

На правах рукописи

УДК 524.354.4

Мольков Сергей Владимирович

**РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ОТ АККРЕЦИРУЮЩИХ
НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД ПО ДАННЫМ МИССИЙ
ГРАНАТ, RXTE и ИНТЕГРАЛ**

01.03.02 Астрофизика, радиоастрономия

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва, 2003

Работа выполнена в Институте космических исследований РАН

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук

С.А. Гребенев (ИКИ РАН)

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор

К.А. Постнов (ГАИШ)

кандидат физико-математических наук

Ю.Д.Котов (МИФИ)

Ведущая организация:

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе (С.-Петербург)

Защита диссертации состоится 26 декабря 2003г. в 12:00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.113.02 в Институте космических исследований РАН по адресу: Москва, 117997, ул. Профсоюзная, 84/32, ИКИ РАН, подъезд 2 (конференц-зал).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИКИ РАН.

Автореферат разослан 24 ноября 2003 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 002.113.02

кандидат технических наук

В.Е.Нестеров

1 Общая характеристика работы

Актуальность темы

Нейтронные звезды были открыты "на кончике пера" в 30-е годы. Еще тогда теоретиками была выдвинута гипотеза о существовании небесных объектов с очень высокой плотностью вещества и с малыми радиусами. Однако обнаружить такие объекты не представлялось возможным, так как остаточное тепловое излучение данных объектов оказывалось очень слабым из-за их малой площади. Таким образом, стало очевидным, что нейтронные звезды могут обнаружить себя только косвенным образом, т.е. должен существовать какой-то более мощный механизм формирования излучения. Одним из таких механизмов может быть аккреция вещества (либо из окружающего пространства, либо со звезды-компаньона в двойной системе) на нейтронную звезду. Расчеты показывали, что эффективная температура такого излучения лежит в рентгеновской области спектра (2 – 10 кэВ). На тот момент астрономам для наблюдений были доступны только телескопы и приборы, базирующиеся на поверхности Земли. Так как подавляющее число рентгеновских лучей поглощается земной атмосферой, нейтронные звезды оставались вне поля зрения астрономов около тридцати лет. Ситуация кардинально поменялась в 60-е годы, когда получила развитие внеатмосферная рентгеновская астрономия и с баллонов были обнаружены первые внесолнечные источники рентгеновского излучения и существование нейтронных звезд было экспериментально подтверждено. Особенно бурно рентгеновская астрономия начала развиваться в 70-е годы, после того как в 1970 г. был запущен первый научный спутник-обсерватория UHURU (SAS-1), работающий в рентгеновской области спектра, приборами которого за два года работы было зарегистрировано 339 рентгеновских объектов.

Дальнейшие исследования показали, что большая часть источников рентгеновского излучения — двойные рентгеновские системы, в которых основное энерговыделение приходится на процесс аккреции — перетекание вещества от нормального звездного компаньона к компактному объекту (нейтронной звезде или черной дыре). При этом оказалось, что наблюдательные проявления двойных рентгеновских систем не одинаковы и зависят от параметров компактного объекта и самой двойной системы. Все двойные рентгеновские системы можно

условно разделить на две большие группы — маломассивные двойные рентгеновские системы (в англоязычной литературе принята аббревиатура LMXB) с массой оптической звезды-компаньона $M \sim 1 M_{\odot}$ и массивные двойные рентгеновские системы (HMXB) с массой компаньона $M \geq 10 M_{\odot}$. Кроме того, свойства двойных систем сильно зависят и от величины магнитного поля нейтронной звезды. Подавляющее большинство систем с сильнозамагниченным компактным объектом (молодые нейтронные звезды, $B \sim 10^{12}$ Гс) относится к классу HMXB и проявляет когерентные пульсации в собственном рентгеновском излучении, то есть является пульсарами. Значительная часть двойных систем с массивным оптическим компаньоном является транзиентами, то есть время от времени переходит из своего обычного состояния в состояние с высокой светимостью. Такие переходы у одних систем довольно регулярны, а у других крайне редки, а длительность пребывания в высоком по светимости состоянии может варьироваться от часов до месяцев. Двойные системы со слабозамагниченным компактным объектом (старые нейтронные звезды, $B \sim 10^9$ Гс) составляют большую часть всех LMXB. Этот тип объектов очень разнообразен. Излучение, регистрируемое от таких объектов, может характеризоваться различными наблюдательными проявлениями: рентгеновскими всплесками, вызванными термоядерными взрывами на поверхности нейтронной звезды (всплески I-го типа, их длительность от нескольких секунд до часов) или кратковременными изменениями темпа аккреции (всплески II-го типа, их длительность порядка секунд); мощными продолжительными вспышками (длющимися дни и даже месяцы); резкими провалами на кривой блеска — дипами, вызванными затмениями излучающей области оптическим компаньоном или аккреционным диском; квазипериодическими осцилляциями потока; а также от таких объектов были обнаружены килогерцевые квазипериодические и когерентные пульсации, свидетельствующие о том, что нейтронные звезды в этих системах вращаются со скоростью несколько сот оборотов в секунду.

Детальное исследование временных историй и спектральных характеристик излучения дает возможность понять, какие процессы происходят в этих системах, где вещество находится в экстремальных условиях (при высоких температурах и высоких давлениях), не достижимых в лабораторных условиях. В частности, очень интересным представля-

ется исследование двойных рентгеновских систем в переходные периоды, когда темп аккреции меняется в несколько раз, либо во время пекулярных событий, таких как термоядерные взрывы, во время которых в системе может быть даже нарушен процесс аккреции.

Цель работы

Цель работы заключалась во всестороннем анализе свойств рентгеновского излучения, регистрируемого от двойных рентгеновских систем в "спокойном" состоянии, во время рентгеновских всплесков 1-го типа и в состояниях с высокой светимостью на основе данных, полученных телескопами АРТ-П обсерватории ГРАНАТ, JEM-X и IBIS обсерватории ИНТЕГРАЛ и детекторами РСА обсерватории RXTE.

При исследовании постоянного рентгеновского излучения рентгеновских барстеров (источников рентгеновских всплесков) основной задачей было применение физических моделей, описывающих излучение, и определение возможных параметров компактного объекта в двойной системе. При исследовании самих рентгеновских всплесков основное внимание было уделено детальному анализу эволюции светимости и температуры во время мощных всплесков и оценке типичных параметров (таких как температура всплеска, энерговыделение во время всплеска, рекуррентное время и т.д.) для всплесков умеренной интенсивности.

Для ярких двойных рентгеновских систем основной задачей было проследить спектральную эволюцию излучения во времени и интерпретировать ее в рамках двухкомпонентной модели излучения, где одна компонента отвечает за излучение пограничного слоя, а вторая описывает излучение диска.

Спектральный и временной анализ и исследование спектральной эволюции во время вспышек являлись целью исследований транзиентных источников в высоком по светимости состоянии.

Научная новизна

Все результаты, представленные к защите, являются новыми.

Для рентгеновского барстера GX3+1 был проведен всесторонний анализ свойств постоянного рентгеновского излучения и излучения во

время термоядерной вспышки на поверхности нейтронной звезды по данным телескопа АРТ-П.

По данным обсерватории RXTE впервые проведено детальное исследование мощнейшего рентгеновского всплеска на поверхности нейтронной звезды 4U 1724-307 в шаровом скоплении Терзан 2. В частности, было показано, что всплеск сопровождался сильным фотосферным расширением.

Для рентгеновского барстера SLX 1732-304 в шаровом скоплении Терзан 1 был проведен анализ свойств рентгеновского излучения, регистрируемого в "низком" состоянии.

Проведено исследование рентгеновского излучения во время 10 термоядерных всплесков на поверхности нейтронной звезды в двойной маломассивной рентгеновской системе X 1916-053.

Прослежена спектральная эволюция рентгеновского излучения яркой системы GX 340+0 в зависимости от положения источника на цвет-цвет диаграмме.

По данным обсерватории ИНТЕГРАЛ проведен анализ излучения от двух рентгеновских систем Aql X-1 и X 1901+03 во время вспышек 2003 года. В частности, впервые был получен спектр X 1901+03 в области жесткого рентгена (20 – 100 кэВ).

Практическая ценность работы

Приведенные в работе экспериментальные данные пригодны для непосредственного сравнения с теоретическими моделями и результатами других экспериментов. Кроме того, детальный анализ спектральных и временных характеристик рентгеновского излучения аккрецирующих нейтронных звезд может дать ключ к пониманию многих процессов, происходящих при аккреции вещества на такие объекты. В процессе выполнения данной работы было разработано математическое программное обеспечение, которое может быть использовано для различных рентгеновских миссий, в частности, ряд программ уже вошли в стандартный пакет обработки данных обсерватории ИНТЕГРАЛ.

Апробация работы

Результаты диссертации докладывались на семинарах ИКИ РАН, международных конференциях "Нейтронные звезды" (С.-Петербург, 1999, 2001), "Астрофизика на рубеже веков" (Пушино, 1999), JENAM-2000 (Москва, 2000), The XXXVII-th Rencontres de Moriond (Les Arc, 2002), "Астрофизика высоких энергий" (Москва, 2002).

Всего опубликовано 18 работ. По теме диссертации — 8 работ.

Объем диссертации

Диссертация состоит из введения, восьми глав, объединенных в четыре части, одна из которых инструментальная, и заключения. К каждой главе прилагается список литературы. Диссертация имеет объем 110 страниц, содержит 37 иллюстраций и 10 таблиц.

2 Содержание работы

Первая часть диссертации, состоящая из одной главы, посвящена краткому описанию орбитальных обсерваторий ГРАНАТ, RXTE и ИНТЕГРАЛ и технических характеристик инструментов, данные которых использовались в работе. Кроме того, описана методика анализа данных, полученных инструментами IBIS и JEM-X обсерватории ИНТЕГРАЛ.

Вторая часть посвящена исследованию рентгеновских барстеров в двойных системах и состоит из 4 глав.

Первая глава второй части представляет результаты временного и спектрального анализа по данным телескопа АРТ-П как постоянного рентгеновского излучения барстера GX3+1, так и рентгеновского излучения во время зарегистрированного от него термоядерного всплеска.

Для описания спектров в "спокойном" состоянии были предложены две спектральные модели изотермической экспоненциальной атмосферы и однородного изотермического полупространства — соответствующие формулы были получены в работах Зельдовича и Шакуры (1969) и Шакуры (1972) и имеют соответственно вид:

$$F(x) = \sqrt{\frac{3\kappa(x)n}{\sigma_T m_p}} B(x); \quad F(x) = \left(\frac{3\kappa(x)}{\sigma_T^2 H}\right)^{\frac{1}{3}} B(x),$$

где

$$B(x) = \frac{2\pi h}{c^2} \left(\frac{kT}{h}\right)^3 \frac{x^3}{e^x - 1}, \quad x = \frac{h\nu}{kT} -$$

чернотельное излучение, а

$$\kappa(x) = \frac{4,1 \cdot 10^{-23}(1 - e^{-x})}{T^{7/2} x^3}$$

спектральный коэффициент свободно-свободного поглощения (Зельдович и Райзер, 1966). На примере этих моделей показана роль комптонизации в формировании спектров излучения.

Также было рассмотрено влияние таких параметров, как доля излучающей области и светимость, на оценку размеров нейтронной звезды и параметров ее атмосферы (рис. 1).

В этой же главе приведен спектральный анализ рентгеновского всплеска на поверхности нейтронной звезды. С использованием аппроксимации данного спектра моделью чернотельного излучения была получена оценка радиуса нейтронной звезды $7,2 \pm 1,2$ км, что согласуется с оценками, полученными из спектрального анализа постоянного потока.

Во Второй главе по данным приборов обсерватории RXTE проведен спектральный анализ рентгеновского источника SLX 1732-304 в шаровом скоплении Терзан 1. Во время наблюдений источник находился в низком состоянии. Исследование показало, что поток от источника регистрировался на уровне, вдвое меньшем, чем по его наблюдениям в том же состоянии телескопом АРТ-П в 1990 г.

В Третьей главе представлено исследование 10 термоядерных всплесков от рентгеновского барстера и затменного источника X1916-053, ряд из которых демонстрировал фотосферное расширение с характерными факторами порядка двойки. Была приведена оценка на рекуррентное время всплесков. Особое внимание было уделено исследованию всплеска, который произошел во время дипа (частичного затмения источника структурами на краю аккреционного диска).

В Четвертой главе по данным обсерватории RXTE рассматривается уникальное событие — мощнейший всплеск излучения источника в шаровом скоплении Терзан 2, причиной которого был термоядерный

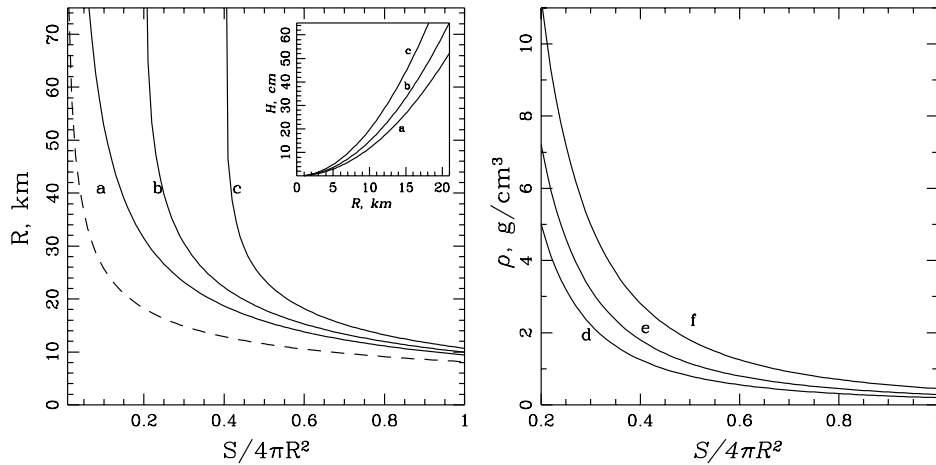


Рис. 1: Зависимости радиуса нейтронной звезды в системе GX3+1 и параметров ее атмосферы (высоты H и плотности ρ) от доли излучающей поверхности, полученные при аппроксимации моделями экспоненциальной атмосферы (слева) и однородного полупространства (справа). Для модели экспоненциальной атмосферы зависимость приведена для трех светимостей системы: **a** – $L \ll L_{\text{edd}}$, **b** – $L = 0,2L_{\text{edd}}$ и **c** – $L = 0,4L_{\text{edd}}$, а для модели однородного полупространства – для трех радиусов нейтронной звезды: **d** – $R = 3R_g$, **e** – $R = 2,5R_g$ и **f** – $R = 2R_g$. Пунктирная кривая показывает зависимость R от доли излучающей поверхности в случае чернотельного излучения.

всплеск на поверхности нейтронной звезды. Данный всплеск, помимо его мощности, выделяется среди всплесков I-го типа наличием прекурсора — короткой вспышки, предшествующей основному событию (рис.2). Поток во время прекурсора и основного всплеска достигал величины в 1,5 Краб. Спектральный и временной анализ события показал, что всплеск сопровождался сильным фотосферным расширением — радиус фотосферы увеличился более чем в миллион раз. После первого прекурсора поток от системы упал в 8 раз по отношению к довсплесковому уровню, что может быть объяснено затмением постоянного источника рентгеновского излучения расширившейся фотосферой нейтронной звезды либо этот источник излучения был подавлен гигантским энерговыделением во время рентгеновского всплеска. Между прекурсором и основным всплеском был обнаружен также второй прекурсор, основное излучение которого приходилось на мягкую область спектра ($E < 3$ кэВ). Объяснением второго прекурсора может быть осцилляция расширяющейся фотосферы.

Третья часть работы состоит из одной главы, посвященной изучению зависимости формы рентгеновских спектров известного источника GX340+0 от положения на Z-треке диаграммы "цвет-цвет" (рис.3). Для анализа были использованы данные наблюдений, полученные при-

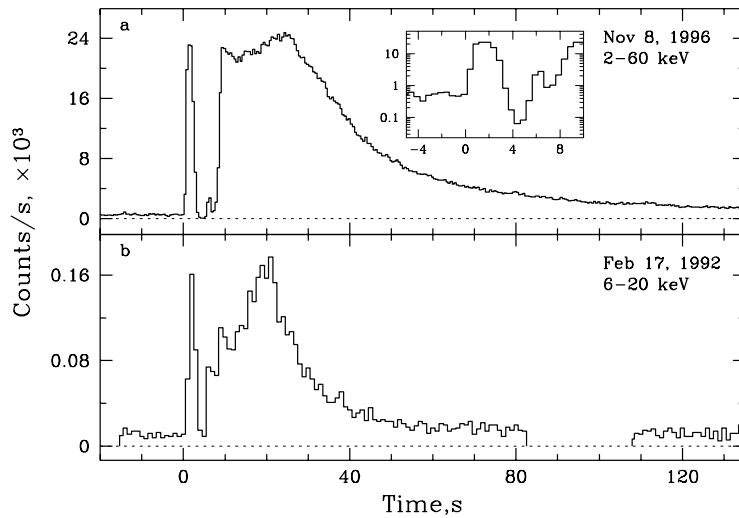


Рис. 2: Временная история двух рентгеновских всплесков задетектированных RXTE/РСА (а) и ГРАНАТ/АРТ-П (б) в широких энергетических диапазонах. Провал на кривой блеска по данным АРТ-П между 80 и 110 с связан с передачей информации из временного буфера хранения данных в бортовую память.

бором РСА/RXTE с общей экспозицией более 300 кс. Данная работа была крайне трудоемкой — при помощи специально разработанного программного обеспечения было проанализировано более десяти тысяч спектров. Для аппроксимации спектров была рассмотрена двухкомпонентная модель излучения (одна компонента описывала излучение погранслоя, а вторая — аккреционного диска) и прослежена ее эволюция по мере продвижения по Z-треку. Показано, что движение источника по Z-треку может быть объяснено эволюцией отдельных спектральных компонент, т.е. изменением соотношения вкладов погранслоя и аккреционного диска в полный спектр излучения.

Четвертая часть, состоящая из двух глав, посвящена изучению свойств рентгеновских транзиентов во время вспышек. Исследование проводилось по данным наблюдения области неба созвездия Орла обсерваторией ИНТЕГРАЛ (рис.4).

В Первой главе проведен анализ спектральной эволюции транзientного источника Aql X-1 во время вспышки 2003 г. Начало наблюдений было привязано к моменту начала вспышки от источника. Наблюдения повторялись с интервалом 5-6 дней с экспозицией ~ 50 кс. Такая стратегия позволила провести мониторинг всей вспышечной стадии. По результатам этих наблюдений подтверждена антикорреляция между величиной потока и жесткостью спектра — температура тормозного излучения растет от 4,2 до 5,1 кэВ по мере затухания вспышки. Однако на данном этапе не удалось подтвердить существование "жестко-

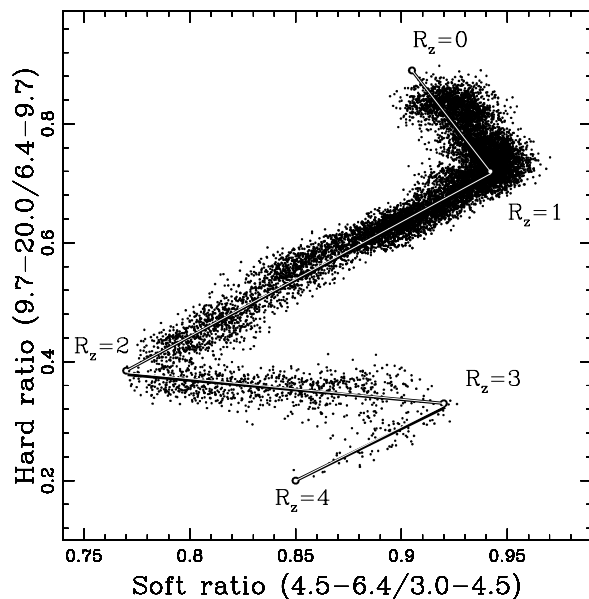


Рис. 3: Цвет-цвет диграмма. Каждой точке диаграммы соответствует 16-секундный интервал времени, а проекция точки на ломаную кривую задает ее "ранг". По оси абсцисс отложено отношение потока, регистрируемого от источника в энергетическом диапазоне 4,5 – 6,4 кэВ, к потоку в диапазоне 3,0 – 4,5 кэВ, а по оси ординат — отношение потока в диапазоне 6,4 – 9,7 кэВ к потоку в диапазоне 9,7 – 20,0 кэВ.

го хвоста" в спектре излучения Aql X-1. Источник не регистрируется в диапазоне энергий 50-100 кэВ. Верхний предел в этом диапазоне 4 мКраб на уровне 1σ , но нельзя полностью исключить наличие слабого жесткого рентгеновского хвоста из-за имеющихся на данный момент неопределенностей в анализе данных. По данным телескопа JEM-X были обнаружены два рентгеновских всплеска от системы. Оба всплеска имеют типичную форму для всплесков I рода. Примечательно, что оба всплеска произошли во время 5-й серии наблюдений, когда вспышка Aql X-1 подходила к концу и темп аккреции существенно уменьшился.

Во Второй главе приведен спектральный и временной анализ излучения НМХВ X 1901+03. Во время наблюдений данная массивная двойная транзиентная система находилась в состоянии с высокой светимостью. Это был только второй раз с 1971 г., когда система наблюдалась в подобном состоянии. Кроме того, во время данной вспышки, незадолго до рассматриваемых наблюдений, по данным обсерватории RXTE у системы были обнаружены когерентные пульсации с периодом 2,763 с. Таким образом, источник был отождествлен как аккрецирующий пульсар.

Во время наблюдений приборами миссии ИНТЕГРАЛ поток от X 1901+03 в энергетическом диапазоне 25 – 50 кэВ уменьшился со 110 до 90 мКраб. В данной работе был впервые получен спектр излучения данной системы в столь широком энергетическом диапазоне 15 – 100 кэВ. Усредненный за все время наблюдений спектр может быть аппроксимирован степенной моделью излучения с завалом на высоких

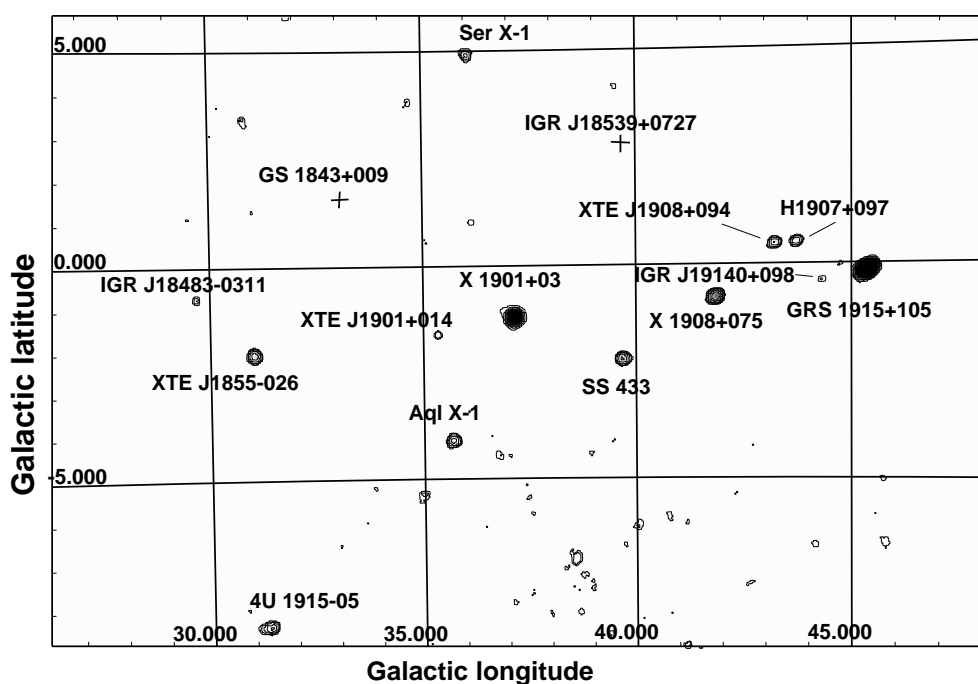


Рис. 4: Изображение региона Aql X-1 в рентгеновских лучах, полученное телескопом ISGRI/IBIS в энергетическом диапазоне 25 – 50 кэВ за период март-апрель 2003 года. Контуры на изображении отражают уровни отношения шума к полезному сигналу: 2, 2.5, 3.3, 4.5, 6.2, ... 42σ (для самых ярких источников GRS1915+105 и X1901+03 контуры начинаются с 4.5σ).

энергиях с фотонным индексом $\Gamma \sim 1,95$ и характерными завалами $E_{cut} \sim 12$ кэВ и $E_{fold} \sim 13,5$ кэВ. Такие значения параметров типичны для рентгеновских пульсаров.

Основные выводы и результаты диссертационной работы

1. Проведен спектральный анализ постоянного рентгеновского излучения барстера GX 3+1 с использованием разных моделей излучения и показана роль комптонизации в формировании спектров, даны оценки размеров области основного энерговыделения. Исследован рентгеновский всплеск, зарегистрированный от этой системы, дана оценка частоты повторений подобных всплесков и исследована антикорреляция между величиной постоянного потока и частотой возникновения всплесков.

2. Проведен спектральный анализ излучения рентгеновского источника SLX 1732-304 в шаровом скоплении Терзан 1. Во время наблюдений источник находился в низком состоянии. Исследование показало,

что поток от источника находился на уровне, вдвое меньшем, чем по его наблюдениям в том же состоянии телескопом АРТ-П в 1990 г.

3. Проведен спектральный анализ 10 рентгеновских всплесков от маломассивной двойной системы X 1916-053. Приведены спектральные параметры всплесков и показано, что часть из них сопровождается фотосферным расширением, даны оценки рекуррентного времени возникновения всплесков. Особое внимание уделено всплеску, который произошел во время дипа в кривой блеска. Считается, что такие дипы связаны с затмением области энерговыделения структурами на краю аккреционного диска. Наблюдения всплеска накладывают ограничения на эту модель.

4. Детально исследован мощнейший рентгеновский всплеск с прекурсором на поверхности нейтронной звезды в источнике 4U 1724-307 в шаровом скопления Терзан 2. Проведена временная спектроскопия данного события и показано, что всплеск сопровождался сильным фотосферным расширением, во время которого радиус фотосферы увеличился более чем в миллион раз, а температура фотосферы уменьшилась на порядок. На несколько секунд во время всплеска поток упал ниже довсплескового уровня, что объяснено затмением расширяющейся оболочкой области основного энерговыделения.

5. Представлено объяснение эволюции спектра рентгеновского излучения известного источника GX340+0, и в частности Z-трека на диаграмме цвет-цвет, изменением относительного вклада двух спектральных компонент, описывающих излучение пограничного слоя и аккреционного диска. Прослежена эволюция этих компонент в зависимости от положения на диаграмме "цвет-цвет".

6. Проведен подробный спектральный и временной анализ излучения транзиентного рентгеновского источника Aql X-1 во время вспышки 2003 года. Показана антикорреляция жесткости спектра и полного потока излучения.

7. Проведен спектральный и временной анализ малоизвестного транзиентного рентгеновского пульсара X1901+03 во время уникальной вспышки 2003 г. (второй за 30-летнюю историю наблюдений). Показано, что его спектр описывается степенным законом излучения.

Список работ, опубликованных по теме диссертации:

1. **Molkov S., Grebenev S., Lutovinov A.** An X-ray burst with strong photospheric radius expansion observed from the source 4U1724-307 in Terzan 2 // *Astron.Astrophys.* 2000, V.357. P.L41-L44.
2. **Molkov S., Lutovinov A., Grebenev S.** First results from TOO observations of the Aql X-1 field with INTEGRAL // *Astron.Astrophys.* 2003. V.411. P.L357.
3. **Gilfanov M., Revnivtsev M., Molkov S.** Boundary layer, accretion disk and X-ray variability in the luminous LMXBs // *Astron.Astrophys.* 2003, V.410. P.217-230.
4. **Molkov S.V., Grebenev S.A., Pavlinsky M.N., Sunyaev R.A.** GRANAT/ART-P observations of GX3+1: type I X-ray burst and persistent emission // *Astrophys. Lett. & Commun.* 1999. V.38. P.141-144
5. **Lutovinov A.A., Molkov S.V., Grebenev S.A., Pavlinsky M.N.** Review of X-Ray bursters in the Galactic Center region // *The Gamma-Ray Universe.* 2002. P.85
6. **Lutovinov A., Grebenev S., Molkov S., Sunyaev R.** Review of low-mass X-ray binaries near the Galactic center // *Astronomische Nachrichten* 2003. V.324, Issue S1. P.337-341
7. **Мольков С.В., Гребенев С.А, Лутовинов А.А.** Низкое состояние рентгеновского барстера SLX 1732-304 в шаровом скоплении Терзан 1 по данным спутника RXTE. // *Письма в Астрономический Журнал.* 2001. Т.27, С.1
8. **Лутовинов А., Мольков С., Ревнивцев М.** Первые результаты наблюдений транзиентного пульсара SAXJ2103.5+4545 по данным обсерватории ИНТЕГРАЛ // *Письма в Астрономический Журнал.* 2003. Т.29. С.803

055/02/2

Ротапринт ИКИ РАН
Москва, 117810, Профсоюзная, 84/32

Подписано к печати 19.11.2003

Заказ

Формат 70×108/32

Тираж 100

0,5 уч.-изд.л.