

На правах рукописи

Михаил Геннадьевич Ревнивцев

**Обзоры неба с обсерваторий ИНТЕГРАЛ и
RXTE: природа рентгеновского фона Галактики
и переменности излучения черных дыр и
нейтронных звезд**

01.03.02 Астрофизика и радиоастрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва, 2006

Работа выполнена в Институте космических исследований РАН.

Официальные оппоненты:

доктор физ.-мат. наук
академик РАН

Черепашук А.М.

доктор физ.-мат. наук
член-корреспондент РАН

Кочаровский В.В.

доктор физ.-мат. наук
член-корреспондент РАН

Шустов Б.М.

Ведущая организация:

Специальная Астрофизическая Обсерватория РАН (г.Нижний Архыз)

Защита диссертации состоится 28 декабря 2006 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 002.113.02 при Институте космических исследований РАН по адресу: 117997 Москва, ул.Профсоюзная 84/32, ИКИ РАН, подъезд 2, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИКИ РАН.

Автореферат разослан 28 ноября 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.113.02
кандидат физ.-мат. наук

А.Ю.Ткаченко

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Рентгеновский фон Галактики

Одним из важнейших вопросов рентгеновской астрофизики является проблема происхождения фонового рентгеновского излучения Галактики. Первые же систематические исследования излучения Галактики на высоких энергиях (в рентгеновском и гамма-диапазонах) показали, что наряду с яркими компактными источниками – аккрецирующими черными дырами и нейтронными звездами – вдоль галактической плоскости присутствует некое протяженное излучение. Исследования этого излучения в гамма-диапазоне показали, что оно формируется в результате взаимодействия частиц космических лучей высоких энергий с веществом межзвездной среды. Однако, эта модель не могла объяснить фоновое излучение Галактики в рентгеновском диапазоне энергий. Исследования рентгеновского фона Галактики, проводившиеся при помощи практически всех рентгеновских обсерваторий, начиная с 80х годов, так и не позволили решить вопрос о его природе.

Спектр излучения рентгеновского фона Галактики очень похож на спектр излучения оптически тонкой плазмы и содержит большой набор эмиссионных линий, характерных для излучения сильно ионизированных тяжелых элементов, что указывает на то, что температура излучающей плазмы не менее, чем 5-10 кэВ. Различные оценки полной светимости Галактики в фоновой (распределенной) компоненте сходятся на значениях $\sim 1-2 \times 10^{38}$ эрг/с .

Сразу после открытия излучения галактического рентгеновского фона (ГРФ) была предложена модель его формирования в результате сложения излучения большого числа слабых галактиче-

ских источников, таких как катаклизмические переменные (CV), коронально активные звезды (AB), двойные системы с нейтронными звездами и черными дырами в выключенном состоянии и т.д. Однако, ввиду отсутствия информации хотя бы ограниченной полноты о свойствах популяций этих галактических источников, сделать оценку их вклада в излучение рентгеновского фона Галактики было невозможно.

Если рентгеновский фон Галактики состоит из точечных источников, то при наличии приборов необходимой чувствительности и с достаточным угловым разрешением весь поток галактического фонового излучения можно разрешить на конечное (возможно, большое) число отдельных источников. По мере улучшения чувствительности рентгеновских телескопов действительно все большая часть фонового излучения оказывалась разрешенной на точечные источники, однако даже рентгеновские телескопы обсерваторий последнего поколения ЧАНДРА и XMM-Ньютон, достигшие предела детектирования точечных источников на уровне $F_x > 3 \times 10^{-15}$ эрг/с/см² в энергетическом диапазоне 2-8 кэВ, не позволили разрешить более 10–15% фонового излучения в области галактической плоскости. Результаты этих измерений были использованы в качестве свидетельства того, что фоновое рентгеновское излучение Галактики нельзя разрешить на точечные источники, и оно представляет собой диффузное излучение, возникающее в межзвездной среде Галактики.

Однако, гипотеза о диффузном/межзвездном происхождении ГРФ наталкивается на значительные теоретические трудности. Основная проблема связана с тем, что температура плазмы, которая, по всей видимости, создает излучение ГРФ, настолько высока ($\sim 5 - 10$ кэВ), что гравитационный потенциал Галактики не может ее удерживать вблизи галактической плоскости и такая плаз-

ма должна формировать постоянный отток вещества. Для того, чтобы восполнить резервуар горячей плазмы в Галактике, необходимо очень большое количество энергии – порядка 10^{43} эрг/с.

Из-за небольшой поверхностной яркости ГРФ в области плоскости Галактики для качественных исследований требуются большие времена наблюдений даже рентгеновскими обсерваториями последнего поколения. Для того, чтобы оценить вклад собственно галактических источников в излучение ГРФ в области галактической плоскости необходимо избавиться от вклада внегалактических источников (в основном – активных ядер галактик), которые, как показали наблюдения, представляют более многочисленную популяцию при достигнутых чувствительностях. Поскольку на масштабах полей зрения современных рентгеновских телескопов ($\sim 0.1 - 0.2^\circ$) поверхностная плотность внегалактических объектов может сильно варьироваться, то очень сложно предсказать их число в конкретном обзоре. Определение же природы всех объектов в обзорах галактической плоскости представляет собой практически нерешаемую задачу из-за сложностей наблюдений объектов в этой области в оптическом диапазоне. Таким образом, определить кривую подсчетов галактических объектов малой светимости, и, следовательно, их вклад в излучение рентгеновского фона Галактики в области галактической плоскости в настоящее время практически невозможно.

Единственная область в нашей Галактике, в которой поверхностная плотность галактических объектов гораздо выше, чем поверхностная плотность внегалактических источников – это ближайшие ~ 10 угловых минут вокруг сверхмассивной черной дыры Стрелец А* в центре Галактики (так называемая область центрального звездного кластера). Наблюдения этой области также еще ценны тем, что здесь объемная плотность галактических ис-

точников настолько велика, что практически все источники, регистрируемые в этом направлении, являются галактическими и расположены в одном месте, в области центра Галактики. В этом случае исчезает проблема определения расстояния до источников и пересчета их потоков в светимость. При помощи наблюдений рентгеновского телескопа обсерватории ЧАНДРА этой области было показано, что кривая подсчетов слабых рентгеновских источников, и, следовательно, их функция светимости растет в сторону низких светимостей и вплоть до значений $\sim 10^{32}$ эрг/с не имеет уплощения. Это является серьезным указанием на то, что в Галактике существует большое количество источников с малыми светимостями, которые, возможно, и дают фоновое рентгеновское излучение Галактики.

Однако, ввиду того, что общее время наблюдений области галактического центра обсерваторией ЧАНДРА (имеющей в настоящее время самую высокую чувствительность детектирования точечных источников) уже сейчас составляет порядка миллиона секунд, трудно надеяться на значительный прогресс в этом направлении в ближайшее время. Таким образом, очевидна необходимость изыскать другие, альтернативные, способы решения проблемы галактического фонового излучения, что и является одной из основных задач данной диссертации.

Хаотическая переменность рентгеновских источников

Большая часть ярких источников рентгеновского излучения в Галактике является аккрецирующими системами. Это является результатом того, что именно в процессе аккреции (падения вещества на гравитирующий объект) достигается практически максимально возможная (если не считать аннигиляцию вещества) эффективность выделения энергии – при падении на нейтронную

звезду или черную дыру вещество выделяет из гравитационного поля компактного объекта энергию, эквивалентную большой доле его (падающего вещества) энергии покоя: $0.1 - 0.5 mc^2$. Нагреваясь, аккрецирующее вещество достигает температур десятки миллионов градусов и излучает рентгеновские фотоны.

Выходящее из таких областей рентгеновское излучение несет в себе “отпечаток” сильного гравитационного поля компактного объекта, и, следовательно, представляет собой природный инструмент для измерения параметров таких экзотических объектов во Вселенной, как черные дыры и нейтронные звезды, а также, для изучения поведения вещества при экстремальных условиях, реализующихся вблизи компактных объектов (температуры десятки миллионов градусов, магнитные поля $10^6 - 10^{13}$ Гаусс, большое давление излучения и т.д.)

Важность исследований переменности потока излучения на коротких временных масштабах для изучения поведения вещества при экстремальных условиях и измерения параметров компактных объектов была подчеркнута теоретиками еще в начале 70х годов. Было отмечено, что из-за чрезвычайно малого размера галактических черных дыр и нейтронных звезд (менее 10-15 км) временной масштаб переменности излучения аккреционных потоков, существующих вблизи этих объектов, может достигать миллисекунд и менее. Именно на таких временных масштабах можно ожидать проявление фундаментального отличия черных дыр от любых других объектов во Вселенной – отсутствия твердой поверхности.

Первые же исследования компактных объектов в рентгеновском энергетическом диапазоне, где аккрецирующие компактные источники излучают основную энергию, показали, что переменность потока излучения большей части источников является не

периодической, а хаотической и распределена по очень большому диапазону временных масштабов. Причины возникновения такого рода переменности долгое время оставались не ясными.

Хаотическая переменность рентгеновского излучения различных частей аккреционного потока вокруг компактного объекта (например, аккреционного диска, оптически тонкой короны над аккреционным диском, пограничного слоя между аккреционным диском и поверхностью нейтронной звезды и т.д.) может иметь различные характеристики. Например, переменность может иметь выделенные временные масштабы, или, напротив, быть распределена по большому диапазону фурье-частот. Предложенное в данной работе использование этой информации позволяет выделять из полного потока рентгеновского излучения источников спектральные компоненты, возникающие именно в интересующих исследователя областях, что в ряде случаев невозможно сделать другими способами. Таким образом можно проводить “томографические” (послойные) исследования аккреционных потоков вокруг компактных объектов и получать информацию о его структуре, о поведении в нем вещества и о параметрах компактных объектов.

Цель работы

Целью работы является решение вопроса о природе рентгеновского фона Галактики путем комплексного исследования обзоров всего неба с различных орбитальных обсерваторий, а именно: 1) изучения морфологии фонового рентгеновского излучения Галактики и 2) получения суммарной светимости всех рентгеновских источников звездного типа в Галактике. Второй целью работы, достигнутой при помощи обзоров (наблюдений большого числа)

ярких рентгеновских источников в Галактике, является объяснение природы хаотической переменности аккрецирующих компактных объектов и измерение с ее помощью параметров компактных объектов.

Научная и практическая ценность работы

В работе выполнен обзор всего неба с обсерватории RXTE, являющийся на настоящий момент самым чувствительным обзором всего неба в энергетическом диапазоне 3–20 кэВ. Полученный в результате обзора неба каталог внегалактических и галактических источников уже используется различными группами для изучения свойств популяций этих источников, а так же при поиске пеккулярных объектов рентгеновского неба.

Полученный в результате обзора спектр внегалактического рентгеновского фона является одним из немногих точных измерений, проведенных на большей части неба, и, таким образом, представляет большую практическую ценность. В настоящее время значение нормировки спектра внегалактического фона, полученное в данной работе, многими исследователями используется как эталонное.

Впервые получена функция светимости галактических источников рентгеновского излучения в широком диапазоне светимостей $10^{27} - 10^{34}$ эрг/с. Это впервые позволило оценить вклад объектов малой светимости в полное излучение Галактики в рентгеновском диапазоне.

Решен вопрос о природе рентгеновского фона Галактики, представлявший загадку для исследователей в течении более чем 25 лет. Полученные в ходе решения этой проблемы карты поверхностной яркости галактического фонового рентгеновского излу-

чения могут быть использованы при планировании и анализе наблюдений объектов в области галактической плоскости.

Предложен и развит новый метод исследования спектральной переменности ярких рентгеновских источников - метод фурье-частотной спектроскопии, с помощью которого впервые показано кардинальное различие в характере переменности оптически толстых и оптически тонких течений в аккреционном диске.

Показан практический способ отделять спектр излучения поверхности аккрецирующей нейтронной звезды от спектра аккреционного диска. Это впервые позволило получить спектр невозмущенной фотосферы аккрецирующих нейтронных звезд, что, в свою очередь, дало возможность измерить параметры нейтронных звезд. Развитие моделей структуры слоя растекания на поверхности нейтронных звезд позволит в дальнейшем получить одну из наиболее точных оценок параметров нейтронных звезд.

Апробация работы

Результаты, полученные в диссертации, представлялись на международных научных конференциях “Жизнь нейтронных звезд” (Санкт-Петербург, 2001), “Исследование быстрой рентгеновской переменности: обсерватория имени Росси и дальше” (Бостон, США, 2003), “Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра” (Москва, 2003,2005), “Процессы высоких энергий в центре Галактики” (Париж, Франция, 2005), “Астрофизика высоких энергий в горах” (Форт Вильям, Великобритания, 2005), “Релятивистская Вселенная” (Рингберг, Германия, 2006), “Скрытая Вселенная” (Москва, 2006), международном семинаре “Лебедь X-2 +/-1” (Киттила, Финляндия, 2005), на 36-ой ассамблее Международного Комитета по космическим исследованиям COSPAR (Пекин, 2006),

а также на астрофизических семинарах в Институте Космических Исследований РАН, Института астрофизики имени Макса Планка (Германия), университета Оулу (Финляндия), Лейстерского университета (Великобритания), Массачусетского технологического института, и Гарвардского университета (США).

По теме диссертации опубликовано 27 работ.

Содержание работы

Диссертация состоит из введения, двух частей и заключения. Первая часть разделена на 6 глав, вторая часть разделена на 4 главы. Одна глава в начале каждой части посвящена описанию методов анализа наблюдений, использующихся в данной части.

Объем диссертации – 230 страниц, в том числе 75 рисунков и 13 таблиц. Список литературы содержит 321 наименование.

В **первой части** диссертации приведены результаты исследования природы фонового рентгеновского излучения Галактики.

Основными “инструментами”, использовавшимися при решении этой задачи являлись обзоры всего неба с обсерваторий ИНТЕГРАЛ и RXTE. В главе 1.1 описаны основные результаты полученных обзоров. В частности, описаны основные свойства нового класса “поглощенных” источников, обнаруженных ИНТЕГРАЛом в плоскости Галактики и показано, что такие источники не могут давать значительный вклад в излучение галактического рентгеновского фона. Приведены основные свойства обзора всего неба обсерватории RXTE, описаны технические детали, связанные с детектированием источников и с точностью измерения их потоков, описана проблема наложения источников. Приведен каталог источников, обнаруженных на галактических широтах более $|b| > 10^\circ$. В случае, где это было возможно, для каждого источ-

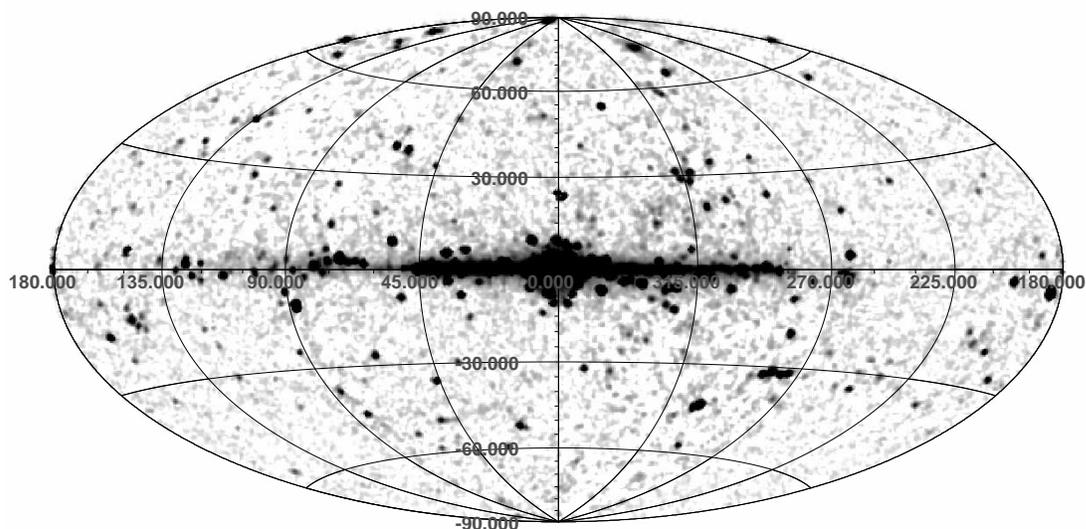


Рис. 1: Карта всего неба, полученная в обзоре неба обсерватории RXTE (энергетический диапазон 3–20 кэВ)

ника из каталога был определен его тип. Приведены результаты идентификации нескольких источников из обзора неба при помощи наблюдений обсерваторий ИНТЕГРАЛ, ЧАНДРА и SWIFT.

Приведен еще один важный результат полученного обзора неба – измерение спектра внегалактического рентгеновского фона. Измерения были проведены при помощи сравнения потоков, регистрируемых детекторами RXTE/РСА, при наблюдении темной стороны Земли и открытого неба. Полученное значение отличается от величины интенсивности рентгеновского фона, полученной ранее по измерениям обсерватории HEAO1. Для выяснения причины этого расхождения был проведен повторный анализ данных этой обсерватории. Показано, что расхождения, скорее всего, связаны с неточностями взаимных калибровок приборов обсервато-

рий RXTE и HEAO1.

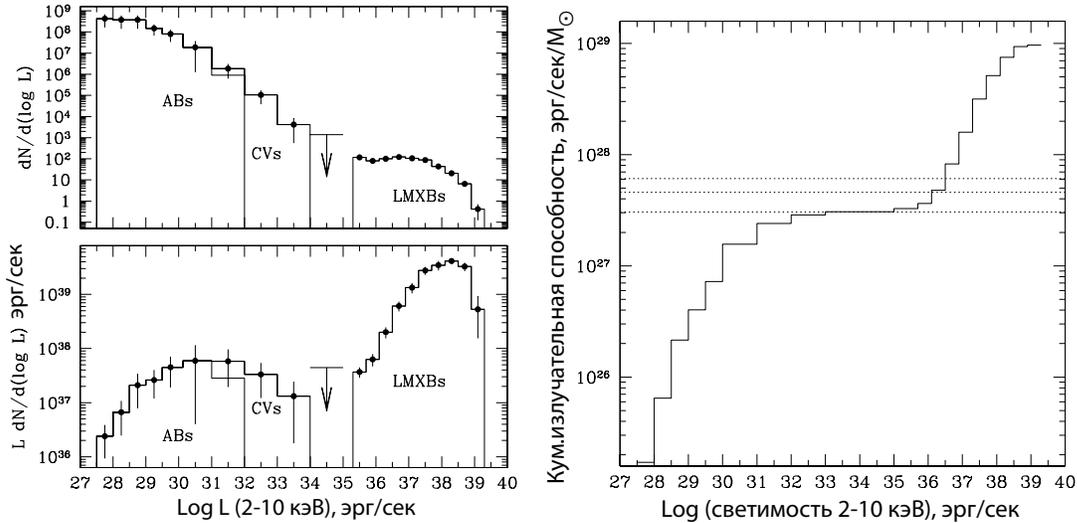


Рис. 2: Слева вверху: Функция рентгеновской светимости галактических близких двойных систем, пересчитанная на всю Галактику. Масса Галактики считалась равной $7 \times 10^{10} M_{\odot}$. Слева внизу: Удельный вклад рентгеновских источников разных типов в полную светимость Галактики. Справа: Кумулятивная излучательная способность коронально активных звезд в двойных системах, катаклизмических переменных и ярких маломассивных двойных систем с нейтронными звездами как функция верхней границы суммирования функции светимости источников. Штриховыми прямыми показаны уровни равные 100%, 150% и 200% от вклада коронально активных звезд и катаклизмических переменных.

В главе 1.2 получена функция светимости слабых галактических источников в широком диапазоне светимостей от $\sim 10^{27}$ эрг/с до $\sim 10^{34}$ эрг/с. Представлен каталог из 30 галактических источников, обнаруженных в обзоре неба обсерватории RXTE на галактических широтах $|b| > 10^{\circ}$. С использованием этого набора источников получены оценки объемных плотностей галактических источников различных классов (карликовых новых, полярнов, промежуточных полярнов, коронально активных звезд) в окрест-

ностях Солнца, имеющих светимости в интервале $L_x \sim 10^{30} - 10^{34}$ эрг/с (энергетический диапазон 3–20 кэВ). Особое внимание уделено анализу полноты используемой подборки. Для продолжения функции светимости галактических источников в диапазон $L_x < 10^{30}$ эрг/с (в основном – коронально активные и молодые звезды), не покрытый обзором неба RXTE, использовались результаты обзора всего неба обсерватории ROSAT, в частности, каталоги ближайших и ярчайших (в рентгеновском диапазоне) звезд. Показано, что функция светимости галактических источников имеет широкий пик в интервале $\sim 10^{30} - 10^{33}$ эрг/с, возникающий из-за вклада аккрецирующих белых карликов (карликовых новых, полярных, промежуточных полярных) и коронально активных звезд (см. рис.2). Получены кумулятивные излучательные способности различных классов объектов. Кумулятивная излучательная способность объектов, составляющих старое звездное население Галактики в окрестности Солнца, со светимостями менее 10^{34} эрг/с равна $L_{3-20} / = 5.3 \pm 1.5 \times 10^{27}$ эрг/с/ M_\odot . Если учесть также вклад молодых звезд, то значение кумулятивной излучательной способности будет равно $L_{3-20} / = 6.2 \pm 1.5 \times 10^{27}$ эрг/с/ M_\odot .

В главе 1.3 исследуется распределение поверхностной яркости рентгеновского фона Галактики в энергетическом диапазоне 3–20 кэВ (см. рис.3). Для того, чтобы избежать искажения получаемого распределения поверхностной яркости ГРФ из-за ярких точечных источников были использованы два метода. В рамках первого метода области, “засвеченные” яркими источниками, отфильтровывались. Во втором методе при построении карты ГРФ использовался лишь поток в эмиссионной линии 6.7 кэВ, которая является характерной для излучения ГРФ, но практически отсутствует в спектрах ярких точечных источников. Результаты, полученные

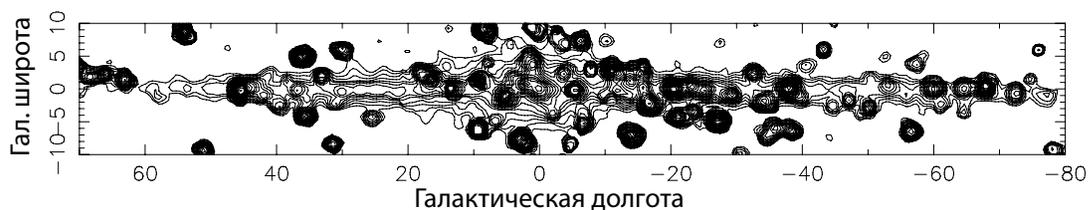


Рис. 3: Карта центральной части Галактической плоскости, полученная по данным сканирующих наблюдений спектрометра РСА обсерватории имени Росси (энергетический диапазон 3-20 кэВ). Контуры показывают области с одинаковой поверхностной яркостью. Величины поверхностных яркостей, обозначенные соседними контурами, отличаются в 1.4 раза. Минимальная поверхностная яркость, обозначенная контуром на карте, 10^{-11} эрг/с/см²/кв.град. На карте хорошо видны яркие точечные источники (многочисленные “пятна” размером $\sim 1^\circ$) и галактическое фоновое излучение, распределенное вдоль галактической плоскости.

этими двумя методами, хорошо согласуются друг с другом. Показано, что поверхностная яркость галактического рентгеновского фона формирует две области – балдж и диск. Распределение поверхностной яркости в области балджа хорошо описывается моделью трехосного эллипсоида, с размерами полуосей $\sim 3.4, 1.2$ и ~ 1.12 кпк, лежащего в галактической плоскости и составляющего с лучем зрения угол $29^\circ \pm 6^\circ$. Профили поверхностной яркости, полученные в области галактического диска, описываются моделью экспоненциального диска с характерным размером $R \sim 2.5$ кпк и характерной толщиной $z \sim 130$ пк (см. рис.4).

Показно, что распределение поверхностной яркости ГРФ хорошо согласуется с распределением поверхностной яркости Галактики в ближнем инфракрасном диапазоне, основной вклад в который дают обычные звезды (см. рис.4 и рис. 5). Сделан вывод, что объемная излучательная способность Галактики в излучении ГРФ пропорциональна объемной плотности звезд. Получено значение излучательной способности единичной звездной массы Галактики

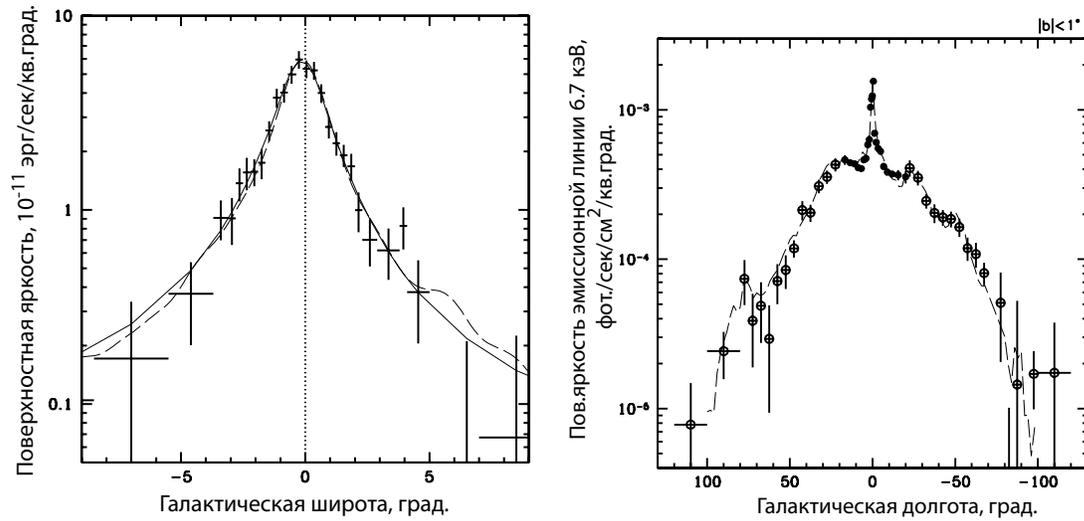


Рис. 4: Слева: Профиль поверхностной яркости рентгеновского фона Галактики (энергетический диапазон 3-20 кэВ) поперек галактической плоскости на галактической широте $l \sim 21^\circ$. Справа: Профиль поверхностной яркости рентгеновского фона Галактики вдоль галактического экватора в эмиссионной линии 6.7 кэВ. На графиках штриховой кривой показана поверхностная яркость Галактики в ближнем инфракрасном диапазоне по результатам измерений COBE/DIRBE. Сплошной кривой на левом рисунке показан профиль поверхностной яркости в модели экспоненциального диска с параметром экспоненциального спада объемной излучательной способности $z = 130$ пк.

в излучении ГРФ: $L_{3-20} / = 3.5 \pm 0.5 \times 10^{27}$ эрг/с/ \odot . Сравнение этого значения со значением кумулятивной излучательной способности, полученным в главе 1.2, позволяет заключить, что *основной вклад в фоновое рентгеновское излучение Галактики вносится излучением галактических точечных источников малой светимости, а именно, аккрецирующими белыми карликами и коронально активными звездами.*

Во **второй части** диссертации исследуется хаотическая переменность ярких рентгеновских источников – аккрецирующих чер-

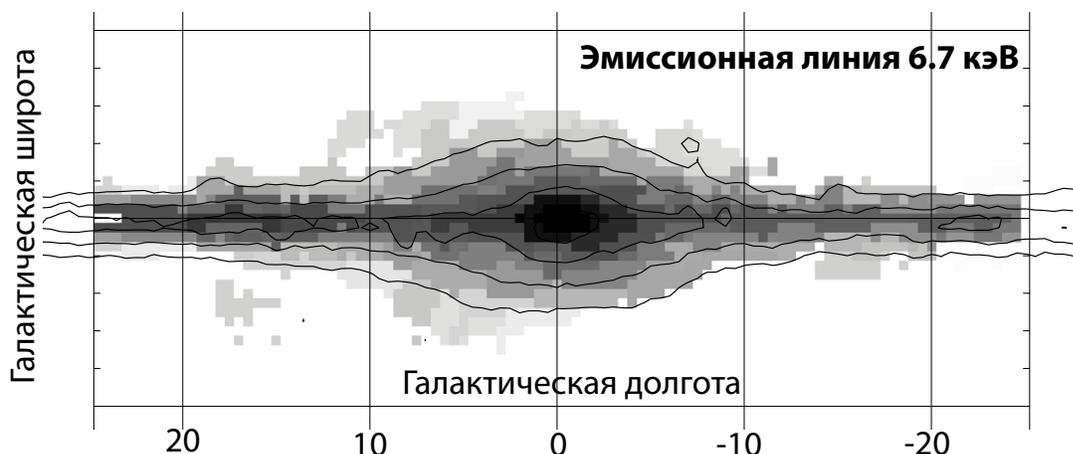


Рис. 5: Карта поверхностной яркости Галактики в эмиссионной линии 6.7 кэВ. Контурами показаны области с одинаковой поверхностной яркостью Галактики в ближнем инфракрасном диапазоне

ных дыр и нейтронных звезд.

В главе 2.1 описываются методы исследования переменности рентгеновского потока, которые будут использоваться в этой части: метод спектров мощности, метод кросс-спектров и метод фурье-частотной спектроскопии. При описании метода спектров мощности специальное внимание уделено анализу влияния эффектов “мертвого” времени и “окон перегрузки” при анализе данных спектрометра PCA обсерватории RXTE на получаемые значения мощности переменности.

В главе 2.2 предложена модель возникновения хаотических вариаций рентгеновского потока аккрецирующих черных дыр, наиболее полно объясняющая весь массив наблюдательных данных о рентгеновской переменности аккрецирующих черных дыр – модель самоподобных вариаций темпа аккреции вещества в оптически тонких областях аккреционного потока на различных рассто-

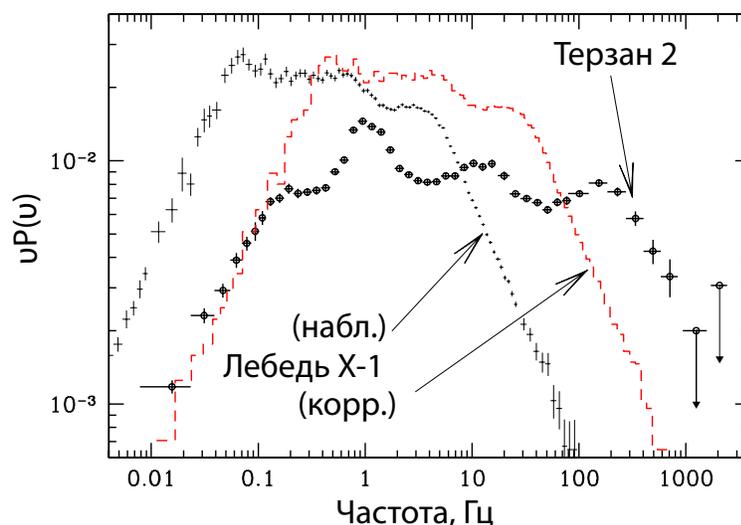


Рис. 6: Спектры мощности вариаций рентгеновского потока аккрецирующей нейтронной звезды в шаровом скоплении Терзан 2 (открытые кружки) и аккрецирующей черной дыры Лебедь X-1 (кресты). Видно, что “шум” аккрецирующей нейтронной звезды на больших частотах гораздо выше, чем у аккрецирующей черной дыры, даже после домножения масштаба частот в спектре мощности вариаций потока Лебедь X-1 на соотношение масс черной дыры и нейтронной звезды

ниях от компактного объекта. Показано, что излучение оптически толстого аккреционного диска практически не переменено на коротких временных масштабах.

В главе 2.3 исследуются самые мелкомасштабные вариации рентгеновского потока аккрецирующих нейтронных звезд и черных дыр по результатам наблюдений большого числа источников обсерваторией RXTE. Получен спектр мощности вариаций рентгеновского потока аккрецирующей черной дыры Лебедь X-1 в состоянии с низкой светимостью (так называемом “низком” состоянии, в котором амплитуда переменности его потока максимальна) с рекордной чувствительностью до фурье-частот ~ 1 кГц. Пока-

зано, в спектре мощности вариаций потока источника Лебедь X-1 происходит обрыв на частотах порядка 100-200 Гц, что указывает на то, что этот временной масштаб является минимальным, на котором еще могут развиваться сильные неустойчивости в аккреционном течении.

Проведено сравнение спектров мощности вариаций рентгеновского потока 9 аккрецирующих черных дыр и 9 аккрецирующих нейтронных звезд в “низком” спектральном состоянии. Показано, что переменность потока излучения аккрецирующих нейтронных звезд продолжается до гораздо больших фурье-частот, т.е. до гораздо меньших временных масштабов. Учет разницы в массах компактных объектов не меняет этого вывода (см. рис.6). Наблюдаемую разницу в характере переменности рентгеновского излучения этих объектов можно объяснить отсутствием твердой поверхности у аккрецирующих черных дыр, на которой в случае аккрецирующих нейтронных звезд происходит дополнительное энерговыделение и дополнительная модуляция рентгеновского потока на малых временных масштабах.

В главе 2.4 получены ограничения на параметры аккрецирующих нейтронных звезд в Галактике, используя спектр излучения пограничного слоя/слоя растекания на поверхности нейтронной звезды. Такой метод невозможно было использовать в предыдущих исследованиях из-за сложности разделения спектральных компонент излучения аккреционного диска и пограничного слоя. С использованием предложенного метода фурье-частотной спектроскопии показан практический способ разделить эти две компоненты. Полученные свойства излучения пограничного слоя на поверхности нейтронной звезды согласуются с гипотезой, что в этой области давление излучения во много раз превосходит тепловое давление плазмы, следовательно, поток энергии излучения

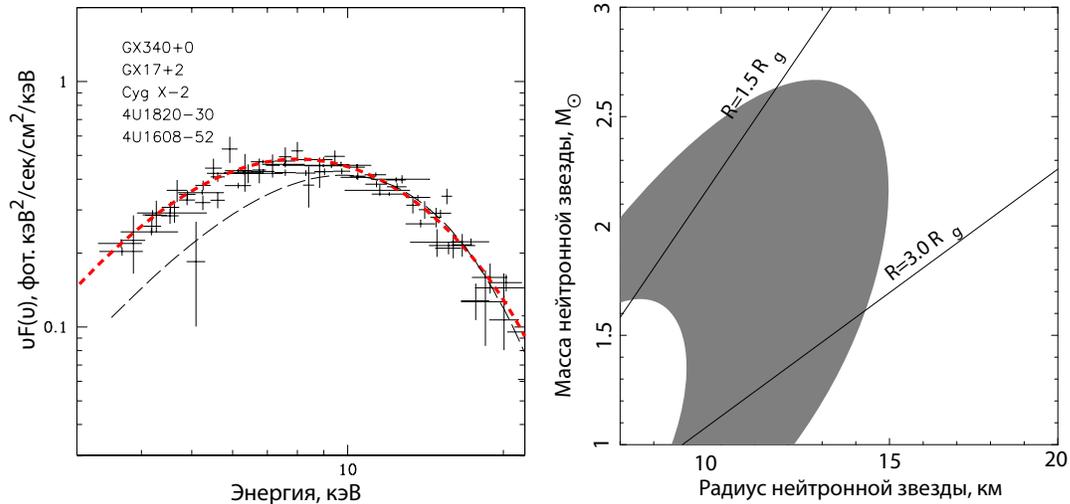


Рис. 7: Слева: Энергетические спектры аккрецирующих нейтронных звезд на фурье-частотах выше 1 Гц (\approx спектры пограничных слоев/слоев растекания на поверхности нейтронных звезд). Штриховая кривая показывает модель излучения абсолютно черного тела с температурой $kT_{\text{bb}} = 2.4$ кэВ. Справа: Ограничения на массы и радиусы нейтронных звезд в проанализированной подборке источников (левый рисунок). Прямые линии показывают области, в которых радиус нейтронной звезды равен $1.5R_g$ (радиус замкнутых фотонных орбит в Шварцшильдской метрике) и $3.0R_g$ (радиус последней устойчивой круговой орбиты в Шварцшильдской метрике)

с единичной поверхности пограничного слоя должен определяться лишь гравитационным полем нейтронной звезды. Используя измеренные параметры спектра излучения поверхности аккрецирующих нейтронных звезд, получены ограничения на их массы и радиусы (рис. 7).

Основные положения, выносимые на защиту

1. Выполнены обзоры неба с обсерваторий ИНТЕГРАЛ и RXTE в рентгеновском и жестком рентгеновском диапазонах.

2. Измерен спектр внегалактического рентгеновского фона в энергетическом диапазоне 3–20 кэВ, полученный усреднением по большей части неба.
3. Построена функция рентгеновской светимости слабых галактических источников (диапазон светимостей $10^{27} - 10^{34}$ эрг/с).
4. Решен вопрос о природе фонового рентгеновского излучения Галактики. Показано, что он в основном состоит из суммарного излучения большого количества аккрецирующих белых карликов и коронально активных звезд.
5. Предложена модель возникновения хаотических вариаций рентгеновского потока аккрецирующих нейтронных звезд и черных дыр. Показано, что эти вариации на различных временных масштабах возникают в результате самоподобных модуляций темпа аккреции вещества в аккреционном потоке на различных расстояниях от компактного объекта.
6. Исследована переменность рентгеновского потока аккрецирующих компактных объектов на самых коротких временных масштабах. Показано, что рентгеновский поток от аккрецирующих нейтронных звезд варьируется на меньших временных масштабах, чем рентгеновский поток от аккрецирующих черных дыр. Это можно интерпретировать как указание на отсутствие твердой поверхности у черных дыр в отличие от нейтронных звезд.
7. Предложен новый метод исследования характеристик излучения рентгеновских источников – Фурье-частотная спектроскопия. Этот метод дал принципиально новую возможность

отделять излучение геометрически различных областей аккреционных потоков на основании информации об их временной переменности. С помощью предложенного метода показано кардинальное различие в структуре переменности оптически толстых и оптических тонких аккреционных течений.

8. Получены ограничения на величины масс и радиусов аккрецирующих нейтронных звезд по измерениям энергетических спектров пограничных слоев/слоев растекания на их поверхностях.

Список публикаций по теме диссертации

1. Ревнивцев М.Г., Сазонов С.Ю., Мольков С.В., Лутовинов А.А., Чуразов Е.М., Сюняев Р.А., *Обзор области Галактической плоскости в созвездии Южного Креста в жестких рентгеновских лучах. Каталог источников*, Письма в Астрономический Журнал, 32, 163 (2006)
2. Ревнивцев М.Г., Лутовинов А.А., Сулейманов В.Ф., Мольков С.В., Сюняев Р.А., *Широкополосный рентгеновский спектр промежуточного поляр V2400 Ori*, Письма в Астрономический Журнал, 30, 848 (2004)
3. Ревнивцев М.Г., Сюняев Р.А., Гильфанов М.Р., Чуразов Е.М., Голдвурм А., Поль Ж., Мандру П., Рок Ж.П., *Обзор жесткого рентгеновского неба телескопа СИГМА обсерватории ГРАНАТ*, Письма в Астрономический Журнал, 30, 582 (2004)
4. Ревнивцев М.Г. *Наблюдения сильнопоглощенных источников IGR J16318-4848 и IGR J16358-4726 обсерваторией RXTE*, Письма в Астрономический Журнал, 29, 644 (2003)

5. Ревнивцев М.Г., Сазонов С.Ю., Гильфанов М.Р., Сюняев Р.А., *IGR J16318-4848: рентгеновский источник в плотной оболочке?*, Письма в Астрономический Журнал, 29, 664 (2003)
6. Revnivtsev M., Gilfanov M., *Boundary layer emission and Z-track in the color-color diagram of luminous LMXBs*, Astron.Astroph., 453, 253 (2006)
7. Revnivtsev M., Sazonov S., Gilfanov M., Churazov E., Sunyaev R., *Origin of the Galactic ridge X-ray emission*, Astron.Astroph., 452, 169 (2006)
8. Sazonov S., Revnivtsev M., Gilfanov M., Churazov E., Sunyaev R., *X-ray luminosity function of faint point sources in the Milky Way*, Astron.Astroph., 450, 117 (2006)
9. Revnivtsev M., Sazonov S., Churazov E., Trudolyubov S., *Identification of four RXTE Slew Survey sources with nearby luminous active galactic nuclei*, Astron.Astroph., 448, L49 (2006)
10. Revnivtsev M., Fabrika S., Abolmasov P., et al., *Broad band variability of SS433: accretion disk at work?*, Astron.Astroph., 447, 545 (2006)
11. Revnivtsev M., Gilfanov M., Jahoda K., Sunyaev R., *Intensity of the cosmic X-ray background from HEAO1/A2 experiment*, Astron.Astroph., 444, 381 (2005)
12. Gilfanov M., Revnivtsev M., *Boundary layer emission in luminous LMXBs*, Astronomische Nachrichten, 326, 812 (2005)
13. Suleimanov V., Revnivtsev M., Ritter H., *RXTE broadband X-ray spectra of intermediate polars and white dwarf mass*

- estimates*, *Astron.Astroph.*, 443, 291 (2005)
14. Suleimanov V., Revnivtsev M., Ritter H., *RXTE broadband X-ray spectra of intermediate polars and white dwarf mass estimates*, *Astron.Astroph.*, 435, 191 (2005)
 15. Revnivtsev M., Lutovinov A., Suleimanov V., Sunyaev R., Zheleznyakov V., *Broadband X-ray spectrum of intermediate polar V1223 Sgr*, *Astron.Astroph.*, 426, 253 (2004)
 16. Revnivtsev M. G., Churazov E. M., Sazonov S. Y., et al., *Hard X-ray view of the past activity of Sgr A* in a natural Compton mirror*, *Astron.Astroph.*, 425, L49 (2004)
 17. Revnivtsev M., Sazonov S., Jahoda K., Gilfanov M., *RXTE all-sky slew survey. Catalog of X-ray sources at $|b| > 10^\circ$* , *Astron.Astroph.*, 418, 927 (2004)
 18. Revnivtsev M., Gilfanov M., Sunyaev R., Jahoda K., Markwardt C., *The spectrum of the cosmic X-ray background observed by RXTE/PCA*, *Astron.Astroph.*, 411, 329 (2003)
 19. Revnivtsev M., *Distribution of the Galactic bulge emission at $|b| > 2^\circ$ according to the RXTE Galactic Center scans*, *Astron.Astroph.*, 410, 865 (2003)
 20. Gilfanov M., Revnivtsev M., Molkov S., *Boundary layer, accretion disk and X-ray variability in the luminous LMXBs*, *Astron.Astroph.*, 410, 217 (2003)
 21. Revnivtsev M., Gilfanov M., Churazov E., *Reflection and noise in the low spectral state of GX 339-4*, *Astron.Astroph.*, 380, 520 (2001)

22. Churazov E., Gilfanov M., Revnivtsev M., *Soft state of Cygnus X-1: stable disc and unstable corona*, MNRAS, 321, 759 (2001)
23. Revnivtsev M., Gilfanov M., Churazov E., *High frequencies in the power spectrum of Cyg X-1 in the hard and soft spectral states*, Astron.Astroph., 363, 1013 (2000)
24. Gilfanov M., Churazov E., Revnivtsev M., *Frequency-resolved spectroscopy of Cyg X-1: fast variability of the reflected emission in the soft state*, MNRAS, 316, 923 (2000)
25. Sunyaev R., Revnivtsev M., *Fourier power spectra at high frequencies: a way to distinguish a neutron star from a black hole*, Astron.Astroph., 358, 617 (2000)
26. Revnivtsev M., Gilfanov M., Churazov E., *The frequency resolved spectroscopy of CYG X-1: fast variability of the Fe K_{α} line*, Astron.Astroph., 347, L23 (1999)
27. Revnivtsev M., Borozdin K., Emelyanov A., *Timing analysis of the X-ray transient source XTE J1806-246 (2S1803-245)*, Astron.Astroph., 344, L25 (1999)

055/02/2

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

Подписано к печати . .2006

Заказ Формат 70×108/32 Тираж 100 0,9 уч.-изд.л.