

На правах рукописи

Арефьев Вадим Александрович

**Переменность компактных рентгеновских источников на
малых и больших временных масштабах.**

01.03.02. Астрофизика и радиоастрономия

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва, 2004

Работа выполнена в Институте космических исследований РАН

Научный руководитель:

доктор физ.-мат. наук,

Гильфанов Марат Равильевич

Официальные оппоненты:

доктор физ.-мат. наук,

доктор физ.-мат. наук,

Постнов Константин Александрович

Титарчук Лев Григорьевич

Ведущая организация:

Московский инженерно-физический институт

Защита диссертации состоится 27 декабря 2004 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 002.113.02 в конференц-зале Института космических исследований РАН по адресу:

Москва, 117997, ул. Профсоюзная, 84/32, ИКИ РАН, подъезд 2

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИКИ РАН

Автореферат разослан 26 ноября 2004 г.

Ученый секретарь

Диссертационного совета Д 002.113.02

к.ф.-м.н.

А.Ю.Ткаченко

055/02/2

Ротапринт ИКИ РАН
Москва, 117997, Профсоюзная, 84/32

Подписано к печати .11.2004

Заказ

Формат 70x 108/32

Тираж 100

уч.-изд.л

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Небо в рентгеновском диапазоне отличается исключительной изменчивостью в широком интервале временных масштабов. Одним из классов источников, которые вносят наибольший вклад в наблюдаемую переменность, являются аккрецирующие нейтронные звезды и черные дыры. Однако многочисленные и разнообразные по своим характеристикам импульсы рентгеновского излучения – рентгеновские транзиенты – генерируются не только рентгеновскими двойными. Это могут быть как активные звезды поздних классов, некоторые молодые звезды, так и взрывы сверхновых, с которыми, вероятно, связаны всплески гамма-излучения.

Рентгеновские транзиенты сильно различаются по своим характеристикам. Это и рентгеновские вспышки активных звезд длительностью в десятки секунд, энергетическим спектром мягче 2-3 кэВ и полным энергосодержанием $\sim 10^{32}$ эрг, так и вспышки рентгеновских Новых, длительностью до нескольких месяцев и даже лет, спектром фотонов простирающимся до нескольких сотен кэВ и полной энергетикой $\sim 10^{44}$ эрг. В максимуме вспышки излучение рентгеновской Новой увеличивается в миллионы раз и может по своей интенсивности превышать рентгеновское излучение всех других компактных рентгеновских источников родительской галактики. Недавно было найдено, что гамма-всплескам могут сопутствовать всплески рентгеновского излучения, с полным энергосодержанием до 10^{52} эрг. Однако значительную переменность показывают и слабопеременные источники рентгеновского излучения. Рентгеновское излучение слабопеременных, т.е. не транзиентных компактных рентгеновских источников также отличается сильной переменностью. Причем может меняться как интенсивность, так и энергетический спектр излучения. Иногда такие изменения показывают периодический характер, иногда происходят спонтанно в непредсказуемые моменты времени.

Изучение особенностей переменности рентгеновского излучения является ключевым фактором как для понимания процессов формирования рентгеновского излучения, так и для выяснения свойств самих компактных объектов. Для его исследования применяются специальные инструменты - рентгеновские мониторы. Рентгеновский монитор должен обладать возможностью зарегистрировать,

локализовать и, желательно, получить информацию об энергетическом спектре и изменении во времени рентгеновского излучения произошедшего события, и как можно скорее передать эту информацию, чтобы можно было осуществить наблюдение данного события специализированными высокочувствительными телескопами, как в рентгеновском, так и в других диапазонах энергетического спектра. Так как рентгеновские транзиенты и изменения в излучении слабопеременных источников происходят в непредсказуемые моменты времени, а для транзиентов и в непредсказуемой точке на небе, то идеальный рентгеновский монитор должен наблюдать все небо все время. Однако в силу многочисленных технических ограничений, до недавнего времени рентгеновские мониторы были способны наблюдать одновременно только небольшую область неба. При этом различные области на небе наблюдались с различной длительностью и периодичностью.

Такие ограниченные и нерегулярные наблюдения привели к тому, что наиболее часто регистрировались и, как следствие, оказались хорошо изучены, явления средней (недели – месяцы) длительности. Тогда как более короткие (секунды-дни) и более длительные (месяцы-годы) события, и как следствие, процессы, отвечающие за их возникновение, изучены достаточно плохо. По этой же причине плохо изучена переменность на длинных масштабах времени у большинства «постоянных» источников. Поэтому исследование переменности компактных рентгеновских источников на малых и больших временных масштабах могут оказаться весьма интересными.

Одной из задач, которая представляет большой интерес, является выяснения природы коротких рентгеновских транзиентных явлений, так называемых быстрых рентгеновских транзиентов (БРТ). К быстрым рентгеновским транзиентам обычно относят события длительностью меньше одного дня и большим отношением потока в максимуме вспышки к постоянному уровню рентгеновского потока. Такие события неоднократно наблюдались различными экспериментами и было высказано предположение, что их природа связана с компактными объектами. Но, как правило, качество данных не позволяло определить характеристики БРТ с хорошей точностью и, следовательно, однозначно определить источники БРТ. Открытие недавно спутником *ВерроSAX* рентгеновских вспышек, похожих на гамма-всплески и рентгеновских послесвечений гамма-всплесков показывает, что наряду с активными звездами и рентгеновскими двойными, заметную долю среди БРТ может занимать

рентгеновское излучение, связанное с гамма-всплесками. Однако до настоящего времени нет надежных определений классов источников, которые генерируют БРТ, как нет информации об их относительном вкладе в статистику БРТ. Вероятно, что в дополнение к вышеперечисленным, некоторыми из источников БРТ являются экзотические (малочисленные или редко себя проявляющие) классы источников. Данные о таких классах (или оценки их численности и других характеристик) могут быть получены из анализа распределения БРТ.

В области более длительных временных масштабов, только после запуска спутника RXTE, стало возможным проведение долговременных достаточно регулярных наблюдений большого числа слабопеременных компактных источников рентгеновского излучения. Это открывает возможность исследовать переменность рентгеновского излучения на временных масштабах сравнимых и дольше характерного вязкого времени аккреционного диска. Что, в свою очередь, дает шанс получить информацию не только о строении аккреционного диска, но, например, оценить размеры двойной системы.

Изучение длительных рентгеновских транзиентов, их эволюция на больших масштабах времен, может оказаться важным для построения теоретических моделей, описывающих поведение таких источников. Например, ряд популярных моделей, описывающих такой феномен, как рентгеновские Новые, проверялись на способность описать данные наблюдений источника A0620-00 - классической маломассивной двойной системы, содержащей черную дыру. Однако известно, что многие рентгеновские Новые, содержащие черные дыры, демонстрируют заметно более сложное поведение, отличающееся от поведения A0620-00. Если бы имелись качественные данные наблюдений таких пекулярных рентгеновских Новых, то их также можно было бы использовать для проверки теоретических моделей.

С практической стороны нужно отметить, что в последнее время, после запуска новых высокочувствительных рентгеновских обсерваторий «ХММ-Ньютон», «Чандра», астрофизической обсерватории «Интеграл», появились новые возможности для изучения переменности рентгеновского излучения компактных источников на малых и больших временных масштабах. Так как программы наблюдений этих обсерваторий составляются на длительное время, и только малая часть наблюдательного времени выделяется для наблюдений транзиентных явлений, для эффективной реализации этих возможностей требуется тщательное предварительное планирование наблюдений. Важность систематизации и анализа

доступных, в настоящее время данных наблюдений рентгеновских транзиентов, для планирования будущих наблюдений трудно переоценить.

С другой стороны, детальная информация о свойствах переменности компактных рентгеновских источников во всем интервале временных масштабов необходима при разработке новых рентгеновских мониторов. Наличие такой информации может существенно повлиять на выбор схемы эксперимента.

Цель работы

Исследование различных аспектов переменности компактных рентгеновских источников. Изучение распределения и состава быстрых рентгеновских транзиентов по архивным данным большого числа различных экспериментов. Исследование пекулярных рентгеновских транзиентов на сверх-долгих (месяцы-годы) временных масштабах. Исследование переменности не транзиентных рентгеновских источников в широком временном диапазоне. Оптимизация рентгеновского монитора для наблюдения БРТ.

Научная новизна

В результате выполненной работы получен ряд оригинальных результатов, в том числе:

- Впервые получено соотношение между интегральным потоком и частотой возникновения БРТ - $\log(N)-\log(S)$ - в широком диапазоне интегральных потоков. Показано, что распределение имеет степенную форму, причем степенной индекс глобального распределения БРТ определяется суперпозицией вкладов различных классов источников. Определены классы вероятных источников БРТ.
- По данным спутников Ginga, BeppoSAX, BATSE, WATCH/Granat, RXTE, показано, что особый тип рентгеновских вспышек - рентгеновские вспышки, похожие по своим свойствам на гамма-всплески, но проявляющие себя в рентгеновском диапазоне - могут являться членами той же популяции, что и

гамма-всплески. Вклад рентгеновских вспышек, вызванных гамма-всплесками, в распределение $\log(N)-\log(S)$ БРТ максимален в области средних потоков $\sim 3 \cdot 10^{-5}$ эрг/см².

- Получено ограничение на число рентгеновских всплесков I-рода от рентгеновских барстеров с постоянной светимостью $L_x \leq 1-2\%$ от Эддингтоновской. Отсюда можно либо получить ограничение на число рентгеновских барстеров с малым темпом аккреции, либо на частоту возникновения рентгеновских всплесков I-рода от таких источников.
- В спектрах мощности маломассивных рентгеновских двойных систем на низких частотах $f \sim 10^{-8} - 10^{-3}$ Гц был найден слом, ниже которого спектр мощности становится плоским, а выше частоты слома спектр мощности описывается степенным законом вида $P_\nu \propto \nu^{-1}$. Величина частоты слома коррелирует с величиной орбитальной частоты системы $f_{break}/f_{orb} \sim 0.2-2$. В предположении, что частота слома соответствует вязкостному масштабу времени аккреционного диска $f_{break} = 1/t_{visc}$, можно определить характеристики внешних областей аккреционного диска и периода двойной системы. Оценено отношение толщины диска к его радиусу. Оно составляет $H_d/R_d \geq 0.1$, что значительно больше, чем предсказывает стандартная теория.
- Исследованы долговременные кривые блеска двух пекулярных рентгеновских источников - рентгеновского барстера 4U 1724-307 в шаровом скоплении Терзан 2 и рентгеновской Новой, галактического микроквзара, кандидата в черные дыры - ХТЕ J1550-564. Обсуждены механизмы возникновения пекулярных кривых блеска на больших временных масштабах.

Научная и практическая ценность работы

Изучение особенностей переменности рентгеновского излучения является ключевым фактором как для понимания процессов формирования рентгеновского излучения, так и для выяснения свойств самих компактных объектов. Изучение функции распределения и состава БРТ дает возможность проводить детальный анализ свойств их составляющих классов. Исследование пекулярных рентгеновских

транзиентов на сверхдолгих (месяцы-годы) временных масштабах дает возможность провести критический тест ряда теоретических моделей, описывающих их поведение. Регулярные наблюдения слабопеременных рентгеновских источников в широком интервале временных масштабов дают возможность исследовать процессы переменности рентгеновского излучения на временных масштабах сравнимых и дольше характерного вязкого времени аккреционного диска. Это, в свою очередь, открывает возможность оценить такие параметры аккрецирующего источника как размер диска и его толщина на внешней границе, и дает шанс получать информацию о глобальных параметрах таких источников, например, оценить размеры двойной системы.

Детальная информация о переменности компактных рентгеновских источников на малых и больших временных масштабах необходима при разработке новых и оптимизации существующих рентгеновских мониторов. Наличие такой информации может существенно повлиять на выбор схемы эксперимента или оптимизацию его параметров. Данные наблюдений о переменности компактных рентгеновских источников, являются также крайне важными при планировании наблюдений таких астрофизических обсерваторий как «ХММ-Ньютон», «Чандра», «Интеграл», RXTE.

Полученные результаты могут быть использованы в работе ИКИ РАН, ГАИШ МГУ, ФТИ РАН, ГАО РАН, САО РАН, МИФИ.

Апробация работы

Результаты, полученные в диссертации, докладывались на международных научных конференциях “Small Missions for Energetic Astrophysics: Ultraviolet to Gamma-Ray” (Лос Аламос, США, 1999), “Gamma-ray Bursts, 5th Huntsville Symposium” (Хантсвилл, США, 2000), Всероссийской конференции «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра» (Москва, 2001, 2002, 2003), конференции Американского астрономического общества (Рочестер, США, 2000, Сан Диего, США, 2001), конференции Американского физического общества (Альбукерке, США, 2002). Выполненные исследования также докладывались на астрофизических семинарах в ИКИ РАН, Лос Аламосской национальной лаборатории, космическом

центре им. Годдарда, Институте астрофизики общества им. Макса Планка в Гаршинге.

По теме диссертации опубликовано 14 работ.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, 3-х частей, разбитых на 8 глав, заключения и приложения. Объем диссертации - ??? страниц, в том числе ??? рисунков и ??? таблиц. Список литературы содержит 190 ссылок.

Содержание работы

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

Первая часть диссертации состоит из трех глав и посвящена исследованию свойств быстрых рентгеновских транзиентов (БРТ) – коротких, но энергичных транзиентных явлений, происходящих на малых масштабах времени (секунда – день). В ***1-й главе***, используя архивные данные большого числа различных экспериментов, найдены параметры распределения БРТ вида $\log(N)-\log(S)$ между частотой возникновения БРТ и их интегральным потоком. Обсуждается форма распределения $\log(N)-\log(S)$ и предлагаются наиболее вероятные классы источников, вносящих вклад в данное распределение. Полученное распределение показано на рис. 1. В ***главе 2*** детально обсуждается рентгеновское излучение гамма-всплесков, связь между гамма-всплесками и БРТ и проводится оценка доли БРТ, вызванных гамма-всплесками. На рис. 2, 3 показаны ожидаемые интегральные потоки рентгеновского излучения, произведенного классическими гамма-всплесками и их вероятный вклад в распределение БРТ. В ***главе 3*** получено ограничение на число рентгеновских всплесков I-рода от рентгеновских барстеров с постоянной светимостью $L_X \leq 1-2\%$ от Эддингтоновской. Из этого результата можно либо получить ограничение на число рентгеновских барстеров с малым темпом

аккреции, либо на частоту возникновения рентгеновских всплесков I-рода от таких источников.

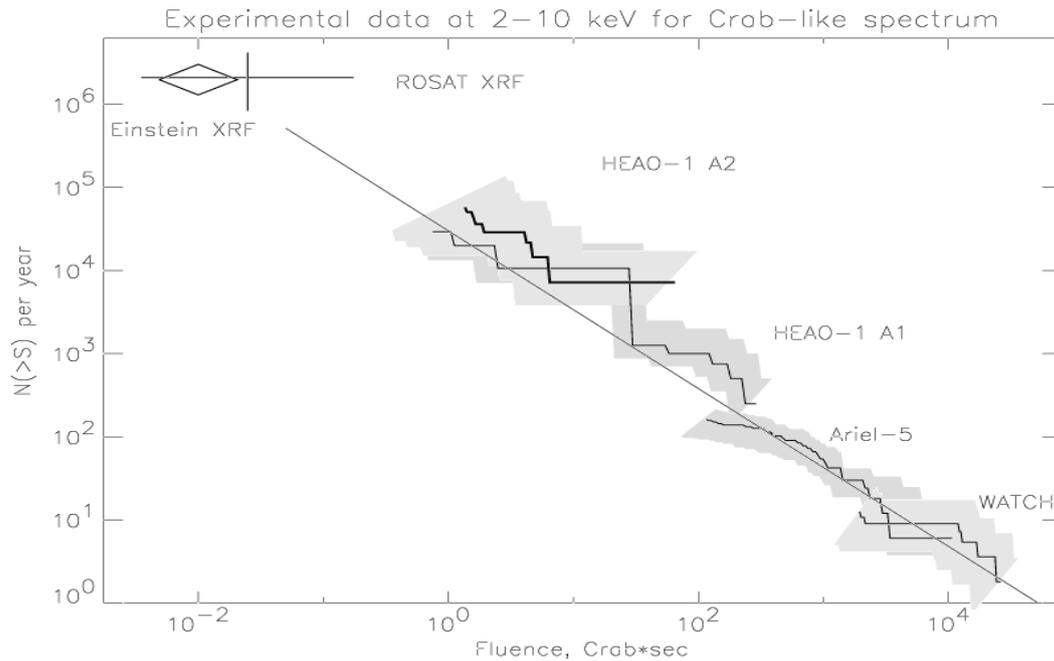


Рис. 1. Распределение $\log(N)\text{-}\log(S)$ быстрых рентгеновских транзиентов. Закрашенные участки, – данные наблюдений – показывают области, включающие статистические и систематические ошибки, определенные по индивидуальным экспериментам. Сплошная прямая линия – наилучшая аппроксимация наблюдаемого распределения БРТ вида $N(>S) = N_0 * S^{-\alpha}$, где $N_0 = 4 * 10^{-4}$ $\alpha = 0.95$.

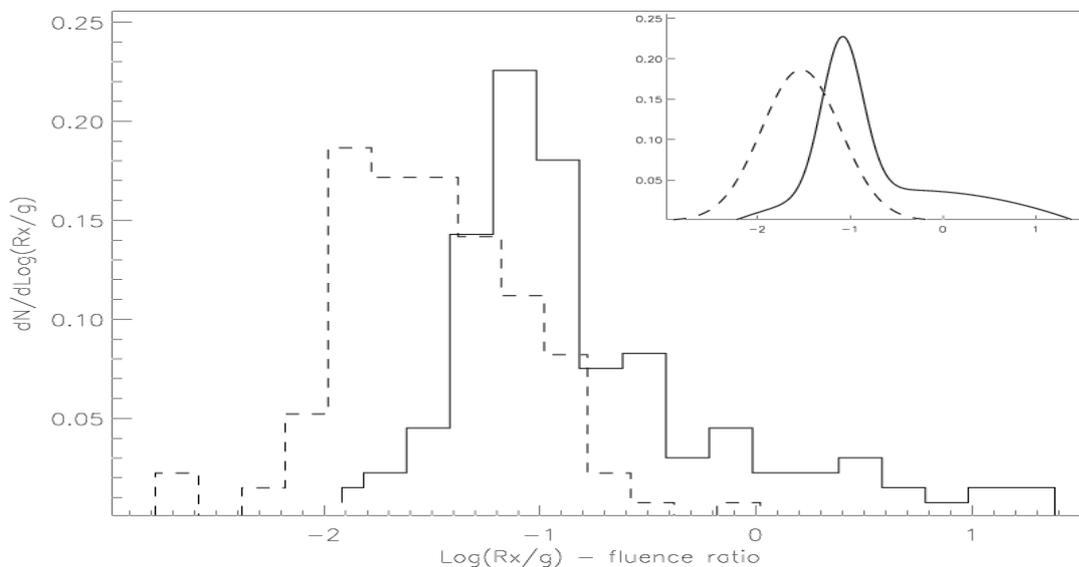


Рис. 2. Экспериментально измеренное отношение полного потока мгновенного рентгеновского излучения к излучению в гамма-диапазоне (сплошная линия); теоретически предсказанное отношение на основе данных, полученных в гамма-диапазоне (штриховая кривая). На врезке в углу показаны аналитические аппроксимации нормальным распределением и суммой нормального распределения и квадратичного полинома.

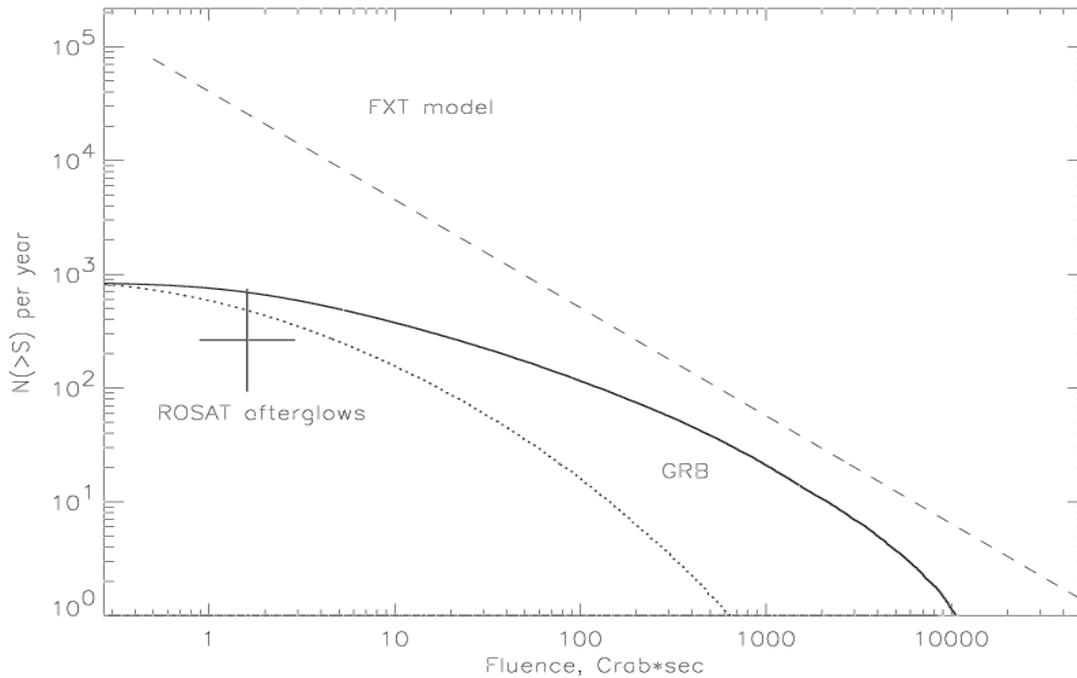


Рис. 3. Вклад гамма-всплесков в ожидаемое распределение $\log(N)-\log(S)$ для БРТ. Прерывистая прямая соответствует наилучшей аппроксимации распределения БРТ (рис.1.). Сплошная и пунктирная кривые показывают величины распределения рентгеновских вспышек от гамма-всплесков, для различных моделей генерации рентгеновского излучения гамма-всплеском. Крест показывает оценку числа таких вспышек по данным ROSAT.

Вторая часть диссертации состоит из четырех глав и посвящена переменности компактных рентгеновских источников на больших временных масштабах. В **главе 4** исследована долговременная переменность рентгеновского излучения ряда слабопеременных маломассивных двойных. В их спектрах мощности на низких частотах имеется слом (рис. 4), причем величина частоты слома коррелирует с орбитальным периодом двойной системы (рис. 5). Показано, что величина частоты слома в спектре мощности рентгеновского излучения может дать важную информацию о структуре внешних частей аккреционного диска. В **главе 5** исследована переменность пекулярного рентгеновского барстера *4U 1724-307* за 30 лет наблюдений (рис. 6.). В **главе 6** исследована долговременная переменность пекулярной рентгеновской Новой, галактического микроквара - XTE J1550-564. В отличие от обычных рентгеновских Новых, содержащих черные дыры, XTE J1550-564 продемонстрировал последовательность из нескольких вспышек, с уменьшающейся энергетикой, причем в каждой последующей вспышке спектральная эволюция рентгеновского излучения существенно упрощалась. В **главе 7** представлены наблюдения постоянного излучения рентгеновских барстеров с

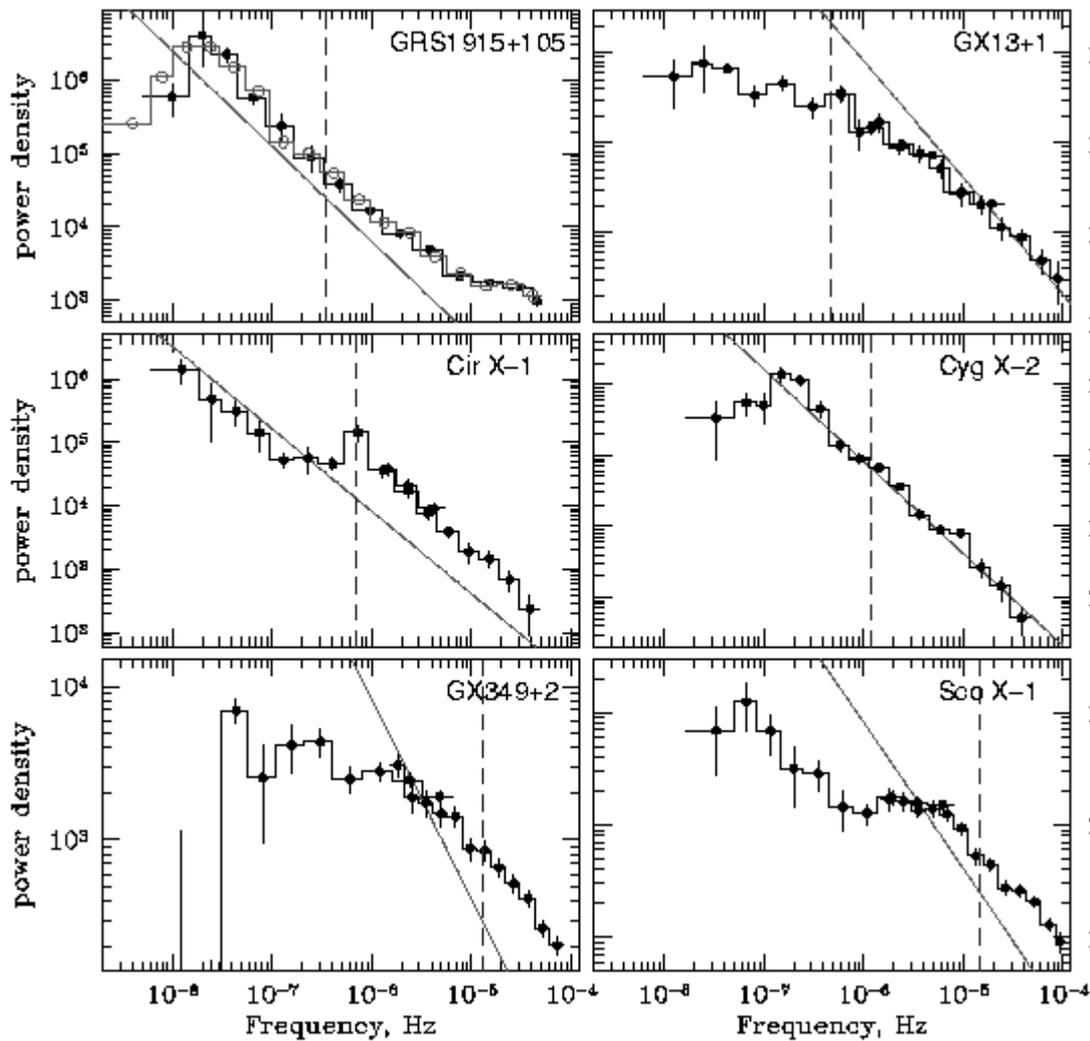


Рис. 4. Спектры мощностей долгопериодических LMXB по данным рентгеновского монитора ASM/RXTE. Сплошная тонкая прямая соответствует степенному спектру вида $P_\nu = 10^{-4} \nu^{-1.3}$. Пунктирная линия соответствует значению орбитальной частоты системы.

постоянной малой светимостью. Это источники того же типа, поиск рентгеновских всплесков от которых был проведен в *главе 3*. Показано, что на протяжении ~ 20 лет эти источники не демонстрировали длительных эпизодов со светимостью, превышающей Эддингтоновскую более чем на несколько процентов.

Третья часть состоит из одной главы. В ней приводятся результаты моделирования и предложения по оптимизации рентгеновского монитора MOXE по данным, полученным в *первой части*.

В *заклучении* перечислены основные результаты, полученные в диссертации, и кратко сформулированы направления дальнейших исследований. В

приложении даны список сокращений и краткое описание основных характеристик астрофизических приборов, чьи данные использовались в работе над диссертацией.

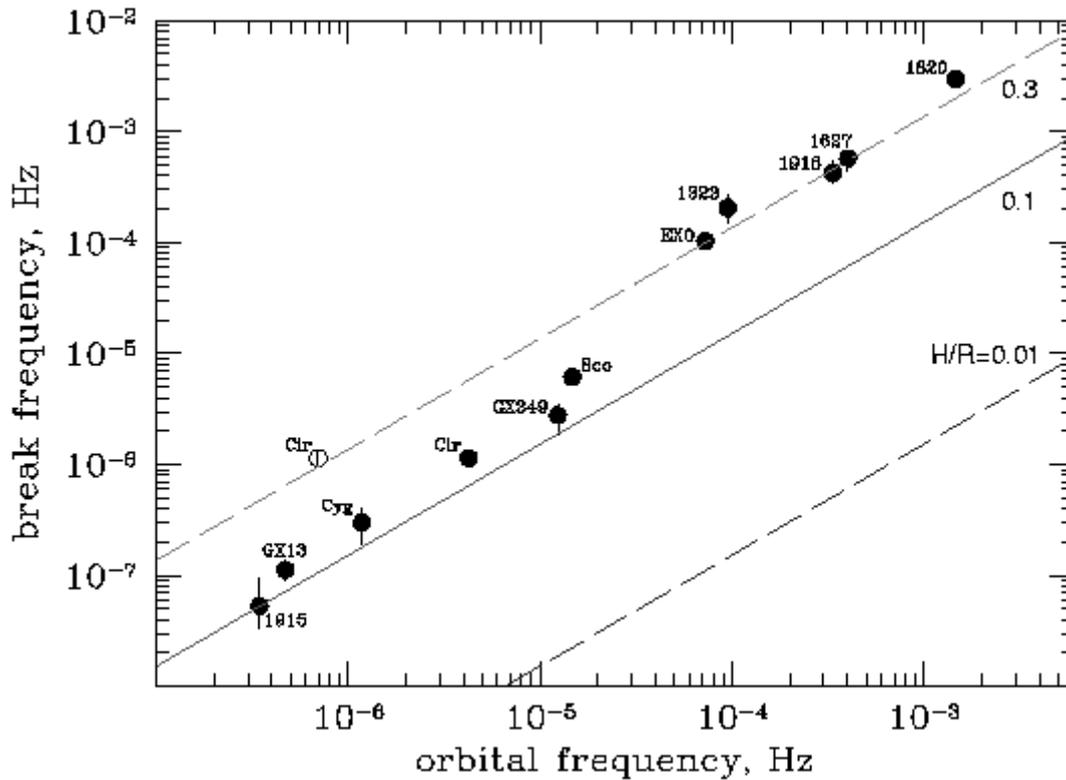


Рис. 5. Связь между частотой слома в спектре мощности и орбитальной частотой двойной системы. Прямые сплошная и прерывистые линии показывают ожидаемую зависимость f_{visc} от f_{orb} для различных относительных толщин диска H_d/R_d , предполагая, что $\alpha=0.5$, $q=0.5$ и $R_d/a=0.4$. Где α - безразмерный параметр, $q=M_{\text{opt}}/M_X$ - отношение масс оптического и компактного объектов, R_d/a - отношение радиуса аккреционного диска к расстоянию между компонентами двойной системы.

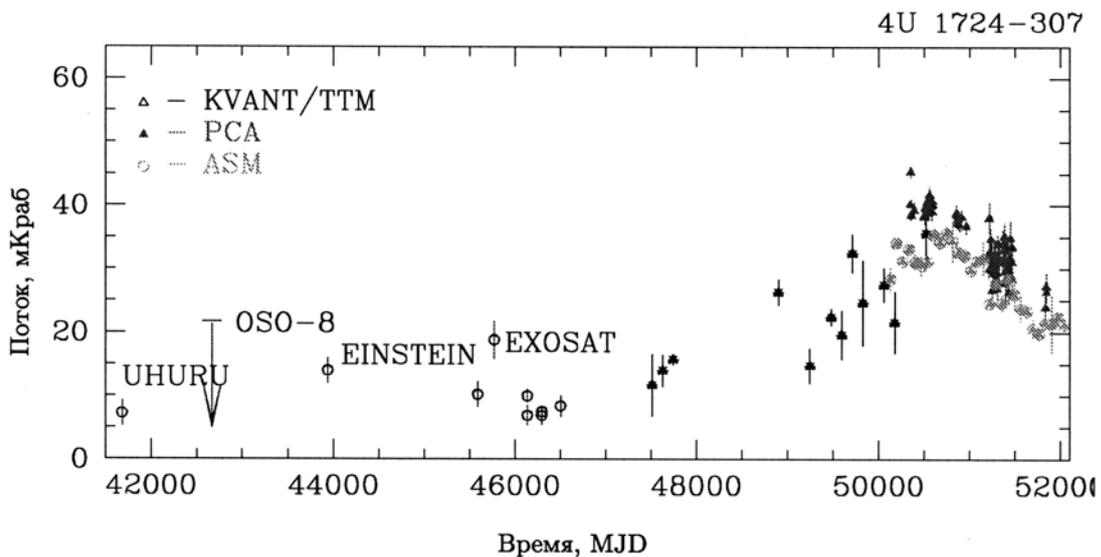


Рис. 6. Кривая блеска в рентгеновском диапазоне барстера 4U1724-307, расположенного в шаровом скоплении Терзан 2. Получена по данным наблюдений ряда обсерваторий в 1973-2001 годах.

Основные результаты, выносимые на защиту

- Впервые получено соотношение $\log(N)-\log(S)$ между интегральным потоком и частотой возникновения быстрых рентгеновских транзиентов (БРТ) в широком диапазоне интегральных потоков. Найдено, что оно описывается степенным законом с показателем $\alpha = -1_{-0.3}^{+0.2}$
- Показано, что степенной индекс $\log(N)-\log(S)$ распределения БРТ определяется суперпозицией вкладов различных классов источников, с различной внутренней светимостью. Определены классы вероятных источников БРТ. Наиболее многочисленными источниками БРТ являются энергичные звездные вспышки от различных типов магнитных звезд и рентгеновское излучение от гамма-всплесков. Показано, что наклон функции $\log(N)-\log(S)$ в случае магнитных звезд определяется внутренним распределением интенсивности вспышек в самом источнике, а не пространственным распределением источников.
- Показано, что особый тип рентгеновских вспышек - рентгеновские вспышки, похожие по своим свойствам на гамма-всплески, но проявляющие себя в рентгеновском диапазоне - могут являться членами той же популяции, что и классические гамма-всплески. По данным спутников Ginga, BeppoSAX, BATSE, WATCH/Granat, RXTE, получено распределение зависимости $R_{X/\gamma}$ полного потока излучения гамма-всплесков в рентгеновском диапазоне (2-10 кэВ) от полного потока в гамма-диапазоне (50-300кэВ) для классических гамма-всплесков. Оценен вклад рентгеновских вспышек, вызванных гамма-всплесками, в распределение $\log(N)-\log(S)$ БРТ и показано, что он максимален для событий с полным потоком около $3 \cdot 10^{-5}$ эрг/см².
- Получено ограничение на число рентгеновских всплесков I-рода от рентгеновских барстеров с постоянной светимостью $L_X < 1-2\%$ от Эддингтоновской. Отсюда можно либо получить ограничение на число рентгеновских барстеров с малым темпом аккреции, либо на частоту

возникновения рентгеновских всплесков I-рода от таких источников. Показано, что рентгеновские барстеры с малым темпом аккреции не могут давать заметный вклад в функцию $\log(N)$ - $\log(S)$ БРТ.

- По данным рентгеновского монитора RXTE/ASM и детектора EXOSAT/ME в широком временном диапазоне исследованы переменность рентгеновского излучения 12 маломассивных двойных систем. В спектрах мощности 11 из этих систем на низких частотах $f \sim 10^{-8} - 10^{-3}$ Гц был найден слом, ниже которого спектр мощности становится плоским, а выше частоты слома спектр мощности описывается степенным законом вида $P_\nu \propto \nu^{-1}$. Величина частоты слома коррелирует с величиной орбитальной частоты системы $f_{break}/f_{orb} \sim 0.2-2$.
- В предположении, что частота слома соответствует вязкостному масштабу времени аккреционного диска $f_{break} = 1/t_{visc}$, можно определить характеристики внешних областей аккреционного диска и периода двойной системы. Оценено отношение толщины диска к его радиусу. Оно составляет $H_d/R_d \geq 0.1$, что значительно больше, чем предсказывает стандартная теория.
- Исследованы долговременные кривые блеска двух пекулярных источников - рентгеновского барстера 4U 1724-307 в шаровом скоплении Терзан 2 и рентгеновской Новой, галактического микроквара, кандидата в черные дыры - XTE J1550-564. Обсуждены механизмы возникновения пекулярных кривых блеска на больших временных масштабах.

Список основных публикаций по теме диссертации

1. Arefiev V., Priedhorsky W., Borozdin K., *Fast X-Ray Transients and Their Connection to Gamma-Ray Bursts*.// *Astrophys.Journal*, 2003, v. 586, p.1238
2. Емельянов А.Н., Арефьев В.А., Чуразов Е.М., Гильфанов М.Р., Сюняев Р.А., *Дефицит рентгеновских всплесков I-рода от двойных систем с малым темпом аккреции. Данные телескопа TTM/COMIS обсерватории «Мир-Квант»*.// *Письма в АЖ*, 2001, т.27, №12, стр.781

3. Арефьев В.А., Гильфанов М.Р., *Долговременная переменность рентгеновского излучения маломассивных в двойных системах.*// Электронный журнал «Исследовано в России», 2004, <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2004/>
4. Емельянов А.Н., Ревнивцев М.Г., Арефьев В.А., Сюняев Р.А., *Десятилетний пик рентгеновского потока барстера 4U 1724-307 в шаровом скоплении Терзан 2: эволюция звезды-донора или влияние третьей звезды?*// Письма в АЖ, 2002, т.28, №1, стр.14
5. Арефьев В.А., Ревнивцев М.Г., Лутовинов А.А., Сюняев Р.А., *Широкополосный рентгеновский спектр XTE J1550-564 во время вспышки 2003 г.*// Письма в АЖ, 2004, т.30, №10, стр.736
6. Арефьев В.А., Александрович Н.Л., *Рентгеновские всплески первого рода из «пустых мест» - индикаторы «слабоаккрецирующих» барстеров?*// Письма в АЖ, 2004, т.30, №2, стр.105.
7. Borozdin K. N., Friedhorsky W. C., Arefiev V. A., Kaniovsky A. S., Black K., Brandt S., *Wide-Field All-Sky Monitor for X-Ray Astronomy*// Small Missions for Energetic Astrophysics : Ultraviolet to Gamma-Ray : Los Alamos, New Mexico. Edited by Steven P. Brumby. Melville, N.Y.: AIP, 1999. AIP Conference Proceedings, v. 499., p. 20
8. Арефьев В.А., Бугров В.П., Давиденко Н.И., Карпов Ю.М., Копылевич Н.М., Перьков А.И., Федотов С.Н., Шарак М.П. *Позиционно-чувствительный гамма-спектрометр.*// Приборы и техника эксперимента, 1990, №3, стр.196
9. Арефьев В.А., Бугров В.П., Волчанский А.В., Гуров А.Ю., Короткова Е.В., Перьков А.И., Федотов С.Н., Шарак М.П., *Гамма-телескоп с одномерной кодированной апертурой.*// Приборы и техника эксперимента, 1990, №4, стр. 61