

На правах рукописи

Ибрагимов Аскар Абдуллович

**Переменное рентгеновское излучение от
аккрецирующих черных дыр и нейтронных звезд**

01.03.02. Астрофизика и радиоастрономия

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук



Москва – 2009

Работа выполнена в Казанском государственном университете.

Научный руководитель:

доктор физ.-мат. наук

Гильфанов Марат Равильевич
(ИКИ РАН)

Официальные оппоненты:

доктор физ.-мат. наук, профессор

Постнов Константин Александрович
(ГАИШ МГУ)

доктор физ.-мат. наук

Гребенев Сергей Андреевич
(ИКИ РАН)

Ведущая организация: Главная астрономическая обсерватория, Пулково

Защита диссертации состоится 25 декабря 2009 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 002.113.02 в конференц-зале Института космических исследований РАН по адресу: Москва, 117997, ул. Профсоюзная, д. 84/32, ИКИ РАН, подъезд 2

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИКИ РАН

Автореферат разослан 24 ноября 2009 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета Д 002.113.02
к.ф.-м.н.



А.Ю.Ткаченко

1 Общая характеристика работы

1.1 Актуальность темы

Около трети всех звезд в нашей Галактике входят в двойные системы. В таких системах возможна аккреция вещества с одной звезды на другую. Данный процесс является очень эффективным механизмом высвобождения энергии в системах с нейтронными звездами и черными дырами. Излучение от аккрецирующих двойных систем наблюдается в ультрафиолетовом, рентгеновском и гамма-диапазонах. На процессы в таких источниках оказывают влияние релятивистские эффекты, высокие температуры и сильные магнитные поля. В данной диссертации представлен анализ наблюдений двух систем, Лебедя X-1 и SAX J1808.4-3658, главным образом по наблюдениям обсерватории Rossi X-ray Timing Explorer (RXTE).

Лебедь X-1 – двойная система, состоящая из сверхгиганта и черной дыры. Звездный ветер со сверхгиганта частично аккрецируется на черную дыру. По этому яркому и давно известному объекту накоплен обширный набор данных. Наиболее ярким наблюдаемым феноменом является смена спектральных состояний в источнике; в так называемом «жестком» состоянии наблюдаемое излучение (степенной спектр с наклоном порядка 1,7 и завалом на энергиях больше 100 кэВ) возникает в результате тепловой комптонизации на «горячих» электронах вблизи компактного объекта (Галеев и др., 1979; Таут и Прингл, 1992; Свенссон и Зdziарски, 1994; Белобородов, 1999; Миллер и Стоун, 2000). «Мягкое» состояние описывается излучением черного тела с температурой порядка 500 эВ и степенным спектром (фотонный индекс порядка 2,5, Герлински и др. 1999). Каждые несколько лет источник демонстрирует переходы между этими состояниями. В последние 10 лет за счет улучшения качества данных стало понятно, что на самом деле спектры источника достаточно сложны. Для «жесткого» состояния были с хорошей точностью определены температура горячего облака (~ 100 кэВ), и Томсоновская оптическая толщина порядка 1–2 (Зdziарски и др., 1996, 1997; Герлински и др., 1997; Поутанен, 1998; Ди Сальво и др., 2001; Фронтера и др., 2001; Зdziарски и Герлински, 2004). Кроме этого, в спектре были обнаружены: отраженная компонента (возникающая в результате взаимодействия жесткого комптонизованного излучения с холодной, оптически плотной средой, Дон и др. 1992; Эбисава и др. 1996; Герлински и др. 1997), мягкая компонента

(вероятно, относящаяся к аккреционному диску, см. Балучинска и Хасингер 1991; Балучинска-Чёрч и др. 1995; Эбисава и др. 1996) и дополнительный «мягкий избыток» (Ди Сальво и др., 2001; Фронтера и др., 2001). В гамма-диапазоне свыше 500 кэВ наблюдается излучение, свидетельствующее о комптонизации на нетепловых частицах (МакКоннелл и др., 1994; Линг и др., 1997). Известны корреляции наклона спектра с характеристическими частотами спектров мощности и с амплитудой отраженной компоненты, см. Гильфанов, Чуразов и Ревнивцев (1999).

Одним из возможных вариантов геометрии источника является модель «усечённого диска», показанная на Рис. 1. Согласно этой модели, в «жестком» состоянии диск заканчивается на некоем переходном радиусе, внутри которого аккреционный поток становится оптически тонким и геометрически толстым. В «мягком» состоянии корона имеет существенно меньшие размеры, а нетепловая комптонизация происходит в активных областях на поверхности диска. Диск излучает мягкие «затравочные» фотоны (впоследствии подвергающиеся комптонизации) и служит так же средой, порождающей отраженную компоненту.

Существует много работ, посвященных анализу индивидуальных наблюдений. Этот подход может быть дополнен статистическим анализом большого числа наблюдений, так как это позволяет обнаружить возможные закономерности в поведении объекта. Полученные результаты (как правило, открытые или успешно подтвержденные зависимости) предоставляют новую информацию, полезную при теоретическом моделировании процессов излучения и геометрии систем в похожих объектах. Кроме того, многолетние наблюдения позволяют анализировать относительно медленные процессы в источниках.

Примером долгопериодического процесса является исследованная нами в данной диссертации «суперорбитальная» переменность в источнике Лебедь X-1, с периодом примерно 150 дней, наблюдаемая практически во всех спектральных диапазонах (Броксопп и др., 1999; Пули и др., 1999; Эземдир и Демирчан, 2001; Беннлох и др., 2001, 2004; Карицкая и др., 2001; Ляхович и др., 2006). Общепринятая интерпретация этого феномена – прецессия аккреционного диска и/или джета (Катц, 1973, 1980; Ларуод, 1998; Уайджерс и Прингл, 1999; Огливие и Дубус, 2001; Торрес и др., 2005; Капрони и др., 2006, геометрия системы показана на Рис. 2); исключением является объект 4U 1820–303 (где край диска, частично заслоняющий центральный объект, меняет размеры в зависи-

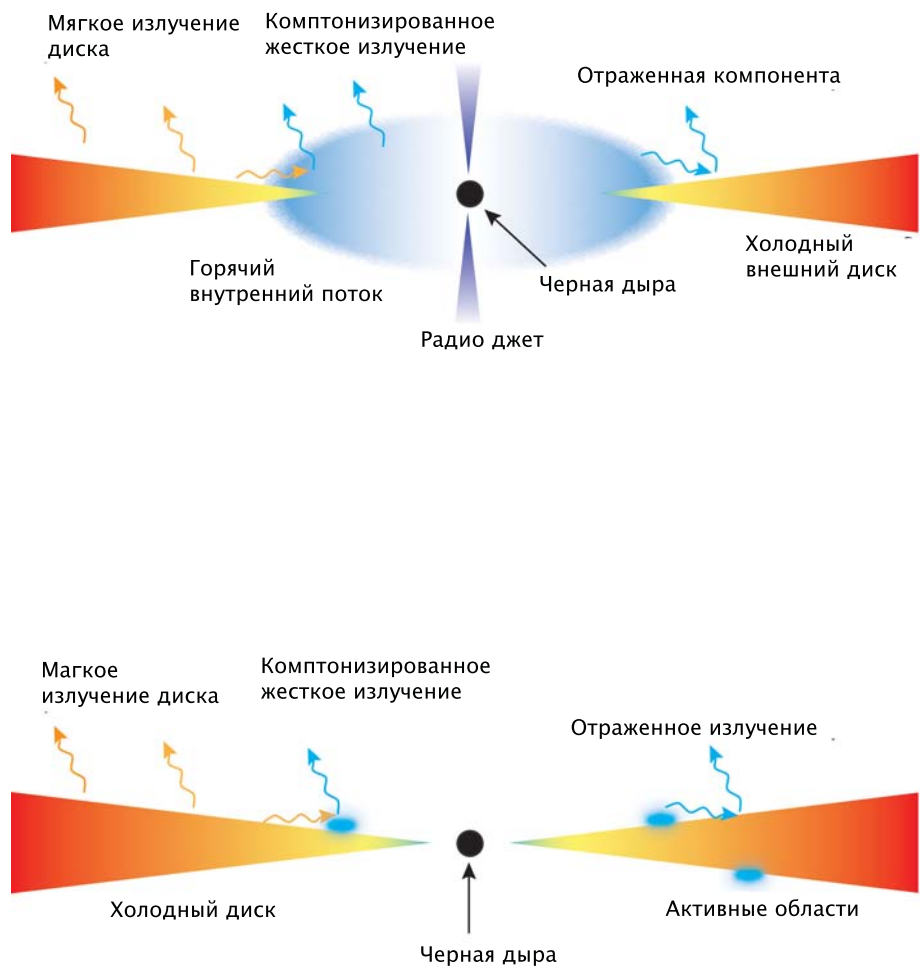


Рис. 1: Геометрии «жесткого» и «мягкого» спектральных состояний источника Лебедь X-1 в модели «усечённого диска». Адаптация из Зdziарски и др. (2002). Показаны черная дыра, радио-джет, аккреционный диск, горячая корона и активные области.

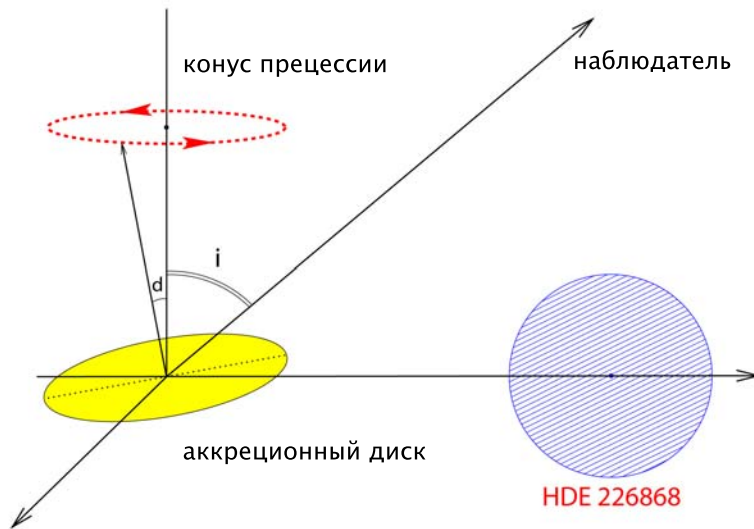


Рис. 2: Геометрия системы Лебеда X-1 в момент нулевой орбитальной фазы. Показаны конус прецессии, аккреционный диск, сверхгигант и вектор в направлении наблюдателя.

мости от переменного темпа аккреции, Здзиарски и др. 2007). В данной диссертации мы анализируем наблюдаемые профили суперорбитальной переменности в радио- и рентгеновском диапазонах, что позволяет нам сделать интересные выводы о геометрическом строении системы.

Так же, в диссертации рассмотрен представитель класса аккрецирующих миллисекундных рентгеновских пульсаров – SAX J1808.4–3658. Данные объекты – транзиенты с периодом вспышек порядка двух лет. На данный момент известно 12 источников: SAX J1808.4–3658 ($\nu = 401$ Гц), ХТЕ J1751–305 ($\nu = 435$ Гц), ХТЕ J0929–314 ($\nu = 185$ Гц), ХТЕ J1807–294 ($\nu = 191$ Гц), ХТЕ J1814–338 ($\nu = 314$ Гц), IGR J00291+5934 ($\nu = 599$ Гц), НЕТЕ J1900.1–2455 ($\nu = 377$ Гц), SWIFT J1756.9–2508 ($\nu = 182$ Гц), НЕТЕ J1900.1-2455 ($\nu = 377$ Гц), Aql X-1 ($\nu = 550$ Гц), SAX J1748.9-2021 ($\nu = 442$ Гц), NGC 6440 X-2 ($\nu = 205$ Гц), IGR J17511-3057 ($\nu = 245$ Гц). Спектр объектов состоит из двух основных компонент – мягкой чернотельной компоненты в диапазоне ниже 7 кэВ и степенного спектра (с наклоном порядка 1,9 и с завалом в районе ~ 100 кэВ). Обе компоненты демонстрируют миллисекундные пульсации, что указывает на их происхождение в районе так называемых «горячих пятен» на магнитных полюсах звезды, куда падает вещество под воздействием магнитного поля (Рис. 3). Жесткий степенной спектр, по-видимому, возникает в аккреционной ударной волне, в то время как чернотельное излучение может генерироваться на нагретой поверхности нейтронной звезды вокруг ударной волны. Бы-

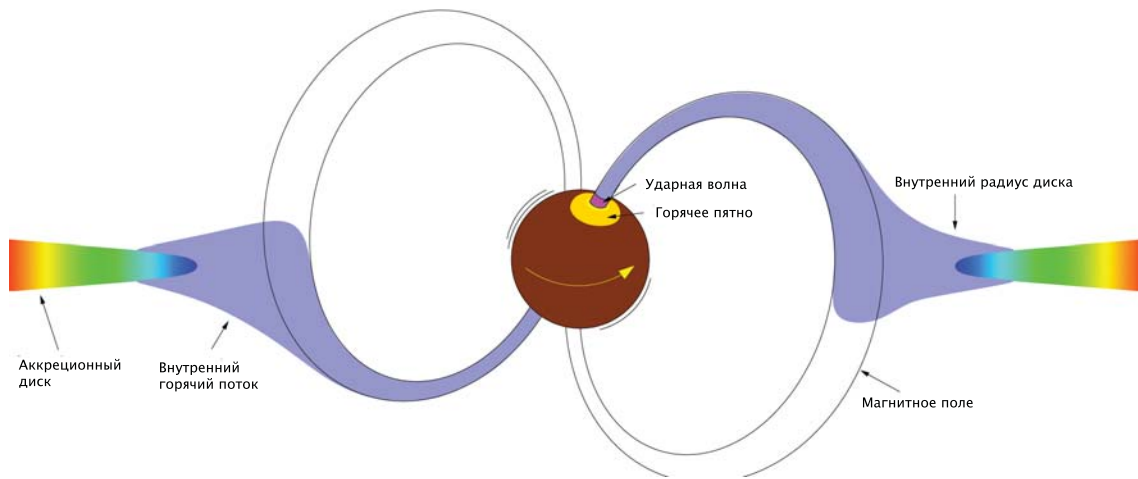


Рис. 3: Схема аккрецирующего миллисекундного рентгеновского пульсара (Герлински, Дон и Баррет, 2002). Показаны аккреционный диск, магнитное поле, аккреционная ударная волна и горячее пятно.

ло обнаружено, что эти две компоненты не синфазны, т.е. между ними существует временная задержка (более жесткие фотоны опережают более мягкие). Данная задержка имеет зависимость от энергии: она плавно уменьшается до величины примерно 200-300 мкс в диапазоне до 10 кэВ, после чего остается постоянной (исключение – IGR J00291+5934, где после 10 кэВ имеет место обратный тренд, см. Фаланга и др. 2005).

1.2 Цель работы

Диссертационная работа посвящена исследованию широкополосных спектров источника Лебедь X-1 в диапазоне 3-1000 кэВ, «суперорбитальной» переменности (с периодом 152 дня), наблюдаемой в Лебеде X-1, спектральных и временных характеристик аккрецирующего рентгеновского миллисекундного пульсара SAX J1808.4–3658 и моделированию кривых блеска рентгеновских миллисекундных пульсаров с учетом экранирования диском второго пятна (на «противоположном» магнитном полюсе звезды), что позволяет объяснить сложные профили пульсов в этом объекте.

1.3 Научная новизна

Впервые проанализированы 42 спектра рентгеновского источника с черной дырой Лебедь X-1 по данным совместных наблюдений спутников

CGRO и RXTE в широком диапазоне энергий 3–1000 кэВ. Обнаружено, что широкополосные спектры не описываются использовавшимися ранее моделями вида «излучение от диска плюс комптонизация», а требуют присутствия дополнительной мягкой компоненты в диапазоне ниже 10 кэВ. Эта компонента может возникнуть в результате (тепловой или нетепловой) комптонизации в некоей отдельной активной области. Нетепловая комптонизация позволяет одновременно промоделировать как мягкий избыток, так и степенной «хвост» на энергиях выше 500 кэВ. В диссертации мы анализируем наблюдаемые зависимости между спектральными параметрами. Показано, что выявленная сильная корреляция между «компактностью» (отношением светимости к характеристическому размеру излучающей области) и частотами квазипериодических осцилляций (Аксельсон, Боргоново и Ларссон, 2005) прекрасно описывается законом, предсказываемым моделью «усеченного диска». Наша интерпретация демонстрирует, что наклон комптоновского континуума может не совпадать с наклоном наблюдаемого спектра.

Проанализированы параметры суперорбитальной переменности источника Лебедь X-1 с помощью ряда физических моделей анизотропии излучения. Впервые определены параметры прецессии диска (угол прецессии порядка 10–20 градусов). Продемонстрировано, что модель тепловой комптонизации в геометрии «плоского слоя» прекрасно описывает изменения амплитуды суперорбитальной переменности в зависимости от энергии. Профиль переменности в радиодиапазоне хорошо аппроксимируется моделью излучения релятивистского джета со скоростью порядка 0,3–0,5 световой.

Открыта зависимость характеристик орбитальной переменности от фазы суперорбитальной. Такое поведение объясняется нами наличием «аккреционного балджа» на краю диска, вероятно, в месте перехода сфокусированного ветра в диск. В зависимости от фазы прецессии диска, на луче зрения оказывается разное количество поглощающего вещества, что и ведет к появлению наблюдаемой зависимости. Наблюдаемый эффект промоделирован теоретически. Фурье-спектр модели успешно объясняет открытые ранее асимметричные частоты «биений» между частотами орбитальной и суперорбитальной переменности (Ляхович и др., 2006).

Впервые выполнен подробный спектральный анализ вспышки 2002 года аккрецирующего миллисекундного пульсара SAX J1808.4–3658 и

построены зависимости параметров аппроксимации от времени и друг от друга. В частности, мы демонстрируем, что амплитуда отраженной компоненты падает с уменьшением темпа аккреции. Показано, что форма профилей пульсов имеет ярко выраженную зависимость от энергии. Проведены оценки геометрических параметров системы. Впервые высказана идея, что изменение профилей пульсов связано с переменным во времени экранированием одного из «горячих пятен» краем аккреционного диска. Эволюция спектральных (амплитуда отражения) и временных параметров (частоты квазипериодических осцилляций, формы пульсов) свидетельствует о том, что в процессе вспышки диск медленно отступает от нейтронной звезды.

Нами проанализирован ряд сложных профилей пульсов пульсара SAX J1808.4–3658 (вспышка 2002г.) и предложено объяснение, что причиной их появления и эволюции является последовательное появление в поле зрения наблюдателя второго горячего пятна, по мере того как оно перестает экранироваться диском, отступающим от звезды (такое поведение диска естественно следует из увеличения альвеновского радиуса в процессе падения темпа аккреции). Нами показано, что эволюция наблюдаемых профилей хорошо описывается предложенным сценарием. Данная модель является первым физически правдоподобным объяснением наблюдаемой эволюции сложных профилей пульсов аккрецирующих миллисекундных рентгеновских пульсаров.

1.4 Научная и практическая ценность работы

Многие предшествующие исследования спектров черных дыр либо опирались на небольшое количество наблюдений, либо использовали только узкий энергетический диапазон при анализе множества спектров. Однако естественно, что в первом случае невозможно выявить статистические зависимости, а во втором – с уверенностью определить модель, корректно описывающую спектр за пределом выбранного узкого диапазона. Наша работа восполняет этот пробел, используя несколько десятков спектров в очень большом интервале энергий. Нами было продемонстрировано, что спектры (вблизи «жесткого» состояния) практически всегда требуют дополнительной мягкой компоненты в районе до 10 кэВ. Ранее обнаруженная в работе Гильфанов, Чуразов и Ревнивцев 1999 зависимость между наклоном спектра и амплитудой отраженной компоненты

подтвердилась, но количественные значения параметров подверглись заметной корректировке. Продемонстрированные нами корреляции изменений спектральных характеристик позволяют проверить теоретические модели процессов, происходящих в источнике.

Путем исследования суперорбитальной переменности Лебеда X-1 с применением физически обоснованных моделей, мы получаем хорошо обоснованные значения параметров прецессии. Мы показываем, что тепловая комптонизация в слое отлично описывает изменение анизотропии с энергией в рентгеновском диапазоне.

Проанализированы профили орбитальной переменности на разных суперорбитальных фазах и продемонстрировано, что они заметно различаются между собой. Результатом открытия зависимости характеристик орбитальной переменности от суперорбитальной явилось уточнение геометрии системы. Эта новая информация является полезной для теоретиков, моделирующих процессы аккреции в системах с мощным звездным ветром.

Исследование аккрецирующих миллисекундных пульсаров и, в частности, анализ их профилей пульсов важно для понимания механизмов излучения в этих объектах, свойств контролируемой магнитным полем аккреции (которые не прояснены до конца на данный момент) и для фундаментальных исследований сверхплотного вещества, составляющего «внутреннее ядро» нейтронных звезд. Различные теории строения внутреннего ядра предсказывают различные зависимости массы нейтронной звезды от радиуса. Моделирование профилей пульсов позволяет уточнить эти параметры для наших объектов.

1.5 Апробация работы

Результаты, полученные в диссертации, докладывались на следующих конференциях и семинарах: международная школа NATO ASI (Marmaris, Turkey, 2004), Nordita Workdays on QPOs (Copenhagen, Denmark, 2005), рабочее совещание Cyg X-2±1 (Kittilä, Finnish Lapland, 2005), конференция High Energies in the Highlands (Fort William, Scotland, UK, 2005), международная школа Observing the X- and Gamma-ray Sky (Cargèse, Corsica, France, 2006), конференция The multicolored landscape of compact objects and their explosive progenitors (Cefalù, Sicily, Italy, 2006), рабочее совещание INTEGRAL The Obscured Universe (Москва, 2006), 36-я ассам-

блея COSPAR (Beijing, China, 2006), конференция The Extreme Universe in the Suzaku Era (Kyoto, Japan, 2006), совещания проекта Observations and physics of accreting neutron stars (Bern, Switzerland, 2007-2009), конференции Cool discs, hot flows: The varying faces of accreting compact objects (Funäsdalen, Sweden, 2008) и A Decade of Accreting Millisecond X-ray Pulsars (Amsterdam, The Netherlands, 2008), серия зимних конференций в ИКИ РАН: HEA-2000, HEA-2001, HEA-2002, HEA-2003, Zeldovich-90 (2004), HEA-2005, HEA-2007, HEA-2008.

По теме диссертации опубликовано пять работ.

Полный список трудов диссертанта включает 7 работ в реферируемых изданиях.

1.6 Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованной литературы. Объем диссертации - 120 страниц, в том числе 46 рисунков и 10 таблиц. Список литературы содержит 192 ссылки.

2 Содержание работы

Во **Введении** дается краткое описание проблем, затронутых в диссертации и обосновывается актуальность данной работы.

Первая глава диссертации посвящена анализу 42 широкополосных рентгеновских спектров рентгеновской двойной с черной дырой Лебедь X-1, наблюдаемых совместно инструментами Ginga + CGRO¹/OSSE и RXTE + CGRO/OSSE в 1991 и 1996–1999 годах. Спектры в диапазоне 3–1000 кэВ могут быть успешно описаны моделью тепловой комптонизации (вместе с отражением от холодного диска), плюс дополнительной мягкой компонентой в диапазоне до 10 кэВ (более заметной в спектрах с большей амплитудой отраженной компоненты и более крутым наклоном спектра основного комптоновского континуума). Мы предполагаем, что эта компонента порождается тепловой комптонизацией на электронах с маленьким комптоновским параметром или является низкочастотной частью спектра нетепловой комптонизации, продолжающейся далеко за 1 МэВ.

¹Compton Gamma-Ray Observatory

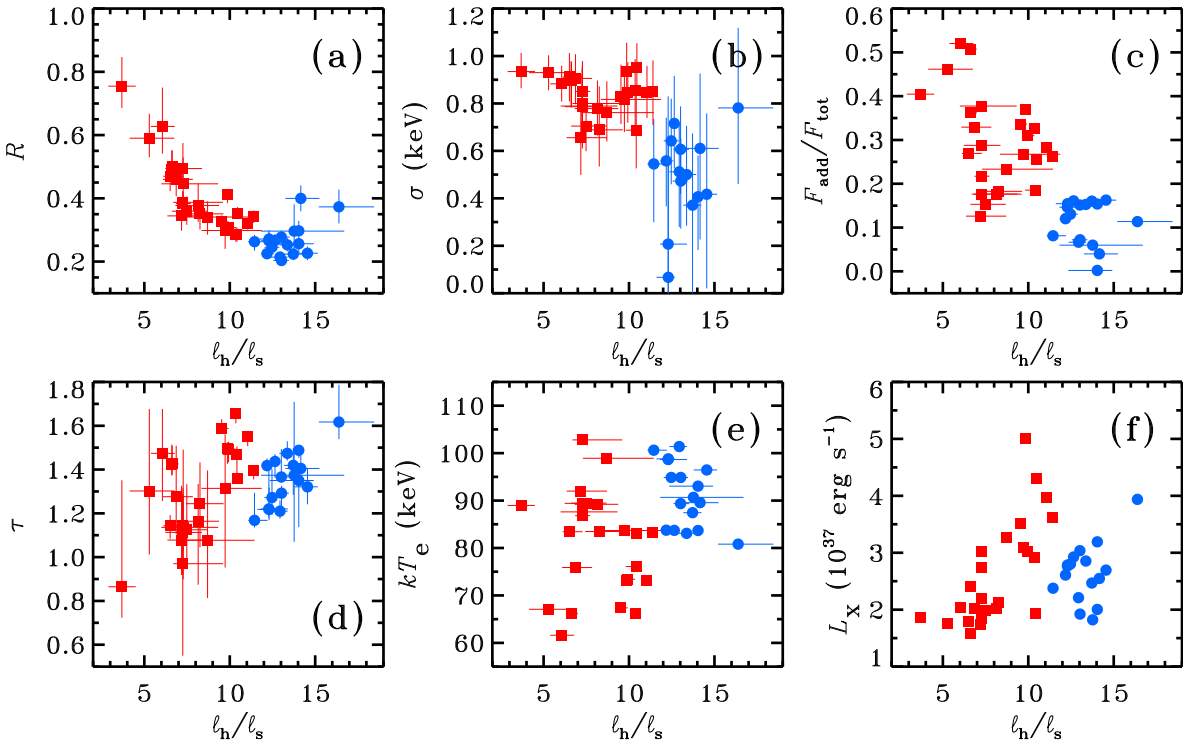


Рис. 4: Корреляции между спектральными параметрами для модели «тепловая + нетепловая комптонизация» для 42 спектров Лебеда X-1. Кружки – данные 1991 и 1997 года, квадратики – данные 1996, 1998 и 1999 года. l_h/l_s – «компактность», R – амплитуда отраженной компоненты, σ – ширина Гауссианы, описывающей линию железа на 6,4 кэВ, $F_{\text{add}}/F_{\text{tot}}$ – относительный вклад нетепловой комптонизации в общий поток, τ – оптическая толща облака в компоненте тепловой комптонизации, kT_e – температура электронов в компоненте тепловой комптонизации, L_x – полная светимость комптонирующего облака, для расстояния 2 кпс.

Мы анализируем полученные нами зависимости между спектральными параметрами (см. Рис. 4) и подтверждаем общую корреляцию между наклоном спектра и амплитудой отраженной компоненты. Мы отмечаем, что простые феноменологические модели (такие как «степенной закон+комптоновское отражение»), примененные к узкому диапазону (3–20 кэВ, см. например Гильфанов, Чуразов и Ревнивцев 1999) переоценивают значения наклона и амплитуды отражения, однако сохраняют тренд этих параметров. Нами показано, что спектральные параметры сильно коррелируют с частотами квазипериодических осцилляций (QPO). Так называемая модель «динамической короны» (Мальзак и др., 2001) удовлетворительно объясняет корреляцию между наклоном спектра и амплитудой отражения, тогда как модель «усечённого диска» не объясняет ее количественно. Однако, в случае динамической короны сложно дать объяснение корреляции компактности с частотами QPO, которая естественным образом следуют из модели «усечённого диска». Мы не обнаружили заметной связи между температурой электронов в горячем облаке и остальными модельными параметрами, тогда как оптическая толщина горячего облака электронов уменьшается с умягчением спектра.

Во второй главе мы исследуем «суперорбитальную» переменность, наблюдаемую в рентгеновском и радио-излучении Лебедя X-1 с помощью модели прецессии аккреционного диска. Прецессия изменяет ориентацию источника излучения (диска или джета) относительно наблюдателя. Это приводит к модуляции излучения вследствие анизотропии диаграммы направленности выходящего излучения. Мы рассматриваем диаграммы направленности чернотельного излучения (изотропное угловое распределение при меняющейся проекции излучающей поверхности), тепловой комптонизации в плоскопараллельном слое, излучения релятивистского джета и поглощения в плоскопараллельном слое. Мы аппроксимируем нашими моделями данные, полученные приборами RXTE/ASM, CGRO/BATSE и радиотелескопом Ryle. В итоге, мы получаем углы прецессии $\sim 10^\circ\text{--}20^\circ$. Модель тепловой комптонизации для рентгеновских данных прекрасно описывает наблюдаемое уменьшение амплитуды переменности от 1 до 300 кэВ (анизотропия излучения уменьшается за счет увеличения числа рассеяний). Наша модель радиоизлучения джета показывает его скорость $\sim (0,3\text{--}0,5)c$. Это находится в согласии с ограничениями, связанными с отсутствием второго (противоположного)

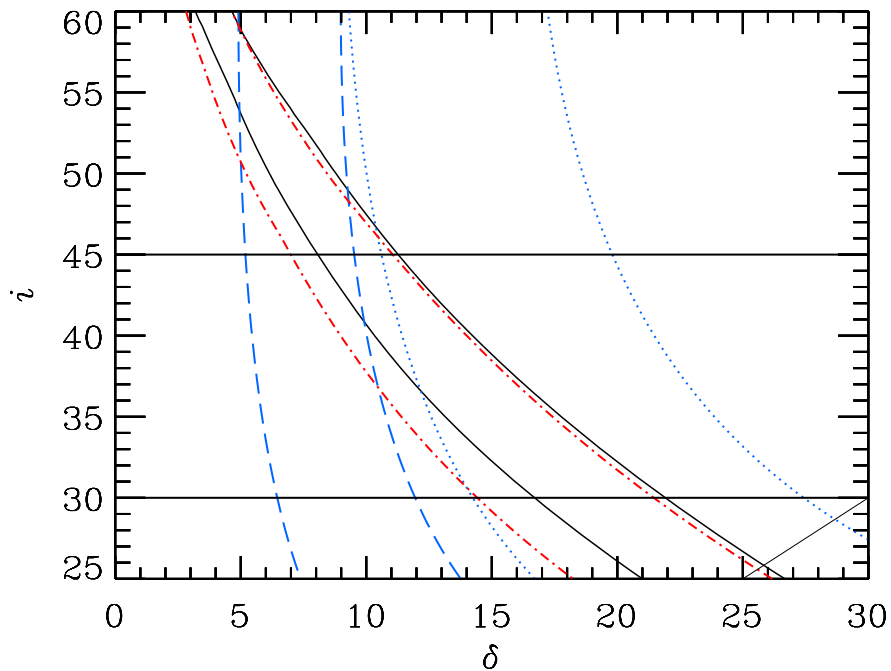


Рис. 5: Доверительные контуры 90% вероятности для угла наклона плоскости орбиты в Лебеде X-1 к лучу зрения i и угла прецессии δ . Сплошная и штрих-пунктирная линии соответствуют аппроксимации данных всех детекторов в составе прибора RXTE/ASM (1,5–3, 3–5 и 5–12 кэВ) и детектора CGRO/BATSE A (20–100 кэВ). Точечная и штриховые кривые показывают контуры для аппроксимации данных радиотелескопа Ryle моделью излучения джета для наклона спектра $\Gamma = 1$ и скорости джета 0,3 и 0,5 световой. Две горизонтальные линии на $i = 30^\circ$ и 45° примерно соответствуют ограничениям на наклон системы согласно другим методам (по данным из литературы). Линия в правом нижнем углу соответствует $i = \delta$, за которой находится симметричное решение (исключенное по определениям наклона системы другими методами).

джета, а так же отсутствием корреляции между рентгеновским и радиоизлучением на коротких масштабах времени. Наши результаты проиллюстрированы на Рис. 5.

Третья глава продолжает тему суперорбитальной переменности в Лебеде X-1. Она описывает наше открытие явной зависимости характеристик орбитальной переменности и «жесткости» спектра (в мягкой рентгеновской области) от текущей фазы супеорбитальной переменности (Рис. 6). В то время как выше мы анализировали профили переменности без «сортировки» данных по орбитальным и суперорбитальным фазам, здесь мы обращаем внимание на орбитальные кривые блеска *на различных фазах суперорбитальной переменности*. Нами продемонстрировано, что эти кривые будут заметно различаться. Мы успешно объясняем это явление комбинацией двух эффектов: прецессии аккреционного диска (как причины суперорбитальной модуляции) и поглощением в аккреционном балдже, расположенном на краю аккреционного диска (смещенного от линии, соединяющей звезды, примерно на 25° , см. Рис. 7). Наши выводы подтверждаются тем фактом, что наблюдаемые в рентгеновском диапазоне «дипы» (кратковременные скачки поглощения на луче зрения) показывают концентрацию к нулевой суперорбитальной фазе (когда балдж находится на луче зрения). Фурье-анализ нашей модели объясняет ранее установленный наблюдательный факт асимметричных пиков на частотах биения между орбитальной и суперорбитальной частотами (Ляхович и др., 2006). Мы не обнаружили статистически значимых изменений в орбитальной переменности на разных суперорбитальных фазах по радиоданным 15ГГц радиоданным телескопа Ryle. Это объясняется тем, что радио-излучение генерируется в джете, а орбитальная переменность в радиодиапазоне создается поглощением в ветре вдали от диска. Мы отмечаем, что распределение потоков в жестком состоянии источника как в радио-, так и в рентгеновском диапазоне имеет лог-нормальное распределение на временных интервалах порядка $\geq 10^4$ секунд, аналогично известному распределению на временах порядка секунды. (Это означает, что для статистически адекватного временного усреднения и анализа ошибок требуется использовать не потоки, а их логарифмы.) В работе мы указываем корректную формулу для ошибки rms кривой блеска для случая, когда эта ошибка больше измеряемой величины.

В четвертой главе рассматривается вспышка аккрецирующего мил-

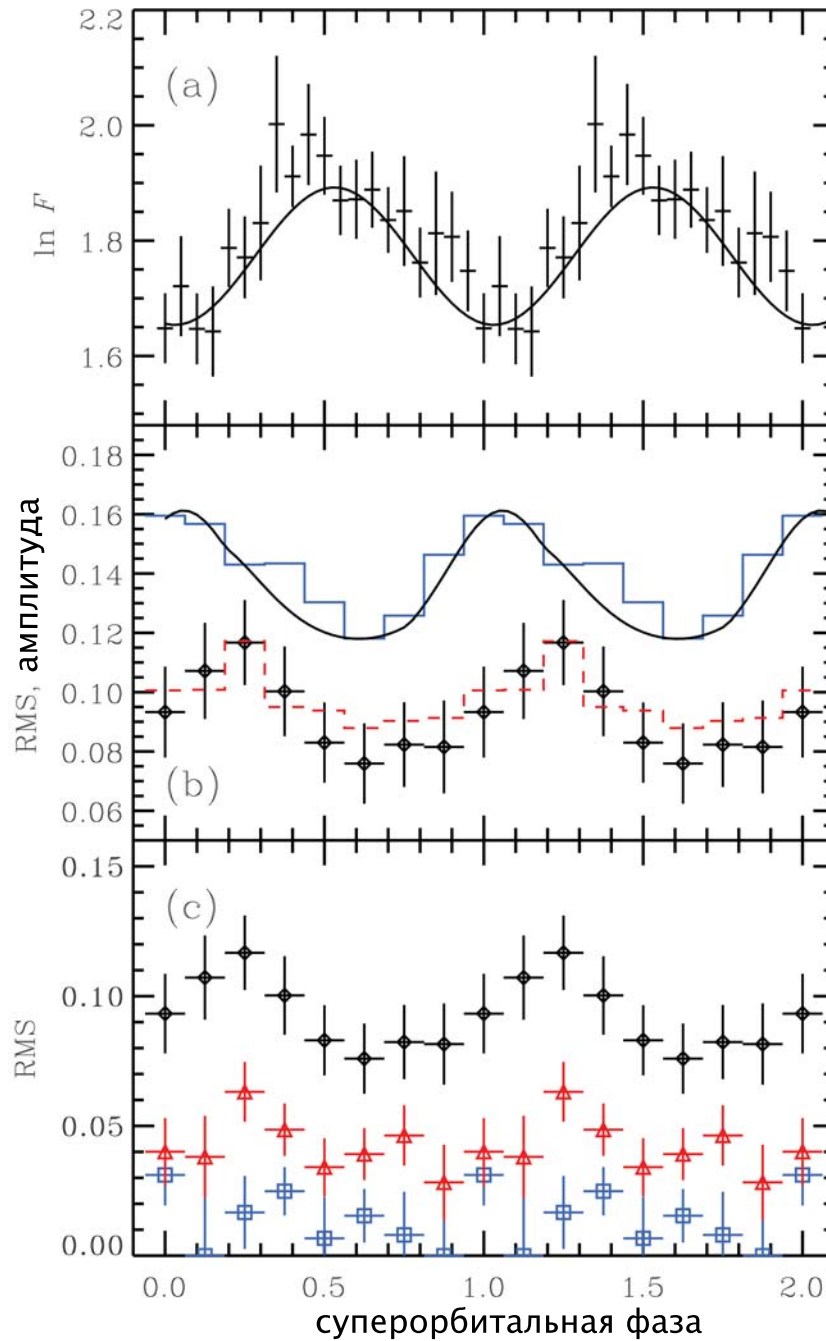


Рис. 6: (a) Профиль суперорбитальной переменности в Лебеде X-1 (1,5–3 кэВ, RXTE/ASM). (b) Сравнение rms орбитальной переменности, полученных разными методами. Крестики – собственная rms (среднеквадратическое отклонение) орбитальной модуляции как функция суперорбитальной фазы. Сплошная линия – амплитуда аппроксимации наблюдаемых профилей орбитальной переменности суммой трех гармоник, штриховая линия – rms этой аппроксимации. Сплошная кривая на панелях (a) и (b) – результат теоретического моделирования. (c) Зависимость собственной rms орбитальной переменности от суперорбитальной фазы для диапазонов RXTE/ASM 1,5–3, 3–5 и 5–12 кэВ (кружки, треугольники и квадратики, соответственно).

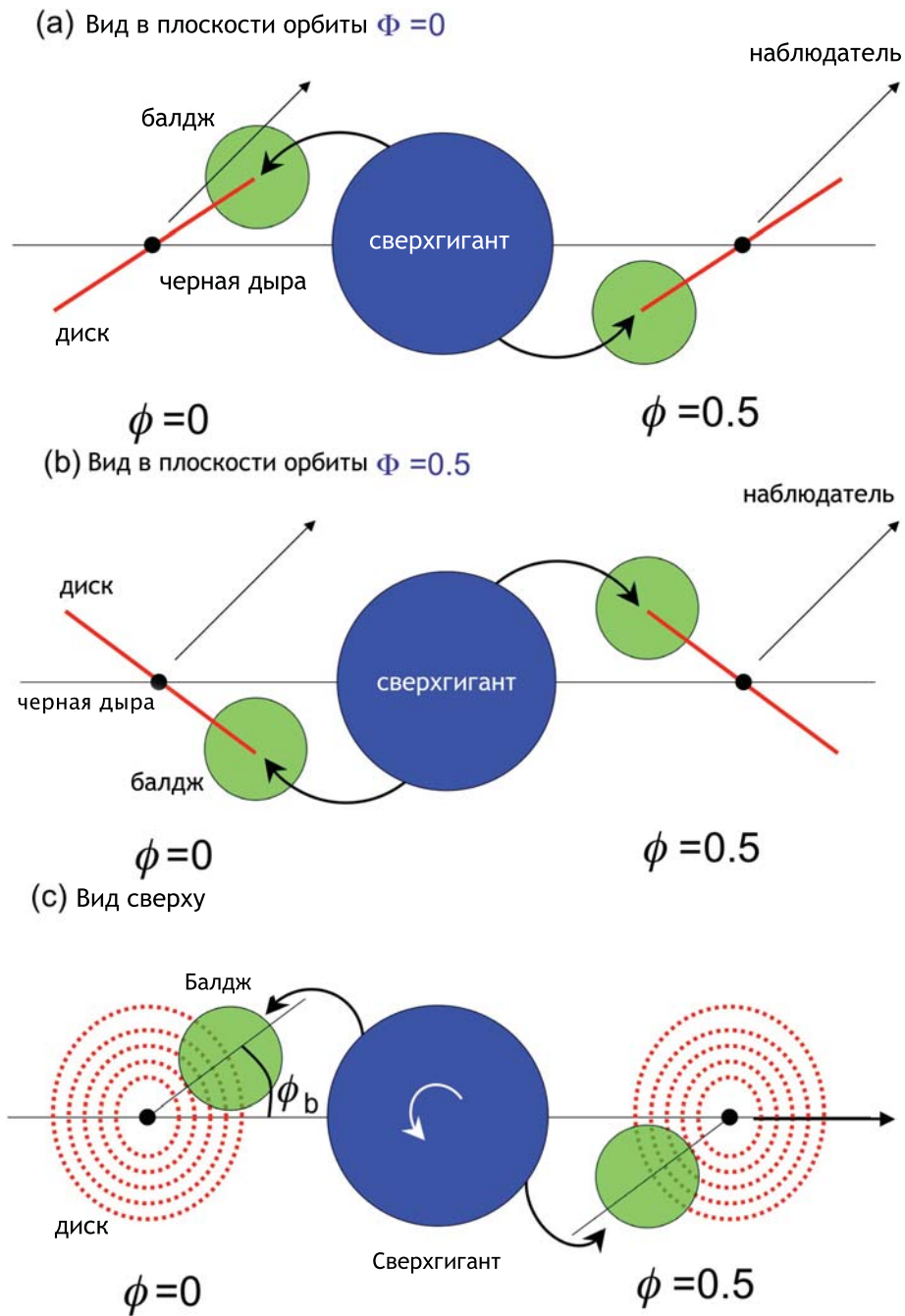


Рис. 7: Иллюстрация эффекта поглощения в аккреционном балдже в Лебеде X-1 (Φ – суперорбитальная фаза, ϕ – орбитальная фаза). (а) рисунок в плоскости орбиты, суперорбитальная фаза $\Phi = 0$; (b) рисунок в плоскости орбиты, суперорбитальная фаза $\Phi = 0,5$; (c) вид перпендикулярно плоскости орбиты. Показаны сверхгигант, черная дыра, балдж и аккреционный диск, а так же направление на наблюдателя.

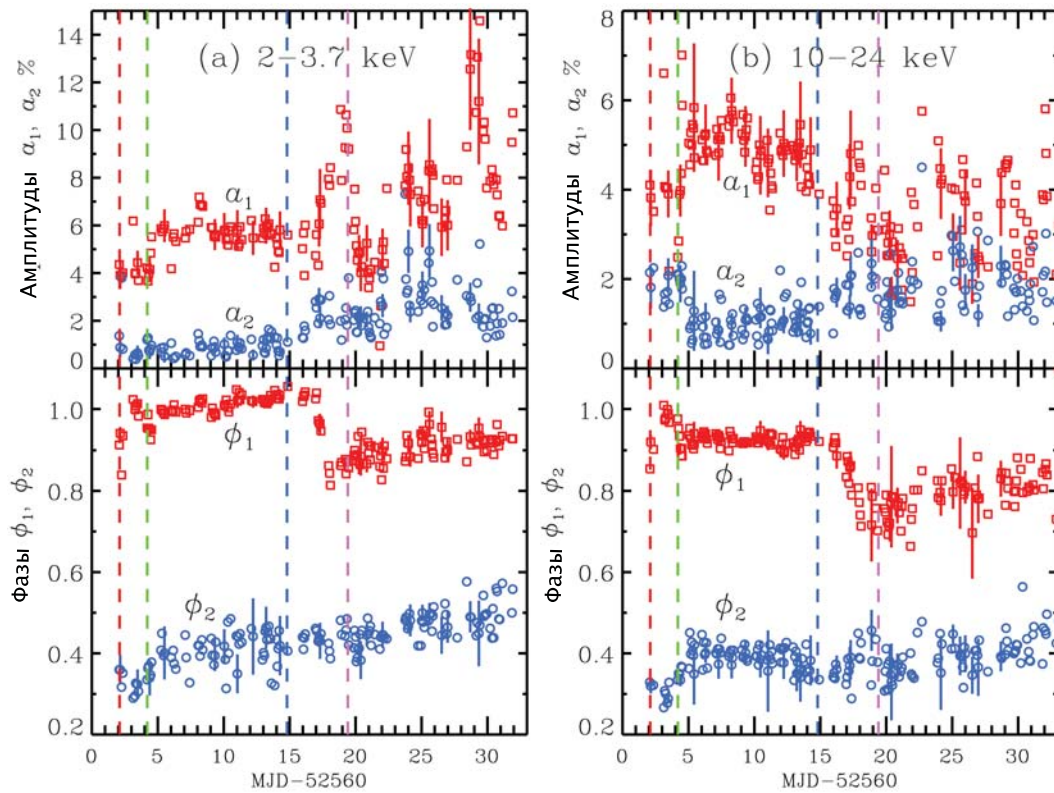


Рис. 8: Фурье-амплитуды и фазы профилей пульсов для диапазонов 2–3,7 кэВ и 10–24 кэВ для вспышки 2002 г. пульсара SAX J1808.4–3658. Рецессия диска и появление в поле зрения наблюдателя второго пятна вызывают последовательные изменения профилей пульсов начиная с MJD 52570.

лисекундного рентгеновского пульсара SAX J1808.4–3658, который наблюдался в течение октября – ноября 2002 г. спутником RXTE. Мы впервые демонстрируем, как – параллельно с уменьшением амплитуды отражения – уменьшается размер горячего пятна на поверхности нейтронной звезды. Эти факты естественно объясняются тем, что внутренний край аккреционного диска отдаляется от нейтронной звезды из-за того, что темп аккреции падает со временем. Профили пульсов источника явно демонстрируют присутствие вторичного максимума в пульсах на поздней стадии вспышки (после 29 октября 2002 г). Это означает, что диск отступает от нейтронной звезды достаточно далеко для того, чтобы второе пятно на противоположном магнитном полюсе звезды оказалось в поле зрения наблюдателя. Мы используем факт появления вторичного максимума, чтобы оценить звездный магнитный момент $\mu = (8 \pm 4) \times 10^{25}$ Гс см³, соответствующий магнитному полю на поверхности звезды порядка 10^8 Гс (что соответствует значению, недавно полученному по данным замедления частоты пульсара (Хартман и др., 2008) и оценке по эффекту пропеллера Гильфанов и др. 1998). Мы демонстрируем, что «временной шум» и резкие изменения в фазе базовой гармонике связаны с изменениями в профиле пульса. Видно, что профиль пульса сильно зависит от энергии (см. Рис. 8). Наблюдаемые «мягкие» временные задержки (запаздывание фазы на мягких энергиях по сравнению с жесткими) являются результатом разной фазовой зависимости двух спектральных компонент, черного тела и комптонизационного континуума. Амплитуда и энергетическая зависимость временных задержек согласуются с представлением, что чернотельное излучение возникает в «горячем пятне», а комптонизованное излучение – в аккреционной ударной волне. Амплитуда профилей пульсов позволяет оценить широту магнитного полюса как $\sim 4-10^\circ$.

В пятой главе описывается модель кривой блеска быстровращающегося аккрецирующего пульсара. Мы моделируем два пятна на поверхности нейтронной звезды, имеющие заданные конечные размеры. Для пятен задаются исходный спектр излучения (степенной закон с индексом 1,9) и диаграмма направленности излучения. (Отметим, что воспроизведение вторичных максимумов в профилях пульса является затруднительным без учета второго пятна.) Поверхность пятен делится на большое количество ячеек. Для каждой ячейки вычисляется её вклад в общую кривую блеска и проверяются условия экранирования излучения от неё

звездой и внутренним краем диска. На Рис. 9 показаны геометрия задачи и примеры профилей пульса. Размер пятна на звезде может быть довольно большим, с угловым радиусом порядка 30° , и экранирование диском такого пятна может быть неполным. Второе пятно в разные моменты времени экранируется по-разному и это порождает многообразие наблюдаемых профилей. Путем прямой аппроксимации наблюдаемых профилей нашей моделью мы демонстрируем, что (а) возможно хорошее описание наблюдаемых профилей нашей моделью и (б) модель воспроизводит плавное отступление внутреннего края диска для объяснения эволюции профилей со временем.

В **Заключении** перечислены основные результаты, полученные в диссертации.

3 Основные результаты, выносимые на защиту

- Впервые исследованы 42 спектра источника Лебедь X-1 в широком диапазоне энергий (3–1000 кэВ, данных Ginga, CGRO/OSSE, RXTE). Спектры успешно описываются моделью тепловой комптонизации, отраженной компоненты и дополнительной мягкой компоненты. Мы показали, что дополнительная компонента может являться либо тепловой комптонизацией на электронах с маленьким комптоновским параметром, либо нетепловой комптонизацией (что позволяет объяснить наблюдаемый поток на энергиях свыше 1 МэВ). Показано, что увеличение амплитуды отраженной компоненты сопровождается увеличением эквивалентной ширины линии железа на энергии 6,4 кэВ, увеличением частот квазипериодических осцилляций и увеличением наклона степенного спектра (т.е. уменьшением «компактности»). Параллельно уменьшаются оптическая толща компоненты тепловой комптонизации и увеличивается вклад нетепловой комптонизации. Мы предлагаем качественный сценарий, который связывает состояние системы с текущим положением «переходного радиуса» между аккреционным диском и внутренним горячим оптически тонким потоком (модель «усечённого диска», см. Рис. 1).
- Изучен феномен суперорбитальной переменности в источнике Лебедь X-1. Переменность аппроксимирована рядом физических моделей, связанных с прецессией аккреционного диска. Найдены гео-

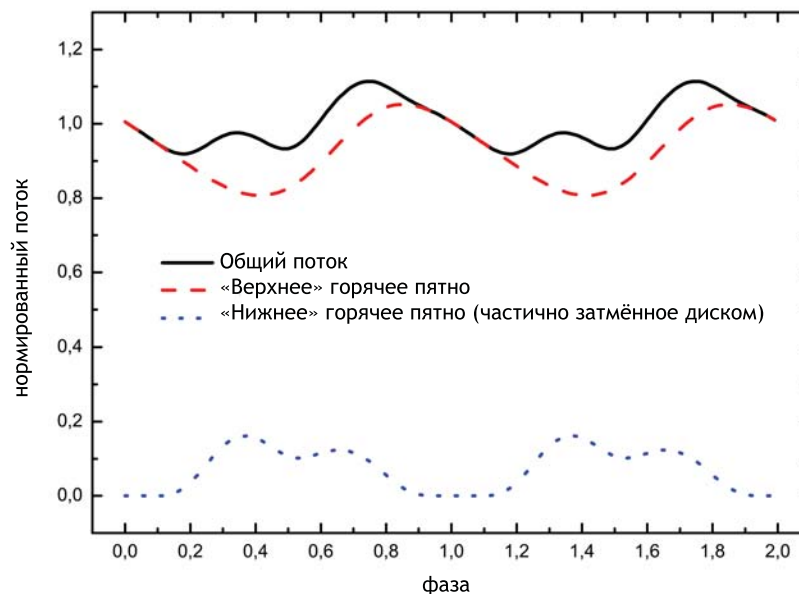
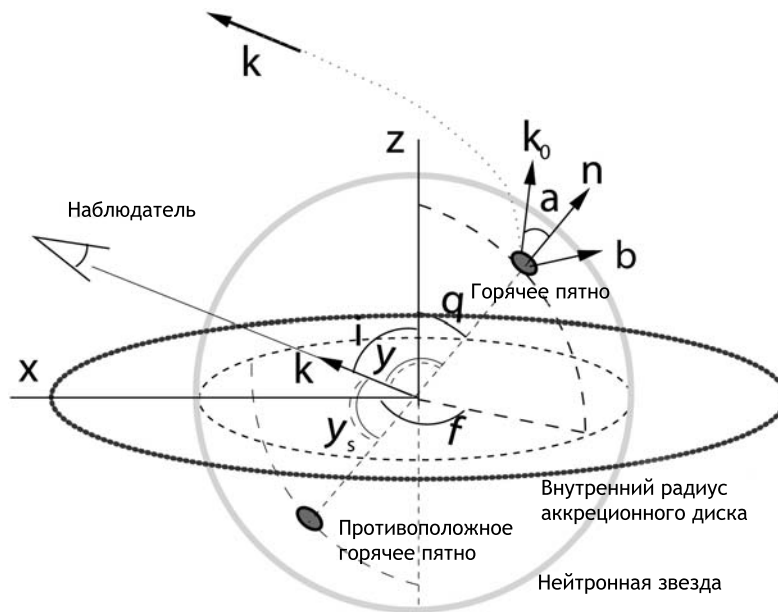


Рис. 9: Геометрия модели быстро вращающегося пульсара и пример модельного профиля пульса.

метрические параметры системы в случае каждой модели. Показано, что изменение амплитуды переменности в рентгеновском диапазоне прекрасно объясняется зависимостью от энергии индикатрисы излучения тепловой комптонизации в плоскопараллельном слое.

- Открыта зависимость характеристик орбитальной переменности в Лебедь X-1 от фазы суперорбитальной. Это явление объяснено комбинацией эффекта прецессии и поглощения в балдже, находящемся

на краю аккреционного диска, на стороне, обращенной к сверхгиганту. Эффект промоделирован теоретически.

- Проанализирована эволюция спектров и профилей пульсов на разных энергиях аккрецирующего рентгеновского миллисекундного пульсара SAX J1808.4–3658 в процессе вспышки 2002 года. Эволюция спектров со временем показывает уменьшение амплитуды отраженной компоненты и размера «горячего пятна» с уменьшением светимости. Это свидетельствует о том, что с течением времени внутренний край диска «отстывает» от звезды. При падении светимости до определенного уровня профиль пульса становится двугорбым, что интерпретируется нами как появление вклада излучения от «нижнего горячего пятна», которое оказывается видимым благодаря рецессии диска. По наблюдательным данным нами получены ограничения на размер пятна и на геометрические параметры системы. Наблюдения для момента времени, когда «нижнее» пятно впервые оказывается видимым, позволяет нам оценить величину магнитного момента звезды.
- Создана модель профилей пульсов аккрецирующего миллисекундного пульсара, учитывающая экранирование одного из горячих пятен на поверхности нейтронной звезды внутренним краем диска, и продемонстрировано соответствие модельных профилей наблюдаемым.

Список основных публикаций по теме диссертации

1. Ибрагимов А., Поутанен Ю., Гильфанов М., Здзиарски А., Шредер К. // Ibragimov A., Poutanen J., Gilfanov M., Zdziarski A., Schrader C., Broad-band spectra of Cyg X-1 and correlations between spectral characteristics, MNRAS – 2005 – v.362 – pp. 1435-1450
2. Ибрагимов А., Здзиарски А., Поутанен Ю. // Ibragimov A., Zdziarski A., Poutanen J., Superorbital variability of X-ray and radio emission of Cyg X-1 – I. Emission anisotropy of precessing sources, MNRAS – 2007 – v.381 – pp. 723-731.
3. Поутанен Ю., Здзиарски А., Ибрагимов А. // Poutanen J., Zdziarski A., Ibragimov, A., Superorbital variability of X-ray and radio emission of Cyg

X-1 – II. Dependence of the orbital modulation on the superorbital phase, MNRAS – 2008 – v. 389 – pp. 1427-1438.

4. Ибрагимов А., Пoutанен Ю. // Ibragimov A. , Poutanen J., Spectral and temporal properties of the accreting millisecond pulsar SAX J1808.4–3658 during its 2002 outburst, MNRAS – 2009 – v. 400 – pp. 492–508.
5. Пoutанен Ю., Ибрагимов А., Аннала М. // Poutanen J., Ibragimov A., Annala M., ApJL – 2009 – v. 706 – pp. L129–L132.

Список литературы

- Аксельсон, Боргоново и Ларссон 2005 // Axelsson M., Borgonovo L., Larsson S., 2005, A&A, 438, 999
- Балучинска и Хасингер 1991 // Balucińska M., Hasinger G., 1991, A&A, 241, 439
- Балучинска-Чёрч и др. 1995 // Balucińska-Church M., Belloni T., Church M. J., Hasinger G., 1995, A&A, 302, L5
- Белобородов 1999 // Beloborodov A., 1999, ApJ, 510, L123
- Беннлох и др. 2001 // Benlloch S., Wilms J., Staubert R., Nowak M. A., 2001, in Gimenez A., Reglero A., Winkler C., eds., ESA SP-459, Exploring the gamma-ray universe. ESA, Noordwijk, p. 263
- Беннлох и др. 2004 // Benlloch S., Pottschmidt K., Wilms J., Nowak M. A., Gleissner T., Pooley G. G., 2004, AIPC, 714, 61
- Броксопп и др. 1999 // Brocksopp C., Fender R. P., Larionov V., Lyuty V. M., Tarasov A. E., Pooley G. G., Paciesas W. S., Roche P., 1999, MNRAS, 309, 1063
- Галеев, Роснер и Вайяна 1979 // Galeev A. A., Rosner R., Vaiana G. S., 1979, ApJ, 229, 318
- Герлински и др. 1997 // Gierliński M., Zdziarski A. A., Done C., Johnson W. N., Ebisawa K., Ueda Y., Haardt F., Philips B. F., 1997, MNRAS, 288, 958
- Герлински и др. 1999 // Gierliński M., Zdziarski A. A., Poutanen J., Coppi P. S., Ebisawa K., Johnson W. N., 1999, MNRAS, 309, 496
- Герлински, Дон и Баррет 2002 // Gierliński M., Done C., Barret D., 2002, MNRAS, 331, 141
- Гильфанов и др. 1998 // Gilfanov M., Revnivtsev M., Sunyaev R., Churazov E., 1998, A&A, 338, L83
- Гильфанов, Чуразов и Ревнивцев 1999 // Gilfanov M., Churazov E., Revnivtsev M., 1999, A&A, 352, 182
- Ди Сальво и др. 2001 // Di Salvo T., Done C., Zycki P. T., Burderi L., Robba N. R., 2001, ApJ, 547, 1024
- Дон и др. 1992 // Done C., Mulchaey J. S., Mushotzky R. F., Arnaud K., 1992, ApJ, 395, 275
- Фаланга и др. 2005 // Falanga M., et al., 2005, A&A, 444, 15
- Фронтера и др. 2001 // Frontera F. et al., 2001, ApJ, 546, 1027
- Капрони и др. 2006 // Caproni A., Livio M., Abraham Z., Mosquera Cuesta H. J., 2006, ApJ, 653, 112
- Карицкая и др. 2001 // Karitskaya E. A., et al., 2001, Astron. Rep., 45, 350

Катц 1973 // Katz J. I., 1973, Nat. Phys. Sci., 246, 87
Катц 1980 // Katz J. I., 1980, ApJ, 236, L127
Ларуод 1998 // Larwood J., 1998, MNRAS, 299, L32
Линг и др. 1997 // Ling J. C., et al., 1997, ApJ, 484, 375
Ляхович и др. 2006 // Lachowicz P., Zdziarski A. A., Schwarzenberg-Czerny A., Pooley G. G., Kitamoto S., 2006, MNRAS, 368, 1025
МакКоннелл и др. 1994 // McConnell M. L. et al., 1994, ApJ, 424, 933
Мальзак, Белобородов и Пoutанен 2001 // Malzac J., Beloborodov A., Poutanen J., 2001, MNRAS, 326, 417
Миллер и Стоун 2000 // Miller K. A., Stone J. M., 2000, ApJ, 534, 398
Огливие и Дубус 2001 // Ogilvie G. I., Dubus G., 2001, MNRAS, 320, 485
Пoutанен 1998 // Poutanen J., 1998, in Abramowicz M., Björnsson G., Pringle J., eds, Theory of Black Hole Accretion Discs. Cambridge Univ. Press, Cambridge, p. 100
Пули, Фендер и Броксопп 1999 // Pooley G. G., Fender R. P., Brocksopp C., 1999, MNRAS, 302, L1
Свенссон и Зdziарски 1994 // Svensson R., Zdziarski A. A., 1994, ApJ, 436, 599
Таут и Прингл 1992 // Tout C. A., Pringle J. E., 1992, MNRAS, 259, 604
Торрес и др. 2005 // Torres D. F., Romero G. E., Barcons X., Lu Y., 2005, ApJ, 626, 1015
Уайджерс и Прингл 1999 // Wijers R. A. M. J., Pringle J. E., 1999, MNRAS, 308, 207
Хартман и др. 2008 // Hartman J. M., et al., 2008, ApJ, 675, 1468
Эбисава и др. 1996 // Ebisawa K., Ueda Y., Inoue H., Tanaka Y., White N. E., 1996, ApJ, 467, 419
Эземдир и Демирчан 2001 // Özdemir S., Demircan O., 2001, Ap&SS, 278, 319
Зdziарски и др. 1996 // Zdziarski A. A., Gierliński M., Gondek D., Magdziarz P., 1996, A&AS, 120C, 553
Зdziарски и др. 1997 // Zdziarski A. A., Johnson W. N., Poutanen J., Magdziarz P., Gierliński M., 1997, in Winkler C., Courvoisier T. J.-L., Durouchoux Ph., eds, SP-382, The Transparent Universe, Proc. 2nd INTEGRAL Workshop. ESA, Noordwijk, p. 373
Зdziарски и др. 2002 // Zdziarski A. A., Poutanen J., Paciesas W. S., Wen L., 2002, ApJ, 578, 357
Зdziарски и Герлински 2004 // Zdziarski A. A., Gierliński M., 2004, Progr. Theor. Phys. Suppl., 155, 99
Зdziарски, Уэн и Герлински 2007 // Zdziarski A. A., Wen L., Gierliński M., 2007, MNRAS, 377, 1006