

Ким Виталий Юрьевич

**Ротационная эволюция нейтронных звезд в газовой среде с магнитным
полем**

Специальность 01.03.02 — Астрофизика и звездная астрономия

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

г. Санкт-Петербург — 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Главной (Пулковской) астрономической обсерватории Российской академии наук

Научный руководитель доктор физико-математических наук,
директор ГАО РАН
Ихсанов Назар Робертович

Официальные опоненты доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник отдела
прикладной и теоретической астрономии
и радиоинтерферометрии ИКИ РАН
Моисеенко Сергей Григорьевич

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Коуровской астрономической обсерватории
им. К. А. Бархатовой УрФУ
**Хайбрахманов
Сергей Александрович**

Ведущая организация Институт астрономии
Российской академии наук

Защита состоится 23 ноября 2018 года в 11:15 на заседании диссертационного совета Д 002.120.01 Главной (Пулковской) астрономической обсерватории Российской академии наук, по адресу: 196140, г. Санкт-Петербург, ГАО РАН, Пулковское шоссе 65/1

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГАО РАН и на сайте ГАО РАН (www.gaoran.ru).

Автореферат разослан _____

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук, _____ С.Д. Булига

Актуальность темы

Стремительное развитие наблюдательной базы рентгеновской астрономии в течение двух последних десятилетий способствовали существенному увеличению точности и объема информации о рентгеновских пульсарах. Сравнение данных, полученных в отношении ротационной эволюции этих объектов, с предсказаниями теорий, сформулированных в течение второй половины прошлого века, выявили ряд несоответствий, избежать которые путем исключительно уточнения параметров теоретической модели затруднительно. В частности, было обнаружено, что крутящий момент, приложенный к нейтронной звезде, проявляющей себя как аккрецирующий рентгеновский пульсар, в целом ряде случаев существенно превосходит максимальную величину этого параметра, ожидаемую в ранее предложенных моделях ротационной эволюции. Единичные случаи такого несоответствия были известны еще на заре становления наблюдательной рентгеновской астрономии. Новые наблюдения обнаружили, однако, систематический характер такого противоречия, что делает актуальным пересмотр принципов и предположений, лежащих в основе существующих сценариев аккреции. Особо принципиальным выступает вопрос о полноте и последовательности учета в аккреционных моделях собственного магнитного поля аккреционного потока [1–7]. Результаты, проводившихся ранее исследований процессов аккреции на черные дыры [3–5] указывают на принципиальную новизну модели, в которой поток плазмы, падающий на черную дыру, обладает достаточно сильным собственным магнитным полем. Параметры и сама структура потока в таких моделях существенно отличаются от ожидаемых в рамках традиционных сценариев квазисферической аккреции и аккреции из Кеплерова диска. Вследствие этого, проверка возможности реализации и последствий такого сценария в рентгеновских пульсарах, предпринятая в настоящей работе, является естественным и актуальным этапом исследования свойств аккрецирующих рентгеновских источников.

Цель исследования

Основная цель данной работы состоит в установлении причин несоответствия между выводами теории и результатами наблюдений в отношении величины крутящего момента, приложенного со стороны аккреционного потока к аккрецирующим рентгеновским пульсарам. Для достижения этой цели мы прежде всего обратились к вопросу о том, связано ли расхождение в величине ожидаемого и наблюдаемого крутящего момента с неточностью определения значений параметров исследуемых объектов или это следствие чрезмерной упрощенности самих моделей, на основе которых ранее были выполнены оценки значения крутящего момента. Поиск ответа на этот вопрос

имел своей целью также и совершенствование предложенных к настоящему времени моделей аккреции, путем расширения их в плане учета современной информации о величинах магнитных полей массивных звезд раннего спектрального класса. Целью работы, в частности, был ответ на вопрос о схожести и отличиях проявлений аккрецирующих нейтронных звезд, погруженных в среду с сильным и слабым магнитным полем. Практической целью наших исследований являлась интерпретация наблюдаемых проявлений и построение картины эволюции одиночного рентгеновского пульсара 1E161348-5055, обладающего сверхдлинным периодом 6.7 часа, и рентгеновского пульсара в массивной двойной системе ОАО 1657-415, демонстрирующего сложную по структуре быструю ротационную эволюцию.

Научная новизна

Принципиальная новизна представленного исследования обусловлена оригинальностью модели обобщенного сценария аккреции, лежащей в его основе, в которой помимо стандартного набора параметров учитывается также собственное магнитное поле аккреционного потока. Нами показано, что условия, при которых влияние собственного магнитного поля на структуру и параметры аккреционного потока оказывается значительным, могут выполняться в большинстве наблюдаемых массивных рентгеновских двойных системах. Это открывает новые возможности объяснения пекулярной эволюции периода, наблюдаемой у некоторых рентгеновских пульсаров в этих системах. В частности:

- Исследование сценария ветровой аккреции выполнено в рамках обобщенного подхода, учитывающего влияние собственного магнитного поля аккреционного потока на картину аккреции. Это позволило наряду с традиционными приближениями квазисферической аккреции и аккреции из Кеплерова диска рассмотреть сценарий магнито-левитационной аккреции на нейтронные звезды с сильным магнитным полем.
- Предложена оригинальная методика оценки величины магнитного поля в звездном ветре массивного компонента рентгеновской двойной системы по наблюдаемой ротационной эволюции входящего в ее состав аккреционного рентгеновского пульсара.
- Предложен сценарий формирования одиночного аккрецирующего рентгеновского пульсара на заключительном этапе эволюции массивной двойной системы, распадающейся вследствие второй вспышки сверхновой.

Научная и практическая значимость

1. Предложенная схема классификации аккреционных структур, реализуемых в зависимости от параметров рентгеновских двойных систем, может быть использована при моделировании эволюции массивных двойных систем и определении численности популяции массивных звезд, обладающих сильным магнитным полем.
2. Разработанный алгоритм диагностики звездного ветра массивного компонента рентгеновской двойной системы по наблюдаемым характеристикам рентгеновского источника расширяет возможности исследования структуры и физических параметров оболочек массивных звезд.
3. Сценарий образования изолированных рентгеновских пульсаров с аномально большими периодами в результате эволюции массивных двойных систем указывает на возможные особенности взрыва сверхновой, способствующие построению модели этого явления.

Апробация работы

Результаты, представленные в диссертации докладывались на следующих семинарах и конференциях:

- 4-ая Пулковская молодежная конференция (всероссийская) (сентябрь 2012г. ГАО РАН) Устный доклад: "О природе пульсара 1E 161348-5055"
- Международная конференция COSPAR Symposium "Cosmic magnetic fields: Legacy of A.B. Severny", (2-6 сентября 2013, КрАО, Крым). Постерный доклад: "Origin and appearance of superpropellers" (соавторы: Н.Р. Ихсанов и Н.Г.Бескровная)
- Молодежный семинар ГАО РАН "Удивительный пульсар 1E 161348-5055" (30 октября 2013г.)
- 5-ая Пулковская молодежная конференция (9-12 июня 2014г. ГАО РАН) Устный доклад: "Образование одиночных рентгеновских пульсаров с аномально долгим периодом" (соавторы: Н.Р. Ихсанов)
- Международная конференция "Physics of neutron stars - 2014" (г. Санкт-Петербург, ФТИ им. Иоффе). Постерный доклад: "Evidence for magneto-levitation accretion in the 6.7h isolated X-ray pulsar 1E 161348-5055" (соавторы: Н.Р. Ихсанов, Н.Г. Бескровная, Л.А. Пустильник)
- Всероссийская конференция "Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра" (22-25 декабря 2014г., г. Москва, ИКИ РАН). Стендовый доклад: "Про-

исхождение изолированного пульсара 1E161348-5055 со сверхдолгим периодом $P = 6.7$ часа" (соавторы: Н.Р. Ихсанов, Н.Г. Бескровная, Л.А. Пустильник)

- Международная конференция "Radiation mechanisms of astrophysical objects: classics today", (21-25 сентября 2015, г. Санкт-Петербург, СПбГУ). Постерный доклад "Origin of the isolated neutron star with anomalously long period 6.7 hr." (соавторы: Н.Р. Ихсанов, Н.Г. Бескровная, Л.А. Пустильник)
- Молодежная конференция "Физика", (г. Санкт-Петербург, ФТИ им. Иоффе). Постерный доклад: "О происхождении изолированного рентгеновского пульсара 1E161348-5055, с периодом 6.7 часа" (соавторы: Н.Р. Ихсанов, Н.Г. Бескровная, Л.А. Пустильник)
- Всероссийская конференция "Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра" (21-24 декабря 2015г., г. Москва, ИКИ РАН). Постерный доклад: "Галактические рентгеновские пульсары" (соавтор: Н.Р. Ихсанов)
- 6-ая Пулковская молодежная конференция (6-8 июня 2016г., ГАО РАН) Устный доклад: "Исследование параметров звездного ветра массивных компаньонов рентгеновских пульсаров" (соавтор: Н.Р. Ихсанов)
- Международная конференция "Физика звезд: от коллапса до коллапса", (2-8 октября 2016г., пос. Нижний Архыз, САО РАН). Постерный доклад: "Параметры звездного ветра в рентгеновских двойных системах" (соавтор: Н.Р. Ихсанов)
- Молодежная конференция "Физика", (1-3 ноября 2016г., г. Санкт-Петербург, ФТИ им. Иоффе). Постерный доклад: "Исследование параметров звездного ветра массивного компаньона рентгеновского пульсара ОАО 1657-415" (соавтор: Н.Р. Ихсанов)
- Международная конференция "Physics of neutron stars - 2017" (10-14 июля 2017г., г. Санкт-Петербург, ФТИ им. Иоффе). Постерный доклад: "What can we learn about stellar magnetization by studying unique spin evolution of the X-ray pulsar ОАО 1657-415" (соавтор: Н.Р. Ихсанов)

Публикации по результатам работы в журналах, рекомендуемых ВАК

Основные результаты по теме диссертации опубликованы в следующих статьях:

1. Ikhsanov N.R., Kim, V.Y., Beskrovnaya N.G., Pustil'nik L.A. A new look at the origin of the 6.67 hr period X-ray pulsar 1E 161348-5055 // *Astroph. and Space Sci.* - 2013. - **Vol.346.** - P.105-109.
2. Ихсанов Н.Р., Ким В.Ю., Бескровная Н.Г. Происхождение изолированных пульсаров с аномально долгим периодом // *Астрон. Журн.* - 2015. - **Т.92.** 29-37.

3. Kim, V.Y., Ikhsanov N.R. What can we learn about the stellar wind of massive stars from studying spin evolution of the X-ray pulsar OAO1657-415 // Journal of phys.: Conf. Ser. - 2017. - **Vol.929**. - P.1-6.
4. Kim, V.Y., Ikhsanov N.R. Magnetization of stellar wind in the HMXB OAO1657-415 // ASP Conf. Ser. -2017. - **Vol.510**. - P.444-446.

Прочие публикации

1. Ким В.Ю, Ихсанов Н.Р О природе пульсара 1E 161348-5055 // Известия ГАО. - 2013. - **Т.221**. - с.159-165.
2. Ким В.Ю, Ихсанов Н.Р. Образование одиночных рентгеновских пульсаров с аномально долгим периодом // Известия ГАО. - 2015. - **Т.222**. - с.55-62.
3. Ким В.Ю, Ихсанов Н.Р. Исследование параметров звездного ветра массивных компаньонов рентгеновских пульсаров // Известия ГАО. - 2016. - **Т.224**. - с.65-74.

Личный вклад автора диссертации

Автор принимал непосредственное участие в аналитических и численных расчетах, приведенных в 1, 2, 3 главах диссертации, а также в сборе информации и составлении каталога Галактической популяции рентгеновских пульсаров в массивных двойных системах, размещенного в приложении.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка сокращений, списка использованных источников (355 наименований) и 2 приложений. Объем работы составляет 140 страниц машинописного текста, включая приложение, список используемых источников, 9 рисунков и 8 таблиц.

Краткое содержание диссертации

Во **Введении** обсуждаются: актуальность и основные цели исследования, научная и практическая значимость решаемых проблем и новизна подходов и результатов. Приводятся сведения по апробации результатов работ, представленных в диссертации, на конференциях, семинарах и симпозиумах. Также приведен список публикаций автора диссертации по теме исследований.

Глава 1 посвящена обсуждению обобщенного сценария аккреции из звездного ветра в массивных рентгеновских двойных системах.

В **параграфе 1.1** изложена современная классификация пульсирующих рентгеновских источников, отождествленных с белыми карликами и нейтронными звездами. Приведены основные характеристики источников, составляющих выделенные к настоящему времени подклассы рентгеновских пульсаров.

В **параграфе 1.2** рассматриваются свойства пульсирующих источников, отождествленных с нейтронными звездами, в массивных рентгеновских двойных системах (МРДС) с ветровой аккрецией. Приведены параметры и основные физические характеристики Галактической популяции МРДС, отмечена их относительная многочисленность (70 известных источников), их классификация по характеру переменности потока рентгеновского излучения (квазистационарные пульсары и транзиенты). Рассмотрены статистические особенности каждого из подклассов, и выделена группа рентгеновских пульсаров в МРДС (25 источников) в которых магнитное поле нейтронной звезды оценено по наблюдению циклотронной линии в их рентгеновских спектрах.

В **параграфе 1.3** описываются наблюдаемые процессы ротационной эволюции рентгеновских пульсаров в МРДС. Указано, что у 44 пульсаров Галактической популяции МРДС были зафиксированы изменения периода осевого вращения. Отмечены глобальные тренды изменения периода, происходящие с темпом до $|\dot{\nu}| < 10^{-13}$ Гц/с на масштабах времени от нескольких месяцев и вплоть до десятилетий. На фоне глобальных трендов присутствуют эпизоды хаотических вариаций периода с исключительно высоким темпом, достигая по абсолютной величине 10^{-12} Гц/с, длящиеся от нескольких дней до нескольких месяцев. Формулируются основные теоретические принципы оценки темпа обмена угловым моментом между нейтронной звездой и падающим на нее аккреционным потоком. Отмечается, что исследование ротационных процессов рентгеновских пульсаров в МРДС позволяет судить о свойствах аккреционного потока и реализуемом на нейтронную звезду сценарии аккреции.

В **параграфе 1.4** обсуждается обобщенный сценарий ветровой аккреции в МРДС при учете углового момента и магнитного поля в аккреционном потоке. Показано, что давление собственного магнитного поля в квазисферическом аккреционном потоке по мере его продвижения к нейтронной звезде увеличивается быстрее динамического давления. Из соотношений компонентов давления аккреционного потока приведены величины характеристических радиусов: Альвеновский радиус, радиус циркуляризации и радиус магнитной левитации. Показано, что в зависимости от соотношения этих величин, процесс аккреции на нейтронную звезду в интервале между радиусом Бонди и границей магнитосферы нейтронной звезды можно рассматривать в одном из трех приближений: магнито-левитационная аккреция (ML) [8], квазисферическая аккреция (QSp) [9,10] или аккреция из Кеплерова диска (Kd) [11–13].

Параграф 1.5 посвящен оценке крутящего момента сил, приложенного к нейтронной звезде со стороны аккреционного потока. В первом приближении оценка крутящего момента получена путем решения модельной задачи о вращении сферы

в вязкой среде [14, 15] и выполнено для случая, когда вязкое вещество, окружающее сферу имеет форму диска. Радиус магнитосферы в этом подходе фиксирован лишь балансом давления дипольного магнитного поля нейтронной звезды и внешнего давления, обусловленного аккреционным потоком, и в общем случае рассматривается как свободный параметр задачи.

В **параграфе 1.6** анализируются возможные преобразования формулы обобщенного момента сил для известных приближений аккреции. Показано, что преобразование этой формулы к тормозящему моменту сил позволяет провести косвенную оценку верхнего предела радиуса магнитосферы нейтронной звезды по наблюдаемому темпу замедления ее осевого вращения [16]. Отмечено, что верхний предел радиуса магнитосферы нейтронных звезд, полученный по наблюдаемым темпам их осевого вращения, оказываются меньше Альвеновского радиуса. Показано, что величина крутящего момента сил возрастает с уменьшением радиуса магнитосферы нейтронной звезды. В случае реализации сценария ML-аккреции момент сил, приложенный со стороны аккреционного потока достигает своего максимального значения [16]. Приведена таблица наблюдаемых эпизодов увеличения периода пульсаров в сравнении с верхними пределами теоретических оценок в рамках различных аккреционных приближений. Показано, что наблюдаемые темпы существенно превышают ожидаемые в рамках немагнитных подходов, но хорошо согласуются с величиной крутящего момента, ожидаемого в сценарии ML-аккреции.

В **параграфе 1.7** рассматривается величина равновесного периода рентгеновских пульсаров в рамках различных приближений аккреции. Показано, что наблюдаемые периоды Галактической популяции рентгеновских пульсаров хорошо интерпретируются в рамках обобщенного сценария ветровой аккреции, при условии, что магнитное поле на поверхности нейтронной звезды находится в диапазоне $10^{11} - 10^{13}$ Гс.

Глава 2 посвящена исследованиям параметров звездного ветра в рентгеновских двойных системах на примере квазистационарного рентгеновского пульсара ОАО 1657-415.

В **параграфе 2.1** приводится описание характеристик рентгеновского пульсара ОАО 1657-415 (далее ОАО 1657), который с момента открытия (1979 г.) демонстрирует монотонное ускорение своего осевого вращения со средним темпом $\dot{\nu}_{\text{su}}^{(g)} \simeq (8.3 - 8.9) \times 10^{-13}$ Гц/с [17, 18]. Дополнительным свойством ротационной эволюции ОАО 1657 являются локальные хаотические вариации периода, абсолютная величина которых в максимуме превосходит средний темп изменения периода в ходе глобального тренда ускорения примерно на порядок.

В **параграфе 2.2** описывается методика оценки относительной скорости ветра. Показано, что монотонное глобальное ускорение осевого вращения нейтронной звезды в ОАО 1657 можно объяснить в рамках обобщенного сценария ветровой аккреции при условии, что относительная скорость движения нейтронной звезды в системе от-

счета, связанной с окружающим ее звездным ветром в плоскости орбиты ограничено неравенством $v_{\text{rel}} \leq v_0$, где $v_0 \simeq 270$ км/с

В **параграфе 2.3** обсуждается возможная причина локальных хаотических вариаций периода осевого вращения ОАО 1657 в рамках существующих аккреционных приближений. Отмечается, что сценарии построенные на немагнитных приближениях аккреции, встречаются с трудностями при попытке объяснить высокий темп изменения периода пульсара ОАО 1657 в локальных эпизодах торможения и ускорения его осевого вращения. Указанные трудности удается преодолеть в рамках обобщенного сценария аккреции, учитывающего влияние собственного магнитного поля звездного ветра. Показано, что максимально возможная оценка темпа торможения в рамках приближения МЛ-аккреции $\dot{\nu}_{\text{sd}}^{(\text{ml})}$ находится в хорошем согласии с наблюдаемыми эпизодами торможения. Предполагается, что захватываемый звездный ветер в окрестностях нейтронной звезды ОАО 1657 обладает магнитным полем, достаточным для образования МЛ-диска.

В **параграфе 2.4** описывается предложенная нами методика диагностики параметров магнитного поля звездного ветра. На примере пульсара ОАО 1657 выполнена оценка напряженности магнитного поля на радиусе орбиты нейтронной звезды из анализа ее наблюдаемых характеристик [19, 20]. Показано, что для реализации наблюдаемых характеристик пульсара ОАО 1657 магнитное поле в звездном ветре на радиусе орбиты нейтронной звезды должно быть заключено в пределах: $15 \text{ мГс} \leq B_{\text{f0}} \leq 70 \text{ мГс}$. Это означает, что напряженность магнитного поля на поверхности массивного компонента ОАО 1657 не превосходит 10 Гс.

В **Главе 3** представлен анализ происхождения и современного состояния изолированного рентгеновского пульсара 1E 161348-5055 со сверхдолгим периодом 6.7 часа.

В **параграфе 3.1** приводится хронология исследования рентгеновского источника 1E 161348-5055 (далее 1E 1613), отождествленного с нейтронной звездой, располагающегося в остатке вспышки сверхновой RCW 103 [21], возраст которой оценен ~ 2000 лет [22] и его основные наблюдаемые характеристики. Приводятся аргументы в пользу изолированного характера этого рентгеновского источника.

В **параграфе 3.2** рассматривается вопрос о текущем эволюционном статусе 1E 1613. Показано, что эта нейтронная звезда не может быть в состоянии эжектора или пропеллера, но с наибольшей вероятностью находится в состоянии аккретора. В рамках такого подхода 1E 1613 может рассматриваться как изолированная нейтронная звезда, аккрецирующая вещество из остаточного диска на свою поверхность в область магнитных полюсов.

В **параграфе 3.3** рассматриваются возможные аккреционные приближения 1E 1613 [23]. Показано, что сценарий аккреции из остаточного Кеплерова диска встречается с трудностями в объяснении сверхдлинного периода этого пульсара. Описана рабочая гипотеза, в рамках которой, нейтронная звезда аккрецирует вещество

из некеплерова остаточного диска, магнитное поле которой находится в интервале $10^{10} \text{ Гс} \leq B_{\text{ns}} \leq 10^{12} \text{ Гс}$.

В параграфе 3.4 обсуждаются возможные сценарии происхождения 1E 1613. Представлены два возможных варианта образования этого объекта [24]. В частности, исследуется гипотеза, в которой 1E 1613 является старой нейтронной звездой, сформированной в момент первой вспышки сверхновой в двойной системе. В состоянии изолированного пульсара она перешла, пройдя долгий путь эволюции от эжектора до аккректора (за время несколько миллионов лет) в момент второй вспышки сверхновой, обусловленной коллапсом ядра ее массивного компаньона [25]. Это событие (вторая вспышка сверхновой) привело к распаду системы [26], и старая нейтронная звезда перешла в изолированное состояние, оставаясь погруженной в остаток вспышки сверхновой ее компаньона, наблюдаемого в настоящую эпоху в форме туманности RCW 103. Показано, что массы захватываемого нейтронной звездой вещества из расширяющейся газовой туманности (остатка вспышки) вполне достаточно для формирования остаточного ML-диска, поддерживающего в случае 1E 1613 процесс аккреции в течение более 2000 лет.

В заключении приведены основные выводы диссертационной работы:

- Ротационная эволюция нейтронных звезд существенным образом зависит от замечательности газовой среды в которую они погружены. Учет магнитного поля в захватываемом нейтронной звездой ветре ее массивного компаньона позволяет значительно дополнить и объединить существующие аккреционные приближения в обобщенный сценарий ветровой аккреции. Процесс ветровой аккреции в МРДС, в зависимости от параметров захватываемого нейтронной звездой на радиусе Бонди звездного ветра, может рассматриваться в трех приближениях: квазисферическая акреция (QSp), аккреция из Кеплерова диска (Kd) и магнитолевитационная аккреция (ML). В рамках приближения ML-аккреции процесс обмена угловым моментом между аккреционным потоком и нейтронной звездой оказывается более эффективным в сравнении с немагнитными приближениями. Это позволяет преодолеть трудности в интерпретации "дефицита" крутящего момента, возникающего при попытках интерпретации наблюдаемой ротационной эволюции пульсаров в рамках немагнитных сценариев.
- Квазистационарные пульсары в массивных двойных системах, отличающиеся слабой переменностью рентгеновского блеска, при определенных условиях могут выступать в качестве естественного прибора для исследования параметров звездного ветра массивных компонентов МРДС. На примере рентгеновского пульсара ОАО 1657-415 нами продемонстрирован результат "зондирования" нейтронной звездой ветра ее массивного компаньона. В результате проведенного анализа получено допустимое значение магнитного поля $15 \text{ мГс} \leq B_{f0} \leq 70 \text{ мГс}$.

Данный метод может быть использован для оценки магнитного поля массивной звезды даже в том случае, если поле на ее поверхности существенно меньше 10 Гс.

- На примере изолированного рентгеновского пульсара 1E 161348-5055 с аномально долгим (6.7 часа) периодом показано, что объекты такого рода могут образовываться в процессе распада МРДС в момент коллапса ядра массивного компонента, сопровождаемого вспышкой сверхновой. Долгопериодическим пульсаром в этом случае может стать старая нейтронная звезда аккрецирующая вещество из остаточного диска, который сформировался в процессе захвата вещества нейтронной звездой, сброшенного в процессе взрыва ее массивного компаньона.

В приложениях приведен каталог Галактической популяции пульсаров в МРДС.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Оценка величины крутящего момента, приложенного к нейтронной звезде со стороны аккреционного потока на границе ее магнитосферы произвольного радиуса. Интервал допустимых значений темпа изменения периода рентгеновских пульсаров в массивных рентгеновских двойных системах с ветровой аккрецией.
2. Методика оценки параметров звездного ветра массивного компонента рентгеновской двойной системы по наблюдаемым параметрам излучения рентгеновского пульсара. Результаты апробации этой методики для случая рентгеновского пульсара ОАО 1657-415.
3. Сценарий формирования долгопериодических изолированных рентгеновских пульсаров на заключительной стадии эволюции рентгеновской двойной системы. Результат апробации этого сценария для изолированного рентгеновского пульсара 1E 161348-5055 с периодом 6.7 часа.

Список литературы

- [1] Зельдович Я.Б., Шакура Н.И. Рентгеновское излучение при аккреции газа на нейтронную звезду // Астрон. Журн. - 1969. - **Т.46.** - Стр.225-236.
- [2] Бисноватый-Коган Г.С., Фридман А.М. О механизме рентгеновского излучения нейтронной звезды // Астрон. Журн. - 1969. - **Т.46.** - с.721-724.
- [3] Шварцман В.Ф. Гало вокруг черных дыр // Астрон. Журн. - **Т.48.** - 479.
- [4] Bisnovatyi-Kogan G.S., Ruzmaikin A.A. The Accretion of Matter by a Collapsing Star in the Presence of a Magnetic Field // Astrophys. and Space Sci. - 1974. - **Vol.28.** - P.45-59.

- [5] Bisnovaty-Kogan G.S., Ruzmaikin A.A. The Accretion of Matter by a Collapsing Star in the Presence of a Magnetic Field. II: Self-consistent Stationary Picture // *Astrophys. and Space Sci.* - 1976. - **Vol.42.** - P.375-399.
- [6] Жилкин А.Г., Бисикало Д.В. Формирование аккреционных дисков в тесных двойных системах с магнитным полем // *Астрон. журн.* - 2010. - Т.87. - С.1155-1169.
- [7] Dudorov A.E., Khaibrakhmanov S.A. Fossil magnetic field of accretion disks of young stars // *Astrophys. Space Sci.* - 2014. - **Vol.352.** - P.103-121.
- [8] Ikhsanov N.R., Finger M.H. Signs of Magnetic Accretion in the X-Ray Pulsar Binary GX 301-2 // *Astrophys. J.* - 2012. - **Vol.753.** - P.1-8.
- [9] Davidson K., Ostriker J.P. Neutron-Star Accretion in a Stellar Wind: Model for a Pulsed X-Ray Source // *Astrophys. J.* - 1973. - **Vol.179.** - P.585-598.
- [10] Arons J., Lea S.M. Accretion onto magnetized neutron stars - Normal mode analysis of the interchange instability at the magnetopause // *Astrophys. J.* - 1976. - **Vol.207.** - P.914-936.
- [11] Шакура Н.И. Дискковая модель аккреции газа релятивистской звездой в тесной двойной системе // *Астрон. Журн.* - 1972. - **Т.49.** - Стр.921-929
- [12] Pringle J.E., Rees M.J. Accretion Disc Models for Compact X-Ray Sources // *Astron. and Astrophys.* - 1972. - **Vol.21.** - P.1-9.
- [13] Lynden-Bell D., Pringle J.E. The evolution of viscous discs and the origin of the nebular variables // *Monthly. Not. Roy. Astron. Soc.* - 1974. - **Vol.168.** - P. 603-637.
- [14] Слезкин Н.А. *Динамика вязкой жидкости.* - М.: ГИТТЛ, 1955.
- [15] Липунов В.М. *Астрофизика нейтронных звезд.* - М.: Наука, 1987.
- [16] Ихсанов Н.Р., Лих Ю.С., Бескровная Н.Г. Об эволюции периодов долгопериодических рентгеновских пульсаров // *Астрон. Журн.* - 2014. - **91.** - С.449-459.
- [17] Barnstedt J., Staubert R., Santangelo A. et.al. INTEGRAL observations of the variability of OAO 1657-415 // *Astron. and Astrophys.* -2008. - **Vol.486.** - P.293-302.
- [18] Jenke P.A., Finger M.H., Wilson-Hodge C.A., Camero-Arranz A. Orbital Decay and Evidence of Disk Formation in the X-Ray Binary Pulsar OAO 1657-415 // *Astrophys. J.* - 2012. - **Vol.759.** - P.124-131.
- [19] Kim, V.Y., Ikhsanov N.R. What can we learn about the stellar wind of massive stars from studying spin evolution of the X-ray pulsar OAO1657-415 // *Journal of phys.: Conf. Ser.* - 2017. - **Vol.929.** - P.1-7.
- [20] Kim, V.Y., Ikhsanov N.R. Magnetization of stellar wind in the HMXB OAO1657-415 // *ASP Conf. Ser.* -2017. - **Vol.510.** - P.468-470.

- [21] Tuohy I., Garmire G. Discovery of a compact X-ray source at the center of the supernova remnant RCW 103 // *Astrophys. J.* - 1980. - **Vol.239.** - L107-L110.
- [22] Caswell J.L., Murray J.D., Roger R.S., Cole D.J., Cooke D.J. Neutral hydrogen absorption measurements yielding kinematic distances for 42 continuum sources in the galactic plane // *Astron. and Astrophys.* - 1975. - **Vol.45.** - P.239-258.
- [23] Ikhsanov N.R., Kim, V.Y., Beskrovnaya N.G., Pustil'nik L.A. A new look at the origin of the 6.67 hr period X-ray pulsar 1E 161348-5055 // *Astroph. and Space Sci.* - 2013. - **Vol.346.** - P.105-109.
- [24] Ихсанов Н.Р., Ким В.Ю., Бескровная Н.Г. Происхождение изолированных пульсаров с аномально долгим периодом // *Астрон. Журн.* - 2015. - **Т.92.** С.29-37.
- [25] Бисноватый-Коган Г.С., Мойсеенко С.Г., Арделян Н.В. Магниторотационный механизм взрыва сверхновых с коллапсирующим ядром // *Ядерная физика.* - 2018. - **Т.81.** - С.257-269.
- [26] Popov S.B., Prokhorov M.E. Progenitors with enhanced rotation and the origin of magnetars // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* - 2006. - **Vol.367.** - P.732-736.