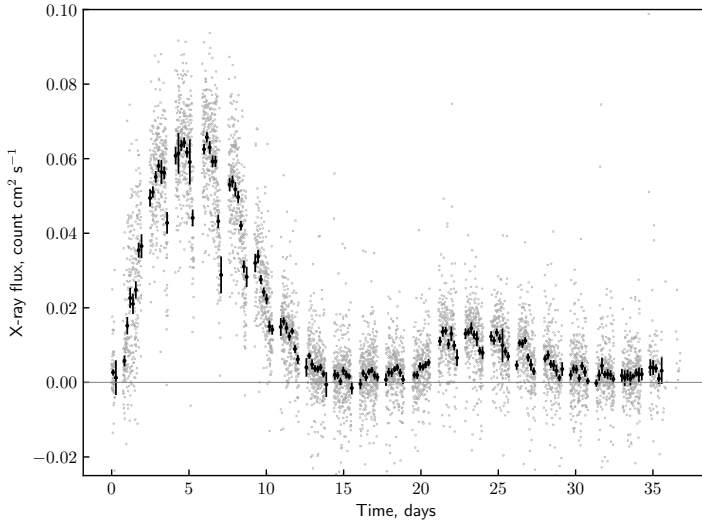


Рис. 2 — Модуляция рентгеновского потока Нег X-1 с 35-дневным периодом. Серые точки — данные спутника *Swift*/BAT [10]. Чёрные точки с барами — средние значения потока в бинах шириной 0.1 дня и средне-квадратичная ошибка.

которых поток рентгеновского излучения значительно меньше, чем во время включений.

Со времени первых наблюдений спутником *Uhuru*, регулярный 35-дневный цикл рентгеновского потока Нег X-1 привлекал большое внимание исследователей. 35-дневный цикл Нег X-1 объясняется ретроградной прецессией наклонного аккреционного диска [11; 12]. Ретроградная прецессия диска приводит к последовательному открытию и закрытию нейтронной звезды для наблюдателя [13].

Вскоре после открытия рентгеновского пульсара, гипотеза свободной прецессии нейтронной звезды была предложена для объяснения 35-дневной модуляции рентгеновского потока [14; 15]. Позднее, наблюдения эволюции профилей рентгеновских импульсов Нег X-1 с фазой 35-дневного цикла на спутнике *EXOSAT*, также были интерпретированы как проявление свободной прецессии нейтронной звезды [16].

Оба явления: 35-дневная прецессия аккреционного диска и 35-дневная свободная прецессия нейтронной звезды хорошо синхронизированы [17]. Такая синхронизация может быть обусловлена наличием физической связи между ними. Например, в качестве этой связи может выступать динамика аккреционных струй из-за переменного эффекта рентгеновского прогрева звезды-донора. Такие струи формируют внешние части аккреционного диска и действуют на него с переменным моментом

сил, который может вынуждать диск прецессировать с частотой, задаваемой свободной прецессией нейтронной звезды [17; 18].

Как уже говорилось ранее, рентгеновские профили импульсов сильно изменяются с фазой 35-дневного цикла [16; 19; 20]. Такие изменения трудно объяснить только прецессией аккреционного диска. По наблюдениям рентгеновских пульсов *Her X-1* на спутнике *RXTE/PCA* было показано, что их периодические изменения могут быть объяснены свободной прецессией нейтронной звезды со сложной структурой магнитного поля вблизи её поверхности [21]. В этой модели, в дополнение к магнитным полюсам, добавлены магнитные дуги на поверхности нейтронной звезды. Такие дуги могут быть образованы мультиполярным магнитным полем вблизи поверхности нейтронной звезды [22; 23].

Ещё одно наблюдательное проявление *Her X-1* в рентгеновском диапазоне — аномально низкие состояния, при котором ожидаемый рентгеновский поток на фазе главного включения 35-дневного цикла не регистрировался несколько циклов подряд. За многолетнюю историю рентгеновских наблюдений *Her X-1* аномально низкие состояния наблюдались четыре раза: в 1983, 1994, 1999, 2004 г. При этом эффект рентгеновского прогрева звезды-донора, определяемый по оптической орбитальной форме кривой блеска, не исчезал [24–28]. Аномально низкие состояния могут быть обусловлены уменьшением угла наклона аккреционного диска к орбитальной плоскости. При наклоне диска, близком к 0, нейтронная звезда остается закрытой для наблюдателя.

За десятилетия фотометрических наблюдений *NZ Her* накопилось большое количество измерений потока в фильтрах *UBV*. Форма наблюдаемых орбитальных оптических кривых блеска *NZ Her* зависит от фазы 35-дневного цикла. Первая попытка объяснить эволюцию орбитальных кривых блеска *NZ Her* моделью, содержащей прецессирующий плоский диск с внешним краем конечной толщины была сделана в 1983 г. [29]. Однако новые данные, накопленные с тех пор, противоречат результатам этого моделирования.

Актуальность и степень разработанности исследований

Рентгеновская двойная система *NZ Her/Her X-1* представляет собой естественную лабораторию, в которой проявляются разнообразные явления, представляющие широкий исследовательский интерес. Наклонный, изгибный, прецессирующий аккреционный диск и аккреционные струи представляют интерес с точки зрения исследования магнитной газовой динамики. Горячая корона над облучённой частью звезды-донора и аккреционным диском интересны с точки зрения задачи переноса рентгеновского излучения для объяснения орбитальной модуляции рентгеновского потока.

Свободная прецессия нейтронной звезды интересна с точки зрения вопроса внутренней структуры нейтронной звезды.

По HZ Her/Her X-1 накоплено большое количество наблюдательных данных за десятилетия, прошедшие с 1973 г.: фотометрия в разных полосах, рентгеновские потоки, измерения частоты рентгеновского пульсара с субмикросекундовой точностью. Объем и качество данных продолжает увеличиваться, позволяя совершенствовать теоретические модели.

HZ Her/Her X-1 это один представитель целого класса космических объектов: рентгеновских двойных систем. Модели и программы, разработанные для объяснения наблюдаемых явлений в HZ Her/Her X-1, могут быть использованы для других представителей этого класса.

Объект исследования

Рентгеновская двойная затменная система промежуточной массы HZ Her/Her X-1.

Цель работы

Целью данной работы является всестороннее исследование рентгеновской двойной системы HZ Her/Her X-1 в оптическом и рентгеновском диапазонах. Особое внимание было уделено определению параметров двойной системы на разных фазах 35-дневного цикла. Для достижения цели работы были поставлены следующие **задачи**:

- создание теоретической модели рентгеновской двойной системы HZ Her/Her X-1 для объяснения наблюдаемых кривых блеска на разных фазах 35-дневного цикла, учитывающей все необходимые физические явления;
- создание программы синтеза теоретических кривых блеска;
- нахождение оптимальных параметров двойной системы, при которых модель адекватно описывает наблюдаемые кривые блеска;
- создание модели горячей короны над облученной частью звезды-донора для объяснения наблюдаемой на спутнике *SRG/eROSITA* орбитальной модуляции рентгеновского потока в низком состоянии;
- создание программы для моделирования орбитальной модуляции рентгеновского потока Her X-1 в низком состоянии 35-дневного цикла;
- нахождение оптимальных параметров модели орбитальной модуляции рентгеновского потока Her X-1, адекватно объясняющих наблюдаемую орбитальную модуляцию рентгеновского потока;

- создание модели вариаций частоты рентгеновского пульсара Her X-1 с фазой 35-дневного цикла из-за свободной прецессии нейтронной звезды;
- нахождение оптимальных параметров модели свободной прецессии, адекватно описывающих наблюдаемые 35-дневные вариации частоты рентгеновского пульсара.

Методология и методы исследований

Для решения поставленных задач были использованы общенаучные (анализ, индукция, дедукция), аналитические и численные методы. Аналитические методы использовались для построения математических моделей рентгеновской двойной системы и составляющих её частей. Численные методы реализованы в специально разработанных компьютерных программах на языках программирования C и Python.

Научная новизна

1. Впервые была объяснена эволюция орбитальных кривых блеска HZ Her в оптическом диапазоне с фазой 35-дневного цикла моделью рентгеновской двойной системы с изгибным, прецессирующим аккреционным диском и свободно прецессирующей нейтронной звездой.
2. Впервые объяснена орбитальная модуляция рентгеновского потока Her X-1 в низком состоянии 35-дневного цикла моделью протяжённой, горячей короны над облучённой частью звезды-донора и изгибного, прецессирующего аккреционного диска.
3. Впервые объяснена амплитуда субмикроргерцовых вариаций частоты рентгеновского пульсара Her X-1 с фазой 35-дневного цикла, измеренных спутником *Fermi*/BAT моделью свободной прецессии нейтронной звезды.

Теоретическая и практическая значимость

Полученные параметры модели рентгеновской двойной системы HZ Her/Her X-1 могут быть применены для более глубокого исследования этой системы. Например, для создания МГД-модели аккреционного диска и струй; для восстановления распределения температуры аккреционного диска по орбитальным фазам вблизи главного минимума. Созданная программа синтеза орбитальных кривых блеска может быть использована для определения параметров других тесных двойных систем и аккреционных дисков.

Положения, выносимые на защиту

1. Эволюция оптических орбитальных кривых блеска HZ Her с фазой 35-дневного цикла рентгеновского пульсара Her X-1 обусловлена прецессией наклонного изгибного аккреционного диска, создающего область тени на поверхности звезды-донора, в которой эффект рентгеновского прогрева отсутствует.
2. Ориентация внутреннего края аккреционного диска меняется с фазой 35-дневного цикла и определяется совместным действием магнитного момента сил магнитосферы нейтронной звезды, зависящего от фазы свободной прецессии нейтронной звезды и от вязких напряжений вещества диска.
3. Орбитальная модуляция рентгеновского потока Her X-1 в низком состоянии 35-дневного цикла в диапазоне 0.2–8 кэВ, измеренная прибором eROSITA космической рентгеновской обсерватории SRG, обусловлена рассеянием рентгеновского излучения в горячей, оптически тонкой короне над облученной частью звезды-донора с рентгеновской тенью, создаваемой изгибным аккреционным диском, и в горячей короне над аккреционным диском.
4. Субмикроргерцовые вариации частоты рентгеновского пульсара Her X-1 с фазой 35-дневного цикла, измеренные прибором GBM космической гамма-обсерватории *Fermi*, обусловлены свободной прецессией нейтронной звезды.

Апробация результатов и достоверность

Представленные результаты являются достоверными и докладывались автором на следующих конференциях:

1. ВАК-2021: «Астрономия в эпоху многоканальных исследований», Москва, 23–28 августа 2021, *Новые результаты по рентгеновским наблюдениям Her X-1 на спутниках SRG и Fermi* (устный)
2. Успехи российской астрофизики 2019: Теория и Эксперимент, Москва, 16 декабря 2019, *Моделирование 35-дневного цикла HZ Her/Her X-1 на основании многолетних фотометрических UBV наблюдений* (устный)
3. Universe of Binaries, Binaries in the Universe, Телч, Чехия, 6–11 сентября 2019, *The 35-day cycle in the X-ray binary HZ Her/Her X-1* (стендовый)
4. Успехи российской астрофизики 2018: Теория и Эксперимент, Москва, 17 декабря 2018, *Моделирование 35-дневного цикла Her X-1/HZ Her по данным многолетних широкополосных фотометрических наблюдений* (устный)

5. VII Пулковская молодёжная астрономическая конференция, Санкт-Петербург, 28–31 мая 2018, *Моделирование 35-дневного цикла HZ Her/Her X-1 по результатам многолетней фотометрии* (устный)
6. Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра — 2017, Москва, 18–21 декабря 2017, *Моделирование 35-дневного цикла HZ Her/Her X-1 по результатам многолетней фотометрии* (стендовый)

Публикации по теме диссертации

Основные результаты по теме диссертации изложены в 9 печатных изданиях, 4 из которых опубликованы в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базе данных Web of Science, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности:

1. Shakura N. I., Kolesnikov D. A., Medvedev P. S., Sunyaev R. A., Gilfanov M. R., Postnov K. A., Molkov S. V., *Observations of Her X-1 in low states during SRG/eROSITA all-sky survey*, **Astronomy & Astrophysics**, 2021, 648, A39. (Импакт-фактор, WoS: 5.203)
2. Kolesnikov D. A., Shakura N. I., Postnov K. A., Volkov I. M., Bikmaev I. F., Irmambetova T. R., Staubert R., et al., *Modelling of 35-d superorbital cycle of B and V light curves of IMXB HZ Her/Her X-1*, **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, 2020, 499, 1747. (Импакт-фактор, WoS: 4.957)
3. Шакура, Н., Колесников, Д., Постнов, К., Волков, И., Бикмаев, И., Ирсмаметова, Т., Штауберт, Р., Вилмс, Й., Иртуганов, Е., Шурыгин, П., Гольшева, П., Шугаров, С., Николенко, И., Трунковский, Е., Шонгерр, Г., Швопе, А., Клочков, Д., *Аккреционные процессы в астрофизике*, **Успехи Физических Наук**, 2019, 189, 1202-1212. (Импакт-фактор, WoS: 3.138)
4. N. I. Shakura, D. A. Kolesnikov and K. A. Postnov, *On the Nature of the 35-Day Cycle in HZ Her/Her X-1*, **Astronomy Reports**, 2021, 65, 10, 1039–1041. (Импакт-фактор, WoS: 0.925)

а также 5 публикаций — в сборниках трудов конференций:

1. Shakura N., Kolesnikov D., Postnov K., Volkov I., Bikmaev I., Irmambetova T., Staubert R., Wilms J., Irtuganov E., Shurygin P., Golsysheva P., Shugarov S., Nikolenko I., Trunkovsky E., Schonherr G., Schwöpe A., Klochkov D., *Multi-frequency long-term observations of Her X-1 - The 35-d cycle*, **Proceedings of Multifrequency Behaviour of High Energy Cosmic Sources - XIII — PoS(MULTIF2019)**, 2020, 362, 47. (Импакт-фактор, Scopus: 0.114)
2. Kolesnikov D., Shakura N., Postnov K., Volkov I., Bikmaev I., Irmambetova T., Staubert R., Wilms J., Irtuganov E., Shurygin P.,

- Golysheva P., Shugarov S., Nikolenko I., Trunkovsky E., Schonherr G., Schwope A., Klochkov D., *The 35-day cycle in the X-ray binary HZ Her/Her X-1*, **Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso**, 2020, 50, 2, 518-520. (Импакт-фактор, WoS: 0.323)
3. Shakura N., Kolesnikov D., Postnov K., Volkov I., Bikmaev I., Irmambetova T., Staubert R., Wilms J., Irtuganov E., Shurygin P., Golysheva P., Shugarov S., Nikolenko I., Trunkovsky E., Schonherr G., Schwope A., Klochkov D., *On the Nature of the 35-days Cycle in X-ray Binary Her-X-1 = HZ Her*, **Proceedings of Accretion Processes in Cosmic Sources – II — PoS(APCS2018)**, 2020, 342, 47. (Импакт-фактор, Scopus: 0.114)
 4. Shakura N., Kolesnikov D., Postnov K., Volkov I., Bikmaev I., Irmambetova T., Staubert R., Wilms J., Irtuganov E., Shurygin P., Golysheva P., Shugarov S., Nikolenko I., Trunkovsky E., Schonherr G., Schwope A., Klochkov D., *On the nature of the 35-day cycle in the X-ray binary Her X-1/HZ Her*, **Proceedings of the International Astronomical Union**, 2019, S346, 281-287.
 5. Shakura N., Kolesnikov D., Postnov K., Volkov I., Bikmaev I., Irmambetova T., Staubert R., Wilms J., Irtuganov E., Shurygin P., Golysheva P., Shugarov S., Nikolenko I., Trunkovsky E., Schonherr G., Schwope A., Klochkov D., *Study of the 35-Day Cycle of the Binary X-ray System of Her X-1 = HZ Her Based on the Broadband Photometric Long-Term Observations*, **Сборник тезисов конференции/М.:ИЗМИРАН**, 2018, 1, 298-306.

Личный вклад автора

Автором была выполнена разработка модели рентгеновской двойной системы с изгибным аккреционным диском и свободно прецессирующей нейтронной звездой с анизотропной интенсивностью рентгеновского излучения; модель для синтеза рентгеновских кривых блеска и модель короны над прогретой частью звезды-донора рентгеновской двойной системы; модель свободной прецессии нейтронной звезды для объяснения 35-дневных вариаций частоты рентгеновского пульсара Her X-1; создание программ и их отладка, моделирование, оптимизация параметров; написание текста диссертации. Обсуждение результатов и подготовка публикаций проводилась совместно с соавторами. Обработка рентгеновских данных и моделирование спектров Her X-1 в низком состоянии выполнена в соавторстве публикации [30].

Содержание работы

Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения и приложения. Полный объём диссертации составляет 94 страницы, включая 33 рисунка и 8 таблиц. Список литературы содержит 106 наименований.

Во **введении** излагается краткий обзор истории рентгеновской астрономии и объекта исследования HZ Her/Her X-1, актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируются цели и задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов.

Первая глава посвящена моделированию оптических кривых блеска в фильтре B и V рентгеновской двойной системы HZ Her/Her X-1. Для вычисления наблюдаемого потока поверхность звезды-донора разбивается на малые площадки. Поток от каждой площадки, видимой наблюдателю, суммируется для получения орбитальной кривой блеска. В модели предполагается, что площадки имеют чёрнотельный спектр с температурой, определяемой локальным ускорением свободного падения и рентгеновским прогревом нейтронной звезды. Так же учитывается эффект потемнения к краю, зависящий от угла между вектором нормали к поверхности и направлением к наблюдателю.

Специально для моделирования кривых блеска HZ Her/Her X-1 в модель были включены следующие составные части, ранее не использовавшиеся в программах для синтеза кривых блеска:

1. Наклонный, изгибный, прецессирующий диск. Такой диск создаёт сложную, переменную тень для рентгеновского излучения на звезде-доноре. В области такой тени рентгеновский прогрев отсутствует. При этом поток от самого диска в данной модели принимался постоянным на одном орбитальном цикле, но менялся на разных орбитальных циклах. Переменность потока от диска обусловлена его прецессией.
2. Анизотропная, переменная интенсивность рентгеновского излучения нейтронной звезды. Анализ рентгеновских импульсов по данным спутника *RXTE* [21] показал, что они хорошо описываются в модели двухосной прецессии нейтронной звезды, на поверхности которой, помимо магнитных полюсов, расположены излучающие линии или дужки. Распределение температуры на звезде-доноре, вызванное прогревом с такой интенсивностью рентгеновского излучения, отличается от прогрева, вызванного излучением с изотропной интенсивностью.

Модель реализована в виде программы на языках программирования C и Python и доступна в репозитории GitHub¹.

Вторая глава посвящена моделированию орбитальной модуляции рентгеновского потока Her X-1 в низком состоянии по данным спутника *SRG/eROSITA*. В ходе первого и второго рентгеновского обзора всего неба Her X-1 14–16 раз проходил через поле зрения детекторов *SRG/eROSITA* с интервалом времени между последовательными прохожденьями 4 часа. В каждом обзоре наблюдения покрывают примерно 1.5 орбитальных периода рентгеновской двойной системы. В первый раз Her X-1 проходил через поле зрения в марте 2020 года, наблюдения попали на низкое состояние перед коротким включением. Во второй раз наблюдения рентгеновской двойной системы состоялись в сентябре 2020 года и попали на низкое состояние сразу после короткого включения. В ходе этих наблюдений была обнаружена орбитальная модуляция рентгеновского потока.

В 1973 году было показано, что в рентгеновской двойной системе над облучённой частью звезды-донора должна находиться горячая корона с температурой $T \sim 2\text{--}4 \times 10^6$ K и плотностью $n \sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$ [31]. Корона оптически прозрачна по рассеянию на свободных электронах $\tau_s \leq 0.05\text{--}0.1$. Вдали от фотосферы звезды-донора корона переходит в звёздный ветер с температурой порядка 10^7 K.

В плазме с такими параметрами может возникать тепловая неустойчивость [32]. При возникновении неустойчивости корональная плазма перераспределяется, что может приводить к вариациям рентгеновского потока на временах короче орбитального периода. Такие вариации могут объяснить наблюдаемое расхождение данных и теоретической модели.

Горячее гало (корона) над аккреционным диском также рассеивает рентгеновское излучение нейтронной звезды [33; 34]. Наблюдения на космической обсерватории *Ginga/LAC* подтверждают предположение о протяжённом источнике рентгеновского излучения [35; 36]. Позже, наблюдения на космической обсерватории *RXTE* указали на присутствие дисковой короны.

В низком состоянии аккреционный диск системы закрывает от наблюдателя нейтронную звезду, поэтому зарегистрированное рентгеновское излучение может быть результатом рассеяния излучения нейтронной звезды на трёх зонах:

- оптически тонкая горячая корона с температурой $T \sim 2\text{--}4 \times 10^6$ K над облучённой частью оптической звезды;
- оптически тонкое горячее гало над аккреционным диском;
- оптически толстая атмосфера оптической звезды.

В **третьей главе** излагается модель свободной прецессии нейтронной звезды Her X-1 и результаты моделирования измеренных вариаций частоты рентгеновского пульсара спутником *Fermi/BAT*. Рассматриваются

¹<https://github.com/eliseys/discostar>

случаи двухосной свободной прецессии с параметрами, определёнными из анализа эволюции профилей рентгеновских импульсов с фазой 35-дневного цикла [21], и трёхосной свободной прецессии. Отдельно излагается кросс-корреляционная методика определения моментов начала 35-дневного цикла по рентгеновским данным спутника *Fermi*/GBM.

Заключение

В рамках исследования, изложенного в настоящей диссертации, было выяснено, что

1. главная причина эволюции оптических кривых блеска с фазой 35-дневного цикла — переменная рентгеновская тень на поверхности звезды-донора от наклонного, изгибаемого, прецессирующего аккреционного диска с переменными параметрами;
2. геометрические параметры аккреционного диска определяются переменным магнитным моментом сил магнитосферы свободно прецессирующей нейтронной звезды;
3. модель рентгеновской двойной системы, дополненная моделью протяжённой, горячей, оптически прозрачной короны над облучённой частью звезды-донора объясняет орбитальную вариацию рентгеновского потока в низком состоянии Her X-1;
4. двухосная свободная прецессия нейтронной звезды объясняет наблюдаемую амплитуду периодических вариаций частоты в 35-дневном цикле Her X-1. Трёхосная модель с $\frac{I_2 - I_1}{I_1} \sim 10^{-7}$ имеет χ^2 лучше, чем модель двухосной прецессии. Наблюдаемые отклонения измеряемой частоты от модельной кривой может объясняться вкладом в пульс других излучающих областей на поверхности нейтронной звезды, положение которых отличается от положения магнитного полюса.

Список литературы

1. Discovery of a Periodic Pulsating Binary X-Ray Source in Hercules from UHURU / Н. Tananbaum [и др.] // *Astrophysical Journal, Letters*. — 1972. — Июнь. — Т. 174. — С. L143.
2. *Bahcall J. N., Bahcall N. A.* The Period and Light Curve of HZ Herculis // *Astrophysical Journal, Letters*. — 1972. — Ноябрь. — Т. 178. — С. L1.
3. *Forman W., Jones C. A., Liller W.* Optical Studies of UHURU Sources. III. Optical Variations of the X-Ray Eclipsing System HZ Herculis // *Astrophysical Journal, Letters*. — 1972. — Ноябрь. — Т. 177. — С. L103.

4. *Crampton D., Hutchings J. B.* Spectroscopic Observations of HZ Herculis and a Model for Hercules X-1 // *Astrophysical Journal, Letters.* — 1972. — Дек. — Т. 178. — С. L65.
5. On the Nature of the Optical Variations of HZ Her = Her X1 / A. M. Cherepashchuk [и др.] // *Information Bulletin on Variable Stars.* — 1972. — Сент. — Т. 720.
6. Further X-ray observations of Hercules X-1 from Uhuru. / R. Giacconi [и др.] // *Astrophysical Journal.* — 1973. — Авг. — Т. 184. — С. 227.
7. *Staubert R., Bezler M., Kendziorra E.* Hercules X-1 : a random walk noise model for the 35-day turn-ons. // *Astronomy and Astrophysics.* — 1983. — Янв. — Т. 117. — С. 215–219.
8. RXTE highlights of the 34.85-day cycle of HER X-1 / N. I. Shakura [и др.] // *Monthly Notices of the RAS.* — 1998. — Нояб. — Т. 300. — С. 992–998.
9. Observational manifestations of the change in the tilt of the accretion disk to the orbital plane in her X-1/HZ her with phase of its 35-day period / D. K. Klochov [и др.] // *Astronomy Letters.* — 2006. — Дек. — Т. 32, № 12. — С. 804–815.
10. The Swift/BAT Hard X-Ray Transient Monitor / H. A. Krimm [и др.] // *Astrophysical Journal, Supplement.* — 2013. — Нояб. — Т. 209, № 1. — С. 14.
11. *Gerend D., Boynton P. E.* Optical clues to the nature of Hercules X-1/HZ Herculis // *Astrophysical Journal.* — 1976. — Окт. — Т. 209. — С. 562–573.
12. HER X-1: a New Model for X-Ray Dips / N. I. Shakura [и др.] // *Astrophysical Letters and Communications.* — 1999. — Т. 38. — С. 165.
13. Physics and astrophysics of neutron stars and black holes. — 1978.
14. *Brecher K.* Her X-1: A Processing Binary Pulsar? // *Nature.* — 1972. — Окт. — Т. 239. — С. 325–326.
15. *Novikov I. D.* Free precession as an explanation for the 36-day period of Hercules X-1 // *Astronomicheskii Zhurnal.* — 1973. — Июнь. — Т. 50. — С. 459.
16. EXOSAT observations of the 35 day cycle of Hercules X-1 Evidence for neutron star precession / J. Truemper [и др.] // *Astrophysical Journal, Letters.* — 1986. — Янв. — Т. 300. — С. L63–L67.
17. Variable pulse profiles of Hercules X-1 repeating with the same irregular 35 d clock as the turn-ons / R. Staubert [и др.] // *Astronomy and Astrophysics.* — 2013. — Февр. — Т. 550. — A110.

18. On the origin of X-ray dips in HER X-1 / N. I. Shakura [и др.] // Astronomy and Astrophysics. — 1999. — Август. — Т. 348. — С. 917–923.
19. The 35 Day Evolution of the Hercules X-1 Pulse Profile: GINGA Observations and Their Implications / J. E. Deeter [и др.] // Astrophysical Journal. — 1998. — Август. — Т. 502. — С. 802–823.
20. *Scott D. M., Leahy D. A., Wilson R. B.* The 35 Day Evolution of the Hercules X-1 Pulse Profile: Evidence for a Resolved Inner Disk Occultation of the Neutron Star // Astrophysical Journal. — 2000. — Август. — Т. 539. — С. 392–412.
21. Variable neutron star free precession in Hercules X-1 from evolution of RXTE X-ray pulse profiles with phase of the 35-d cycle / K. Postnov [и др.] // Monthly Notices of the RAS. — 2013. — Октябрь. — Т. 435. — С. 1147–1164.
22. *Shakura N. I., Postnov K. A., Prokhorov M. E.* Presence of a Quadrupole Component of the Magnetic Field Near the Surface of the Neutron Star in HERCULES-X-1 // Soviet Astronomy Letters. — 1991. — Апрель. — Т. 17. — С. 339.
23. *Panchenko I. E., Postnov K. A.* Hercules X-1 pulse profile simulation // Astronomy and Astrophysics. — 1994. — Июнь. — Т. 286. — С. 497–500.
24. An extended X-ray low state from Hercules X-1 / A. N. Parmar [и др.] // Nature. — 1985. — Январь. — Т. 313, № 5998. — С. 119–121.
25. Multiwavelength Observations of Hercules X-1/HZ Herculis / S. D. Vrtilek [и др.] // Astrophysical Journal, Letters. — 1994. — Ноябрь. — Т. 436. — С. L9.
26. The 1999 Hercules X-1 Anomalous Low State / W. Coburn [и др.] // Astrophysical Journal. — 2000. — Ноябрь. — Т. 543, № 1. — С. 351–358.
27. *Boyd P., Still M., Corbet R.* Her X-1 Exiting Anomalous Low State // The Astronomer's Telegram. — 2004. — Июль. — Т. 307. — С. 1.
28. *Still M., Boyd P.* Fine-Tuning the Accretion Disk Clock in Hercules X-1 // Astrophysical Journal, Letters. — 2004. — Май. — Т. 606, № 2. — С. L135–L138.
29. *Howarth I. D., Wilson B.* A Study of the Low-Mass X-Ray Binary Hz-Herculis / HERCULES-X-1 Using IUE and Optical Data // Monthly Notices of the RAS. — 1983. — Январь. — Т. 202. — С. 347.
30. Observations of Her X-1 in low states during SRG/eROSITA all-sky survey / N. I. Shakura [и др.] // Astronomy and Astrophysics. — 2021. — Апрель. — Т. 648. — A39.
31. *Basko M. M., Sunyaev R. A.* Interaction of the X-Ray Source Radiation with the Atmosphere of the Normal Star in Close Binary Systems // Ap&SS. — 1973. — Июль. — Т. 23, № 1. — С. 117–158.

32. *Krolik J. H., McKee C. F., Tarter C. B.* Two-phase models of quasar emission line regions. // *Astrophysical Journal*. — 1981. — Окт. — Т. 249. — С. 422—442.
33. *Bochkarev N. G.* Physical Conditions in the Gaseous Corona around the Outer Edge of the Accretion Disk in HERCULES-X-1 // *Soviet Ast.* — 1989. — Дек. — Т. 33. — С. 638.
34. *Bochkarev N. G., Karitskaya E. A.* Behavior of Matter Near the Outer Region of the Accretion Disk in HERCULES-X-1 // *Evolutionary Processes in Interacting Binary Stars*. Т. 151. — 1992. — С. 449.
35. *Leahy D. A.* Ginga observations of Her X-1 in the short high state: evidence for an extended emission region // *Monthly Notices of the RAS*. — 2000. — Июль. — Т. 315, № 4. — С. 735—739.
36. *Leahy D. A., Chen Y.* AstroSat SXT Observations of Her X-1 // *Astrophysical Journal*. — 2019. — Февр. — Т. 871, № 2. — С. 152.