

РГБ  
02

На правах рукописи

Гильфанов Марат Равильевич

**НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ ЧЕРНЫХ ДЫР, НЕЙТРОННЫХ  
ЗВЕЗД И МЕЖГАЛАКТИЧЕСКОГО ГАЗА В СКОПЛЕНИЯХ ГАЛАКТИК В  
РЕНТГЕНОВСКОМ ДИАПАЗОНЕ (ПО ДАННЫМ ОБСЕРВАТОРИЙ  
МИР-КВАНТ, ГРАНАТ И АСКА).**

01.03.02 Астрофизика и радиоастрономия

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук



Москва  
1995

Работа выполнена в Институте космических исследований Российской Академии наук

Официальные оппоненты:

д.ф.-м.н., член-корреспондент РАН

Д.А.Варшалович

д.ф.-м.н., член-корреспондент РАН

В.В.Железняков

д.ф.-м.н., профессор

А.М.Черепашук

Ведущая организация: Главная Астрономическая Обсерватория РАН, Пулково

Защита состоится 29 декабря 1995 г. в 11:30 часов на заседании диссертационного совета Д 002.94.01 в Институте космических исследований РАН, Москва 117810, ул. Профсоюзная, д. 84/32

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института космических исследований РАН

Автореферат разослан 29 ноября 1995 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

к.т.н.



В.Е.Нестеров

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы.

Большинство ярких компактных источников рентгеновского излучения в нашей Галактике являются двойными системами, состоящими из нормальной звезды и компактного объекта. Рентгеновское излучение от этих объектов обязано своим происхождением гравитационной энергии, выделяющейся при аккреции вещества, истекающего с поверхности нормальной звезды, на компактный объект. В настоящее время известно всего несколько надежных наблюдательных критериев, позволяющих выяснить природу компактного объекта в двойной системе — отличить нейтронную звезду от черной дыры. Критерием того, что компактный объект в двойной системе является нейтронной звездой могут служить детектирование рентгеновских всплесков первого типа либо пульсации рентгеновского потока. Единственным надежным критерием наличия черной дыры на настоящий момент является динамическое определение массы компактного объекта через измерение функции масс двойной системы. Общее число подтвержденных нейтронных звезд составляет несколько десятков, в то же время известно всего несколько объектов, в которых компактный объект, несомненно, является черной дырой. Среди них Лебедь X-1 и ряд рентгеновских Новых — A0620-00, Новые в созвездиях Лебеда, Мухи, Лисички и, возможно, Персея.

Наблюдения в рентгеновском и гамма-диапазоне, выполненные в конце 80-х начале 90-х гг. орбитальными обсерваториями ГИНГА, МИР-КВАНТ, РОСАТ, ГРАНАТ, ГРО и АСКА, дали огромное количество новой информации о спектральных свойствах галактических рентгеновских двойных. Возросшее качество экспериментальных данных было обусловлено несколькими причинами. Значительно улучшилось угловое разрешение в жестком рентгеновском диапазоне (точность локализации источников телескопом СИГМА обсерватории ГРАНАТ достигает 1 угл. мин., разрешающая способность — 5–10 угл. мин.), что дало возможность исследовать индивидуальные источники в наиболее "густозаселенных" областях неба. Одновременная работа сразу нескольких телескопов и обсерваторий, покрывающих различные спектральные диапазоны, позволило исследовать спектры источников в широком диапазоне энергий от десятков эВ до 1 МэВ. Непрерывная работа приборов, обзорающих все небо (ASM/GINGA, WATCH/GRANAT, BATSE/GRO), обеспечивавших почти полное покрытие небесной сферы в течение почти 100% времени,

привела к открытию многочисленных новых транзиентных источников. В частности, яркие рентгеновские Новые детектировались в последние годы с частотой  $\sim 1$  Новая в год.

Природа рентгеновских Новых связана с эпизодической аккрецией на черные дыры или нейтронные звезды в двойной системе с маломассивной видимой звездой. Важность исследования этого класса объектов для понимания физических механизмов генерации рентгеновского (жесткого и мягкого) излучения от аккрецирующих черных дыр обусловлена рядом причин. В течение нескольких месяцев после начала вспышки рентгеновские Новые являются очень яркими (как правило, ярчайшими на рентгеновском небе) объектами, что позволяет подробно исследовать многие детали их поведения. За период с момента основной вспышки и до момента исчезновения источника (падения потока ниже уровня чувствительности современных рентгеновских детекторов) светимость и, следовательно, темп аккреции изменяются на несколько порядков, предоставляя тем самым уникальную возможность исследовать поведение источника при различных режимах аккреции.

После первых спектроскопических наблюдений жесткого рентгеновского излучения от кандидатов в черные стало ясно, что наблюдаемые спектры вполне могут быть объяснены в рамках комптонизации низкочастотного излучения на горячих электронах. Впоследствии, в 80-х — начале 90-х годов, теория комптонизации успешно применялась для описания отдельных спектров индивидуальных источников. Тем не менее, комптонизации, как общей концепции, недостаточно для объяснения всей совокупности наблюдаемых свойств рентгеновских источников. По-видимому, дальнейший прогресс в теории требует расширения наших представлений о наблюдательных проявлениях аккрецирующих черных дыр и нейтронных звезд в рентгеновском диапазоне.

Новым элементом в нашем представлении о свойствах аккрецирующих черных дыр стало открытие обсерваториями ГИНГА, ГРАНАТ и ГРО квазипериодических осцилляций рентгеновского потока, в частности от Лебедя X-1. Очевидно, что "классическая" теория возникновения QPO, весьма успешно объяснявшая квазипериодические осцилляции, открытые обсерваторией EXOSAT в маломассивных двойных с нейтронными звездами, в данном случае не применима.

Открытие межгалактического газа в начале 70-х годов поставило скопления галактик в один ряд с наиболее интересными объектами рентгеновской астрономии. Совершенствование техники рентгеновского эксперимента уже сейчас (спут-

ник АСКА) позволяет строить подробные рентгеновские изображения скоплений с хорошим спектральным разрешением. Одним из важнейших вопросов, ответить на который стало принципиально возможным с запуском обсерватории АСКА, является обилие и пространственное распределение тяжелых элементов в скоплении. Сравнение наблюдаемых распределений с предсказаниями теории является мощным методом исследования астрофизической плазмы межгалактического газа.

#### Цель работы.

Исследование рентгеновских свойств компактных рентгеновских источников – аккрецирующих черных дыр и нейтронных звезд – в широком диапазоне энергий от сотен эВ до 1 МэВ. Исследование физических процессов в межгалактическом газе скоплений галактик в контексте интерпретации данных рентгеновских наблюдений.

#### Научная новизна.

Впервые представлены результаты наблюдений компактных источников рентгеновского излучения телескопом СИГМА обсерватории ГРАНАТ в жестком рентгеновском диапазоне в 1990–1995 гг.. Ряд новых результатов получен в результате совместного анализа данных одновременных наблюдений телескопов СИГМА и ТТМ и телескопов обсерватории АСКА. Предложен механизм, объясняющий возникновение квазипериодических осцилляций рентгеновского потока от кандидатов в черные дыры. Впервые указано на важность учета рассеяний в рентгеновских резонансных линиях при интерпретации наблюдений скоплений галактик в рентгеновском диапазоне.

#### Научная и практическая ценность работы.

Диссертационная работа содержит систематическое исследование рентгеновских свойств компактных рентгеновских источников – двойных систем, в которых релятивистский объект является черной дырой или нейтронной звездой. Полученные результаты необходимо учитывать при построении моделей формирования рентгеновского излучения в компактных источниках.

Ряд результатов, полученных в диссертации, был использован при планировании наблюдений орбитальных обсерваторий ГРАНАТ, МИР-КВАНТ, АСКА, ГРО и РОСАТ и наземных обсерваторий, работающих в оптическом и радио-диапазонах. Результаты точной локализации рентгеновских Новых в созвездиях Мухи, Персея и Змееносца позволили произвести оптическую идентификацию этих объектов. Ряд результатов, полученных в работе, послужил толчком для последующих наблюдений и новых открытий в оптическом, радио- и инфракрасном диапазонах. Так, напри-

мер, результаты телескопа СИГМА инициировали интенсивные спектрометрические наблюдения в оптическом диапазоне рентгеновской Новой в созвездии Мухи, что привело к определению функции масс и независимой идентификации этого объекта как черной дыры. Вслед за открытием аннигиляционной линии в спектре источника 1E1740.7-2942 последовали наблюдения этого источника на всех длинах волн, в результате чего в радиодиапазоне были открыты релятивистские джеты (впервые для источника в нашей Галактике), подобные наблюдаемым в ядрах активных галактик.

Результаты сравнительного анализа спектров нейтронных звезд и черных дыр открывают возможность для независимой от оптических наблюдений диагностики природы компактного объекта в двойных системах.

Результаты анализа влияния рассеяния резонансных фотонов на распределение поверхностной яркости в линиях ионов тяжелых элементов (в частности железа) необходимо учитывать при интерпретации данных наблюдений скоплений галактик телескопами нового поколения, подобными тем, что работают в настоящее время на борту спутника АСКА и будут работать в составе обсерватории СПЕКТР-РГ. Эти результаты могут быть использованы для независимого определения постоянной Хаббла, подобно тому как это делается при помощи эффекта Зельдовича-Сюняева.

#### Апробация результатов.

Изложенные в диссертации результаты докладывались на семинарах ИКИ РАН, ГАИШ, Центра Космических Полетов им. Годдарда (Гринбелт, США, 1993), Центра Астрофизики Смитсоновского Института (Кембридж, США, 1994, 1995), на Генеральных Ассамблеях КОСПАР (1990, 1992, 1994), на международных конференциях: "23rd ESLAB Symposium", (Болонья, Италия, 1989), "Recent Advances in High Energy Astrophysics", (Тулуза, Франция, 1992), "The Multi-Wavelength Approach to Gamma-Ray Astronomy", (Ле-Диаблере, Швейцария, 1993), "Структура Галактик и Метагалактики" (Пушино, 1993), "Lives of the Neutron Stars" (Турция, 1993), "The Evolution of X-Ray Binaries" (Марилэнд, США, 1993), "Pairs, Gamma-Rays, Black Holes" (Конинки, Польша, 1993), "Некоторые проблемы современной астрофизики" (Пушино, 1994), "New Horizon of X-Ray Astronomy" (Токио, Япония, 1994), "Гамовский Семинар" (С-Петербург, 1994) "Roentgenstrahlung from the Universe", (Вурибург, Германия, 1995) и др.

#### Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из двух частей (12 глав). Она содержит 197 стр., 105 рис. Список литературы включает 175 наименований.

## Содержание работы

**Часть I** посвящена исследованию свойств рентгеновского излучения двойных систем, одним из компонентов которых является релятивистский объект (черная дыра или нейтронная звезда) на энергиях от мягкого рентгена ( $\sim 300$  эВ) до гамма-диапазона ( $\sim 1$  МэВ). В работе использованы данные наблюдений телескопа СИГМА обсерватории ГРАНАТ, телескопа ТТМ обсерватории МИР-КВАНТ и обсерватории АСКА.

**Глава 1** – введение, кратко очерчен круг задач и современное состояние рентгеновской астрономии.

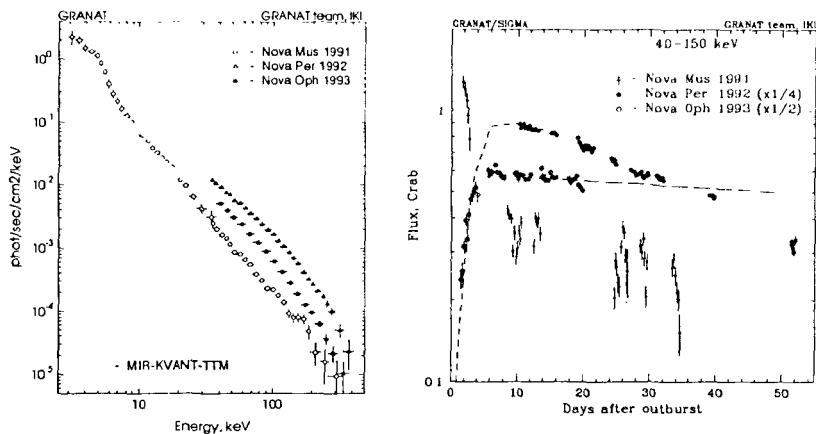
В **Главе 2** дано краткое описание телескопов СИГМА и ТТМ, типичных циклограмм наблюдений и методов обработки данных.

**Глава 3** посвящена экспериментальному (телескопы СИГМА и ТТМ) исследованию класса рентгеновских источников, называемых рентгеновскими Новыми. Природа этих объектов связана с эпизодической аккрецией на черные дыры или нейтронные звезды в двойной системе с маломассивной видимой звездой. Для ряда рентгеновских Новых оптические наблюдения дали прямые динамические свидетельства присутствия черной дыры в двойной системе – было продемонстрировано, что функция масс этих объектов превышает  $\approx 3M_{\odot}$  – теоретический верхний предел массы нейтронной звезды.

Важность исследования этого класса объектов для понимания физических механизмов генерации рентгеновского (жесткого и мягкого) излучения от черных дыр обсуждается в **разделе 3.1**.

Три очень яркие рентгеновские Новые наблюдались и были детально исследованы телескопами обсерваторий ГРАНАТ и МИР-КВАНТ.

Спектр Новой 1991 г. в созвездии Мухи – GRS1124-684 (**раздел 3.2**), наблюдавшейся телескопами АРТ-П и СИГМА, в максимуме кривой блеска характеризовался наличием двух ярко выраженных компонент (рис. 1): мягкой - ниже  $\approx 8$  кэВ, вносящей основной вклад ( $\sim 90\%$ ) в рентгеновскую светимость источника, и жесткой, почти степенной компоненты, обнаруженной до энергий  $\approx 200 - 300$  кэВ. Интенсивность мягкой компоненты в этот период менялась плавно, с характерным временем экспоненциального спада  $\approx 30$  дней, в то время как жесткая степенная компонента демонстрировала сильную переменность в шкале времен порядка нескольких часов

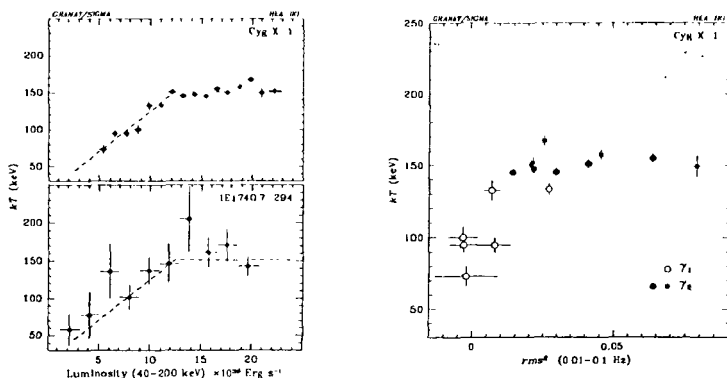


**Рисунок 1.** Широкополосные спектры и рентгеновские кривые блеска трех рентгеновских Новых, наблюдавшихся обсерваториями ГРАНАТ и МИР-КВАНТ в 1991–1993 гг.: в созвездии Мухи, Персея и Змееносца. Штриховой линией на правом рисунке схематично представлены результаты прибора BATSE обсерватории Гамма-Лучей.

и, в среднем, спадала значительно медленнее. Относительный вклад двух компонент в рентгеновскую светимость радикально менялся с изменением светимости источника — наблюдались изменения спектрального состояния источника.

В отличие от Новой в созвездии Мухи, в спектрах рентгеновских Новых в созвездиях Персея (раздел 3.4) и Змееносца (раздел 3.5) отсутствовала сколь-либо заметная мягкая спектральная компонента (рис. 1) — их спектры были подобны спектру Лебедя X-1 в низком состоянии. Рентгеновский поток спадал плавно (амплитуда относительных вариаций на масштабах часов  $\lesssim 3 - 4\%$ ). Наблюдались относительно слабые изменения формы спектра источника, скоррелированные с изменением рентгеновской светимости.

Транзиентный источник GRS/KS1730-312 (раздел 3.3), открытый телескопами СИГМА (ГРАНАТ) и ТТМ (МИР-КВАНТ) в зоне Центра Галактики, во многом подобен по своим свойствам в рентгеновском диапазоне рентгеновской Новой в созвездии Мухи и другим объектам этого класса. Можно предположить, что вспышка рентгеновского излучения от GRS/KS1730-312, наблюдавшаяся СИГММой и ТТМ в сентябре 1994 г., имеет ту же природу, что и в случае ярких рентгеновских Новых. Единственным отличием GRS/KS1730-312 от объектов, которые мы привыкли называть рентгеновскими Новыми, состоит в том, что он расположен на расстоянии в 3–5 раз дальше от нас и, в силу ограниченной чувствительности, доступной для



**Рисунок 2.** Слева: зависимость жесткости спектра от светимости в диапазоне 40–200 кэВ для Лебеда X-1 (верхний график) и 1E1740.7–2942 (нижний график, из работы Кузнецова и др., 1996). Результат аппроксимации данных для Лебеда X-1 константой с изломом показан на обоих графиках штриховой линией. Справа: Зависимость жесткости спектра от квадрата относительной амплитуды короткомасштабных аperiodических флуктуаций рентгеновского потока для источника Лебедь X-1.

наблюдений оказалась лишь самая "макушка" кривой блеска источника.

Эти объекты являются типичными представителями двух типов рентгеновских Новых, обсуждаемых в [разделе 3.6](#) (рис. 1). В этом разделе сформулированы основные различия в рентгеновских свойствах двух типов рентгеновских Новых и обсуждаются возможные причины этих различий. Основной вывод этого раздела – рентгеновские Новые двух типов характеризуются разной величиной  $\dot{M}/\dot{M}_{\text{Edd}}$  – отношения темпа аккреции к критическому (Эддингтоновскому) значению.

В [Главе 4](#) исследуются свойства рентгеновского излучения от источника Лебедь X-1 в интервале энергий от  $\sim 300$  эВ (обсерватория АСКА) до  $\sim 1$  МэВ (телескоп СИГМА). Как известно ([раздел 4.1](#)), этот объект является на сегодняшний день одним из наиболее надежных кандидатов в черные дыры. Нижний предел на массу компактного объекта, следующий из значения функции масс двойной системы, известной из оптических наблюдений, и факта отсутствия рентгеновских затмений, равен  $9.5M_{\odot}$ .

В [разделе 4.2](#) проанализирована вся совокупность данных наблюдений Лебеда X-1 в жестком рентгеновском диапазоне телескопом СИГМА с целью поиска возможных корреляций между основными характеристиками жесткого рентгеновского излучения (40–200 кэВ) – светимостью источника  $L_X$ , жесткостью спектра (которая характеризовалась температурой  $kT$  тормозного спектра, наилучшим образом

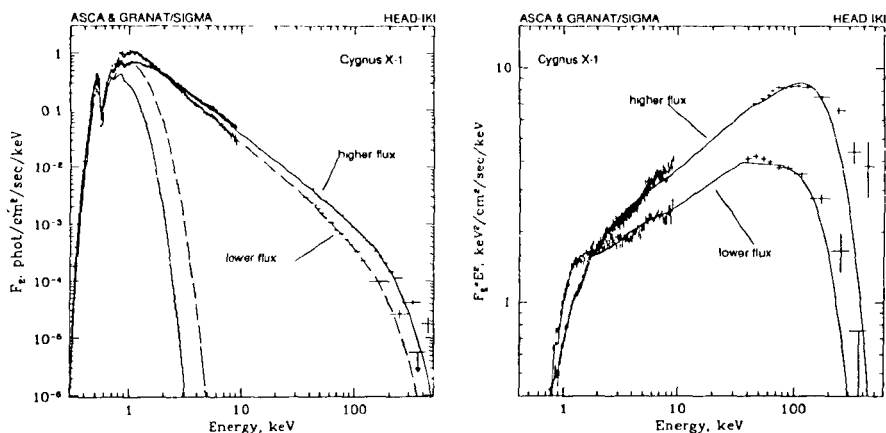
описывающего данные) и амплитудой ( $rms$ ) короткомасштабных аperiodических вариаций жесткого рентгеновского потока.

Обнаружено, что на диаграмме  $kT - L_X$  существует два различных режима поведения источника (рис.2). При низкой светимости в жестком рентгеновском диапазоне – ниже уровня, примерно соответствующего светимости в состоянии  $\gamma_1$ , – жесткость спектра возрастает с увеличением светимости. Количественно это соответствует увеличению  $kT$  от  $\approx 70$  кэВ при  $L_X \approx 0.5L_{\gamma_1}$  до  $\approx 150$  кэВ при  $L_X \approx 1.2L_{\gamma_1}$ . При светимости выше уровня  $\approx 1.2L_{\gamma_1}$  жесткость спектра практически не зависит от светимости источника и соответствует тормозной температуре  $\approx 150$  кэВ. Примечательно, что в точности такое же поведение было обнаружено в случае другого галактического кандидата в черные дыры 1E1740.7–2942 (результат получен совместно с С.Кузнецовым).

Зависимость подобного типа наблюдается между жесткостью спектра и относительной амплитудой короткомасштабных вариаций рентгеновского потока (рис.2). Увеличение  $kT$ , соответствующее возрастающей ветви на диаграмме  $kT - L_X$ , сопровождается увеличением  $rms$  от уровня, не превышающего несколько %, до  $\approx 10 - 15\%$ . Дальнейшее увеличение  $rms$  не приводит к изменению жесткости спектра и не коррелирует с вариациями светимости источника.

Обсерватория АСКА провела две серии наблюдений Лебеда X-1 в 1993 г. и 1994 г. (раздел 4.3), которые, благодаря удачному стечению обстоятельств, пришлись на состояние источника с  $\sim$  "минимальным" (возрастающая ветвь диаграммы на рис. 2) и "стандартным" (плоская часть диаграммы на рис. 2) потоком в жестком рентгеновском диапазоне. Это позволило исследовать характер изменения спектра на энергиях от  $\approx 300$  эВ  $\sim 1$  МэВ и, возможно, понять причины такого поведения источника. Изменение формы спектра источника при изменении его светимости в жестком рентгеновском диапазоне, обнаруженные СИГМой (рис. 2), распространяются и на спектр источника в стандартном рентгене – заметно меняется наклон комптонизированного спектра в интервале энергий от  $\sim 1$  кэВ до  $\sim 50 - 100$  кэВ (рис.3). Несомненно, что это является следствием изменения физических параметров в зоне формирования комптонизированного излучения – температуры горячих электронов и оптической толщи.

Важно отметить, что вместе с этим изменяются также параметры в области, где формируется мягкая спектральная компонента (оптически непрозрачная часть аккреционного диска ?). Из данных обсерватории АСКА с достаточной степенью до-



**Рисунок 3.** Спектры Лебедя X-1 в диапазоне энергий от 0.3 кэВ до 500 кэВ, полученные по данным наблюдений обсерваторий АСКА и ГРАНАТ, соответствующие состояниям с низким и высоким потоком в жестком рентгеновском диапазоне. Отдельно для каждого спектра показан вклад излучения диска, определенный по данным АСКИ.

стоверности следует, что температура мягкой спектральной компоненты и ее светимость растут с понижением светимости в жестком рентгеновском диапазоне и увеличением наклона комптонизированного спектра (рис.3). По-видимому, наблюдаемое изменение спектральных свойств источника вызвано увеличением темпа аккреции, приводящим к увеличению температуры оптически непрозрачной части аккреционного диска, что в свою очередь приводит к изменению физических параметров в зоне формирования жесткой спектральной компоненты — например, из-за увеличения потока мягких фотонов увеличиваются комптоновские потери горячих электронов, что приводит к уменьшению их температуры и, следовательно, к увеличению наклона комптонизированного спектра.

В Главе 5 рассматривается связь между присутствием мягкой компоненты в спектре аккрецирующей черной дыры и характером переменности жесткого рентгеновского потока на масштабах часов.

Раздел 5.1 посвящен поиску мягкой спектральной компоненты в спектрах аккрецирующих черных дыр в жестком (низком) состоянии на основе данных обсерватории АСКА. Показано, что для согласования результатов измерения межзвездного покраснения в направлении на Лебедь X-1 и рентгеновских данных требуется существование мягкой спектральной компоненты в спектре источника в низком (жест-

ком) состоянии. Мягкая спектральная компонента соответствует чернотельному излучению с температурой  $\sim 130 - 150$  эВ и светимостью  $\sim 10 - 25\%$  от общей рентгеновской светимости источника. Обсуждается возможность присутствия аналогичной мягкой компоненты в спектре источника 1E1740.7–2942. В то же время не обнаружено сравнимых по яркости мягких компонент в спектрах рентгеновских Новых в созвездиях Персея и Змееносца. Для этих источников получены ограничения на вклад мягкой спектральной компоненты в светимость.

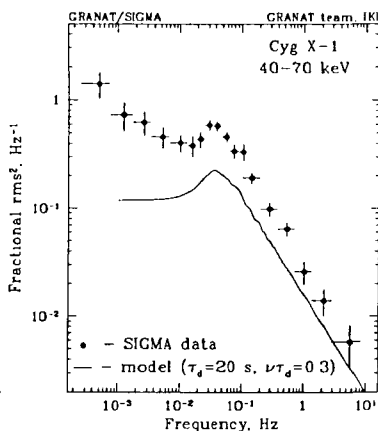
В разделе 5.2 предложено объяснение различий в амплитуде переменности жесткого рентгеновского потока от аккрецирующих черных дыр на масштабах часов.

В Главе 6 обсуждаются свойства жесткой спектральной компоненты. Сравниваются широкополосные спектры разных источников – кандидатов в черные дыры, обсуждается зависимость общей формы жесткой спектральной компоненты от светимости источника (раздел 6.1). Как известно, наблюдаются три спектральных состояния кандидатов в черные дыры, различающихся соотношением вкладов мягкой и жесткой спектральных компонент: сверхвысокое (в спектре присутствуют обе компоненты), высокое (существенно преобладает мягкая компонента) и низкое (преобладает жесткая компонента). Показано, что эти состояния соответствуют разным значениям величины  $L/L_{\text{Edd}}$ . На основе данных телескопа СИГМА показано (раздел 6.2), что существует хорошо заметное различие в спектральных свойствах жесткой компоненты, наблюдаемой в сверхвысоком и низком спектральных состояниях. Это может свидетельствовать о различном происхождении жесткого излучения в этих состояниях.

Глава 7 посвящена исследованию квазипериодических осцилляций (QPO) рентгеновского излучения от кандидатов в черные дыры.

В разделе 7.1 кратко суммированы основные экспериментальные результаты, полученные телескопом СИГМА: открытие QPO в Лебеде X-1 и рентгеновской Новой в созвездии Персея, обнаружение необычного поведения спектра мощности рентгеновской Новой в созвездии Персея на частотах  $\lesssim 0.01$  Гц (результаты получены совместно с А.Вихлининым).

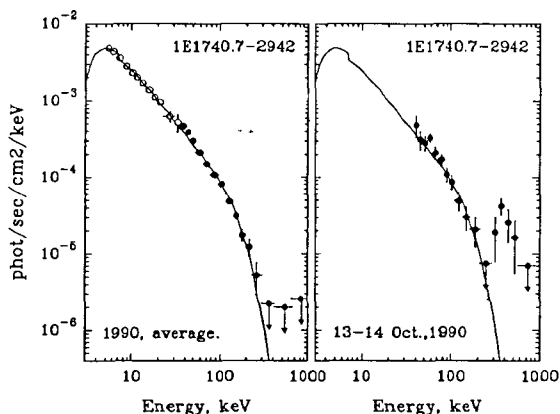
В разделе 7.2 предложен механизм возникновения квазипериодических осцилляций рентгеновского излучения от кандидатов в черные дыры. Показано, что такие осцилляции естественным образом возникают в модели всплеск (shot noise model), если предположить наличие слабого взаимодействия между индивидуаль-



**Рисунок 4.** Спектр мощности Лебеда X-1, полученный по данным СИМБЛ, и предсказанный в рамках модели вспышек с взаимодействием. Нормировка модельного спектра произвольна.

ными вспышками. Существования взаимодействия между вспышками можно ожидать во многих физических моделях формирования жесткой спектральной компоненты. Действительно, независимо от конкретной физической природы неустойчивостей во внутренних областях аккреционного диска, приводящих к возникновению наблюдаемой короткомасштабной аperiодической переменности жесткого рентгеновского излучения, эти неустойчивости развиваются в условиях существенно более медленно изменяющегося внешнего притока энергии, определяемого величиной темпа аккреции  $\dot{M}$ . Этот факт имеет многочисленные наблюдательные подтверждения, а также и теоретическое обоснование — внешние области диска, несомненно, устойчивы по отношению к короткопериодическим возмущениям. В этих условиях неизбежно взаимодействие между индивидуальными вспышками — появление сильной вспышки влияет на амплитуду и/или вероятность появления следующей вспышки. Предсказаны формы спектра мощности при наличии такого взаимодействия между вспышками и показано, что таким образом можно объяснить QPO, обнаруженные в спектрах мощности Лебеда X-1 и рентгеновской Новой 1992 г. в созвездии Персея (рис.4). Попутно получена точная формула для искажения спектров мощности из-за наличия "мертвого времени" у детектора рентгеновского излучения.

Глава 8 посвящена открытию транзитных эмиссионных линий на энергиях  $\sim 0.5$  МэВ в спектрах нескольких компактных рентгеновских источников. В 1990–1994 гг. такие линии были обнаружены в спектрах двух галактических кандидатов

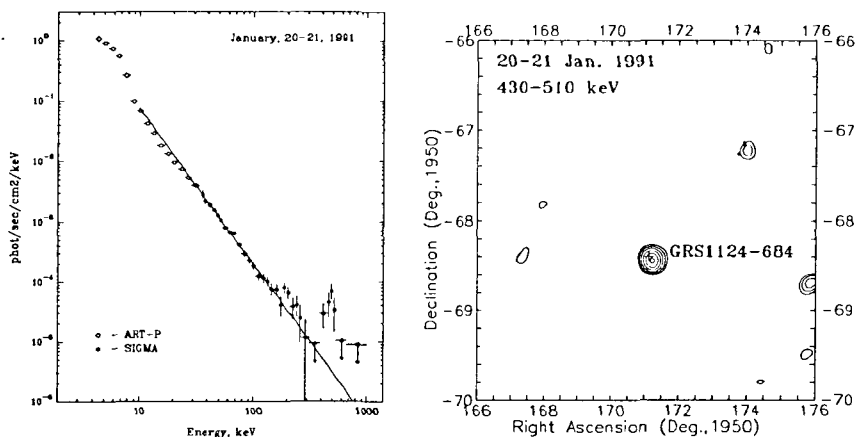


**Рисунок 5.** Спектры источника 1E1740.7-2942, полученные телескопами АРТ-П и СИГМА: усредненный спектр 1990 г. (за исключением наблюдения 13-14 октября) – слева и спектр, полученный 13-14 октября 1990 г., – справа.

в черные дыры (1E1740.7-2942 и рентгеновская Новая 1991 г. в созвездии Мухи) и Крабовидной Туманности. Происхождение эмиссионных линий связано, по всей видимости, с аннигиляцией электрон-позитронных пар в компактном источнике, хотя не исключены и альтернативные интерпретации.

В разделе 8.1 представлены результаты для кандидата в черные дыры 1E1740.7-2942, известного как ярчайший источник жесткого рентгеновского излучения вблизи динамического центра нашей Галактики. Во время наблюдений области Галактического Центра (ГЦ) обсерваторией ГРАНАТ в 1990 г. были обнаружены два совершенно различных спектральных состояния этого источника. Почти во всех наблюдениях 1990 года источник имел спектр, подобный спектру известного кандидата в черные дыры Лебедь X-1. Во время наблюдения 13-14 октября 1990 г. было зафиксировано иное, жесткое, спектральное состояние этого источника, характеризовавшееся ярко выраженной спектральной особенностью в районе  $\approx 400$  кэВ (рис. 5).

В разделе 8.2 приведены результаты для рентгеновской Новой 1991 г. в созвездии Мухи. Рентгеновская Новая 1991 г. в созвездии Мухи наиболее интенсивно наблюдалась телескопами обсерватории ГРАНАТ в течение первого месяца после открытия, в январе – феврале 1991 г. Во всех наблюдениях, выполненных в этот период, СИГМА детектировала жесткое рентгеновское излучение от источника до

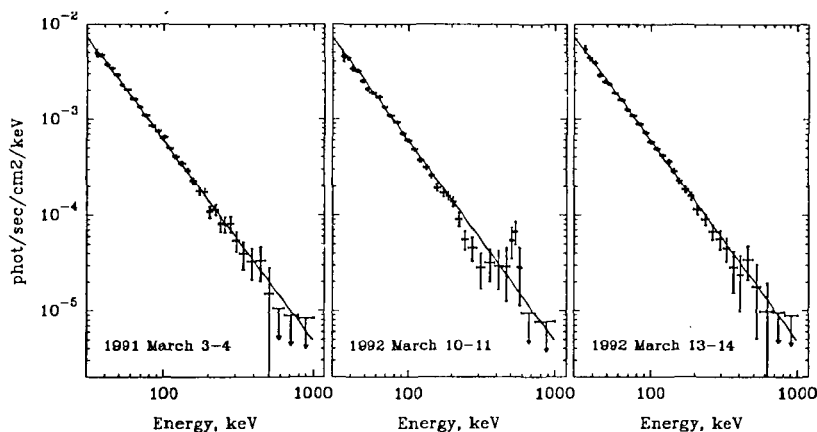


**Рисунок 6.** Спектр рентгеновской Новой 1991 г. в созвездии Мухи, полученный 20–21 января 1991 г. (слева), и изображение участка неба, содержащего рентгеновскую Новую в созвездии Мухи в диапазоне 430–510 кэВ (справа)

энергий  $\approx 300$  кэВ. 20–21 января 1991 г. телескоп СИГМА обнаружил (на уровне достоверности  $5.1\sigma$ ) в спектре источника сравнительно узкую эмиссионную линию вблизи  $\approx 480$  кэВ (рис.6) с потоком  $\approx 6.3 \cdot 10^{-3}$  фот/с/см<sup>2</sup>. Аннигиляционной линии сопутствовала спектральная особенность вблизи  $\approx 200$  кэВ.

Во время калибровочного наблюдения Крабовидной Туманности 10–11 марта 1992 г. телескоп СИГМА обсерватории ГРАНАТ обнаружил сравнительно узкую транзиентную эмиссионную линию в спектре источника на энергии  $\approx 540$  кэВ (рис.7) (раздел 8.3). В предыдущем (за год до того) и в последующем (три дня спустя) наблюдениях спектр Краба имел стандартный вид. В момент обнаружения линии не наблюдалось никаких отклонений формы спектра источника от номинальной на энергиях ниже  $\approx 100$  кэВ. В то же время появление линии сопровождалось  $\approx 25\%$  уменьшением (зарегистрированным на уровне достоверности  $\approx 3\sigma$ ) потока в диапазоне 200–350 кэВ по сравнению с "номинальным" значением. В рамках аннигиляционного сценария происхождения линии наилучшие значения параметров линии соответствуют узкой ( $FWHM \approx 44$  кэВ), смещенной в голубую сторону ( $v/c \approx 0.05$ ) аннигиляционной линии. Следует отметить, что в пределах достоверности 90% данные СИГМы согласуются также с несколько более широкой ( $FWHM \approx 70 - 120$  кэВ), но несмещенной линией.

В разделе 8.4 обсуждается статистическая достоверность обнаруженных спек-

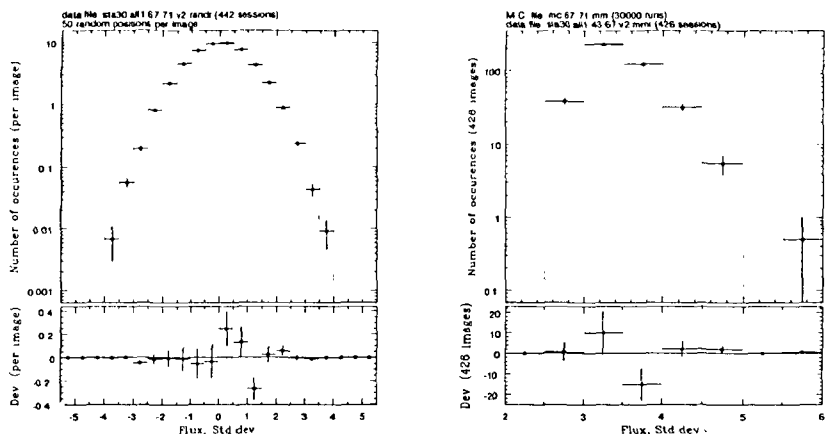


**Рисунок 7.** Рентгеновские спектры источника в Крабовидной Туманности, полученные телескопом СИГМА в разные дни наблюдений. Сплошной линией показан степенной спектр с наклоном 2.1.

тральных деталей.

Во-первых, проанализировано качество изображений, получаемых телескопом СИГМА в мягком гамма-диапазоне. Важным преимуществом рентгеновских телескопов, способных, подобно СИГМЕ, наряду с получением спектров строить изображения, является возможность непосредственно убедиться в правильности ошибок приписываемых измерениям потока. Подробный анализ большого числа реальных изображений, полученных телескопом СИГМА в 1990–1994 гг., показал, что статистическое распределение потока, получаемого в любой заданной точке изображения (не содержащей источник), достаточно хорошо описывается гауссовым законом со средним нуль и дисперсией, равной квадрату ошибки на поток, полученной стандартной процедурой обработки данных СИГМЫ (рис.8).

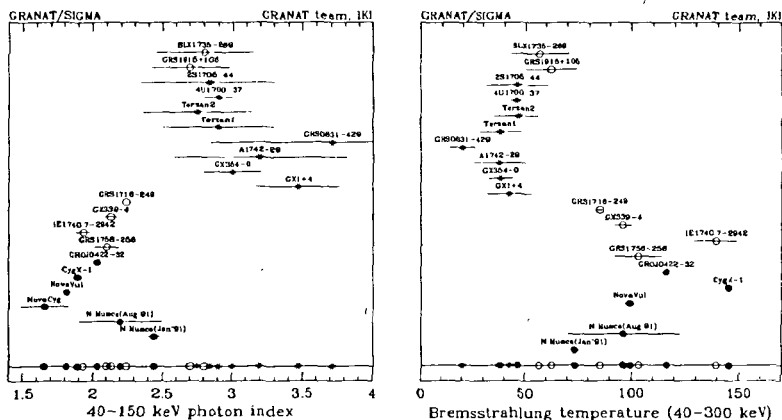
Результаты этого исследования позволяют использовать Гауссову статистику для оценки статистической достоверности обнаружения спектральных деталей, обсуждаемых в Главе 6. Оценивалась достоверность двух утверждений: факта детектирования потока в заданном интервале энергий и того, что поток, детектируемый в заданном интервале энергий, соответствует появлению эмиссионной линии в спектре. При этом считывались дополнительные степени свободы, определяемые количеством наблюдений источника и произвольным положением линии (методом Монте-Карло). Такая оценка произведена для всех трех случаев детектирования линий в спектрах. Полученные результаты свидетельствуют о достаточно высокой достоверности обна-



**Рисунок 8.** Слева: Результаты статистического анализа изображений в диапазоне 490–580 кэВ, полученных СИГМой в 1990–1994 гг. Статистическое распределение потока в случайно выбранных положениях (50 положений на изображение). Сплошная линия – Гассово распределение со средним нуль и дисперсией 1. Справа: Диапазон 200–500 кэВ, распределение экстремальных значений потока. Сплошная линия – результат моделирования методом Монте-Карло. Крайняя точка справа, значительно отклоняющаяся от результата моделирования, соответствует обнаружению линии в спектре 1E1740.7–2942 13–14 октября 1990 г. (пик имел значимость  $\approx 6\sigma$ ). Поток на обоих рисунках выражен в единицах ошибки, определенной стандартной процедурой обработки данных СИГМы.

ружения линий: вероятность того, что наблюдавшиеся линии являются результатом статистической флуктуации,  $\sim 10^{-4} - 10^{-3}$ .

Глава 9 посвящена сравнению рентгеновских спектров двойных систем с разной природой релятивистского объекта (черная дыра или нейтронная звезда). Для количественной характеристики формы спектра была использована аппроксимация данных спектром тормозного излучения и степенным законом. Хотя модель тормозного излучения оптически тонкой плазмы по всей вероятности не имеет отношения к происхождению жесткого рентгеновского излучения в компактных источниках, она удивительно хорошо описывает спектры, наблюдаемые в жестком рентгеновском диапазоне от  $\sim 40$  кэВ до  $\sim 200 - 300$  кэВ (типичная точность аппроксимации – лучше  $\sim 5 - 10\%$ ). Температура тормозного излучения или наклон степенного спектра являются удобными количественными характеристиками жесткости наблюдаемого спектра. Хотя общее количество источников не позволяет серьезно говорить о построении функции распределения источников по жесткости наблюдаемого излучения, тем не менее существует хорошо заметное разделение двойных систем с чер-



**Рисунок 9.** Жесткость спектров галактических рентгеновских двойных, наблюдавшихся телескопом СИГМА в 1990–1994 гг., выраженная через наклон спектра в диапазоне 40–150 кэВ (слева) и температуру тормозного спектра, наилучшим образом описывающего данные в диапазоне 40–300 кэВ (справа). Двойные системы с известной природой компактного объекта отмечены звездочками (нейтронные звезды) и закрашенными кружками (черные дыры)

ными дырами и нейтронными звездами по жесткости спектра (раздел 9.1) (рис.9). Нейтронные звезды группируются вблизи значений фотонного индекса  $\alpha \approx 2.8 - 3.5$  (температура тормозного спектра  $kT \approx 30 - 60$  кэВ), в то время как кандидаты в черные дыры в низком спектральном состоянии имеют типичные значения наклона спектра  $\alpha \approx 2$  ( $kT \approx 80 - 150$  кэВ). Сделан вывод о том, что жесткость наблюдаемого спектра может быть использована для диагностики природы компактного объекта (раздел 9.2). Обсуждается жесткое рентгеновское излучение от рентгеновских барстеров (раздел 9.3).

В Главе 10 обсуждается происхождение жесткой спектральной компоненты, наблюдаемой в спектрах аккрецирующих черных дыр и, в некоторых случаях, нейтронных звезд (в частности, рентгеновских барстеров).

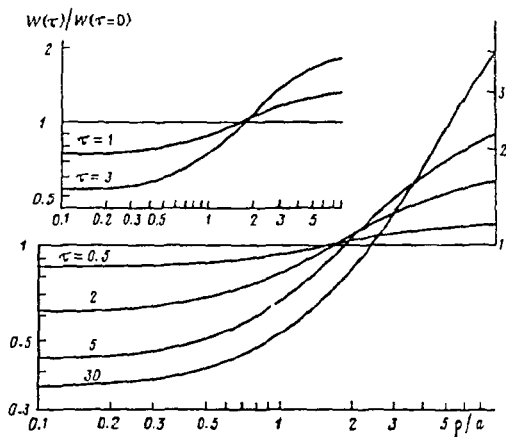
В разделе 10.1 рассматривается двухфазная модель комптонизации с обратной связью. Предложенный подход позволяет, не конкретизируя геометрию и физический механизм передачи энергии горячим электронам, сформулировать условия, необходимые для формирования жесткой спектральной компоненты, и объяснить ряд наблюдаемых свойств жесткого рентгеновского излучения. В его основе лежит условное разделение "горячей" фазы (в которой формируется комптонизированный спектр) и "холодной" фазы (оптически непрозрачная область, поставляющая мяг-

кие фотоны в зону комптонизации), в каждой из которых выделяется определенная доля гравитационной энергии аккрецирующего вещества. Показано, что для формирования жесткого спектра, с наклоном  $\lesssim 2$ , необходимо выполнение двух условий. Во-первых,  $\frac{f_{C \rightarrow H} W_C}{W_H} \ll 1$ , где  $W_C$ ,  $W_H$  – энерговыделение в холодной и горячей фазах,  $f_{C \rightarrow H}$  – геометрический фактор, определяющий долю мягких фотонов, излучившихся в холодной фазе и попавших в горячую фазу. Во-вторых, малость коэффициента обратной связи – геометрического фактора, равного доли светимости комптонизированного излучения, которая была переизлучена холодной оптически плотной фазой и возвращена в область комптонизации в виде мягких фотонов. При выполнении этих условий наклон комптонизационного спектра слабо зависит от абсолютных величин энерговыделения в горячей и холодной фазах (т.е. от светимости источника). Если же коэффициент обратной связи велик,  $\sim 0.5 - 1$ , прогрев холодной оптически плотной фазы комптонизированным излучением приведет к увеличению ее температуры, притока мягких фотонов в область комптонизации, и, следовательно, темпа комптоновского охлаждения горячих электронов, понижению их температуры и увеличению наклона комптонизационного спектра.

В разделе 10.2 обобщена модель вспышек применительно к формированию жесткой спектральной компоненты. Предполагая неоднородную в пространстве и во времени передачу энергии в зону комптонизации (горячую фазу – например, корону аккреционного диска), можно удовлетворить условиям формирования жесткого комптонизированного спектра, сформулированным выше. При этом усредненная по времени и по пространству доля энергии аккреции, выделяющейся в горячей фазе, может быть сравнительно невелика,  $\frac{(W_H)}{(W_C)} \lesssim 1$ , но мгновенное локальное значение будет сколь угодно большим,  $\frac{W_H}{W_C} \gg 1$ . Следствием такой модели является вывод о том, что 100% излучения жесткой спектральной компоненты формируется в результате вспышек. На примере рентгеновской Новой в созвездии Персея показано, что этот вывод подтверждается результатами телескопа СИГМА. Получены конкретные параметры индивидуальных вспышек: типичная продолжительность  $\sim 20$  сек., частота вспышек – раз в  $\sim 2 - 20$  сек.

**Часть II** посвящена исследованию физических процессов в межгалактическом газе скоплений галактик и их влиянию на наблюдаемое диффузное рентгеновское излучение от скоплений.

В **Главе 11** исследуется распределение химических элементов в межгалактическом газе. В гравитационном поле скопления может действовать механизм грави-



**Рисунок 10.** Отношение эквивалентной ширины линии с учетом и без учета рассеяний к эквивалентной ширине без рассеяний (изотермическая модель,  $\beta = 2/3$ ).

тационного разделения элементов. Рассмотрена динамика процесса диффузии и показано, что наиболее эффективно, с характерным временем  $\sim 10^{16}$  сек, механизм разделения элементов действует на легкие элементы: дейтерий, гелий и литий, в то время как распределение элементов с  $Z \gtrsim 16$  меняется в 10-20 раз медленнее. За время жизни скопления ( $\sim 10^{17}$  сек) обилие легких элементов в центре скопления может возрасти в 5–15 раз по сравнению с первоначальным (однородным по скоплению). Это может привести к обогащению легкими элементами, в первую очередь гелием, центральной доминирующей галактики скопления. Наличие слабого хаотического магнитного поля с масштабом неоднородностей  $\lambda \ll a$  ( $a$  — радиус ядра скопления) может существенно ослабить этот эффект. Если же магнитное поле имеет крупномасштабную структуру,  $\lambda \sim a$ , то усреднение коэффициента диффузии по конфигурации поля уменьшит темп диффузии лишь в конечное число раз. Большой интерес представляет также возможность обогащения галактик легкими элементами на стадии их образования в протоскоплении галактик, когда магнитное поле было на много порядков слабее.

В Главе 12 рассматривается влияние рассеяния рентгеновских фотонов в резонансных линиях тяжелых элементов на наблюдаемое распределение поверхностной яркости в этих линиях. Показано, что оптическая толща по рассеянию в рентгеновских линиях железа в условиях скоплений галактик может быть заметно больше единицы. Рассеяние приводит к искажению распределения поверхностной яркости

в резонансных линиях: понижению яркости в центральной части скопления и повышению на краях. Одновременно искажается и профиль линии – возникает характерная для задач рассеяния седлообразная форма. Так как рассеяние влияет исключительно на поверхностную яркость излучения в линии, то рассматриваемый механизм приводит к сильной зависимости эквивалентной ширины от расстояния до центра скопления (рис.10). Для случая малой толщи получены простые аналитические зависимости. Реальная задача для скопления галактик в Персее была решена численно методом итераций. Показано, что пренебрежение этим эффектом может привести к недооценке в  $\approx 1.5 - 2$  раза обилия тяжелых элементов в скоплениях галактик. Подобно эффекту Зельдовича-Сюняева, этот эффект может быть использован для независимого определения постоянной Хаббла на основе одних только наблюдений в рентгеновском диапазоне.

## Основные результаты работы

1. На основе наблюдений рентгеновских Новых в созвездиях Мухи, Персея и Змееносца обсерваториями ГРАНАТ, МИР-КВАНТ и АСКА систематически исследованы свойства рентгеновских Новых на энергиях от стандартного рентгеновского до мягкого гамма-диапазона. Показано, что транзиентный источник GRS/KS1730-312, открытый телескопами СИГМА и ТТМ в районе Центра Галактики, имеет, вероятно, ту же природу, что и "классические" рентгеновские Новые. Предложено объяснение наблюдаемых различий в поведении рентгеновских Новых.
2. Проанализированы данные наблюдений обсерватории АСКА с целью поиска мягких спектральных компонент в спектрах аккрецирующих черных дыр в низком (жестком) состоянии. Показано, что в спектре Лебедя X-1 в низком состоянии присутствует мягкая компонента, соответствующая чернотельному излучению с температурой  $\sim 130 - 150$  эВ, в которой излучается  $\sim 10 - 25\%$  общей рентгеновской светимости источника. Возможно, аналогичная компонента присутствует в спектре источника 1E1740.7-2942. В то же время не обнаружено сравнимых по яркости мягких компонент в спектрах рентгеновских Новых в созвездиях Персея и Змееносца. Для этих источников получены ограничения на вклад мягкой спектральной компоненты в светимость. Предложено объяснение различий в характере переменности жесткого рентгеновского

потока от аккрецирующих черных дыр на промежуточных временных масштабах ( $\sim$  часов).

3. Черная дыра Лебедь X-1: По данным СИГМЫ (1990–1994 гг.) обнаружены два режима поведения источника на диаграммах жесткость спектра – светимость ( $L_{40-200 \text{ keV}}$ ) и жесткость спектра – амплитуда короткомасштабных аперiodических вариаций рентгеновского потока. Из сравнения с данными обсерватории АСКА показано, что изменение формы спектра источника при изменении его светимости в жестком рентгеновском диапазоне распространяются и на спектр источника в стандартном рентгене – заметно меняется наклон комптонизационного спектра в интервале энергий от 1 кэВ до  $\sim 50 - 100$  кэВ. При увеличении наклона комптонизационного спектра (понижении светимости  $L_{40-200 \text{ keV}}$ ) растут температура и светимость мягкой спектральной компоненты. Предложена интерпретация наблюдаемого поведения.
4. Показано, что спектральные характеристики жесткой компоненты различаются в разных спектральных состояниях кандидатов в черные дыры.
5. Предложена модель возникновения квазипериодических осцилляций жесткого рентгеновского излучения от кандидатов в черные дыры. Модель позволяет также объяснить необычное поведение спектров мощности некоторых источников на частотах ниже  $\sim 0.01$  Гц.
6. Открыты эмиссионные линии на энергиях  $\sim 0.5$  МэВ в спектрах двух аккрецирующих черных дыр (1E1740.7–2942 и рентгеновской Новой в созвездии Мухи) и пульсара в Крабовидной Туманности. Продемонстрирована высокая статистическая достоверность обнаружения линий. В рамках аннигиляционного сценария происхождения линий получены ограничения на физические параметры в зоне формирования излучения в линиях.
7. Произведено сравнение рентгеновских спектров двойных систем с разной природой релятивистского объекта (черная дыра или нейтронная звезда) на энергиях  $\gtrsim 40$  кэВ. Показано, что аккрецирующие черные дыры имеют систематически более жесткие спектры, чем нейтронные звезды. Предложен метод диагностики природы компактного объекта в двойной системе на основании спектральных характеристик наблюдаемого жесткого рентгеновского излучения.

8. Предложен подход, позволяющий, не конкретизируя геометрию и физический механизм передачи энергии горячим электронам, сформулировать условия, необходимые для формирования жесткой спектральной компоненты с наклоном  $\alpha \lesssim 2$ , и объяснить ряд наблюдаемых свойств жесткого рентгеновского излучения.
9. Обобщена модель вспышек применительно к формированию жесткой спектральной компоненты. На примере рентгеновской Новой в созвездии Персея показано, что следствия этой модели совместимы с результатами СИГМЫ. Получены конкретные параметры индивидуальных вспышек.
10. Предсказано, что диффузия химических элементов в межгалактическом газе скоплений галактик под действием гравитационного потенциала скопления может приводить к обогащению центральных областей скоплений галактик легкими элементами, в первую очередь дейтерием и гелием.
11. Показано, что рассеяние рентгеновских фотонов в резонансных линиях высокозарядных ионов тяжелых элементов может приводить к заметному искажению распределения поверхностной яркости скоплений галактик в этих линиях. Пренебрежение этим эффектом при интерпретации экспериментальных данных может приводить к систематическому занижению обилий тяжелых элементов в межгалактическом газе. Подобно эффекту Зельдовича–Сюняева, этот эффект может быть использован для независимого определения постоянной Хаббла.

## Основные публикации по теме диссертации

1. Gilfanov M., Churazov E., Sunyaev R., Vikhlinin A., Finoguenov A., Sitdikov A., Dyachkov A., Khavenson N., Laurent P., Ballet J., Claret A., Goldwurm A., Roques J.P., Mandrou P., Niel M., Vedrenne G.,  
"Hard X-ray observations of black hole candidates.", NATO ASI Series, Series C, Vol.450 "The Lives of neutron stars", ed. A.Alpar, U.Kiziloglu, J.van Paradijs, Kluwer Acad. Publishers, 1995, p.331
2. Gilfanov M., Churazov E., Sunyaev R., Vikhlinin A., Finoguenov A., Sitdikov A., Dyschkov A., Khavensos N., Ballet J., Cordier B., Goldwurm A., Laurent P., Roques J.P., Mandrou P., Niel M., Vedrenne G.,

- "Observations of hard X-ray transient GRS1716-249 (Nova Oph 1993) with GRANAT/SIGMA. Preliminary results.", *Proceedings of the 4th Annual Astrophysics Conference in Maryland*. Kluwer Acad. Publishers, 1995, p.221
3. Trudoluybov S., Gilfanov M., Churazov E., Sunyaev R. *et al.*  
 "Hard X-ray observations of GRS/KS1730-312 with GRANAT/SIGMA.", in the *Proc. of International Conference on X-Ray Astronomy and Astrophysics "Roentgenstrahlung from the Universe"*, Wurzburg, 1995.
  4. Revnivtsev M., Gilfanov M., Churazov E., Sunyaev R. *et al.*  
 "Hard X-ray observations of X-ray Nova Ophiuchi 1993 (GRS1716-249) with GRANAT/SIGMA.", in the *Proc. of International Conference on X-Ray Astronomy and Astrophysics "Roentgenstrahlung from the Universe"*, Wurzburg, 1995.
  5. Vikhlinin A., Churazov E., Gilfanov M., Sunyaev R., Finoguenov A., Dyachkov A., Kremnev R., Sukhanov K., Ballet J., Goldwurm A., Cordier B., Claret A., Denis M., Olive J. F., Roques J. P., Mandrou P. ,  
 "Hard X-Ray Variability of X-Ray Nova Persei 1992: Granat/SIGMA Results", 1995, *Ap. J.*, **441**, 779
  6. Kuznetsov S., Gilfanov M., Churazov E., Sunyaev R. *et al.*  
 "Two distinct modes in the low (hard) state of Cyg X-1 and 1E1740.7-2942.", in the *Proc. of International Conference on X-Ray Astronomy and Astrophysics "Roentgenstrahlung from the Universe"*, Wurzburg, 1995.
  7. Gilfanov M., Churazov E., Sunyaev R., Vikhlinin A., Finoguenov A. *et al.*  
 "Spectral and temporal properties of black hole candidates.", *Frontiers Science series #12*, "New Horizon of X-Ray Astronomy", Eds.: F.Makino and T.Ohashi, p.433
  8. Gilfanov M., Churazov E., Sunyaev R., Khavenson N., Novikov B., Dyachkov A., Tserenin I., Sukhanov K., Bouchet L., Denis M. *et al.* ,  
 "Observation of transient high-energy emission features in the spectra of black hole candidates and the Crab Nebula by Granat/SIGMA", 1994, *Ap. J. (Supplement Series)*, **92**, 411
  9. Vikhlinin A., Churazov E., Gilfanov M. ,  
 "Quasi-periodic oscillations in the shot noise model of X-ray sources", 1994, *A&A*,

287, 73

10. Ситдииков А., Гильфанов М., Сюняев Р., Чуразов Е., Дьячков А., Кремнев Р., Суханов К., Кулешлва Н., и др.,  
"Наблюдения рентгеновской двойной системы 4U1700-377/HD 153919 в диапазоне энергий 35–1300 кэВ телескопом СИГМА обсерватории ГРАНАТ." 1993, *Письма в Астрон.Журн.*, **19**, 483
11. Gilfanov M., Churazov E., Sunyaev R., Khavenson N., Novikov B., Dyachkov A., Kremnev R., Sukhanov K., Bouchet L., Mandrou P., Roques J. P., Vedrenne G., Cordier B., Goldwurm A., Laurent P., Paul J. ,  
"Three Years of Monitoring GRS 1758-258: An Extremely Hard X-Ray Source near GX 5-1", 1993, *Ap. J.*, **418**, 844
12. Gilfanov M., Churazov E., Sunyaev R. A., Grebenev S., Pavlinskii M., D'iachkov A., Kovtunenkov V., Kremnev R., Goldwurm A., Ballet J. *et al.* ,  
"The spectra of Nova Muscae 1991 between 3 keV and 1 MeV observed with GRANAT", 1993, *A&A (Supplement Series)*, **97**, 303
13. Laurent P., Claret A., Cordier B., Lebrun F., Denis M., Bouchet L., Lei F., Barret D., Churazov E., Gilfanov M. ,  
"SIGMA observations of bright X-ray binaries", 1993, *A&A (Supplement Series)*, **97**, 225
14. Sunyaev R., Churazov E., Gilfanov M., D'iachkov A., Khavenson N., Grebenev S., Kremnev R., Sukhanov K., Goldwurm A., Ballet J. *et al.* ,  
"X-ray nova in Musca (GRS 1124 - 68) - Hard X-ray source with narrow annihilation line", 1992, *Ap. J. (Letters)*., **389**, 75
15. In't Zand J. J. M., Pan H. C., Bleeker J. A. M., Skinner G. K., Gilfanov M. R., Sunyaev R. A. ,  
"The spectral variability in 2-28 keV of GS2023+338 during its 1989 outburst", 1992, *A&A*, **266**, 283
16. Salotti L., Ballet J., Cordier B., Lambert A., Bonazzola S., Mereghetti S., Mandrou P., Roques J. P., Sunyaev R., Gilfanov M. *et al.* ,  
"Soft gamma ray observations of Cygnus X-1 with the coded-aperture SIGMA telescope", 1992, *A&A*, **253**, 145

17. Гильфанов М., Сюняев Р., Чуразов Е., Павлинский М., Гребенев А., Кремнев Р., и др.,  
 "Наблюдения Новой в созвездии Мухи телескопом СИГМА обсерватории ГРАНАТ: спектральные свойства в жестком рентгене и открытие аннигиляционной линии в спектре.", 1991, *Письма в Астрон.Журн.*, **17**, 1059
18. Сюняев Р., Бороздин К., Гильфанов М., Ефремов В., Каниовский А. и др.,  
 "Аномально жесткий спектр источника 1E1740.7-294 по данным обсерваторий РЕНТГЕН модуля КВАНТ.", 1991, *Письма в Астрон.Журн.*, **17**, 126
19. Sunyaev R., Churazov E., Giffanov M., Pavlinskii M., Grebenev S., Babalian G., Dekhanov I., Khavenson N., Bouchet L., Mandrou P. *et al.* ,  
 "Three spectral states of 1E 1740.7 - 2942 - From standard Cygnus X-1 type spectrum to the evidence of electron-positron annihilation feature", 1991, *Ap. J. (Letters)*., **383**, 49
20. Гильфанов М., Сюняев Р., Чуразов Е., Лозников В., Ефремов В. и др.,  
 "Наблюдения рентгеновских пульсаров модулем КВАНТ.", 1989, *Письма в Астрон.Журн.*, **15**, 675
21. Гильфанов М.Р., Сюняев Р.А., Чуразов Е.М.,  
 "Распределение поверхностной яркости рентгеновского излучения скоплений галактик в резонансных линиях." 1987, *Письма в Астрон.Журн.*, **13**, 7
22. Гильфанов М.Р., Сюняев Р.А.,  
 "Гравитационная сепарация дейтерия и гелия в богатых скоплениях галактик.", 1984, *Письма в Астрон.Журн.*, **10**, 137