

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СПЕЦИАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ

На правах рукописи

УДК 524.354.4-327 + 524.354.4-62

Ихсанов Назар Робертович

**ИССЛЕДОВАНИЕ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ ПРОЯВЛЕНИЙ
КОМПАКТНЫХ ЗВЕЗДНЫХ ОБЪЕКТОВ НА
ПЕКУЛЯРНЫХ СТАДИЯХ ЭВОЛЮЦИИ**

(01.03.02 – астрофизика, радиоастрономия)

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико–математических наук

Нижний Архыз – 2008

Работа выполнена в Главной Астрономической Обсерватории
Российской Академии Наук

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
профессор А.И. Цыган
Физико-технический Институт
им. А.Ф. Иоффе
Российской Академии Наук

доктор физико-математических наук
профессор С.Н. Фабрика
Специальная Астрофизическая Обсерватория
Российской Академии Наук

доктор физико-математических наук
М.Е. Прохоров
Государственный Астрономический Институт
им. П.К. Штернберга МГУ им. М.В. Ломоносова

Ведущая организация: Санкт-Петербургский Государственный
Университет

Защита состоится 15 апреля 2008 г. в 14 часов на заседании Диссертационного совета Д 002.203.01 при Специальной Астрофизической Обсерватории РАН по адресу: 369167, КЧР, Зеленчукский район, пос. Нижний Архыз.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке САО РАН.

Автореферат разослан " ____ " _____ 2008 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета
кандидат физ.- мат. наук

МАЙОРОВА Е.К.

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Теория магниторотационной эволюции нейтронных звезд позволяет интерпретировать многообразие наблюдаемых особенностей этих объектов в рамках единого эволюционного трека, включающего в себя три основных состояния: *эжектор*, *пропеллер* и *аккретор*. Молодые нейтронные звезды, образующиеся в процессе вспышки сверхновой с коллапсирующим ядром, отличаются высокой температурой поверхности, сильным магнитным полем и высокой скоростью вращения. В ходе дальнейшей эволюции температура поверхности нейтронной звезды падает, происходит распад ее магнитного поля и уменьшение энергии вращения. Это приводит к изменению характера взаимодействия звезды с окружающей материей и, соответственно, механизма энерговыделения, ответственного за ее излучение.

Нейтронные звезды в состоянии эжектора и аккретора надежно отождествлены, соответственно, с радио- (эжекционными) и аккреционными пульсарами и уже на протяжении нескольких десятков лет являются предметом активного наблюдательного исследования. Наблюдательные особенности нейтронных звезд в состоянии пропеллера до недавнего времени оставались лишь темой теоретической дискуссии, одно из центральных мест в которой занимала проблема происхождения долгопериодических рентгеновских пульсаров. Анализ возможных решений этой задачи показал, что прохождение нейтронной звездой стадии пропеллера является неминуемым, что количество нейтронных звезд нашей Галактики, которые в настоящее время находятся на этой стадии, является значительным и что класс пропеллеров не является однородным, но включает в себя по крайней мере два подкласса, получивших название сверхзвуковых и дозвуковых пропеллеров.

Наблюдательное отождествление пропеллеров стало возможным лишь несколько лет назад, благодаря стремительному прогрессу в чувствительности рентгеновских телескопов. Было показано, что характеристики рентгеновского излучения, наблюдаемого в течение спокойной фазы ряда транзиентных рентгеновских источников, отличаются от характеристик излучения нейтронных звезд в состоянии эжектора или аккретора. Более того, огромная амплитуда изменения интенсивности рентгеновского излучения при переходе этих источников из спокойной фазы в активную и обратно находилась в хорошем соответствии с моделью, в которой транзиентный характер этих объектов интерпретировался в рамках перехода нейтронной

звезды между состояниями пропеллера и аккретора, и позволяла исключить альтернативные объяснения. Вместе с тем, было отмечено, что спектральные и временные характеристики излучения источников, являющихся кандидатами в пропеллеры, отличаются от соответствующих характеристик, предсказываемых теорией. Это указывает на необходимость пересмотра существующих представлений о механизме формирования излучения пропеллеров, а также на актуальность критического анализа основных временных и энергетических параметров этой пекулярной фазы эволюции нейтронных звезд.

Среди наблюдательных данных, свидетельствующих об актуальности критического анализа существующей модели магниторотационной эволюции нейтронных звезд, следует также отметить:

- 1) открытие сверхдолгопериодических пульсаров, период вращения нейтронных звезд в которых лежит в пределах 1000–10000 секунд;
- 2) наблюдения ряда Be/рентгеновских транзиентных источников в состоянии аномально низкой рентгеновской светимости, представляющем собой симбиоз состояний пропеллера и аккретора низкой светимости, а также
- 3) отсутствие успеха в поиске старых изолированных нейтронных звезд, излучение которых обусловлено аккрецией материи межзвездной среды на их поверхность.

Интерпретация вышеперечисленных результатов представляется возможной лишь в рамках эволюционных треков, включающих в себя фазу дозвукового пропеллера, которая до недавнего времени оставалась практически неисследованной.

Следует отметить, что методы, лежащие в основе магниторотационной модели эволюции нейтронных звезд, оказываются также эффективными в исследовании наблюдательных проявлений другого класса компактных звезд – белых карликов. В частности, анализ эволюции белых карликов, входящих в состав маломассивных тесных двойных систем, указывает, что наряду с состоянием аккретора, в котором эти объекты наблюдаются в многочисленном классе Взрывных (катаклизмических) Переменных звезд, состояния пропеллера и эжектора также могут быть реализованы. Переход белых карликов в эти состояния возможен как вследствие интенсивной дисковой аккреции вещества на их поверхность, так и слияния двух белых карликов на поздних стадиях эволюции двойной системы. Несмотря на относительную многочисленность подобных объектов, предсказываемую теорией, попытки их обнаружения в течение долгого времени успеха не имели.

Первый кандидат в этот класс объектов появился лишь в 1994 году: было показано, что темп замедления белого карлика в тесной двойной системе АЕ Водолея, также как и наблюдаемая картина течения вещества в его полости Роша не могут быть интерпретированы в рамках канонической модели аккретора. На протяжении последующего десятилетия для исследования АЕ Водолея были привлечены лучшие телескопы мира, охватывающие все диапазоны электромагнитного спектра, что позволило получить обильный материал для теоретической интерпретации этого источника и, во многом благодаря исследованиям, представленным в настоящей диссертации, продвинуть наши представления об этом объекте на качественно новый уровень. Знания, полученные в ходе этих исследований, заставляют нас пересмотреть границы применимости магниторотационной модели эволюции компактных звезд, что является актуальным в выборе правильной стратегии исследования этих объектов на современном этапе.

Цель исследования

Основными целями настоящей работы являются:

1. Построение эволюционного трека нейтронных звезд в долгопериодических рентгеновских пульсарах. Анализ ключевых параметров нейтронных звезд и их компаньонов в тесных двойных системах, требуемых для образования этих источников;
2. Исследование наблюдательных проявлений нейтронных звезд на стадиях сверхзвукового и дозвукового пропеллера с целью выработки критериев для наблюдательного отождествления этих объектов;
3. Исследование наблюдаемых свойств одиночных нейтронных звезд на поздних стадиях эволюции при учете взаимодействия аккреционного потока с магнитосферой этих объектов. Определение критериев для наблюдательного отождествления этих объектов и оценка вероятности их обнаружения современными рентгеновскими телескопами;
4. Определение состояния нейтронной звезды в течение фазы аномально низкой светимости Ве/рентгеновского транзита А 0535+26. Анализ механизмов энерговыделения, ответственных за высокоэнергичное излучение системы, детектируемое в течение этой фазы;
5. Идентификация состояния белого карлика в тесной двойной системе АЕ Водолея. Построение модели переноса массы между компонентами

этой системы и, на основе этого, решение вопроса о механизмах энерговыделения, ответственных за наблюдаемое излучение. Определение эволюционного статуса источника;

6. Теоретический и наблюдательный анализ причин уникальной вспышечной активности АЕ Водолея. Решение вопроса о локализации источника вспышечного излучения и его параметрах.

Научная новизна

В диссертации представлены следующие новые результаты:

- Впервые показано, что происхождение известных на сегодня долгопериодических рентгеновских пульсаров может быть объяснено в рамках единого эволюционного трека, включающего в себя четыре основных состояния нейтронной звезды: эжектор, сверхзвуковой пропеллер, дозвуковой пропеллер и аккректор. Сформулированы основные условия реализации указанной эволюционной цепочки;
- Приведены исправленные величины основных параметров, определяющих условие перехода компактной звезды между состояниями сверхзвукового и дозвукового пропеллера и аккректора;
- Впервые сформулированы критерии идентификации нейтронных звезд в состоянии дозвукового пропеллера. Показано, что звезды в этом состоянии проявляют себя как аккрецирующие рентгеновские пульсары с низкой светимостью и мягким спектром;
- Впервые показано, что учет взаимодействия аккреционного потока с магнитным полем изолированных нейтронных звезд, находящихся на поздней стадии эволюции, приводит к пересмотру вероятности обнаружения этих объектов в сторону понижения;
- Впервые показано, что нейтронная звезда, входящая в состав Ве/рентгеновского транзиента А 0535+26, в течение спокойной фазы источника находится в пекулярном состоянии, идентичном состоянию дозвукового пропеллера;
- Впервые показано, что наблюдаемые проявления белого карлика в тесной двойной системе АЕ Водолея находятся в соответствии с идентификацией состояния этого объекта с состоянием эжектора. В рамках

этой идентификации проведена оценка основных параметров системы и ее компонентов и выполнено моделирование процесса переноса массы.

Положения диссертации, выносимые на защиту

1. Решение проблемы происхождения долгопериодических рентгеновских пульсаров в рамках сценария магниторотационной эволюции нейтронных звезд в массивных тесных двойных системах, исходно предложенного Дэвисом, Фабианом и Принглом и исправленного автором диссертации.
2. Критерии наблюдательного отождествления нейтронных звезд в состоянии дозвукового пропеллера и результат их использования для идентификации состояния нейтронной звезды и моделирования аккреционного процесса в течение фазы аномально низкой рентгеновской светимости транзиентного источника А 0535+26.
3. Оценка вероятности наблюдательного отождествления изолированных нейтронных звезд с сильным магнитным полем, аккрецирующих материю на свою поверхность из межзвездной среды. Результаты расчета временных и энергетических характеристик излучения этих объектов на заключительном этапе эволюции.
4. Идентификация компактного компонента тесной двойной системы АЕ Водолея с белым карликом, находящимся в состоянии эжектора.
5. Результаты численного моделирования доплеровской $H\alpha$ томограммы и построение картины течения вещества в системе АЕ Водолея. Определение относительного вклада механизмов эжектора и пропеллера в энергетический баланс системы.
6. Результаты фотометрических и поляриметрических наблюдений АЕ Водолея и их интерпретация. Определение энергетических и цветовых параметров вспышечного излучения системы.
7. Определение энергетических и пространственных параметров источников рентгеновского и гамма-излучения, связанных с белым карликом в состоянии эжектора.

Научная и практическая значимость работы

1. В диссертации приводится подробное описание исправленного единого эволюционного трека нейтронных звезд и критериев его применимости в зависимости от исходных параметров объекта и окружающей его материи. Эти данные могут быть использованы для идентификации эволюционного статуса компактных звезд и определения механизма энерговыделения, ответственного за излучение соответствующего источника;
2. Полученные критерии идентификации компактных источников в состоянии пропеллера могут быть использованы для разработки стратегии их отождествления при составлении наблюдательных программ;
3. Учет рассмотренных в диссертации механизмов взаимодействия аккреционного потока с магнитным полем компактного объекта необходим при моделировании рентгеновских вспышек в транзиентных источниках и для определения параметров процесса обмена массой между компонентами в этих двойных системах;
4. Результаты моделирования тесной двойной системы АЕ Водолея могут быть использованы для построения эволюционных треков компактных объектов, входящих в состав Взрывных Переменных, при расчетах эволюции магнитных полей белых карликов, а также для оценки достоверности модели процесса энерговыделения, ответственного за излучение компактных звездных объектов, находящихся в состоянии эжектора;
5. Результаты фотометрических и поляриметрических наблюдений АЕ Водолея могут быть использованы при моделировании пекулярной вспышечной активности этого объекта.

Апробация результатов

Основные результаты, изложенные в диссертации, докладывались на астрофизических семинарах:

- Главной астрономической обсерватории РАН, Астрономического института им. В.В. Соболева СПбГУ, Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе, Теоретического отдела Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, Специальной астрофизической обсерватории РАН и Крымской Астрофизической Обсерватории;

- институтов им. Макса Планка, Германия: МРЕ, г. Мюнхен, (1996, 1999); МРІ, г. Бонн, (6 докладов в течение 1996–2007); МРА, г. Мюнхен (2003); Института астрономии Бонского Университета, г. Бонн, Германия (1995); Института астрономии Мюнхенского Университета, г. Мюнхен, Германия (4 доклада в течение 1994–1999); Института астрономии Кембриджского Университета, г. Кембридж, Англия (2003, 2005), Корейского института астрономии и космических исследований, г. Тэджон, Южная Корея (4 доклада в течение 2003–2005), Центра космических полетов им. Маршала, НАСА, г. Хантсвилл, США (2006), Астрономического института Университета Северной Каролины, г. Гринсборо, США (2006),

Автором было представлено 36 научных докладов на 24-х российских и международных конференциях:

- “X Ray Emission from Active Galactic Nuclei and the Cosmic X Ray Background”, Мюнхен, Германия, ноябрь 1991;
- “The cosmic dynamo”, Потсдам, Германия, сентябрь 1992;
- “Particle Acceleration Phenomena in Astrophysical Plasmas”, Мэриленд, США, январь 1993;
- “Cataclysmic Variables”, Терме, Италия, июнь 1994;
- IAU Colloquium 151: “Flares and Flashes”, Зоненберг, Германия, декабрь 1994;
- Seventeenth Texas Symposium on Relativistic Astrophysics and Cosmology, Мюнхен, Германия, декабрь 1994;
- Cape Workshop on “Magnetic cataclysmic variables”, Кейптаун, Южная Африка, январь 1995;
- Vulcano Workshop on “High Energy Astrophysics and Particle Physics”, Вулкано, Италия, июнь 1997;
- ESO Workshop on “Cyclical Variability in Stellar Winds: Recent Developments and Future Applications”, Мюнхен, Германия, октябрь 1997;
- “BL LAC Phenomenon”, Турку, Финляндия, июнь 1998;
- “Highlights in X-ray astronomy”, Мюнхен, Германия, июнь 1998;

- IAU Colloquium 177, “Pulsar Astronomy - 2000 and Beyond”, Бонн, Германия, август 1999;
- ESO Workshop on “Black Holes in Binaries and Galactic Nuclei”, Мюнхен, Германия, сентябрь 1999;
- Съезд Европейского астрономического общества JENAM-2000, Москва, Россия, май 2000;
- Съезд Европейского астрономического общества JENAM-2001, Мюнхен, Германия, сентябрь 2001;
- Третья Всероссийская Астрономическая Конференция (ВАК-2004) “Вселенная и мы”, Москва, Россия, июнь 2004;
- IAU Symposium 223, “Multi-Wavelength Investigations of Solar Activity”, Санкт-Петербург, Россия, июнь 2004;
- “The Astrophysics of Cataclysmic Variables and Related Objects”, Страсбург, Франция, июль 2004;
- “Astrophysics and cosmology after Gamow - theory and observations”, Одесса, Украина, август 2004;
- Annual meeting of Korean Physical Society, Джеджу, Южная Корея, октябрь 2004;
- “Cosmology and High Energy Astrophysics (Zeldovich-90)”, Москва, Россия, декабрь 2004;
- COSPAR Colloquium on: “Spectra & Timing of Accreting X-ray Binaries”, Бомбей, Индия, январь 2005;
- “Isolated Neutron Stars: from the Interior to the Surface”, Лондон, апрель, 2006;
- 363. WE-Heraeus Seminar on: “Neutron Stars and Pulsars”, Бад-Хоннеф, Германия, май 2006.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из Введения, трех глав, заключения, списка литературы (260 наименований) и приложения. Она содержит 21 рисунок и 15 таблиц. Общий объем диссертации – 282 страницы.

Краткое содержание диссертации

Во Введении обосновывается актуальность темы, обсуждаются основные цели исследования, отмечается научная новизна и практическая значимость представленных результатов, дается краткое изложение содержания диссертации, указывается, где диссертация прошла апробацию и формулируются основные положения, выносимые на защиту. Там же приводится список опубликованных работ автора по теме диссертации с указанием его непосредственного вклада в работы, выполненные с соавторами.

Первая глава посвящена решению проблемы происхождения долгопериодических рентгеновских пульсаров.

В § 1.1 приводятся определения основных параметров, используемых в теории магниторотационной эволюции компактных звездных объектов, обсуждаются базовые принципы классификации состояний нейтронной звезды по характеру ее взаимодействия с окружающей материей и подробно описывается постановка задачи о происхождении долгопериодических рентгеновских пульсаров. Сравнительный анализ наблюдаемых параметров долгопериодических пульсаров и параметров, ожидаемых в различных моделях этих объектов, позволяет сделать вывод, что равенство коротационного (R_{cor}) и магнитосферного (R_m) радиусов нейтронной звезды не может являться достаточным условием перехода звезды в состояние аккретора. Там же показано, что данное утверждение остается справедливым в широком спектре возможных величин параметров нейтронной звезды (включая предположение о сверхкритической величине ее исходного магнитного поля) и звездного ветра ее нормального компаньона.

§ 1.2 посвящен анализу геометрии аккреционного потока в долгопериодических пульсарах. Сравнение параметров эволюции периода вращения нейтронных звезд, ожидаемых в случае дисковой аккреции, с величиной соответствующих параметров, полученных из наблюдений, позволяет сделать вывод об отсутствии развитого постоянного аккреционного диска в этих объектах. Вследствие этого, эволюционный трек нейтронных звезд, входящих в состав долгопериодических пульсаров, следует моделировать в рамках предположения о сферической геометрии аккреционного потока.

В § 1.3 проводится критический анализ сценария эволюции нейтронной звезды в массивной тесной двойной системе, предложенного в работах Дэвиса, Фабиана и Прингла (см. Davies et al. 1979) и Дэвиса и Прингла (см. Davies & Pringle 1981) (ДФП-сценарий). Авторами этого сценария было показано, что условие $R_m \leq R_{\text{cor}}$ в случае сферической геометрии аккре-

ционного потока не является достаточным условием перехода нейтронной звезды в состояние аккретора. Для реализации такого перехода необходимо также, чтобы темп охлаждения плазмы на границе магнитосферы звезды превышал темп ее нагрева вследствие эффекта пропеллера. Однако, как было отмечено автором диссертации, величина периода вращения звезды, при котором это дополнительное условие оказывается выполненным, в работе Davies & Pringle (1981), вычислена неверно. Исправленная величина этого периода определяется выражением:

$$P_{\text{br}} \simeq 450 \mu_{30}^{16/21} \dot{\mathcal{M}}_{15}^{-5/7} m^{-4/21} \text{ с}, \quad (1)$$

где μ_{30} и m – дипольный магнитный момент и масса нейтронной звезды, выраженные в единицах $10^{30} \text{ Гс} \cdot \text{см}^3$ и $1.4 M_{\odot}$, соответственно, и $\dot{\mathcal{M}}_{15}$ – максимально возможный темп захвата массы нейтронной звездой из ветра ее массивного компаньона, выраженный в единицах 10^{15} г/с .

Автором диссертации также было получено, что условие самосогласованности модели сверхзвукового пропеллера, полученное в рамках ДФП-сценария в работе Davies & Pringle (1981), нуждается в поправке. С учетом этого обстоятельства было показано, что ДФП-сценарий может быть использован для описания эволюции нейтронных звезд в массивных тесных двойных системах при условии:

$$\dot{\mathcal{M}}_0 < \dot{\mathcal{M}}_{\text{cr}} \simeq 3.5 \times 10^{17} m V_8 \text{ г/с}, \quad (2)$$

которое для известных на сегодняшний день долгопериодических пульсаров выполняется с большим запасом. Здесь V_8 – скорость движения нейтронной звезды относительно материи, окружающей ее на радиусе гравитационного захвата, выраженная в единицах 10^8 см/с .

В § 1.4 показано, что периоды вращения большинства нейтронных звезд, проявляющих себя как долгопериодические рентгеновские пульсары, находятся в достаточно хорошем соответствии с предсказаниями исправленного ДФП-сценария магниторотационной эволюции компактных звездных объектов. Привлечение дополнительного предположения о сверхкритической величине исходного магнитного поля медленно вращающихся нейтронных звезд в рамках построенного эволюционного трека не является необходимым. Вместе с тем, наилучшего соответствия между наблюдаемыми и предсказываемыми величинами периода удается достичь, предположив, что параметры нейтронных звезд в этих системах соответствуют жесткому уравнению состояния.

Во **второй главе** анализируется возможность наблюдательного отождествления нейтронных звезд в состояниях сверхзвукового и дозвукового пропеллера, предсказанных в рамках ДФП-сценария, а также рассматриваются приложения этого сценария к исследованию эволюции изолированных нейтронных звезд.

В § 2.1 отмечено, что в силу того, что проводимость плазмы аккреционного потока не бесконечна, темп ее проникновения в магнитосферу и, соответственно, темп аккреции на поверхность звезды, находящейся в состоянии дозвукового пропеллера, ненулевой. Аккреционный процесс в данном случае обусловлен диффузией плазмы оболочки в магнитное поле звезды на границе ее магнитосферы. Характерное время аккреции определяется временем остывания плазмы в магнитопаузе. В рамках рассматриваемой задачи аккреционная светимость дозвукового пропеллера оценивается выражением:

$$L_x^{\text{sp}} \lesssim 10^{32} \mu_{30}^{2/7} m^{-4/7} \left(\frac{R_{\text{ns}}}{10^6 \text{ см}} \right)^{-1} \left[\frac{\dot{\mathcal{M}}_0}{10^{15} \text{ г/с}} \right]^{13/7} \text{ эрг/с}, \quad (3)$$

где $\dot{\mathcal{M}}_0 = \pi R_G^2 \rho_\infty V_{\text{rel}}$ – максимально возможный темп захвата материи нейтронной звездой, двигающейся через среду, средняя плотность которой ρ_∞ , с относительной скоростью V_{rel} , а $R_G = 2GM_{\text{ns}}/V_{\text{rel}}^2$ – радиус гравитационного захвата нейтронной звезды с массой M_{ns} . Таким образом, нейтронная звезда на стадии дозвукового пропеллера может проявлять себя подобно аккреционному рентгеновскому пульсару низкой (или умеренной) светимости. Вместе с тем, существует ряд критериев, позволяющих отличить дозвуковые пропеллеры от аккреторов низкой светимости.

К ним, в частности, относятся следующие:

1. ограничение на область допустимых величин периодов вращения дозвуковых пропеллеров;
2. мягкий рентгеновский спектр, обусловленный бóльшей площадью горячих пятен в области магнитных полюсов дозвукового пропеллера по сравнению с аккретором той же светимости;
3. высокий темп замедления вращения нейтронной звезды, находящейся в состоянии дозвукового пропеллера.

Следует особо отметить, что радиус магнитосферы нейтронной звезды в состоянии дозвукового пропеллера, R_m^{p} , меньше радиуса магнитосферы

аккретора, R_m^a , имеющего ту же рентгеновскую светимость:

$$\frac{R_m^a}{R_m^p} \simeq 17 \mu_{30}^{-4/49} m^{22/49} \left[\frac{\dot{M}_0}{10^{15} \text{ г/с}} \right]^{-12/49}. \quad (4)$$

Это обстоятельство следует учитывать при оценке радиуса магнитосферы нейтронной звезды по рентгеновской светимости пульсирующего источника. В противном случае возможно возникновение парадоксальной ситуации, при которой радиус магнитосферы нейтронной звезды, аккрецирующей вещество на свою поверхность, оказывается превосходящим ее радиус коротации. С другой стороны, именно факт возникновения такого парадокса является наиболее веским аргументом в пользу идентификации состояния нейтронной звезды с состоянием дозвукового пропеллера.

В § 2.2 рассматривается задача об идентификации состояния нейтронной звезды в течение фазы аномально низкой светимости транзиентного рентгеновского источника А 0535+26. Модуляция рентгеновского излучения, наблюдаемого в течение этой фазы, с периодом вращения нейтронной звезды ($\simeq 103 - 104$ с) и отождествление источника пульсирующего компонента с горячими ($T_p \simeq 1.3$ кэВ) пятнами, радиус каждого из которых $R_p \simeq 0.1$ км, оставляют мало сомнений в том, что наблюдаемое излучение имеет аккреционную природу и генерируется на поверхности нейтронной звезды. В то же время, предположение о том, что нейтронная звезда в течение этой фазы находится в состоянии аккретора приводит к противоречию: радиус магнитосферы звезды в этом случае оказывается существенно больше ее радиуса коротации, что соответствует состоянию сверхзвукового пропеллера, в течение которого стационарная аккреция на поверхность нейтронной звезды невозможна.

Данное противоречие, однако, не возникает в том случае, если нейтронная звезда в течение фазы аномально низкой рентгеновской светимости переходит в состояние дозвукового пропеллера. Значительное уменьшение рентгеновской светимости объекта в рамках такого подхода происходит вследствие изменения геометрии аккреционного потока от дисковой к сферической и, как следствие этого, уменьшения темпа проникновения плазмы в магнитное поле звезды на границе ее магнитосферы. Расчеты показывают, что основные характеристики рентгеновского излучения, ожидаемые в рамках этой модели, находятся в хорошем соответствии с наблюдаемыми. Следует также обратить внимание на то, что оптические наблюдения А 0535+26 в течение фазы аномально низкой рентгеновской светимости свидетельству-

ют о существенном изменении структуры ветра массивного компаньона: в течение этой фазы экваториальный истекающий диск у Ве-компонента отсутствует, и, таким образом, звезда теряет вещество преимущественно в форме высокоскоростного звездного ветра. Проведенные оценки указывают, что предположение об изменении геометрии аккреционного потока при этих условиях является реалистичным.

В § 2.3 рассматривается магниторотационная эволюция изолированных нейтронных звезд в рамках ДФП-сценария. Ранние исследования этого вопроса показали, что изолированные нейтронные звезды, обладающие достаточно сильным магнитным полем, на заключительном этапе своей эволюции могут переходить в состояние аккретора. При этом максимально возможный темп захвата вещества этими объектами из межзвездной среды оказывается настолько высоким, что если бы все захваченное вещество достигало поверхность звезды, то соответствующий рентгеновский источник мог бы быть зарегистрирован современными рентгеновскими телескопами. В частности, ожидалось, что телескопы Chandra и XMM-Newton будут в состоянии зарегистрировать излучение от ~ 10000 аккрецирующих изолированных нейтронных звезд, находящихся на удалении ≤ 5 кпк от Земли. Однако наблюдения не подтвердили это предсказание: ни одного рентгеновского источника, ассоциированного с аккрецирующей изолированной нейтронной звездой, до настоящего времени обнаружено не было.

Подход, представленный в этом параграфе, отличается от предшествовавших исследований учетом взаимодействия аккреционного потока с магнитным полем нейтроной звезды. В нем показано, что в условиях, реализуемых в задаче, аккреционный поток является сферическим и, следовательно, для описания эволюции изолированных нейтронных звезд следует использовать ДФП-сценарий, включающий в себя дополнительное состояние дозвукового пропеллера. Соответствующая модификация эволюционного трека изолированных нейтронных звезд позволяет сделать вывод о том, что эти звезды могут перейти в состояние аккретора лишь по достижении периода вращения

$$P_{\text{br}}^{\text{INS}} \simeq 10^5 \text{ с} \times \mu_{30}^{16/21} n^{-5/7} m^{-34/21} \left(\frac{V_{\text{rel}}}{10^7 \text{ см/с}} \right)^{15/7}, \quad (5)$$

где n – концентрация газа в межзвездной среде, выраженная в единицах одного атома водорода на кубический сантиметр. Однако даже при условии $P_s \gtrsim P_{\text{br}}^{\text{INS}}$ характерное время аккреционного процесса на поверхность звезды оказывается ограниченным снизу временем охлаждения плазмы на

границе магнитосферы, которое для условий рассматриваемой задачи определяется выражением

$$t_{\text{br}}(r_m) \simeq 10^5 \text{ лет} \times \left(\frac{T(R_m)}{10^7 \text{ К}} \right)^{1/2} \left(\frac{N_e(r_m)}{300 \text{ см}^{-3}} \right)^{-1}, \quad (6)$$

и, таким образом, существенно превосходит время свободного падения,

$$t_{\text{ff}}(r_m) \simeq 740 \text{ с} \times \mu_{30}^{6/7} n^{-3/7} m^{-11/7} \left(\frac{V_{\text{rel}}}{10^7 \text{ см/с}} \right)^{9/7}. \quad (7)$$

В силу этого обстоятельства процесс аккреции на поверхность изолированной нейтронной звезды будет носить нестационарный характер: соответствующие источники будут проявлять себя в виде барстеров, длительность и рекуррентное время вспышек которых: $t_{\text{burst}} \sim 30$ минут и $t_{\text{rec}} \sim 10^5$ лет соответственно. Количество объектов такого типа, которое могло бы быть зарегистрировано телескопами Chandra и XMM-Newton, определяется выражением

$$N \leq 10^{-5} \left(\frac{N(0)}{3 \times 10^4} \right) \left(\frac{t_{\text{burst}}}{30 \text{ минут}} \right) \left(\frac{t_{\text{rep}}}{10^5 \text{ лет}} \right), \quad (8)$$

что почти на девять порядков величины меньше количества этих объектов, предсказанного ранее ($N(0) \sim 3 \times 10^4$) в рамках модели, не учитывающей взаимодействие аккреционного потока с магнитным полем нейтронной звезды. Таким образом, отсутствие успеха в поиске изолированных нейтронных звезд, аккрецирующих вещество из межзвездной среды на свою поверхность, в свете рассмотренной нами модели является закономерным.

В **третьей главе** диссертации представлены результаты комплексного теоретико-наблюдательного исследования новоподобной звезды АЕ Водолея, являющейся одной из наиболее уникальных представителей класса Взрывных (катаклизмических) Переменных.

В § 3.1 отмечено, что классификация состояний компактных звездных объектов, принятая в рамках магниторотационной модели нейтронных звезд, в полной мере может быть использована и в отношении белых карликов. Состояние аккретора имеет надежное наблюдательное подтверждение: белые карлики в этом состоянии отождествлены с компактными компонентами большинства маломассивных тесных двойных систем, входящих в состав класса Взрывных Переменных. Перенос массы в этих системах обусловлен заполнением нормальным компонентом своей полости Роша и происходит в форме струи, текущей через первую точку Лагранжа. По характеру течения вещества внутри полости Роша белого карлика различают

три основных подкласса Взрывных Переменных: *немагнитные* системы (аккреция из диска, внутренний радиус которого порядка радиуса белого карлика), *промежуточные поляры* (аккреция из диска, внутренний радиус которого ограничен снизу радиусом магнитосферы, превосходящим радиус белого карлика) и *поляры* (канализованная аккреция без образования диска).

Белых карликов в состоянии эжектора и пропеллера до недавнего времени обнаружено не было. Вместе с тем, наблюдаемые величины магнитных полей и периодов вращения белых карликов, а также результаты моделирования эволюционных треков маломассивных двойных систем указывают на высокую вероятность существования этих объектов в нашей Галактике. Как было показано Усовым (Усов 1988, Usov 1993), белые карлики в состоянии эжектора могут являться источниками нетеплового гамма-излучения и теплового пульсирующего рентгеновского/ультрафиолетового излучения, генерируемого в области их магнитных полюсов. При этом темп потери вращательной энергии этими объектами оказывается существенно превосходящим их светимость в наблюдаемой части электромагнитного спектра. Среди изученных на сегодня белых карликов лишь один объект отвечает вышеперечисленным характеристикам. Им является белый карлик, входящий в состав маломассивной тесной двойной системы АЕ Водолея (АЕ Aquarii).

В § 3.2 кратко описывается история исследований АЕ Водолея и эволюция теоретических представлений о природе этого источника. Отмечается, что этот объект на протяжении уже почти 80-ти лет продолжает занимать одно из центральных мест в наблюдательных программах ведущих телескопов во всех областях электромагнитного спектра. Вследствие этого он является одним из наиболее полно изученных объектов, традиционно относящихся к классу Взрывных Переменных. АЕ Водолея был первым источником среди этого класса объектов, разрешенным как тесная двойная система. На протяжении долгого времени он был также известен как промежуточный поляр, в состав которого входит белый карлик с самым коротким периодом вращения (~ 33 с). В течение последних 30-ти лет он был утвержден в статусе “всеволнового” источника, излучение которого во всех диапазонах спектра от радио до рентгена носит переменный вспышечный характер, не имеющий аналогов среди всех известных на сегодня астрофизических объектов. Наконец, в течение последних 15-ти лет было показано, что характеристики излучения, наблюдаемого от АЕ Водолея в оптическом, УФ и рентгеновском диапазонах радикально отличаются от соответству-

ющих характеристик излучения объектов класса Взрывных Переменных звезд и не могут быть интерпретированы в рамках модели аккреции вещества на поверхность белого карлика. Таким образом, белый карлик в АЕ Водолея находится в состоянии, отличном от состояния аккретора.

В § 3.3 дается детальное описание параметров системы и ее компонентов, а также обсуждается постановка задачи теоретического моделирования процесса энерговыделения в этом источнике. Мы показываем, что основной особенностью АЕ Водолея и, в то же время, ключем к пониманию природы этого объекта является быстрое замедление вращения белого карлика, происходящее с темпом $\dot{P}_0 = 5.64 \times 10^{-14}$ с/с. Это означает, что темп потерь вращательной энергии белым карликом в 120–300 раз превышает светимость системы в ультрафиолетовой и рентгеновской частях спектра (в зависимости от вспышечного/спокойного состояния объекта) и по крайней мере в 5 раз выше ее болометрической светимости (с учетом вклада нормального компонента). Кроме того, распределение температуры по поверхности белого карлика неоднородно: при средней температуре поверхности $\sim 10000 - 16000$ К обнаруживается присутствие двух горячих ($\sim 20000 - 50000$ К) пятен, локализованных в области магнитных полюсов. Анализ наблюдений, выполненных на телескопе ХММ-Newton (см. Itoh et al. 2006), приводит к выводу, что происхождение этих пятен не связано с процессом аккреции вещества на поверхность звезды: пространственный масштаб рентгеновского источника $\ell_x \gtrsim 2 \times 10^{10}$ см, что почти на два порядка превышает радиус белого карлика, а концентрация излучающей плазмы, $n_x \sim 10^{11}$ см $^{-3}$, на несколько порядков меньше типичной концентрации частиц в ударной волне у поверхности аккрецирующих белых карликов. Все вышеприведенные результаты позволяют отклонить гипотезу об аккреционной природе излучения системы и, таким образом, исключить состояние аккретора из списка возможных состояний белого карлика.

Свидетельство того, что белый карлик в АЕ Водолея выполняет функцию пропеллера, отбрасывая из системы материю, притекающую к его магнитосфере от нормального компаньона, было получено из анализа доплеровской $\text{H}\alpha$ томограммы системы. Теоретическое моделирование процесса течения вещества в системе на основе полученной из наблюдений томограммы показало, что материя, текущая через внутреннюю точку Лагранжа, не аккрецирует на поверхность белого карлика и не аккумулируется в диске вокруг его магнитосферы, а, напротив, покидает систему в виде струи, двигаясь в полости Роша белого карлика со скоростью $\lesssim 550$ км/с.

Однако интерпретация быстрого замедления вращения белого карлика в терминах эффекта пропеллера оказывается затруднительной: требуемый темп переноса массы в системе в этом случае оказывается существенно выше верхней оценки величины этого параметра, полученного из наблюдений системы в оптической и ультрафиолетовой областях спектра. Кроме того, доплеровская $H\alpha$ томограмма, рассчитанная на основе модели пропеллера, содержит высокоскоростную петлю ($V \gtrsim 1000$ км/с), явно отсутствующую на наблюдаемой томограмме. Наконец, в рамках модели пропеллера оказывается крайне затруднительным ответить на вопросы об источнике рентгеновского излучения в системе и причине появления в области магнитных полюсов белого карлика горячих пятен.

Здесь же показано, что попытки интерпретации быстрого замедления белого карлика в терминах модифицированной модели пропеллера (так называемый “МГД-пропеллер”) или источника интенсивного гравитационного излучения основаны на явно нереалистичных или просто ошибочных предположениях. Наконец, предсказания моделей, согласно которым компактным объектом системы является дифференциально вращающийся белый карлик или легкая нейтронная звезда, также входят в противоречие с наблюдаемыми свойствами системы.

Таким образом, каноническая аккреционная модель, разработанная для интерпретации Взрывных Переменных звезд в приложении к АЕ Водолею оказывается не в состоянии ответить на следующие вопросы:

- вследствие какого механизма происходит замедление вращения белого карлика?
- по какой причине в системе отсутствует аккреционный диск и почему скорость вещества, текущего в виде струи через полость Роша белого карлика, не превосходит 500–600 км/с?
- что является причиной образования горячих ($T_p \sim (2 - 5) \times 10^4$ К) пятен в области магнитных полюсов белого карлика?
- где локализован источник рентгеновского излучения системы?
- вследствие какого механизма в системе происходит генерация релятивистских частиц, ответственных за нетепловое излучение системы?
- каков эволюционный статус системы и что является причиной уникальности этого источника?

- что является причиной необычной вспышечной активности системы?

Все это указывает на необходимость поиска альтернативных путей моделирования системы АЕ Водолея.

В § 3.4 представлена модель АЕ Водолея, построенная на основе предположения о том, что белый карлик в этой системе находится в состоянии эжектора и, таким образом, что механизм его замедления идентичен механизму потерь вращательной энергии радиопульсарами. В рамках такого предположения величина дипольного магнитного момента белого карлика оценивается следующим образом:

$$\mu_0 \simeq 1.5 \times 10^{34} \left(\frac{P_s}{33 \text{ с}} \right)^2 \left(\frac{L_{sd}}{6 \times 10^{33} \text{ эрг/с}} \right)^{1/2} \text{ Гс} \cdot \text{см}^3, \quad (9)$$

где P_s и L_{sd} означают, соответственно, период вращения белого карлика и темп потери им своей вращательной энергии. Из этого следует, что напряженность магнитного поля на поверхности звезды в области магнитных полюсов $B_0 \simeq 100 \text{ МГц}$ и в области магнитного экватора $\sim B_0/2 = 50 \text{ МГц}$.

С точки зрения современных представлений о допустимой величине магнитного поля белых карликов приведенная выше оценка является вполне реалистичной. Однако, величина B_0 , вычисленная в рамках модели эжектора, почти на два порядка превосходит оценку напряженности магнитного поля белого карлика, принятую в более ранних исследованиях этой системы. Это обстоятельство заставляет обратиться к анализу достоверности ранее выполненных оценок величины магнитного поля.

Прежде всего, необходимо обратить внимание на то, что классификация АЕ Водолея как промежуточного поляра является не более чем традиционной и, вероятно, ошибочной: во всех своих проявлениях источник является ярким исключением из этой группы объектов. Поэтому предположение о том, что величина магнитного поля белого карлика в этой системе сопоставима с величиной магнитного поля белых карликов, входящих в состав Промежуточных поляров, не имеет под собой достаточных оснований.

Следует отметить, что оценка магнитного поля белого карлика на основе измерений степени круговой поляризации оптического излучения АЕ Водолея, выполненная ранее на основе аккреционной модели системы, является ошибочной. Этот вывод базируется на результатах проведенных автором наблюдений круговой поляризации оптического излучения объекта в Крымской астрофизической обсерватории, и выводах теоретических расчетов верхнего предела круговой поляризации оптического излучения, испускаемого с поверхности белого карлика в АЕ Водолея. Они, в частности,

позволяют исключить горячие пятна, расположенные в областях магнитных полюсов белого карлика из списка возможных источников поляризованного излучения со средней степенью круговой поляризации $0.06 \pm 0.01\%$, показывая, что в противном случае степень собственной поляризации в таком источнике должна превышать 100%. Численный расчет степени круговой поляризации излучения, генерируемого в атмосфере белого карлика вследствие линейного и квадратичного эффектов Зеемана, показывает, что либо напряженность магнитного поля на поверхности белого карлика превышает 50 МГс, либо источник поляризованного излучения не связан с белым карликом. Таким образом, оценка напряженности магнитного поля белого карлика, полученная в рамках модели эжектора, не противоречит данным поляриметрических наблюдений системы.

Дополнительным аргументом в пользу реалистичности полученной выше оценки магнитного поля белого карлика является результат численного моделирования течения вещества в системе, проведенного в рамках модели эжектора. Допплеровская $\text{H}\alpha$ томограмма системы, полученная в ходе этого моделирования, находится в хорошем соответствии с наблюдаемой томограммой. В используемой в этих расчетах модели струя плазмы, текущая через первую точку Лагранжа, приближается к белому карлику на расстояние $R_A \gtrsim (3 - 5) \times 10^{10}$ см (определяемое альвеновским радиусом звезды), вследствие чего ее скорость в системе не превосходит 600 км/с. При этом согласия между наблюдаемой и расчетной томограммами удастся достичь без привлечения большинства дополнительных (и по большей части спорных) предположений, лежащих в основе моделирования системы как Промежуточного поляра.

Обращаясь к вопросу о природе горячих пятен, локализованных в магнитных полюсах белого карлика и являющихся основным источником пульсирующего ультрафиолетового и оптического излучения системы, следует прежде всего заметить, что их происхождение не может быть связано с аккрецией материи на поверхность белого карлика. Проведенные автором расчеты показали, что данное утверждение справедливо в отношении как модели эжектора, так и более ранней модели АЕ Водолея, в которой предполагалось, что белый карлик находится в состоянии пропеллера. На этом же основании отвергается гипотеза о том, что рентгеновское излучение системы имеет аккреционную природу и его источник находится на или вблизи поверхности белого карлика (данный результат был пятью годами позже подтвержден в ходе анализа рентгеновских данных, полученных на телеско-

пе ХММ-Newton).

В рамках модели эжектора локальный нагрев поверхности белого карлика может быть интерпретирован в терминах диссипации токов, текущих в его магнитосфере. Для параметров рассматриваемой задачи энергия заряженных частиц, ускоряемых в магнитосфере белого карлика, может достигать $\lesssim 3$ ТэВ, а темп их эжекции из магнитосферы $L_{\text{kin}} \lesssim 2 \times 10^{32}$ эрг/с. Поток гамма-излучения, ожидаемый вследствие радиационных потерь этих частиц (на изгибное излучение и обратное Комптоновское рассеяние на оптических фотонах, излучаемых с поверхности нормального компонента и струи плазмы, двигающейся через полость Роша белого карлика), существенно ниже порога чувствительности современных детекторов. Это, в частности, объясняет отсутствие успеха в попытках детектирования гамма-излучения системы телескопами CGRO и Wipple. Вместе с тем, ожидаемая площадь и температура горячих пятен на поверхности белого карлика, образующихся вследствие диссипации обратного тока, замыкающего токовую цепочку в магнитосфере эжектора, оказываются близки к величинам соответствующих параметров, определенных из наблюдений системы телескопом им. Хаббла.

Наконец, при анализе результатов наблюдений системы телескопом ХММ-Newton, было получено, что источник, ответственный за непульсирующий компонент рентгеновского излучения, находится за пределами двойной системы и, по-видимому, является продуктом взаимодействия струи плазмы, покидающей систему вследствие эффекта пропеллера, с релятивистским ветром, эжектируемым из магнитосферы белого карлика.

В § 3.5 рассматривается возможный сценарий происхождения быстро вращающегося белого карлика, обладающего сильным магнитным полем, и обсуждается эволюционный статус системы. Несоответствие между возрастом белого карлика, оцениваемым по температуре его поверхности ($\gtrsim 10^8$ лет) и характерным временем его замедления ($P_s/\dot{P} \lesssim 3 \times 10^7$ лет), заставляет обратиться к гипотезе о том, что в предшествующую эпоху период вращения белого карлика уменьшался вследствие дисковой аккреции на его поверхность. Однако для реализации такой гипотезы в рамках модели эжектора необходимо, чтобы было выполнено одно из следующих условий:

- а) аккреция в эпоху раскрутки происходила в сверх-Эддингтоновском режиме, либо
- б) дипольный магнитный момент белого карлика в течение предыдущей эпохи был существенно меньше величины его дипольного магнитного мо-

мента, оцениваемого по формуле для магнито-дипольного излучения в рамках модели эжектора.

Сценарий сверх-Эддингтоновской аккреции в случае АЕ Водолея является маловероятным. С другой стороны, ограничение на величину μ означает, что либо замедление вращения белого карлика, наблюдаемое в настоящую эпоху, не связано с эффектом эжектора, либо магнитный момент белого карлика в течение предыдущей эпохи также эволюционировал в сторону увеличения. Это могло быть связано с переходом в дифференциальный режим вращения по мере того, как звезда достигает критического периода, который для $M_{\text{wd}} \simeq 0.8 - 0.9 M_{\odot}$ лежит в пределах $\sim 15 - 20$ с (Chanmugam et al. 1987). Генерация магнитного поля в области дифференциального вращения, его всплытие на поверхность звезды и укрупнение масштаба (вследствие диффузии оснований трубок вдоль поверхности звезды и перезамыкания силовых линий) приводят к увеличению дипольного магнитного момента звезды.

Выполненные автором оценки показывают, что описанный выше сценарий может быть использован для моделирования эволюционного трека АЕ Водолея при условии, что область усиления магнитного поля в белом карлике (в течение фазы его дифференциального вращения) находилась в области, являющейся промежуточной между его вырожденным ядром и невырожденной оболочкой. В этом случае возможная история АЕ Водолея может быть представлена в виде следующей цепочки: а) система в ее исходном состоянии была типичным представителем класса немагнитных Взрывных Переменных; б) период вращения белого карлика вследствие дисковой аккреции на его поверхность монотонно возрастал до критической величины, при которой его вращение перешло в дифференциальный режим; в) вследствие генерации магнитного поля в области дифференциального вращения до современной величины, белый карлик перешел в состояние эжектора.

В § 3.6 подробно описываются и обсуждаются результаты фотометрических наблюдений АЕ Водолея, выполненные нами в 1994 году на пятиканальном фотометре-поляриметре Хельсинского университета, установленном на 1.25-метровом телескопе АЗТ-11 Крымской Астрофизической Обсерватории. Основной целью этих наблюдений было определение параметров источника, ответственного за вспышечное излучение системы в ближней ультрафиолетовой и оптической областях спектра (заметим, что максимум интенсивности излучения вспышечного источника в АЕ Водо-

лея приходится именно на ближний ультрафиолетовый диапазон спектра). В ходе анализа цветовых и спектральных характеристик излучения системы, зарегистрированного в течение наиболее мощных вспышек, было установлено, что излучение вспышечного источника может быть хорошо аппроксимировано чернотельным излучением газа, нагретого до температуры $\simeq 17500$ К. При этом эффективная площадь вспышечного источника оценивается как $S \approx 2.8 \times 10^{20}$ см², что соответствует площади сферы радиуса $R_{\text{flare}} \simeq 5 \times 10^9$ см.

Этот результат позволяет исключить как поверхность белого карлика, так и внутреннюю область магнитосферы (определяемую неравенством $R < R_{\text{flare}}$) из списка возможных областей локализации вспышечного источника. Он также говорит о том, что вспышечная активность объекта не связана ни с аккрецией материи на поверхность белого карлика, ни с какими-либо другими процессами энерговыделения (к примеру, перезамыканием силовых линий магнитного поля), происходящими вблизи поверхности компактного компонента.

С другой стороны, цветовые характеристики вспышек в АЕ Водолея существенно отличаются от соответствующих характеристик магнито-активных красных карликов. Это исключает возможность локализации вспышечного источника на поверхности нормального компонента системы. Следующие аргументы дополнительно подтверждают этот вывод:

- характерные времена роста и затухания вспышек, наблюдаемых в АЕ Водолея, сравнимы по величине, в то время как в случае вспышек на одиночных магнито-активных звездах время нарастания блеска, как правило, намного меньше времени затухания;
- корреляции вспышечной активности с фазой орбитальной периода не наблюдается;
- нет также свидетельств облучения поверхности красного карлика высокоэнергичным электромагнитным излучением или релятивистскими частицами;
- наблюдается значительный фазовый сдвиг кривой радиальных скоростей эмиссионных линий относительно кривой радиальных скоростей абсорбционных линий красного карлика;
- аномально высокая частота вспышек в АЕ Водолея (рекуррентное время между сериями вспышек 20-180 минут) является нетипичной для одиночных магнито-активных звезд;
- отсутствие импульса высокоэнергичного (рентгеновского) излучения,

предшествующего оптической вспышке, свидетельствует о том, что наблюдаемая вспышечная активность не связана с процессами энерговыделения в областях перезамыканий силовых линий магнитного поля.

Наконец, моделирование процесса переноса массы в системе и результаты анализа возможной локализации рентгеновского источника, представленные выше, указывают на то, что источник вспышечного излучения АЕ Водолея не может быть связан с материей, движущейся в полости Роша белого карлика. Это позволяет сделать вывод о том, что генерация вспышечного излучения происходит за пределами системы и, скорее всего, связана с процессом энерговыделения в веществе, истекающем из системы вследствие эффекта пропеллера. Энергетические параметры вспышек при этом могут быть интерпретированы в терминах взаимодействия истекающего вещества с релятивистским ветром белого карлика.

В ЗАКЛЮЧЕНИИ формулируются основные научные результаты и общие выводы, полученные в диссертационной работе.

В ПРИЛОЖЕНИИ приводятся материалы, детализирующие материал, изложенный в третьей главе диссертации.

Публикации по теме диссертации

Результаты, представленные в диссертации, изложены в 38 работах, в том числе 28 статей опубликованы в ведущих отечественных и зарубежных реферируемых журналах.

1. Ихсанов, Н.Р. “Генерация синхротронного излучения инфракрасного диапазона в двойных рентгеновских источниках”, // Письма в Астрономический Журнал, 1989, **15**, 513–518
2. Гнедин, Ю.Н., Ихсанов, Н.Р. “Механизм генерации высокоэнергичных частиц и образование корон в двойных рентгеновских источниках”, // Письма в Астрономический Журнал, 1989, **15**, 918–924
3. Гнедин, Ю.Н., Ихсанов, Н.Р. “Механизм генерации гамма-квантов сверхвысоких энергий в аккрецирующих рентгеновских пульсарах”, // Астрономический Журнал, 1990, **67**, 1165–1174
4. Beskrovnaya, N.G., Ikhsanov, N.R., Bruch, A., Shakhovskoy, N.M. “*UBVRI* Photometry of АЕ Aquarii in July-August 1994”, // Lecture Notes in Physics, 1995, **454**, 276–280

5. Beskrovnaya, N.G., Ikhsanov, N.R., Bruch, A. “Cessation of the Optical Pulsations in AE Aqr”, // *Astrophysics and Space Science Library*, 1995, **205**, 368–369
6. Ikhsanov, N.R. “The nature of the primary in AE Aquarii”, // *Astronomy and Astrophysics*, 1995, **300**, 207–213
7. Ikhsanov, N.R. “Is AE Aquarii a System with a Neutron Star?”, // *ASP Conference Series*, 1995, **85**, 400–403
8. Beskrovnaya, N.G., Ikhsanov, N.R., Bruch, A., Shakhovskoy, N.M. “Measurement of Circular Polarization and *UBVRI* photometry of AE Aqr”, // *ASP Conference Series*, 1995, **85**, 364–367
9. Bruch, A., Beskrovnaya, N., Ikhsanov, N., Borisov, N. “AE Aquarii in 1993: Cessation of the 33s Oscillations?”, // *Information Bulletin on Variable Stars*, 1995, **3996**, 1–4
10. Beskrovnaya, N.G., Ikhsanov, N.R., Bruch, A., Shakhovskoy, N.M. “Photometric and polarimetric analysis of the flaring activity in AE Aqr”, // *Astronomy and Astrophysics*, 1996, **307**, 840–848
11. Ikhsanov, N., Pustilnik, L.A. “Stability of the magnetospheric boundary of a neutron star undergoing spherical accretion”, // *Astronomy and Astrophysics*, 1996, **312**, 338–344
12. Ikhsanov, N.R. “Spindown of the primary in AE Aquarii”, // *Astronomy and Astrophysics*, 1997, **325**, 1045–1054
13. Ikhsanov, N.R. “The pulsar-like white dwarf in AE Aquarii”, // *Astronomy and Astrophysics*, 1998, **338**, 521–526
14. Ikhsanov, N.R. “Rapid spindown of fast-rotating white dwarfs in close binary systems as a result of magnetic field amplification”, // *Astronomy and Astrophysics*, 1999, **347**, 915–918
15. Ikhsanov, N.R. “A simple solution of the spindown problem in AE Aquarii”, // *Mem. Soc. Astron. Ital.*, 1999, **70**, 1005–1010
16. Ikhsanov, N.R. “Signs of a dead disk in AE Aquarii”, // *Astronomy and Astrophysics*, 2000, **358**, 201–207

17. Ikhsanov, N.R. “On the origin and parameters of the pulsar-like white dwarf in AE Aquarii” // in “Pulsar Astronomy - 2000 and Beyond”, ASP Conference Series, Vol. 202 Eds. M. Kramer, N. Wex, and N. Wielebinski, 2001, p. 605–608
18. Ikhsanov, N.R. “On the origin of quiescent X-ray emission from A0535+26”, // Astronomy and Astrophysics, 2001, **367**, 549–556
19. Ikhsanov, N.R. “On the duration of the subsonic propeller state of neutron stars in wind-fed mass-exchange close binary systems”, // Astronomy and Astrophysics, 2001, **368**, L5–L7
20. Ikhsanov, N.R. “Can the 33 s pulsations observed from AE Aquarii be explained in terms of accretion onto the white dwarf surface?”, // Astronomy and Astrophysics, 2001, **374**, 1030–1034
21. Ikhsanov, N.R. “On the state of low luminous accreting neutron stars”, // Astronomy and Astrophysics 2001, **375**, 944–949
22. Ikhsanov, N.R., Larionov, V.M., Beskrovnaya, N.G. “On the accretion flow geometry in A0535+26”, // Astronomy and Astrophysics, 2001, **372**, 227–232
23. Ikhsanov, N.R. “Supersonic propeller spindown of neutron stars in wind-fed mass-exchange close binaries” // Astronomy and Astrophysics, 2002, **381**, L61–L63
24. Ikhsanov, N.R., Beskrovnaya, N.G. “Can the Rapid Braking of the White Dwarf in AE Aquarii Be Explained in Terms of the Gravitational-Wave Emitter Mechanism?”, // Astrophysical Journal, 2002, **576**, L57–L59
25. Ikhsanov, N.R., Jordan, S., Beskrovnaya, N.G. “On the circularly polarized optical emission from AE Aquarii”, // Astronomy and Astrophysics, 2002, **385**, 152–155
26. Ikhsanov, N.R. “On the accretion luminosity of isolated neutron stars”, // Astronomy and Astrophysics, 2003, **399**, 1147–1150
27. Ихсанов, Н.Р., Неустроев, В.В., Бескровная, Н.Г. “Белый карлик в состоянии эжектора”, // Письма в Астрономический Журнал, 2004, **30**, 743–753

28. Ikhsanov, N.R. “On the induced activity of red dwarfs in close binary systems”, // in “Multi-Wavelength Investigations of Solar Activity”, IAU Symposium, Vol. 223. Eds. A.V. Stepanov, E.E. Benevolenskaya, and A.G. Kosovichev, Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2004., p.683–684
29. Ikhsanov, N.R., Neustroev, V.V., Beskrovnaya, N.G. “On the mass transfer in AE Aquarii”, // *Astronomy and Astrophysics*, 2004, **421**, 1131–1142
30. Ikhsanov, N.R., Neustroev, V.V., Beskrovnaya, N.G. “Simulation of H α Doppler Tomogram of AE Aquarii”, // *ASP Conference Series*, 2005, **330**, 397–398
31. Ихсанов, Н.Р. “Нейтронные звезды в состоянии дозвукового пропеллера”, // *Астрофизика*, 2005, **48**, 477–490
32. Ихсанов, Н.Р. “Критерии идентификации дозвуковых пропеллеров”, // *Письма в Астрономический Журнал*, 2005, **31**, 656–660
33. Ikhsanov, N.R. “On a Site of X-Ray Emission in AE Aquarii”, // *Astrophysical Journal*, 2006, **640**, L59–L62
34. Ikhsanov, N.R., Choi, C.-S. “Appearance of neutron stars in the state of subsonic propeller”, // *Advances in Space Research*, 2006, **38**, 2901–2902
35. Ikhsanov, N.R., Biermann, P.L. “High-energy emission of fast rotating white dwarfs”, // *Astronomy and Astrophysics*, 2006, **445**, 305–312
36. Ikhsanov, N.R., Biermann, P.L. “Accreting isolated neutron stars”, // *MPE Reports*, 2007, **291**, 165–168
37. Ikhsanov, N.R. “The origin of long-period X-ray pulsars” // *MNRAS*, 2007, **375**, 698–704
38. Ikhsanov, N.R. “Accretion by isolated neutron stars” // *Astrophys. Sp. Sci.*, 2007, **308**, 137–140

Личный вклад автора

Большинство публикаций по теме диссертации выполнено автором без соавторов. Личный вклад автора диссертации в работах 2 и 3 состоит в проведении расчетов и изложении результатов в форме статьи. В работах 4 и 30–38 автором диссертации была поставлена задача, выработан алгоритм расчетов и подготовлен текст статьи. В работах 7, 8 и 11–13 основной вклад

автора диссертации состоит в теоретической интерпретации результатов, полученных в ходе наблюдений, проведенных на основе поставленной им задачи и при его непосредственном участии.

Список литературы

- Усов В.В., “Генерация гамма-излучения вращающимися магнитными белыми карликами”, // Письма в Астрономический журнал, 1988, **14**, 606–609
- Chanmugam, G., Rao, M., Tohline, J.E. “Lower bounds on the masses of rapidly rotating white dwarfs”, // Astrophysical Journal, 1987, **319**, 188–191
- Davies, R.E., Fabian, A.C., Pringle, J.E. “Spindown of neutron stars in close binary systems”, // MNRAS, 1979, **186**, 779–782
- Davies, R.E., Pringle, J.E. “Spindown of neutron stars in close binary systems – II”, // MNRAS, 1981, **196**, 209–224
- Itoh, K., Okada, S., Ishida, M., Kunieda, H. “Density Diagnostics of the Hot Plasma in AE Aquarii with XMM-Newton”, // Astrophysical Journal, 2006, **639**, 397–404
- Usov, V.V. “High-frequency emission of X-ray pulsar 1E 2259+586”, // Astrophysical Journal, 1993, **410**, 761