

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи

Сергей Павлович Трудолюбов

АНАЛИЗ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ВРЕМЕННЫХ И СПЕКТРАЛЬНЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ГАЛАКТИЧЕСКИХ КАНДИДАТОВ В ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ

01.03.02 Астрофизика и радиоастрономия

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель
доктор физ.-мат. наук М.Р. Гильфанов

Москва
1999

Хочется сказать огромное спасибо Марату Гильфанову и Евгению Чуразову, под руководством и в тесном сотрудничестве с которыми была выполнена большая часть работы. Большую помощь в моих исследованиях оказало продуктивное общение с товарищами по отделу Астрофизики высоких энергий Константином Бороздиным, Алексеем Финогеновым и Сергеем Сазоновым.

Хотелось бы выразить особую благодарность Рашиду Алиевичу Сюняеву за постоянное внимание и поддержку в моей научной работе.

Автор благодарит за гостеприимство коллектив Астрофизического Института общества им. Макса Планка (Германия) и группу NIS-2 Лос-Аламосской Национальной Лаборатории (США), где была получена часть результатов, представленных в диссертации.

Во время работы над диссертацией автор получал поддержку от Российского Фонда фундаментальных исследований, INTAS и Соросовской программы образования в области точных наук.

Часть результатов, представленных в диссертационной работе, получена с использованием данных, предоставленных службой электронного архива Годдардовского Центра космических полетов (США).

Оглавление

Введение	23
I Инструменты и наблюдения	25
1.1 Телескоп СИГМА обсерватории “Гранат”	27
1.2 Телескоп ТТМ обсерватории МИР – КВАНТ	27
1.3 Обсерватория RXTE	27
1.3.1 Прибор РСА	28
1.3.2 Прибор HEXTE	30
II Наблюдения GX 339–4	33
1.4 Введение	35
1.5 Наблюдения телескопом СИГМА в 1990–1994 гг.	35
1.5.1 Наблюдения 1990 года	36
1.5.2 Вспышка 1991 года	36
1.5.3 Вспышка 1992 года	37
1.6 Эволюция спектра источника во время вспышек	38
1.7 Связь между жесткостью спектра и уровнем флуктуаций жесткого рентгеновского потока	39
1.8 Механизм возникновения вспышек	40
III Наблюдения GRS 1915+105	47
2 GRS 1915+105 в состоянии с низкой светимостью	51
2.1 Введение	51
2.2 Наблюдения	51
2.2.1 Эволюция параметров энергетического спектра	53
2.3 Эволюция характера переменности	56
2.3.1 Аналитическая аппроксимация спектров мощности	59
2.4 Корреляция спектральных и временных параметров	60
2.5 Корреляции между спектральными и временными свойствами	61
2.6 Обсуждение	61
3 GRS 1915+105 во вспышечном состоянии	79
3.1 Наблюдения	79
3.1.1 Спектральный анализ	80

3.1.2	Временной анализ.	80
3.2	Классификация состояний.	80
3.2.1	Переходы между состояниями.	81
3.2.2	Эволюция спектральных и временных параметров.	82
3.3	Корреляция свойств спектральной и временной эволюции в период “жестких” состояний.	84
3.4	Корреляция между длительностью “жестких” состояний и соответствующей частотой QPO в спектре мощности.	85
3.5	QPO и “жесткие” состояния, как возможные проявления динамической и вязкой эволюции аккреционного диска.	86
4	Модель аккреционного потока в GRS 1915+105	91
4.1	Наблюдательные предпосылки.	91
4.2	Модель аккреционного потока.	92
IV	Пространственное распределение рентгеновских Новых	97
4.3	Введение.	99
4.4	Пространственное распределение галактических рентгеновских Новых.	99
4.5	Заключение.	102
V	Модель комптонизации на сходящемся потоке аккрецируемого вещества	105
VI	Свойства галактических рентгеновских Новых	111
5	Рентгеновская Новая KS 1730–312	113
5.1	Локализация и кривая блеска источника	113
5.2	Спектр	115
5.3	KS/GRS 1730-312 – Удаленная рентгеновская Новая ?	118
6	Рентгеновская Новая GRS 1739–278	123
6.1	Эволюция GRS 1739–278 в период вспышки 1996 г.	123
6.1.1	Обнаружение QPO на частоте ~ 5 Гц.	124
7	Рентгеновская Новая GRS 1737–31	127
7.1	Открытие и локализация источника	127
7.2	Кривые блеска источника в стандартном и жестком рентгеновском диапазонах.	127
7.3	Спектр	128
7.4	Обсуждение	130
8	Рентгеновская Новая XTE J1748–288	133
8.1	Введение.	133
8.2	Кривая блеска и эволюция широкополосного энергетического спектра.	133
8.3	Эволюция характера короткопериодической переменности рентгеновского потока.	134
8.4	Связь между эволюцией спектральных и временных параметров.	137

9	Источник 4U 1630–47	141
9.1	Введение.	141
9.2	Наблюдения и анализ данных.	143
9.2.1	Спектральный анализ.	143
9.2.2	Временной анализ.	143
9.3	Кривая блеска и эволюция источника.	144
9.4	Спектральная и временная эволюция источника в период вспышки.	145
9.4.1	Фаза нарастания потока	145
9.4.2	“Сверхвысокое” состояние (VHS).	147
9.4.3	“Высокое” состояние (HS).	148
9.5	Спектральные и временные свойства на начальном этапе вспышки.	149
9.6	Переменность на масштабах 10–20 сек.	150
9.7	Интерпретация спектрально–временных свойств	151
VII	Сходство характера эволюции мягких рентгеновских Новых	159
VIII	Приложение	165

Список иллюстраций

1.1	Общий вид обсерватории RXTE. Стрелками показаны три научных прибора – ASM, PCA, HEXTE.	28
1.2	Схема отдельного пропорционального счетчика PCU. Показаны коллиматор, пропановый “вето”–слой, три слоя, снимающих электронный каскад, и ксеноново–метановый “вето”–слой (активная защита, основанная на методе антисовпадений). Снизу встроен искусственный источник рентгеновского излучения Am^{241}	29
1.3	Схема отдельного детектора HEXTE. Показаны коллиматор, калибровочный источник рентгеновского излучения Am^{241} , сцинтилляционный кристалл $NaI(Tl)$, кристалл $CsI(Na)$, фотоумножитель, магнитная защита.	30
1.4	Спектры GX 339-4, полученные телескопом СИГМА в диапазоне 40 – 400 кэВ осенью 1991 г.	36
1.5	Спектры GX 339-4, полученные телескопом СИГМА в диапазоне 40 – 400 кэВ 12 – 14 октября 1992 г.	37
1.6	Спектры GX 339-4, полученные телескопом СИГМА в диапазоне 40 – 400 кэВ весной 1994 г.	38
1.7	Эволюция параметров спектра GX 339-4 в диапазоне 40 – 400 кэВ во время вспышек в 1991, 1992 и 1994 гг.	39
1.8	Широкополосные (2 – 300 кэВ) спектры GX 339-4 в различных спектральных состояниях	40
1.9	Зависимость жесткости спектра GX 339-4 в диапазоне 40 – 150 кэВ от уровня флуктуаций потока (rms^2) в том же диапазоне в полосе частот $10^{-2} – 10^{-1}$ Гц.	41
2.1	Кривая блеска GRS 1915+105 в диапазоне 2 – 12 кэВ по данным наблюдений монитора всего неба (ASM) орбитальной рентгеновской обсерватории RXTE. Даты наблюдений источника приборами PCA и HEXTE отмечены треугольниками. Эти наблюдения были выбраны с целью исследования поведения источника во время состояния с низкой светимостью и переходов между состояниями.	52

- 2.2 Характерные широкополосные энергетические спектры GRS 1915+105 в единицах $F(E)E^2$ во вспышечном состоянии с высокой светимостью (а) и в состоянии с низкой светимостью (б) по данным приборов PCA и HEXTE. Закрашенные и открытые кружки на рис. (а) представляют спектры источника во “вспышке” и в “выключенном” состоянии соответственно. 54
- 2.3 Эволюция параметров энергетического спектра GRS 1915+105 во время наблюдения PCA 7 ноября 1996 г. (для аналитической аппроксимации спектра использовались модели излучения “многоцветного” аккреционного диска с характерной температурой T_{soft} (см. текст) и степенной закон ($f(E) \sim E^{-\alpha}$, E — энергия фотона, α — фотонный индекс), величина Галактического межзвездного поглощения была зафиксирована на значении $N_H L = 5 \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$). Каждая точка соответствует усреднению данных за 16-секундные интервалы. Вклад мягкой компоненты равен отношению светимости мягкой спектральной компоненты излучения к полной светимости в диапазоне энергий 3–20 кэВ, скорректированных на межзвездное поглощение. 55
- 2.4 Эволюция параметров энергетического спектра GRS 1915+105 в диапазоне 3–20 кэВ по данным PCA (для аналитической аппроксимации спектра использовались модели излучения “многоцветного” аккреционного диска с характерной температурой T_{soft} (см. текст) и степенной закон ($f(E) \sim E^{-\alpha}$), величина Галактического межзвездного поглощения была зафиксирована на значении $N_H L = 5 \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$). Вклад мягкой компоненты равен отношению светимости мягкой спектральной компоненты излучения к полной светимости в диапазоне энергий 3–20 кэВ, скорректированных на межзвездное поглощение. Данные наблюдений 7 и 23 октября, а также 7 и 19 ноября 1996 г. представлены несколькими точками по причине сильной переменности источника в этих наблюдениях. 57
- 2.5 Эволюция параметров высокоэнергичной части спектра источника GRS 1915+105 в диапазоне 20–150 кэВ по данным прибора HEXTE; (а) — аппроксимация степенным законом $f(E) \sim E^{-\alpha}$, E — энергия фотона, α — фотонный индекс; (б, в) — аппроксимация степенным законом с экспоненциальным завалом $f(E) \sim E^{-\alpha} \exp(-E/E_{cut})$, E — энергия фотона, α — фотонный индекс, E_{cut} — энергия завала). Треугольниками показана верхняя граница рабочего диапазона HEXTE в случаях наблюдений, когда завал в спектре источника не детектировался прибором. 58
- 2.6 Зависимость наклона высокоэнергичной части спектра источника GRS 1915+105 от уровня рентгеновской светимости в диапазоне 3–50 кэВ. Заштрихованные и открытые кружки отражают результаты аппроксимации данных степенным законом и степенным законом с экспоненциальным завалом соответственно. 59

- 2.7 Спектры мощности GRS 1915+105 по данным наблюдений PCA: (а) — во вспышечном состоянии с высокой светимостью; (б) — при переходе между состояниями (вклад мягкой компоненты в общую светимость довольно мал); (в) — при переходе между состояниями (вклад мягкой компоненты в общую светимость достаточно велик); (г) — номинальное состояние с низкой светимостью. 67
- 2.8 Зависимость между центральной частотой QPO—пика в спектре мощности GRS 1915+105 и уровнем рентгеновского потока от источника в диапазоне 3–20 кэВ и болометрического потока в мягкой компоненте энергетического спектра, скорректированных на Галактическое межзвездное поглощение для наблюдений 7 (открытые кружки) и 28 (закрашенные кружки) ноября 1996 г. Каждая точка представляет данные, усредненные за 16–48 сек интервалы. 68
- 2.9 Схематическое представление модели, использовавшейся для аналитической аппроксимации широкополосного спектра мощности излучения GRS 1915+105 в диапазоне 0.05–50 Гц в единицах $f \times (rms/mean)^2$ /Гц, где f — частота, на примере наблюдения 19 декабря 1996 г. Вклады частотно—ограниченных компонент (BLN) и Лоренцевых компонент, аппроксимирующих QPO—пики, изображены с помощью точечных и штриховых линий соответственно. 69
- 2.10 Параметры аппроксимации спектров мощности источника GRS 1915+105 как функции центральной частоты основного пика QPO (диапазон энергий 2–13 кэВ). Открытые кружки соответствуют наблюдениям, покрывающим период переходов между состояниями (до 28 ноября 1996 г.); закрашенные кружки соответствуют состоянию с низкой светимостью. 74
- 2.11 То же самое, что и рис. 2.10, но для диапазона энергий 13–60 кэВ. 75
- 2.12 Полная относительная среднеквадратичная амплитуда флуктуаций потока (rms) и относительная rms частотно—ограниченной компоненты (BLN) спектра мощности источника (диапазоны энергий 2–13 и 13–60 кэВ) как функции рентгеновского потока в диапазоне 3–20 кэВ. Открытые кружки соответствуют наблюдениям в период перехода между состояниями (23.10.1996–28.11.1996); закрашенные кружки соответствуют состоянию с низкой светимостью и возврату в состояние с высокой светимостью (28.11.1996–25.04.1997). 76
- 2.13 Полная относительная среднеквадратичная амплитуда флуктуаций потока (rms) и относительная rms частотно—ограниченной компоненты (BLN) спектра мощности источника (диапазон энергий 13–60 кэВ) как функция потока в жесткой спектральной компоненте в диапазоне 3–20 кэВ. Открытые кружки соответствуют наблюдениям в период перехода между состояниями (23.10.1996–28.11.1996); закрашенные кружки соответствуют состоянию с низкой светимостью и возврату в состояние с высокой светимостью (28.11.1996–25.04.1997). 76

- 2.14 Зависимость между центральной частотой основного пика QPO в спектре мощности GRS 1915+105 и болометрическим потоком в мягкой спектральной компоненте, полученным по результатам аппроксимации энергетического спектра (см. текст) для наблюдений в ноябре 1996 г. — апреле 1997 г. Открытые кружки соответствуют наблюдениям, в период перехода между состояниями (23.10.1996 — 28.11.1996); закрашенные кружки соответствуют состоянию с низкой светимостью и возврату в состояние с высокой светимостью (28.11.1996 — 25.04.1997). Большие кружки отражают данные, усредненные за целое наблюдение, маленькие кружки — данные, усредненные за 16 — 80 секундные интервалы. 77
- 3.1 Временные истории рентгеновского потока GRS 1915+105 в период вспышечного состояния в диапазоне энергий 2 — 30 кэВ (*верхние панели рисунка*), соответствующие коэффициенты жесткости спектра, равные соотношению потоков в энергетических диапазонах 13 — 30 и 2 — 13 кэВ (13 — 30 keV)/(2 — 13 keV) (*средние панели рисунка*) и динамические спектры мощности (*нижние панели рисунка*) для наблюдений 7 октября 1996 г. (*левая часть рисунка*) и 30 октября 1997 г. (*правая часть рисунка*). Пик QPO в спектре мощности источника выглядит как 'U' — образная черная полоса на изображении динамического спектра мощности. 81
- 3.2 Изменение свойств энергетического спектра и спектра мощности GRS 1915+105 при переходе из “жесткого” в “мягкое” состояние во время наблюдения 7 октября 1996 г. Толстыми линиями и буквами “А” и “В” в верхней части рисунка отмечены временные интервалы, которым соответствуют приведенные в нижней части рисунка энергетические спектры и спектры мощности. “А” и “В” — интервалы обозначают “жесткое” и “мягкое” состояния соответственно. 82
- 3.3 Изменение свойств энергетического спектра и спектра мощности GRS 1915+105 при переходе из “жесткого” в “мягкое” состояние во время наблюдения 19 июня 1996 г. Толстыми линиями и буквами “А” и “В” в верхней части рисунка отмечены временные интервалы, которым соответствуют приведенные в нижней части рисунка энергетические спектры и спектры мощности. “А” и “В” — интервалы обозначают “жесткое” и “мягкое” состояния соответственно. 83
- 3.4 Изменение свойств энергетического спектра и спектра мощности GRS 1915+105 при переходе из “жесткого” в “мягкое” состояние во время наблюдения 30 октября 1997 г. Толстыми линиями и буквами “А” и “В” в верхней части рисунка отмечены временные интервалы, которым соответствуют приведенные в нижней части рисунка энергетические спектры и спектры мощности. “А” и “В” — интервалы обозначают “жесткое” и “мягкое” состояния соответственно. 84

- 3.5 **Левая часть рисунка:** Эволюция параметров аппроксимации энергетического спектра GRS 1915+105 (см. описание модели в тексте) в наблюдении 7 октября 1997 г. (яркое вспышечное состояние, временное разрешение 16 сек). Первые ~ 600 сек наблюдения соответствуют “жесткому” состоянию, которое сменяется “мягким” состоянием (переход 2 типа). На *верхней панели рисунка* изображено изменение потока в мягкой компоненте, на *средней панели* — изменение наклона жесткой спектральной компоненты и на *нижней панели* — изменение характеристической цветовой температуры мягкой спектральной компоненты. **Правая часть рисунка:** То же самое, но с временным разрешением 4 сек. 85
- 3.6 Зависимость параметров аналитической аппроксимации энергетического спектра для нескольких наблюдений GRS 1915+105 во вспышечном состоянии (‘Total flux’ — полная светимость в диапазоне энергий 3–20 кэВ; ‘Soft component flux’ — болометрический поток в мягкой спектральной компоненте; ‘Soft ratio’ — вклад мягкой компоненты в полную светимость в диапазоне энергий 3–20 кэВ; ‘ kT_{soft} ’ — цветовая температура мягкой компоненты) от соответствующего значения центральной частоты QPO–пика (‘QPO centroid frequency’). 89
- 3.7 Связь между длительностью “жесткого” состояния и соответствующей минимальной частотой QPO для набора наблюдений GRS 1915+105 в ярком вспышечном состоянии (Табл. 3.1) (данные для первой группы наблюдений (см. объяснение в тексте) представлены в *левой части рисунка*; данные для второй группы изображены в *правой части рисунка*). Зависимости $t_{visc} \propto f_K^{-7/3}$ характерного времени вязкой эволюции внутренней границы радиационно–доминированного диска от кеплеровской частоты на этой границе при темпах аккреции $\dot{m} \sim 0.11(\alpha/0.1)^{-1/2}(m/33)^{-2/3}$ и $\dot{m} \sim 0.17(\alpha/0.1)^{-1/2}(m/33)^{-2/3}$ показаны с помощью *штриховой* и *точечной* линий соответственно. 90
- 3.8 Динамические спектры мощности GRS 1915+105, соответствующие первой (18/06/1997, *верхняя часть рисунка*) и второй группам наблюдений (30/10/1997, *нижняя часть рисунка*). Ожидаемая зависимость центральной частоты QPO от времени, полученная в рамках модели вязкой эволюции положения внутренней границы радиационно–доминированного аккреционного диска приведена в виде белых линий, наложенных на наблюдаемый трек QPO. 90
- 4.1 Схема двухкомпонентной модели аккреционного потока вблизи компактного объекта в системе GRS 1915+105 93

- 4.2 Поверхностная плотность звездной массы в Галактике в модели Бакалла и Сонееры (Bahcall 1986) как функция расстояния до земного наблюдателя для различных условий наблюдения. *Толстая линия* соответствует наблюдению всей небесной сферы, *тонкая линия* — наблюдению прямоугольной площадки неба размером $10^\circ \times 10^\circ$, центрированной в направлении на Центр Галактики, *точечная линия* — наблюдению прямоугольной площадки неба размером $10^\circ \times 10^\circ$, центрированной в направлении на точку с галактическими координатами: $l = 20^\circ; b = 0^\circ$ 100
- 4.3 Ожидаемое соотношение числа источников N_{SIGMA}/N_{all} , открытых телескопом СИГМА в области Центра Галактики $\sim 10^\circ \times 10^\circ$ и рентгеновскими мониторами всего неба (WATCH, BATSE), как функция положения центра и характерной ширины Гауссовой функции светимости транзиентных источников. Чувствительность на детектирование новых источников принята равной 100 мКраб и 300 мКраб для прибора СИГМА и мониторов всего неба соответственно. 102
- 4.4 Широкополосные спектры галактических кандидатов в черные дыры в “высоком”/”сверхвысоком” спектральном состоянии по данным орбитальных обсерваторий RXTE и EXOSAT. Сплошные линии представляют собой аналитическую аппроксимацию данных моделью комптонизации низкоэнергичного излучения на сходящемся потоке аккрецируемого вещества вблизи черной дыры. 109
- 5.1 Изображение области Галактического Центра в диапазоне 35–150 кэВ 22–26 сентября 1994 г. Контуры соответствуют уровню значимости в 3,5,7... стандартных отклонений. 114
- 5.2 Рентгеновские кривые блеска KS/GRS 1730-312 в диапазонах 2–10 (а), 10–27 (б) и 35–150 (в) кэВ, полученные телескопами ТТМ и СИГМА в сентябре 1994 г. (данные ТТМ взяты из работы Бороздина и др., 1995). . . . 117
- 5.3 Широкополосные (2–300 кэВ) спектры KS/GRS 1730-312 (по данным телескопов ТТМ и СИГМА) (данные ТТМ взяты из работы Бороздина и др. 1995), полученные в сентябре 1994 г.: 22–23 сентября (а), 24–25 сентября (б), 26–27 сентября (в) 1994 г. Сплошные линии соответствуют моделям, наилучшим образом аппроксимирующим данные: комптонизированное излучение (Сюняев, Титарчук, 1980)(а, б); двухкомпонентная модель, состоящая из излучения оптически непрозрачного аккреционного диска и степенного закона (в). Штриховые линии приведены для сравнения и отображают аппроксимацию данных 22–23 сентября ($kT_e \approx 26$ кэВ, $\tau \approx 3.6$). 120
- 5.4 Кривые блеска KS/GRS 1730-312 (а, б) и рентгеновской Новой 1991 г. в созвездии Мухи (в, г) в стандартном (а, в) и жестком (б, г) рентгеновских диапазонах. Данные прибора ТТМ по KS/GRS 1730-312 взяты из работы Бороздина и др. (1995), данные телескопа СИГМА и обсерватории ГИНГА по Новой 1991 г. в созвездии Мухи заимствованы из работ Гильфанова и др. (1991) и Китамото и др. (1992) (Новая в созвездии Мухи была впервые зарегистрирована 8 января 1991 г). 121

- 5.5 Спектры KS/GRS 1730-312 (*a, в*) и рентгеновской Новой 1991 г. в созвездии Мухи (*б, г*) (в единицах $E^2 \times F(E)$) в момент появления источников (*a, в*) и вблизи максимума рентгеновской светимости источников несколько дней спустя (*б, г*). Поведение спектра Новой в созвездии Мухи 9 – 10 января 1991 г. в стандартном рентгеновском диапазоне (штриховая линия на рис. 6б) показано по данным обсерватории ГИНГА из работы Китамото и др., (1992). Данные телескопов ТТМ и АРТ-П в мягком рентгеновском диапазоне (2 – 30 кэВ) взяты из работ Бороздина и др. (1995) и Гребенева и др. (1992). 122
- 6.1 Кривая блеска GRS 1739–278 в стандартном рентгеновском диапазоне (2 – 12 кэВ), полученная по данным монитора всего неба (ASM) орбитальной обсерватории RXTE. По оси времен отложены усеченные Юлианские даты: $TJD = JD - 2450000$, поток от источника приведен в стандартных единицах потока от Крабовидной туманности. Даты наблюдений источника приборами PCA и HEXTE обсерватории RXTE отмечены штрихами в верхней части рисунка. 123
- 6.2 Примеры широкополосных энергетических спектров и спектров мощности GRS 1739–278 в период “сверхвысокого” (*левая часть*) и “высокого” (*правая часть*) состояний по данным приборов PCA и HEXTE. 124
- 7.1 Изображение области Центра Галактики в диапазоне 35 – 75 кэВ 14 – 28 марта 1997 г. по данным телескопа СИГМА. Контуры соответствуют уровню значимости рентгеновского потока в 3, 4, 5, ... стандартных отклонений, координатная сетка соответствует эпохе 1950 г. 128
- 7.2 Временные истории рентгеновского потока источника GRS 1737–31 в диапазонах энергии 35 – 75, 75 – 150 и 35 – 150 кэВ в марте 1997 г. по данным телескопа СИГМА. 129
- 7.3 Кривая блеска GRS 1737–31 в стандартном рентгеновском диапазоне (2 – 12 кэВ) по данным прибора PCA и рентгеновского монитора ASM орбитальной обсерватории RXTE (Cui *et al.* 1997б). 129
- 7.4 Энергетические спектры источников GRS 1737–31 (*закрашенные кружки*), 1E 1740-292 (*открытые кружки*) и GRO J1744-28 (*открытые квадраты*) в единицах $F(E) \times E^2$, полученные в результате наблюдений телескопом СИГМА в марте 1997 г. Данные, соответствующие 1E 1740-292, домножены на 0.1 131
- 7.5 Широкополосные энергетические спектры источников GRS 1737–31 (*закрашенные кружки* – данные телескопа СИГМА; *закрашенные квадраты* – данные RXTE/PCA (Marshall *et al.* 1997)), Лебедь X–1 (*открытые кружки* – данные телескопа СИГМА и обсерватории ASCA) и GRO J1744–28 (*открытые квадраты* – данные приборов СИГМА и ТТМ). Данные прибора ТТМ взяты из работы Александровича и др. 1997. 132

- 8.1 **Слева:** Временные истории рентгеновского потока (в единицах потока от Крабовидной туманности) от ХТЕ J1748–288 во время вспышки 1998 г. Открытые кружки в верхней части рисунка соответствуют данным монитора всего неба (ASM) в диапазоне энергий 1.3 – 12 кэВ, заштрихованные кружки в верхней и нижней частях рисунка соответствуют результатам измерений прибора PCA орбитальной обсерватории *RXTE* в диапазонах энергий 3 – 15 и 15 – 30 кэВ. Вдоль оси времен отложены усеченные Юлианские даты: $TJD = JD - 2440000$. **Справа:** Широкополосные энергетические спектры ХТЕ J1748–288, соответствующие различным спектрально–временным состояниям, наблюдавшимся в процессе вспышки 1998 г. 135
- 8.2 Широкополосные спектры мощности ХТЕ J1748–288, соответствующие различным спектрально–временным состояниям, наблюдавшимся в процессе вспышки 1998 г. 136
- 8.3 Схематическое представление модели, использовавшейся для аппроксимации широкополосных спектров мощности ХТЕ J1748–288 (в единицах $f \times (rms/mean)^2/Hz$) в “сверхвысоком” спектральном состоянии на примере наблюдения 10 июня 1998 г. Вклады частотно–ограниченной компоненты и Лоренцевых компонент, аппроксимирующих QPO–пики, изображены с помощью штриховой и точечных линий соответственно. Врезка в левом верхнем углу демонстрирует отличие профиля QPO–пиков от профиля Лоренца. 137
- 8.4 Параметры аналитической аппроксимации спектров мощности источника (полная амплитуда переменности и характеристическая частота слома частотно–ограниченной компоненты – левая часть рисунка; относительная среднеквадратическая амплитуда частотно–ограниченной шумовой компоненты и основного QPO–пика в диапазоне частот 0.02 – 150 Гц – правая часть рисунка) ХТЕ J1748–288 в “сверхвысоком” состоянии как функции центральной частоты основного пика QPO. 139
- 8.5 Зависимость между центральной частотой основного пика QPO в спектре мощности ХТЕ J1748–288 и интегральной относительной среднеквадратической амплитудой переменности в этом QPO, полученная по результатам аналитической аппроксимации спектров мощности и энергетических спектров источника, аккумулированных за 256–с временные интервалы. 140
- 8.6 Зависимость между центральной частотой основного пика QPO в спектре мощности ХТЕ J1748–288 в “сверхвысоком” состоянии и потоком в мягкой компоненте энергетического спектра в диапазоне энергий 3 – 25 кэВ, полученная по результатам аналитической аппроксимации спектров мощности и энергетических спектров источника, аккумулированных за 256–сек временные интервалы. 140

- 9.1 Долговременная кривая блеска 4U 1630–47 в стандартном рентгеновском диапазоне (2 – 12 кэВ), полученная по данным монитора всего неба (ASM) орбитальной обсерватории RXTE. По оси времен отложены усеченные Юлианские даты: $TJD = JD - 2450000.$, поток от источника приведен в стандартных единицах потока от Крабовидной туманности. 144
- 9.2 Временные истории рентгеновского потока от 4U 1630–47 во время вспышки 1998 г. в стандартном рентгеновском диапазоне (две верхние панели, данные монитора всего неба (ASM) и прибора PCA орбитальной обсерватории RXTE) и в диапазоне энергий 12 – 30 кэВ (нижняя панель, данные прибора PCA). По оси времен отложены усеченные Юлианские даты: $TJD = JD - 2450000.$, поток от источника приведен в стандартных единицах потока от Крабовидной туманности. Границы последовательных спектрально–временных состояний источника отмечены с помощью точечных линий. 145
- 9.3 Характерные примеры широкополосных энергетических спектров 4U 1630–47 в период начального нарастания и максимума вспышки 1998 г. *Закрашенные* и *открытые* кружки отражают данные приборов PCA и HEXTE соответственно. 146
- 9.4 Эволюция параметров аппроксимации энергетического спектра 4U 1630–47 в период вспышки 1998 г. 'Soft fraction' обозначает вклад мягкой спектральной компоненты в полный поток в диапазоне энергий 3 – 20 кэВ, а 'Flux'* – полный поток от источника в том же диапазоне энергий, скорректированный на эффекты межзвездного поглощения (в единицах $\times 10^{-8} \text{ эрг } \text{с}^{-1} \text{ см}^{-2}$). 147
- 9.5 Характерные примеры широкополосных спектров мощности 4U 1630–47 в единицах $f \times (rms/mean)^2/\text{Гц}$ в период вспышки 1998 г. 149
- 9.6 Эволюция основных параметров спектра мощности 4U 1630–47 в период вспышки 1998 г., совмещенная с эволюцией рентгеновского потока (*верхняя часть рисунка*). *Закрашенные* и *открытые* кружки в верхней части рисунка соответствуют полному потоку в диапазоне энергий 3 – 20 кэВ и болометрическому потоку в мягкой спектральной компоненте. 'Total rms' – обозначает полную среднеквадратическую амплитуду переменности в диапазоне частот 0.01 – 128 Гц. *Нижние панели рисунка* демонстрируют эволюцию центральной частоты и амплитуды переменности нескольких QPO–компонент спектра мощности источника. 150
- 9.7 Сходство свойств энергетического спектра и спектра переменности 4U 1630–47 на начальном этапе вспышки 1998 г. (*левая половина рисунка*) и GRS 1915+105 в состоянии с низкой светимостью (*правая половина рисунка*). Энергетические спектры и спектры мощности источников представлены в *верхней* и *нижней* частях рисунка. 151
- 9.8 Сходный характер переменности рентгеновского потока 4U 1630–47 (*верхняя панель*), GRO J1655–40 (*средняя панель*) и GRS 1915+105 (*нижняя панель*). 152

- 9.9 Спектры мощности 4U 1630–47, GRO J1655–40 и GRS 1915+105 для наблюдений со сходным характером переменности на масштабах 10 – 50 сек. . 153
- 9.10 Различие свойств энергетического спектра 4U 1630–47 при низком (*закрашенные кружки*) и высоком (*открытые кружки*) уровнях потока для наблюдения 18 февраля (#24). Точки отражают отношение спектров к степенному спектру с наклоном $\alpha = 2.5$ 154
- 9.11 **Слева:** Сравнение спектров мощности источника (в единицах $f \times (rms/mean)^2/\text{Гц}$), соответствующих низкому (*закрашенные кружки, сплошные линии*) и высокому (*открытые кружки, точечные линии*) уровням рентгеновского потока в наблюдении 18 февраля (#24). Примечательно, что QPO на частоте ~ 13 Гц доминирует в первом случае и исчезает во втором случае. **Справа:** Зависимость частот QPO–пиков в спектре мощности от рентгеновского потока 4U 1630–47 в диапазоне 2 – 13 кэВ в том же наблюдении. QPO на частоте ~ 13 Гц не детектируется для потоков более ~ 4200 *отсч/с*. Центральная частота второго QPO–пика испытывает резкий скачок в той же области потоков. 154
- 9.12 Кривые блеска GRS 1739–278, XTE J1748–288 и 4U 1630–47 в стандартном рентгеновском диапазоне (1.3 – 12 кэВ), полученные по данным монитора всего неба (ASM) орбитальной обсерватории RXTE. По оси времен отложены усеченные Юлианские даты: $TJD = JD - 2450000.$, потоки от источников приведены в стандартных единицах потока от Крабовидной туманности. 163

Список таблиц

1.1	Наблюдения GX 339-4 телескопом СИГМА	45
1.2	Параметры аппроксимации спектров GX 339-4 в диапазоне 40 – 300 кэВ, полученных телескопом СИГМА в октябре 1992 г.	46
1.3	Параметры аппроксимации спектров GX 339-4 в диапазоне 40 – 300 кэВ, полученных телескопом СИГМА весной 1994 г.	46
2.1	Наблюдения GRS 1915+105 приборами орбитальной обсерватории <i>RXTE</i> в октябре 1996 г. – апреле 1997 г.	66
2.2	Параметры аналитической аппроксимации спектра мощности источника GRS 1915+105 в диапазоне энергий 2 – 13 кэВ в период состояния с низкой рентгеновской светимостью и переходов между состояниями. Ошибки и верхние пределы на значения параметров соответствуют уровню в 1σ и 2σ . $f_1^{br}, f_2^{br}, f_3^{br}$ и $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – характеристические частоты слома и показатели степени спадающей части частотно-ограниченных шумовых компонент (см. описание модели в тексте), rms_{BLN} представляет собой сумму rms всех частотно-ограниченных шумовых компонент (BLN) в диапазоне частот 0.05 – 50 Гц. Наблюдения с сильной переменностью были разбиты на отдельные части, соответствующие различным диапазонам наблюдаемого потока излучения от источника.	70
2.3	То же, что и в Табл. 2, но для энергетического диапазона 13 – 60 кэВ.	71
2.4	Параметры аппроксимации спектра мощности источника GRS 1915+105 в период состояния с низкой рентгеновской светимостью и переходов между состояниями, не включенные в Табл. 2 и 3. f_{QPO} , FWHM – центральная частота и ширина основного пика QPO, rms_n^{QPO} – интегральная относительная среднеквадратическая амплитуда флуктуаций в QPO–гармонике с номером n , соответствующим отношению ее центральной частоты к центральной частоте основного QPO-пика.	72
2.5	То же, что и в Табл. 4, но для энергетического диапазона 13 – 60 кэВ.	73
3.1	Наблюдения GRS 1915+105 прибором PCA орбитальной обсерватории <i>RXTE</i> в ярком вспыхивающем состоянии.	79
5.1	Наблюдения KS/GRS 1730-312 телескопом СИГМА в сентябре 1994 г.	115
5.2	Параметры аппроксимации спектров GRS/KS 1730-312 в диапазоне 40 – 300 кэВ, полученных телескопом СИГМА 22-27 сентября 1994 г.	116

5.3	Параметры аппроксимации широкополосных спектров GRS/KS 1730-312 в диапазоне 2 – 300 кэВ, полученных телескопами ТТМ и СИГМА в ходе совместных наблюдений в сентябре 1994 г.	116
6.1	Параметры аналитической аппроксимации спектров мощности GRS 1739–278 в “сверхвысоком” (наблюдение 30/03/1996, сумма модели частотно–ограниченной компоненты, двух лоненциан, представляющих QPO, и степенного закона) и “высоком” (наблюдение 25/05/1996, степенной закон) спектральных состояниях	125
7.1	Наблюдения GRS 1737–31 телескопом СИГМА в марте 1997 г.	130
7.2	Параметры аналитической аппроксимации спектров источника GRS 1737–31, полученных телескопом СИГМА 14–28 марта 1997 г. в диапазоне 40 – 300 кэВ.	131
8.1	Наблюдения XTE J1748–288 прибором PCA орбитальной обсерватории RXTE.	134
8.2	Параметры аналитической аппроксимации спектров мощности XTE J1748–288 в диапазоне энергий 2 – 13 кэВ и интервале частот 0.02 – 150 Гц. Ошибки на значения параметров соответствуют уровню в 1σ . rms_{total} и rms_{BLN} представляют собой полную относительную среднеквадратическую амплитуду переменности и относительную среднеквадратическую амплитуду частотно–ограниченной компоненты, проинтегрированные в диапазоне частот 0.02 – 150 Гц, а f_{br} , f_{QPO} и $f_{QPO}^{shoulder}$ – характеристическую частоту слома частотно–ограниченной компоненты и центральные частоты фундаментальной гармоник QPO и дополнительной Лоренцевой компоненты. rms_{QPO}^1 , $rms_{QPO}^{1/2}$ и rms_{QPO}^2 представляют собой относительные среднеквадратические амплитуды переменности фундаментальной гармоник QPO, ее субгармоники и второй гармоник.	138
9.1	Наблюдения 4U 1630–47 приборами орбитальной обсерватории RXTE в период вспышки 1998 г.	142
9.2	Параметры аналитической аппроксимации спектра 4U 1630-47 в диапазоне 3 – 20 кэВ моделью, состоящей из суммы модели оптически толстого “многотемпературного” аккреционного диска (Mitsuda et al. 1984) и степенного закона с коррекцией на эффекты межзвездного поглощения. Ошибки на параметры соответствуют уровню значимости в 1σ для принятой дополнительной систематической ошибки в 1%. Для описания данных прибора HEXTE использовалась модель степенного закона. В целях повышения значимости данные HEXTE были усреднены в соответствии с датой наблюдений.	156
9.3	Характеристики спектра мощности 4U 1630–47 в период вспышки 1998 г. Ошибки на параметры соответствуют уровню значимости в 1σ . rms_{total} представляет собой полную среднеквадратическую амплитуду переменности в диапазоне частот 0.02 – 100 Гц, f_{QPO} и rms_{QPO} – центральную частоту и амплитуду переменности фундаментальных QPO–пиков.	157

-
- 9.4 Свойства различных состояний 4U 1630–47 в период вспышки 1998 г. . . . 158
- 9.5 Основные параметры энергетического спектра 4U 1630–47 в диапазоне энергий 3–20 кэВ при максимально низком и высоком уровнях потока для наблюдения 18 февраля (#24), полученные в результате его аппроксимации суммой модели излучения оптически толстого “многоцветного” аккреционного диска и простого степенного закона с коррекцией на межзвездное поглощение, зафиксированное на значении $8 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ (данные прибора РСА). Ошибки на параметры соответствуют уровню значимости в 1σ 158

Введение: рентгеновская астрономия галактических кандидатов в черные дыры

Рентгеновское излучение, возникающее при аккреции вещества на белые карлики, нейтронные звезды и черные дыры, является уникальным источником информации о физических процессах, протекающих в непосредственной близости от компактного объекта, где вещество находится в экстремальных состояниях, недостижимых в современных лабораторных условиях. В свете этого детальный анализ свойств рентгеновского излучения компактных объектов приобретает особое значение.

Галактические транзиентные источники (рентгеновские Новые) представляют собой, пожалуй, самый удобный объект исследования, поскольку они демонстрируют сразу целый ряд состояний, соответствующих различным режимам аккреции на компактный объект. Одновременный анализ свойств энергетического спектра и характера короткопериодической переменности рентгеновского излучения таких систем и их эволюции позволяет получить наиболее полную информацию о физических параметрах и геометрии аккреционного потока, а также о возможных причинах, вызывающих их изменение.

Одновременные наблюдения галактических транзиентных источников приборами орбитальных обсерваторий МИР–КВАНТ и ГРАНАТ впервые позволили проследить эволюцию свойств спектра нескольких рентгеновских Новых в период вспышки в широком энергетическом диапазоне от нескольких кэВ до сотен кэВ, продемонстрировав общность ее характера для разных объектов, относящихся к этому классу.

Запуск орбитальной рентгеновской обсерватории RXTE открыл новый этап в исследовании свойств излучения компактных объектов. Рекордная чувствительность, высокое временное разрешение и широкий энергетический диапазон приборов, установленных на борту спутника, позволяет исследовать процессы, происходящие во внутренней части аккреционного потока, на расстояниях порядка нескольких гравитационных радиусов от центрального объекта. Наблюдения прибора PCA открыли возможность изучения эволюции временных и спектральных параметров источников

рентгеновского излучения на временных масштабах вплоть до нескольких секунд. Подробный анализ свойств нескольких рентгеновских Новых позволил установить общность процесса изменения спектра и характера переменности вне зависимости от временного масштаба. Особенно интересна корреляция между спектральными и временными свойствами, в частности, между параметрами мягкой спектральной компоненты и характерными частотами спектра мощности. Наблюдаемая взаимосвязь спектральных параметров и свойств короткопериодической переменности может быть успешно использована для проверки современных теоретических моделей аккреционного потока, включающих взаимодействующие внутреннюю область и окружающий оптически непрозрачный аккреционный диск, в предположении того, что мягкая спектральная компонента возникает в оптически толстом диске, а характерные временные масштабы переменности соответствуют положению границы между вышеупомянутыми областями аккреционного потока.

Наблюдения галактического “микроквара” GRS 1915+105 в различных спектральных состояниях позволяют исследовать особенности свойств процесса аккреции в системах, демонстрирующих сколламированные релятивистские выбросы вещества (джеты). Широкий диапазон изменения спектральных и временных свойств источника позволяет проверять современные модели, описывающие геометрические и физические свойства аккреционного потока вблизи черной дыры.

Часть I

Инструменты и наблюдения.

1.1 Телескоп СИГМА обсерватории “Гранат”.

Телескоп СИГМА (Paul *et al.* 1991) является одним из двух основных рентгеновских телескопов на борту орбитальной обсерватории “Гранат”.

В основу работы телескопа СИГМА положен принцип кодированной апертуры для построения изображений в жестком рентгеновском и мягком гамма — диапазонах. Основными элементами прибора являются кодирующая маска и расположенный на расстоянии 2.5 м от нее позиционно — чувствительный детектор на основе кристалла NaI(Tl), построенный на принципе гамма — камеры Оже (Anger). Положение и энергия каждого регистрируемого фотона определяются при помощи фотумножителей, расположенных с нижней стороны детектора и находящихся в оптическом контакте с ним. Блок детектора помещен в оболочку из кристаллов CsI, составляющих систему активной защиты детектора. Телескоп позволяет получать изображения в диапазоне от 35 до 1300 кэВ с номинальным угловым разрешением (соответствующем размеру элемента маски) ~ 13 угловых минут. Точность локализации точечных источников варьируется от $\sim 20''$ до 4 — 5 угловых минут в зависимости от яркости источника и количества наблюдений. Поле зрения телескопа состоит из центральной области размером 4.7×4.3 — области полного кодирования, в которой чувствительность прибора максимальна и постоянна, окруженной широким полем спадающей чувствительности. Размер поля зрения на половине чувствительности составляет 11.5×10.9 . Энергетическое разрешение детектора составляет $\sim 9\%$ на энергии 500 кэВ.

1.2 Телескоп ТТМ обсерватории МИР — КВАНТ.

Обсерватория МИР — КВАНТ (модуль КВАНТ орбитального комплекса МИР) функционирует на орбите с апреля 1987 г. Телескоп с кодированной апертурой ТТМ — один из основных ее инструментов — позволяет строить изображения в поле зрения $15^\circ \times 15^\circ$ с угловым разрешением ~ 2 угловых минут в диапазоне от 2 до 30 кэВ.

1.3 Обсерватория RXTE

Значительная часть результатов, представленных в диссертационной работе получена на основе наблюдений галактических рентгеновских источников приборами орбитальной обсерватории RXTE (Rossi X-ray Timing Explorer, Bradt *et al.* 1993), позволяющими исследовать свойства этих объектов с беспрецедентной чувствительностью и временным разрешением.

Основными приборами обсерватории RXTE являются: система пропорциональных счетчиков PCA (Proportional Counter Array) и комплекс твердотельных (phoswich) детекторов HEXTE (High Energy Timing Experiment), а также рентгеновский монитор всего неба ASM (All Sky Monitor) (см Рис.1.1).

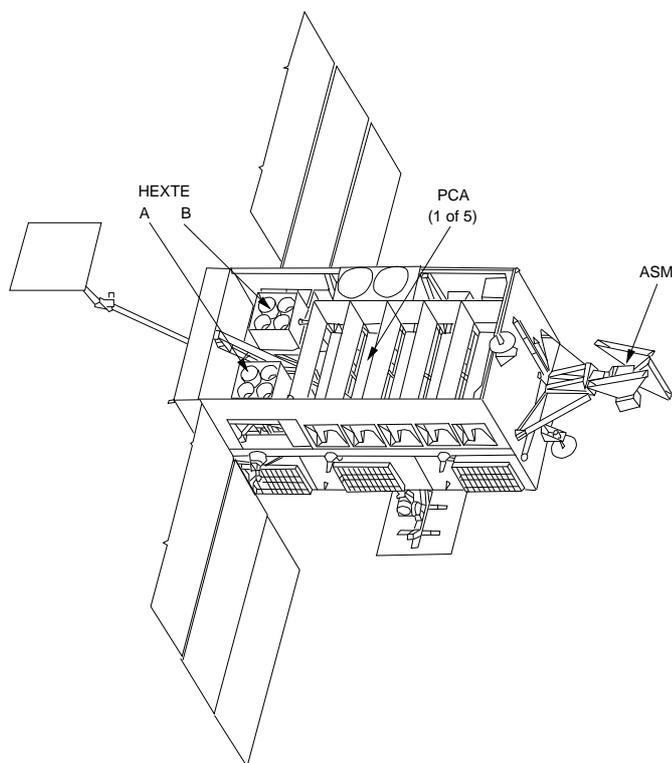


Рис. 1.1. Общий вид обсерватории RXTE. Стрелками показаны три научных прибора — ASM, PCA, HEXTE.

1.3.1 Прибор PCA.

PCA представляет собой набор 5 коллимированных пропорциональных счетчиков, заполненных ксеноном (Xe). Диапазон чувствительности детекторов: $\sim 3 - 40$ кэВ. Сотовый коллиматор ограничивает поле зрения $\sim 1^\circ \times 1^\circ$. Несмотря на то, что спектрометр не имеет пространственного (углового) разрешения, он может использоваться для локализации ярких источников, работая в сканирующем режиме. Серия сканирующих наблюдений в отдельных случаях позволяет определять положение ярких источников с точностью $\sim 1 - 2$ угл. мин.

Передний слой каждого детектора заполнен пропаном, прозрачным для рентгеновских фотонов с энергией > 3 кэВ и используется для частичной фильтрации фоновых частиц (вето-слой). Основной объем детекторов занимает ксенон с малой примесью метана при давлении ~ 1.1 атм. Система, снимающая ток с каждого детектора состоит из трёх слоев катодов, каждый из которых подразделен на две части - “правую” (R) и “левую” (L). В каждый из детекторов встроен калибровочный источник рентгеновских фотонов Am^{241} (схема строения отдельного PCU (Proportional Counter Unit) показана на Рис. 1.2). Полная эффективная площадь детекторов PCA составляет ~ 6500 см² на энергии 6 кэВ, а энергетическое разрешение на той же энергии — $\Delta E/E \sim 12\%$.

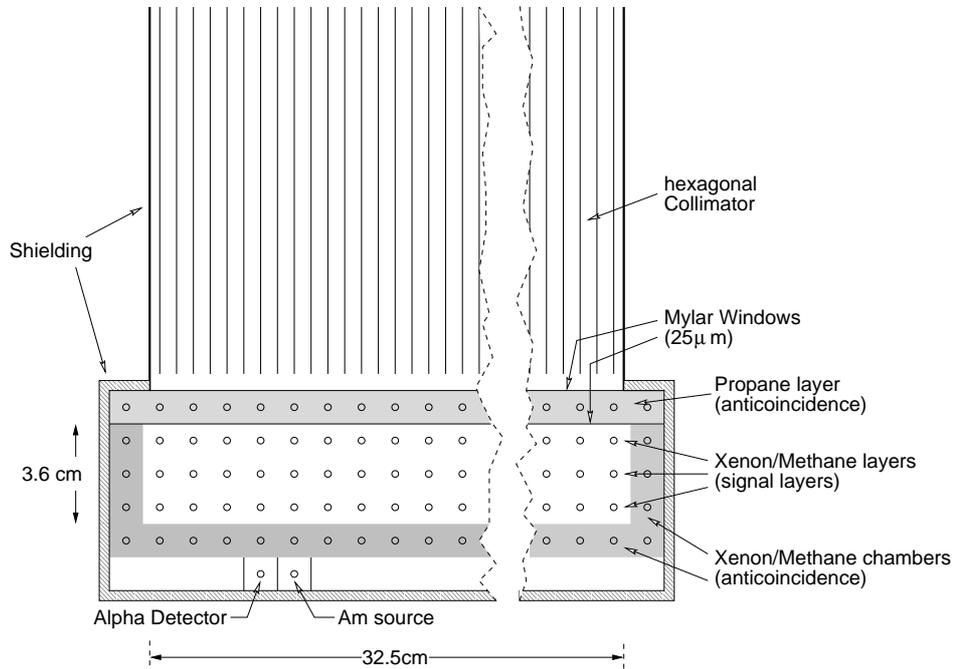


Рис. 1.2. Схема отдельного пропорционального счетчика PCU. Показаны коллиматор, пропановый “вето”-слой, три слоя, снимающих электронный каскад, и ксеноново-метановый “вето”-слой (активная защита, основанная на методе антисовпадений). Снизу встроен искусственный источник рентгеновского излучения Am^{241}

Результаты счета детекторов PCA обрабатываются бортовой системой EDS (Experiment Data System), которая позволяет записывать время прихода фотонов с разрешением ~ 1 мксек (более точно - 2^{-20} сек) в 256 каналах. Мертвое время прибора составляет ~ 10 мксек для каждого регистрируемого фотона (эта величина несколько растет с энергией фотона) и ~ 150 мксек на каждую высокоэнергичную частицу. Поток от Крабовидной туманности в диапазоне PCA составляет $\sim 10^4$ отсч/сек. При очень больших потоках ($\geq 2 - 3$ Краб) существенным становится так называемый “эффект переполнения” (“pile-up effect”). Бортовой компьютер, обрабатывающий пришедший от детектора импульс, не успевает надлежащим образом записать всю информацию о событии как приходит новый импульс. Такое наложение двух импульсов приводит к тому, что компьютер записывает одно событие, но с энергией, соответствующей сложной энергии двух пришедших событий.

При обработке данных спектрометра PCA использовался стандартный пакет программ FTOOLS 4.2 XTE. Приборный фон моделировался при помощи программы *pcabackest* (Stark 1999). Для того, чтобы учесть эволюцию параметров пропорционального счетчика PCA, для каждого наблюдения PCA строилась своя матрица отклика (Jahoda 1999a, Jahoda 1999b). Все спектры корректировались на мертвое

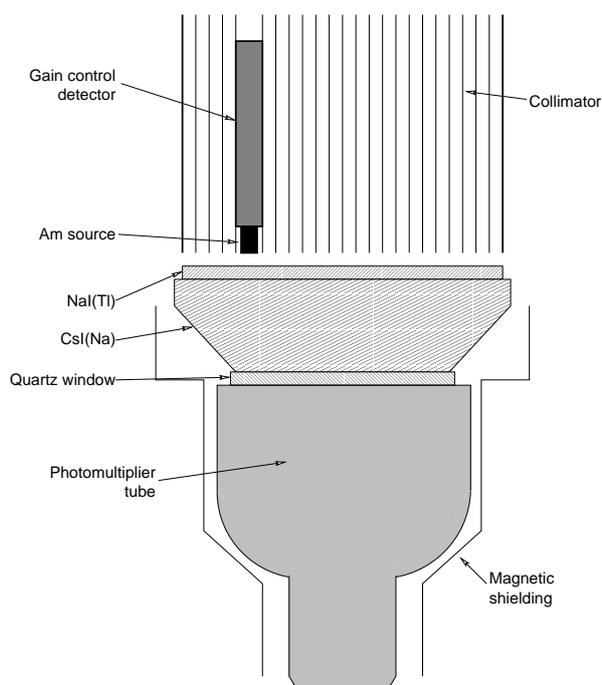


Рис. 1.3. Схема отдельного детектора HEXTE. Показаны коллиматор, калибровочный источник ренгеновского излучения Am^{241} , сцинтилляционный кристалл $NaI(Tl)$, кристалл $CsI(Na)$, фотоумножитель, магнитная защита.

время по методу, описанному в работе Zhang & Jahoda (1996).

1.3.2 Прибор HEXTE.

Система из 8 детекторов HEXTE (Rotschild *et al.* 1998) объединена в две группы/”кластера” (А и В, или 0 и 1) по 4 детектора, работающих в качающемся режиме, что позволяет эффективно измерять поток и спектр фонового излучения параллельно с наблюдением источника. Кластеры HEXTE поочередно отклоняют свои оптические оси на $\pm 3^\circ$ или $\pm 1.5^\circ$ от источника (величина задается командами с Земли). Полный цикл занимает 32 или 64 *сек*, в зависимости от заданной программы наблюдения. Поскольку переменность приборного фона HEXTE имеет значительно большее характерное время, линейная или ступенчатая интерполяция фонового потока очень эффективна. К сожалению, в густонаселенных областях неба описанный способ наталкивается на большие сложности, связанные с тем, что во время наблюдения фоновых площадок неба помимо собственно фона в поле зрения детекторов HEXTE попадает также и излучение других рентгеновских источников.

Детекторы HEXTE состоят из сцинтилляционных кристаллов $NaI(Tl)$ и $CsI(Na)$, которые находятся в контакте с фотоумножителями. Для удаления низкоэнергичных фотонов перед кристаллом $NaI(Tl)$ находится бериллиевая пластина (berillium window). Структура детектора HEXTE показана на Рис. 1.3. Рабочий энергетический диапазон детекторов HEXTE $\sim 15 - 250$ кэВ, а их общая эффективная площадь составляет ~ 1400 см² на энергии 50 кэВ. Поле зрения прибора ограничено сотовым механическим коллиматором — $1^\circ \times 1^\circ$. Мертвое время прибора для каждого ре-

гистрируемого фотона равно $\sim 1 - 2$ мксек и ~ 2.5 мсек для высокоэнергичной частицы. Поток Крабовидной туманности, регистрируемый детекторами HEXTE составляет ~ 150 отсч/сек (величина не скорректирована на мертвое время прибора). Средний поток высокоэнергичных частиц составляет $\sim 150 - 200$ частиц/сек, что приводит к высокой доле мертвого времени прибора ($\sim 40 - 50\%$).

Литература

- Bradt *et al.* 1993//Bradt H., Rotshild R., Swank J., Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 1993, **97**, 355
- Zhang & Jahoda 1996//Zhang W., Jahoda K. <http://lheawww.gsfc.nasa.gov/users/keith/deadtime/deadtime.htm>
- Paul *et al.* 1991// Paul J. et. al. 1991, Advances In Space Research, **11**, 289
- Rotschild *et al.* 1998// Rothschild R., Blanco P., Gruber D., Heindl W., Macdonald D., Marsden D., Pelling M., Wayne L., Hink P., 1998, ApJ, **496**, 538
- Stark 1999// Stark, <http://lheawww.gsfc.nasa.gov/~stark/pca/pcabackest.html>
- Jahoda 1999a// Jahoda, <http://lheawww.gsfc.nasa.gov/users/keith/pcarmf.html>
- Jahoda 1999б// Jahoda, http://lheawww.gsfc.nasa.gov/users/keith/pcarmf_ft41.erratum

Часть II

**Источник GX 339-4:
долговременные наблюдения в
жестком рентгеновском диапазоне.**

1.4 Введение.

Согласно данным рентгеновских наблюдений GX 339-4 (4U 1658-486), можно выделить по меньшей мере три состояния этого источника: “выключенное” (*off state*), “низкое” или “жесткое” (*low/hard state*) и “мягкое” или “высокое” (*soft/high state*), в зависимости от временных и спектральных характеристик его излучения. Рентгеновское излучение системы в “низком” состоянии характеризуется жестким комптонизационным спектром и высоким уровнем хаотических вариаций потока (Grebenev *et al.*, 1993; Harmon *et al.*, 1994; Grabelsky *et al.*, 1995). Спектр источника в “высоком” состоянии, обычно наблюдаемом сразу после “низкого” состояния, представляет собой совокупность доминирующей мягкой, хорошо описываемой моделью излучения абсолютно черного тела с температурой $\sim 0.5 - 1.0$ кэВ, и относительно слабой жесткой степенной компонент. “Выключенное” состояние характеризуется низким уровнем рентгеновского потока от источника (< 30 мКраб в диапазоне энергий $2 - 10$ кэВ (Markert *et al.*, 1973)) и спектром, схожим по форме со спектром в “низком” состоянии. В добавление к вышеперечисленным состояниям, наблюдения рентгеновской обсерватории *GINGA* (Miyamoto *et al.*, 1991) выявили наличие так называемого “сверхвысокого” состояния (*very high state*) системы с нетипично высокими для “мягкого” состояния светимостью и уровнем вариаций рентгеновского потока.

Принимая во внимание схожесть поведения GX 339-4 с поведением систем (Лебедь X-1, некоторые рентгеновские Новые), присутствие черной дыры в которых подтверждено динамически, было высказано предположение, что компактным объектом здесь также является черная дыра. С другой стороны, оценки массы, основанные на наблюдениях в оптическом диапазоне (Cowley *et al.*, 1987; Callanan *et al.*, 1992), лежат в пределах от $1M_{\odot}$ до $2M_{\odot}$, свидетельствуя в пользу того, что компактный объект - нейтронная звезда.

1.5 Наблюдения телескопом СИГМА в 1990–1994 гг.

В 1990-1994 годах телескопом СИГМА орбитальной обсерватории ГРАНАТ было проведено пять серий наблюдений GX 339-4. В четырех сериях источник детектировался со средним уровнем потока $200 - 400$ мКраб в диапазоне энергий $35 - 150$ кэВ (Табл. 1.1).

Согласно данным прибора BATSE обсерватории гамма-лучей им. А. Комптона (*CGRO*), за период с 1991 по 1994 год произошло три последовательных жестких рентгеновских вспышки GX 339-4 с промежутками $\approx 440 \pm 30$ дней и длительностью $110 - 120$ дней каждая (Fishman *et al.*, 1991; Harmon *et al.*, 1992; Harmon *et al.*, 1994a). Было установлено, что временные и спектральные характеристики жесткого рентгеновского излучения системы сходны для этих вспышек (Harmon *et al.*, 1994), что находится в хорошем согласии с результатами, полученными с помощью телескопа СИГМА.

1.5.1 Наблюдения 1990 года

Во время наблюдений 27 – 28 марта 1990 года GX 339-4 находился в “низком” состоянии со средним потоком ≈ 210 мКраб в диапазоне 35 – 150 кэВ (Табл. 1.1)(Bouchet *et al.* , 1993). Спектр источника в интервале энергий 40 – 300 кэВ хорошо аппроксимируется моделью комптонизированного излучения (Sunyaev & Titarchuk, 1980) с электронной температурой $kT_e \approx 31 \pm 7$ кэВ и оптической толщине по томсоновскому рассеянию $\tau \approx 3.95 \pm 1.86$ (здесь и далее предполагается сферическая геометрия задачи).

В течение следующей серии наблюдений телескопом СИГМА в августе 1990 года не было обнаружено статистически значимого потока от источника. В то же время, согласно данным телескопа АРТ-П в диапазоне 3 – 30 кэВ (Grebenev *et al.* , 1993), GX 339-4 находился в типичном “высоком” состоянии, что согласуется с отсутствием детектирования излучения системы в жестком рентгеновском диапазоне.

1.5.2 Вспышка 1991 года

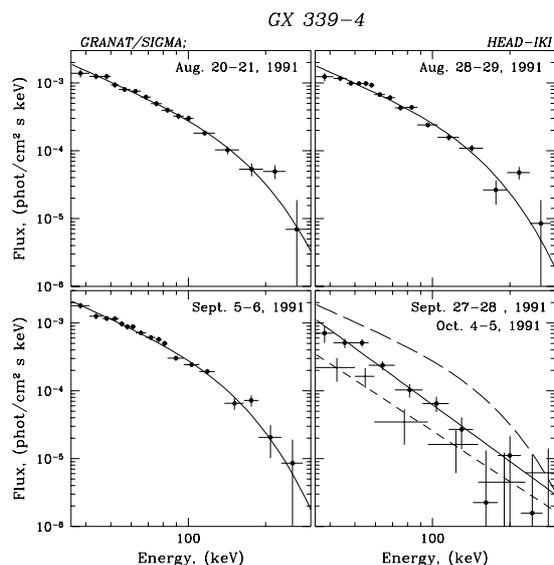


Рис. 1.4. Спектры GX 339-4, полученные телескопом СИГМА в диапазоне 40 – 400 кэВ осенью 1991 г.

По данным *CGRO/BATSE*, начало вспышки GX 339-4 в жестком рентгеновском диапазоне приходится на июль 1991 года (Fishman *et al.* , 1991). В середине августа поток от источника в интервале энергий 20 – 100 кэВ достиг значения ≈ 400 мКраб и продолжал оставаться на этом уровне вплоть до середины сентября (Harmon *et al.* , 1994). С 21 августа по 5 октября 1991 года с помощью телескопа СИГМА было проведено пять наблюдений GX 339-4 (Табл. 1.1)(Bouchet *et al.* , 1993).

Эволюция спектра GX 339-4 в жестком рентгеновском диапазоне за этот период характеризуется постепенным укрупнением спектра, сопровождающимся падением его интенсивности (Bouchet *et al.*, 1993; Harmon *et al.*, 1994). Противоположно поведению потока в жестком диапазоне, поток в стандартном рентгеновском диапазоне монотонно возрастал, что может рассматриваться как свидетельство перехода источника из “низкого” в “высокое” спектральное состояние (Рис. 1.4) (Grebenev *et al.*, 1993).

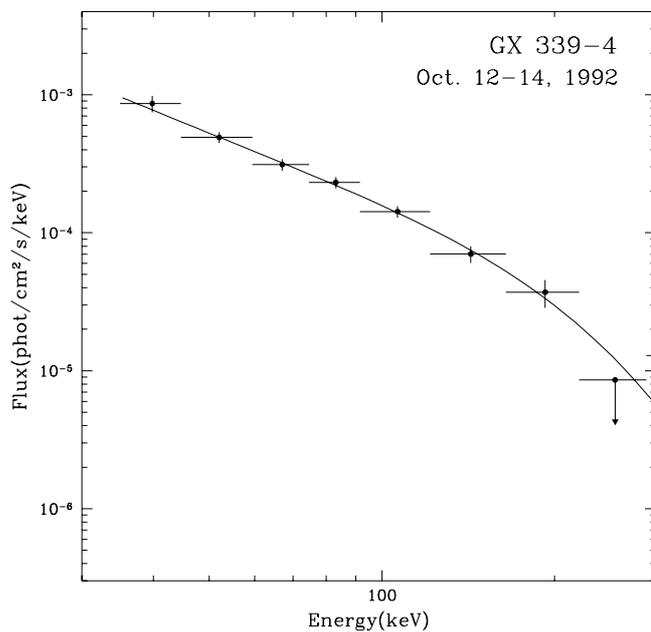


Рис. 1.5. Спектры GX 339-4, полученные телескопом СИГМА в диапазоне 40–400 кэВ 12–14 октября 1992 г.

1.5.3 Вспышка 1992 года

Результаты, полученные *CGRO/BATSE*, демонстрируют поразительное сходство характера временной эволюции параметров жесткого рентгеновского излучения источника во время вспышек 1991 и 1992 годов (Harmon *et al.*, 1994). В момент наблюдений телескопа СИГМА, проводившихся в октябре 1992 года и приходящихся на начало вспышки, GX 339-4 находился в типичном “низком” состоянии со средним потоком ≈ 220 мКраб в диапазоне 35–150 кэВ (Табл. 1.2). Необходимо отметить, что спектр источника был несколько жестче, чем типичный спектр в “низком” состоянии (аппроксимация моделью комптонизированного излучения дает значения $kT_e \approx 40$ кэВ и $\tau \approx 3.1$) (Табл. 1.2, Рис. 1.5).

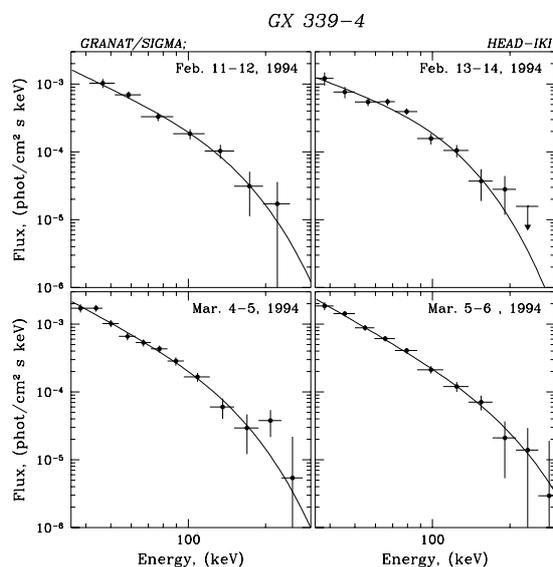


Рис. 1.6. Спектры GX 339-4, полученные телескопом СИГМА в диапазоне 40–400 кэВ весной 1994 г.

1.6 Эволюция спектра источника во время вспышек

В средней части рисунка 1.7 изображена зависимость жесткости спектра GX 339-4, характеризующейся температурой наилучшим образом аппроксимирующей его модели теплового тормозного излучения оптически тонкой плазмы, от времени, прошедшего с момента начала соответствующей вспышки (даты начала вспышек взяты из работ Нагтон *et al.*, 1994a, 1994b). Верхняя часть рисунка 1.7 отображает временную эволюцию потока от источника в диапазоне 40–300 кэВ. Приведенные данные демонстрируют схожесть спектральной эволюции жесткого рентгеновского излучения GX 339-4 во время вспышек 1991, 1992 и 1994 годов, выражающейся в постепенном падении жесткости спектра со временем, независимо от величины светимости источника.

Как показали исследования свойств рентгеновского излучения некоторых галактических кандидатов в черные дыры, в частности, “мягких” рентгеновских Новых (GRS/GS 1124-684, KS/GRS 1730-312), жесткость спектра на высоких энергиях антикоррелирована с полной рентгеновской светимостью и, как следствие, с темпом аккреции вещества на компактный объект. Предполагая сходство механизма генерации рентгеновского излучения в “мягких” рентгеновских Новых и GX 339-4, мы можем заключить, что постепенное уменьшение жесткости спектра во время вспышек этого источника свидетельствует о монотонном возрастании темпа аккреции.

Сопоставление данных, полученных приборами CGRO/BATSE (Хармон и др., 1994), СИГМА и АРТ-П (Grebenev *et al.*, 1993; Bouchet *et al.*, 1993) во время вспышки 1991 года показывает, что максимум потока от GX 339-4 в жестком рентгеновском диапазоне совпадает по времени с началом перехода источника из “низкого”

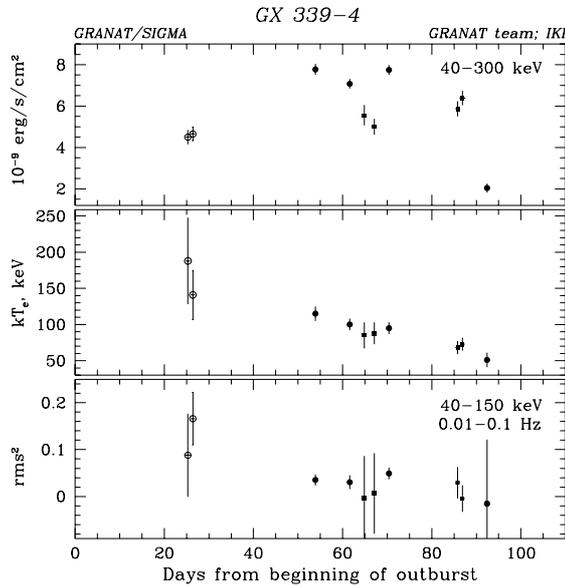


Рис. 1.7. Эволюция параметров спектра GX 339-4 в диапазоне 40 – 400 кэВ во время вспышек в 1991, 1992 и 1994 гг.

в “высокое” спектральное состояние. С другой стороны, установлено, что “высокое” состояние кандидатов в черные дыры соответствует более высокому темпу аккреции на компактный объект в сравнении с “низким” состоянием (Трудолюбов и др., 1996). Следовательно, максимум темпа аккреции наступает заметно позже максимума светимости в жестком рентгеновском диапазоне, и падение жесткого потока не должно рассматриваться как свидетельство уменьшения темпа аккреции в системе.

Согласно данным *EXOSAT/ME* (Ilovaisky *et al.*, 1986) и *GINGA* (Ueda *et al.*, 1994), спектр GX 339-4 в “выключенном” состоянии в диапазоне 2 – 20 кэВ характеризуется высокой жесткостью (наклон спектра по числу фотонов $\alpha \sim 1.7$) (Рис. 1.8). Примечателен тот факт, что спектр GX 339-4 в “низком” спектральном состоянии имеет сходную форму (Grebenev *et al.*, 1993), в то время как светимость источника в > 100 раз выше, чем в “выключенном” состоянии, что говорит о необычно слабой зависимости наклона комптонизационного спектра от светимости (Gilfanov *et al.*, 1995).

1.7 Связь между жесткостью спектра и уровнем флуктуаций жесткого рентгеновского потока

Данные наблюдений GX 339-4, полученные телескопом СИГМА позволили провести анализ временных характеристик жесткого рентгеновского излучения источника. Зависимость среднеквадратической амплитуды хаотических вариаций (*RMS*) потока в диапазоне 40 – 150 кэВ от температуры для модели тормозного излучения оптически тонкой плазмы, характеризующей жесткость спектра, изображена на

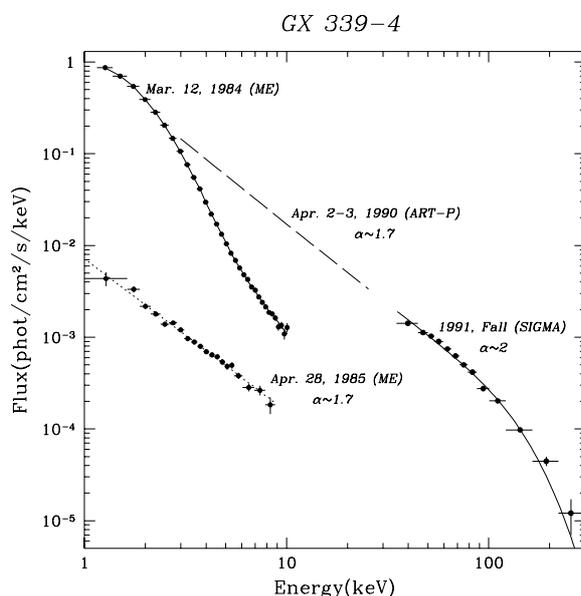


Рис. 1.8. Широкополосные (2 – 300 кэВ) спектры GX 339-4 в различных спектральных состояниях

рисунках 1.7 и 1.9. Легко видеть, что падение жесткости спектра GX 339-4 сопровождается уменьшением уровня вариаций жесткого рентгеновского потока, что напоминает поведение хорошо известных кандидатов в черные дыры, таких как Лебедь X-1 (Kuznetsov *et al.*, 1996) и Новая в созвездии Персея 1992 года (GRO J0422+32). Этот факт может рассматриваться как еще одно свидетельство схожести процесса генерации жесткого рентгеновского излучения в подобных системах.

1.8 Механизм возникновения вспышек

Как показывают оптические наблюдения, GX 339-4 является двойной системой с 14.8-часовым периодом обращения, состоящей из компактного объекта массы $1M_{\odot} \leq M_c \leq 2M_{\odot}$ и, вероятно, маломассивной нормальной звезды на поздней стадии эволюции со светимостью $L_s \leq L_{\odot}$ (Cowley *et al.*, 1987; Callanan *et al.*, 1992).

Кривые блеска GX 339-4 в жестком рентгеновском диапазоне (≥ 20 кэВ), полученные с помощью CGRO/BATSE во время его вспышек в 1991-1994 г., демонстрируют начальное возрастание интенсивности источника на масштабе времени ~ 1 месяца, сменяющееся более пологим подъемом до максимального значения в течение последующих ~ 2 месяцев, и относительно быстрым ~ 20 -дневным спадом до предвспышечного значения (Harmon *et al.*, 1993; Harmon *et al.*, 1994). Характер эволюции рентгеновского спектра источника свидетельствует о том, что максимум темпа аккреции в системе достигается через некоторое время после пика светимости в жестком диапазоне, т. е. через ~ 3 месяца после начала вспышки. Такое поведение противоположно поведению рентгеновских Новых во время главной вспышки

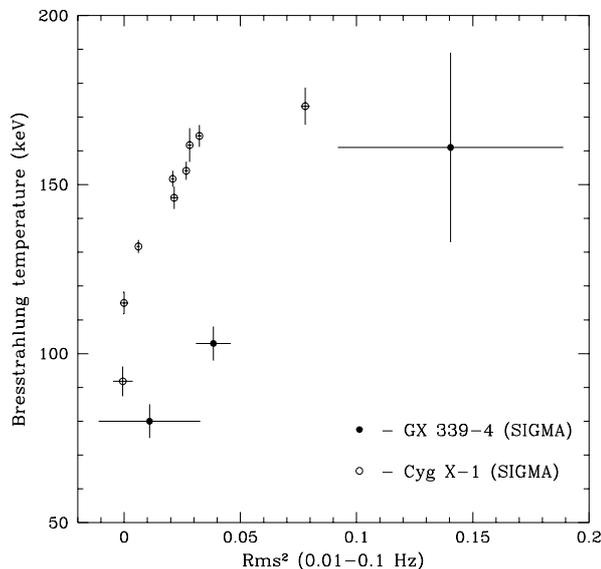


Рис. 1.9. Зависимость жесткости спектра GX 339-4 в диапазоне 40 – 150 кэВ от уровня флуктуаций потока (rms^2) в том же диапазоне в полосе частот $10^{-2} - 10^{-1}$ Гц.

с быстрым нарастанием потока (в течение нескольких дней), обычно объясняемым действием тепловой неустойчивости аккреционного диска.

Причиной вспышек рентгеновского излучения в маломассивных двойных системах традиционно считается увеличение темпа аккреции вещества на компактный объект. Основываясь на различных физических механизмах, объясняющих это явление, были построены две основные наиболее реалистичные модели. Первая из них базируется на неустойчивости процесса переноса массы в двойной системе (MTI) (Hameury, King & Lasota, 1986; 1988; 1990) и предполагает, что вспышки высокоэнергичного излучения вызваны увеличением темпа переноса вещества на компактный объект через внутреннюю точку Лагранжа из-за расширения оболочки звезды-компаньона, нагреваемой жестким рентгеновским излучением, генерируемым вблизи компактного объекта. Вторая модель, основанная на действии тепловой неустойчивости аккреционного диска (DTI) (Lin & Taam, 1984; Huang & Wheeler, 1989; Mineshige & Wheeler, 1989), объясняет явление вспышек увеличением скорости переноса массы через диск в связи с увеличением поверхностной плотности вещества диска, вызванной изменением температуры и степени ионизации вещества.

В MTI - модели время развития процесса вспышки определяется характерным временем расширения оболочки звезды-компаньона (Gontikakis & Hameury, 1993) и временем диффузии вещества через аккреционный диск вокруг компактного объекта: $\tau_{diff} \sim (R/v_R) \sim (1/\alpha\Omega)(R/H)^2 \sim$ несколько месяцев (Lightman, 1974), где R , H , α , Ω - радиус, толщина, параметр вязкости и угловая скорость вращения аккреционного диска соответственно (Shakura & Sunyaev, 1973; 1976). С другой стороны,

измеренная средняя светимость GX 339-4 перед вспышками ($\geq 10^{35} D_{4kpc}^2$ эрг/с) (Plovaisky *et al.*, 1986; Ueda *et al.*, 1994; Tanaka, 1994) в целом выше, чем требуемая для активизации расширения внешних слоев атмосферы звезды-компаньона $\sim 10^{34} M_2^2$ эрг/с (Hameury, King & Lasota, 1986; Chen, Livio & Gehrels, 1993), где M_2 - масса звезды-компаньона в солнечных массах. Характерный временной масштаб развития тепловой неустойчивости аккреционного диска определяется временем распространения волны нагрева: $\tau_{heat} \sim (R/\alpha c_s) \sim (1/\alpha\Omega)(R/H) \sim$ несколько дней (Meuer, 1984), где c_s - скорость звука. Вышеперечисленные факты позволяют предположить, что наиболее вероятной причиной вспышек жесткого рентгеновского излучения GX 339-4 является развитие неустойчивости процесса переноса вещества на компактный объект в маломассивной двойной системе.

Предполагая, что вспышки GX 339-4 вызваны усилением процесса перетекания вещества через внутреннюю точку Лагранжа (L_1), оценим степень переполнения ΔR нормальной компонентой своей полости Роша, зная темп аккреции в системе. В случае нормальной звезды с глубокой конвективной оболочкой уравнение состояния газа может быть аппроксимировано законом $p = \rho^{5/3}$, и связь темпа переноса массы \dot{M} со степенью переполнения полости Роша ΔR принимает следующий вид (см. Приложение):

$$\dot{M} \simeq \frac{M_2}{P_B} \left(\frac{\Delta R}{R} \right)^3, \quad (1.1)$$

где P_B - период обращения двойной системы. Приближенное значение темпа аккреции в “низком” состоянии равно $\sim 3 \times 10^{-9} (0.1/\eta) M_\odot/\text{год}$ (η -зэффективность аккреции) при полной рентгеновской светимости $\sim 2 \times 10^{37} D_{4kpc}^2$ эрг/с (Grebenev *et al.*, 1993), откуда $\Delta R/R \sim 10^{-4}$, принимая во внимание неточность в определении параметров двойной системы. Может ли подобный эффект вызываться другими причинами, например, собственными колебаниями радиуса звезды? Как показывают наблюдения, в маломассивных двойных системах, таких как взрывные переменные и карликовые Новые, действительно происходят колебания радиуса нормальных компонент, что, возможно, связано с циклами магнитной активности. В дополнение следует заметить, что наблюдения Солнца также выявили наличие изменений его радиуса ($\Delta R_\odot/R_\odot \sim 10^{-4}$) в пределах циклов солнечной активности (Gilliland, 1981). Характерная длительность циклов магнитной активности нормальных звезд исчисляется годами, поэтому вряд ли их можно считать ответственными за возникновение вспышек GX 339-4, хотя нельзя полностью исключить возможность их влияния на эволюцию источника на сравнительно больших временных масштабах.

Предлагаемый механизм возникновения вспышек жесткого рентгеновского излучения GX 339-4 связывает увеличение темпа аккреции вещества с расширением внешних слоев атмосферы звезды-компаньона под действием нагрева высокоэнергичным излучением, приходящим из окрестности компактного объекта. В момент, когда темп аккреции достигает определенного значения, происходит переход источника из “низкого” в “высокое” спектральное состояние. Облучение поверхностных

слоев нормального компонента продолжается до тех пор, пока разросшийся аккреционный диск не заслонит окрестность внутренней точки Лагранжа, тем самым подавляя их расширение. Следующее за этим сжатие атмосферы звезды приводит к уменьшению темпа переноса массы на компактный объект и падению светимости источника.

Данный механизм не предполагает существования строгой периодичности во вспышках GX 339-4. Более того, возможные дополнительные факторы, подобные обсуждавшимся выше внутренним флуктуациям радиуса нормального компонента, могут накладываться на основной цикл, вызывая сильное увеличение темпа аккреции, приводящее к переходу источника в “сверхвысокое” состояние или возникновению внеочередной вспышки.

Литература

- Bouchet *et al.* 1993//Bouchet, L., *et al.* 1993 ApJ, **407**, 739
Callanan *et al.* 1992//Callanan, P.J., *et al.* 1992 MNRAS, **259**, 395
Chen *et al.* 1993//Chen, W., Livio, M., Gehrels, N., 1993 ApJ, **408**, L5
Cowley *et al.* 1987//Cowley, A.P., Crampton, D., & Hutchings, J.B., 1987 AJ, **92**, 195
Fishman *et al.* 1991//Fishman, G. J., *et al.* 1991 IAU Circ. **N 5327**
Hameury, King & Lasota 1986//Hameury, J.M., King, A.R., Lasota, J.P., 1986 A&A, **162**, 71
Hameury, King & Lasota 1988//Hameury, J.M., King, A.R., Lasota, J.P., 1988 A&A, **192**, 187
Hameury, King & Lasota 1990//Hameury, J.M., King, A.R., Lasota, J.P., 1990 ApJ, **353**, 585
Harmon *et al.* 1992//Harmon, B.A., *et al.* 1992 IAU Circ. **N 5647**
Harmon *et al.* 1993//Harmon, B. A., *et al.* 1993 Proc. 304 The Second Compton Symposium, eds. C. E. Fichtel, N. Gehrels, J. P. Norris (New York: AIP), **210**
Harmon *et al.* 1994//Harmon, B. A., *et al.* 1994 IAU Circ. **N 5915**
Harmon *et al.* 1994//Harmon, B. A., *et al.* 1994 ApJ, **425**, L17
Huang & Wheeler 1989//Huang, M., & Wheeler, J. C. 1989, **343**, 229
Ilovaisky *et al.* 1986//Ilovaisky, S. A., *et al.* 1986 A&A, **164**, 67
Gil'fanov *et al.* 1991//Gilfanov, M. R., *et al.* 1991 Soviet. Astron. Lett., **17**, 437
Gilfanov *et al.* 1995//Gilfanov, M., *et al.* 1995 in The Lives of the Neutron Stars, NATO ASI C450, Kluwer, Dordrecht, **331**
Gilliland 1981//Gilliland, R. L., 1981 ApJ, **248**, 1144
Gontikakis & Hameury 1993//Gontikakis, C., Hameury, J. M., 1993 A&A, **271**, 118
Grabelsky *et al.* 1995//Grabelsky, D.A., *et al.* 1995, ApJ, **441**, 800
Grebenev *et al.* 1993//Grebenev, S. A. *et al.* 1993 A&ASS, **97**, 281
Lightman 1974//Lightman, A.P., 1974 ApJ, **194**, 419
Livio 1992//Livio, M. 1992 in 22d Saas Fee Advanced Course, Interacting Binaries, ed. H. Nussbaumer
Lubow & Shu 1975//Lubow, S.H., Shu, F.H. 1975 ApJ, **198**, 383
Makishima, K., Maejima, Y., Mitsuda, K., Bradt, H. V., Remillard, R. A., Tuohy, I. R., Hoshi, R., & Nakagawa, M.

Astrophys. J., 1986, V. 308, P. 635.

Markert *et al.* 1973//Markert, T.H., *et al.* 1973 ApJ, **184**, L67

Meyer 1984//Meyer, F., 1984 A&A, **131**, 303

Mineshige & Wheeler 1989//Mineshige, S., & Wheeler, J. C., 1989 ApJ, **343**, 241

Paczynski 1971//Paczynski, B., 1971 ARA&A, **9**, 183

Revnivtsev *et al.* 1998//Revnivtsev M., *et al.* A&A. 1998, **331**, 557

Shakura & Sunyaev 1973//Shakura N., & Sunyaev R., 1973 A&A, **24**, 337

Sunyaev & Titarchuk 1980//Sunyaev R., & Titarchuk L. 1980 A&A, **86**, 121

Sunyaev & Titarchuk 1989//Sunyaev, R. A., Titarchuk, L. G., 1989 in Proc. of the 23rd ESLAB Symposium, ESA SP-296, Bologna, Italy, eds. J. Hunt & B. Battrock, **627**

Trudoyubov *et al.* 1996//Трудолобов С.П. и др. 1996 Письма в Астрономический Журнал, **22**, 740

Soviet. Astron. Letters, 1996, V. 22, P. 664.

Ueda *et al.* 1994//Ueda, Y., Ebisawa, K., & Done, C., 1994 PASJ, **46**, 107

Табл. 1.1. Наблюдения GX 339-4 телескопом СИГМА

Дата, UT	Экспозиция (час) ^a	Поток, мКраб ^b		
		35-75 кэВ	75-150 кэВ	35-150 кэВ
1990				
27-28 марта	23.86	205 ± 15	226 ± 19	214 ± 12
18 августа	3.01	-10 ± 25	18 ± 36	7 ± 18
22-23 августа	15.00	16 ± 12	22 ± 18	22 ± 9
1991				
18-19 февраля	21.01	-10 ± 16	63 ± 25	19 ± 12
19-20 февраля	20.00	-5 ± 11	4 ± 16	0 ± 8
21-22 августа	16.00	400 ± 13	399 ± 18	400 ± 11
29-30 августа	21.52	385 ± 12	360 ± 16	380 ± 10
6-7 сентября	18.00	450 ± 12	397 ± 17	430 ± 10
28-29 сентября	17.16	157 ± 13	99 ± 18	136 ± 10
5-6 октября	16.00	55 ± 13	34 ± 18	47 ± 11
1992				
10-11 февраля	19.33	24 ± 13	-12 ± 18	9 ± 9
11-12 февраля	13.00	25 ± 15	-10 ± 12	5 ± 11
13-14 февраля	20.31	10 ± 10	-16 ± 24	3 ± 12
6-7 марта	24.00	-26 ± 18	16 ± 29	-7 ± 19
12-13 октября	16.00	197 ± 17	223 ± 24	207 ± 14
13-14 октября	17.00	218 ± 17	276 ± 23	239 ± 13
1993				
12-13 февраля	21.00	13 ± 14	-10 ± 20	0 ± 11
13-14 февраля	20.00	-18 ± 14	-19 ± 20	-10 ± 11
1994				
11-12 февраля	14.69	329 ± 26	297 ± 35	320 ± 17
13-14 февраля	19.00	291 ± 21	274 ± 28	280 ± 17
4-5 марта	20.00	385 ± 20	296 ± 28	350 ± 16
5-6 марта	20.65	410 ± 20	325 ± 26	380 ± 16

^a длительность экспозиции без коррекции на мертвое время прибора.

^b поток в 1 мКраб равен $\sim 7.9 \times 10^{-12}$, $\sim 7.2 \times 10^{-12}$ и $\sim 1.5 \times 10^{-11}$ эрг/с/см² в диапазонах 35 – 75, 75 – 150 и 35 – 150 кэВ соответственно.

Табл. 1.2. Параметры аппроксимации спектров GX 339-4 в диапазоне 40 – 300 кэВ, полученных телескопом СИГМА в октябре 1992 г.

Параметр	Дата, Октябрь 1992	
	12 – 13	13 – 14
<i>Степенной закон</i>		
Наклон спектра, α	1.88 ± 0.14	2.04 ± 0.13
Поток на 60 кэВ, F_{60}^a	3.54 ± 0.28	3.99 ± 0.27
$\chi^2(d.o.f.)$	50.5(45)	46.9(45)
<i>Спектр тормозного излучения оптически тонкой плазмы</i>		
Температура, кэВ	188^{+62}_{-41}	141^{+34}_{-25}
Поток на 60 кэВ, F_{60}^a	3.58 ± 0.27	4.06 ± 0.25
$\chi^2(d.o.f.)$	47.9(45)	44.6(45)
<i>Модель комптонизированного излучения (Сюняев и Титарчук, 1980)</i>		
Температура электронов, kT_e , кэВ	46^{+19}_{-10}	40^{+20}_{-8}
Оптическая толщина, τ	$3.11^{+1.08}_{-0.91}$	$3.18^{+1.25}_{-1.08}$
Поток на 60 кэВ, F_{60}^a	3.46 ± 0.26	3.97 ± 0.24
$\chi^2(d.o.f.)$	47.1(44)	44.0(44)

^a поток в единицах $10^{-4} \text{ фот см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ кэВ}^{-1}$

Табл. 1.3. Параметры аппроксимации спектров GX 339-4 в диапазоне 40 – 300 кэВ, полученных телескопом СИГМА весной 1994 г.

Параметр	Дата, 1994			
	11 – 12 фев.	13 – 14 фев.	4 – 5 мар.	5 – 6 мар.
<i>Степенной закон</i>				
Наклон спектра, α	2.38 ± 0.16	2.36 ± 0.14	2.58 ± 0.12	2.53 ± 0.11
Поток на 60 кэВ, F_{60}^a	5.78 ± 0.42	5.14 ± 0.33	6.67 ± 0.31	7.04 ± 0.31
$\chi^2(d.o.f.)$	33.5(45)	83.8(45)	50.9(45)	45.8(45)
<i>Спектр тормозного излучения оптически тонкой плазмы</i>				
Температура, кэВ	85 ± 18	88^{+15}_{-13}	68 ± 9	73 ± 9
Поток на 60 кэВ, F_{60}^a	6.00 ± 0.45	5.38 ± 0.32	7.03 ± 0.33	7.33 ± 0.32
$\chi^2(d.o.f.)$	31.2(45)	76.0(45)	47.8(45)	46.2(45)
<i>Модель комптонизированного излучения (Сюняев и Титарчук, 1980)</i>				
kT_e , кэВ	35^{+26}_{-9}	26^{+5}_{-6}	30 ± 8	45^{+28}_{-11}
Оптическая толщина, τ	$2.89^{+1.48}_{-1.24}$	$5.30^{+1.93}_{-1.86}$	$2.88^{+0.62}_{-1.27}$	$2.00^{+0.65}_{-1.20}$
Поток на 60 кэВ, F_{60}^a	5.93 ± 0.40	5.42 ± 0.32	6.91 ± 0.31	7.16 ± 0.31
$\chi^2(d.o.f.)$	31.1(44)	73.4(44)	47.4(44)	44.2(44)

^a поток в единицах $10^{-4} \text{ фот см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ кэВ}^{-1}$

Часть III

**Свойства рентгеновского
излучения галактического
микроквара GRS 1915+105 (по
данным приборов обсерватории
RXTE).**

Введение

Рентгеновский источник GRS 1915+105, один из наиболее известных Галактических объектов, демонстрирующих релятивистские выбросы вещества (джеты), был открыт в 1992 г. прибором ВОТЧ (WATCH) орбитальной обсерватории “ГРАНАТ” (Кастро-Тирадо и др. 1992). Последующие наблюдения GRS 1915+105 в радиодиапазоне позволили определить расстояние до источника (~ 12.5 кпк) и наклонение системы к лучу зрения ($\sim 70^\circ$) (Мирабель, Родригез, 1994).

На основании того, что светимость источника заведомо превышает эддингтоновский предел для нейтронной звезды (Сазонов и др., 1994), а также сходства его спектральных и временных свойств со свойствами системы GRO J1655-40 (Жанг и др., 1995), динамические измерения массы которой предполагают наличие в ней черной дыры (Ороц, Байлин, 1997), GRS 1915+105 был причислен к классу кандидатов в черные дыры.

GRS 1915+105 демонстрирует чрезвычайно сложную систему долгопериодической переменности рентгеновского потока: с момента открытия в 1992 г. наблюдалось большое количество вспышек и эпизодов падения светимости источника (Сазонов и др., 1996; Пачейсас и др., 1997). Регулярные наблюдения GRS 1915+105 приборами обсерватории RXTE, начавшиеся в апреле 1996 г., выявили самый сложный характер переменности источника на сравнительно коротких временных масштабах (0.01 с – 1 час): были зарегистрированы резкие переходы источника между состояниями с низкой и высокой светимостью, чередующиеся со спокойными периодами, открыты квазипериодические осцилляции рентгеновского потока с характерными частотами $\sim 0.01 - 67$ Гц (Морган и др., 1997; Чен и др., 1997; Таам и др., 1997; Беллони и др., 1997*a, б*).

Глава 2

GRS 1915+105 в период состояния с низкой светимостью и переходов между состояниями.

2.1 Введение.

Мы провели анализ особенностей эволюции временных и спектральных характеристик излучения источника во время состояния с низкой светимостью и переходов между состояниями в октябре 1996 – апреле 1997 г., используя общедоступные (public domain) архивные данные наблюдений приборов PCA и HEXTE орбитальной обсерватории RXTE (Bradt, Swank & Rothschild 1993). Основными целями проведенного исследования являлись:

- выявление взаимосвязи временных и спектральных характеристик рентгеновского излучения GRS 1915+105;
- установление связи между вышеуказанными состояниями GRS 1915+105 и канонической системой спектральных состояний, принятой для Галактических кандидатов в черные дыры (Танака, Льюин, 1995).

2.2 Наблюдения

Данные наблюдений источника GRS 1915+105, использовавшиеся для анализа, получены с помощью приборов PCA (Proportional Counter Array) и HEXTE (High Energy X-ray Timing Experiment) в период с октября 1996 г. по апрель 1997 г. Список наблюдений, содержащий дату и эффективное время экспозиции с коррекцией на эффекты мертвого времени приборов, приведен в табл. 2.1.

Для обработки данных прибора PCA использовался набор стандартных программ пакета FTOOLS версии 4.1. При оценке фона учитывались вклады диффузного рентгеновского фона и фона заряженных частиц (Штарк, 1997).

Спектральный анализ данных PCA проводился с использованием матрицы отклика прибора версии 3.2.1 (Ягода, 1997). Для учета неточностей в ее определе-

нии мы добавили 1% систематическую ошибку к статистическим ошибкам данных при аппроксимации энергетических спектров источника аналитическими моделями. В связи с быстрым падением чувствительности прибора в области энергий ниже 3 кэВ и выше 20 кэВ, для спектрального анализа использовались только данные в диапазоне 3 – 20 кэВ. Полученные значения спектральных потоков от источника были откорректированы с учетом эффектов мертвого времени (Жанг, Ягода, 1996).

При обработке данных прибора HEXTE также использовались стандартные программы пакета FTOOLS версии 4.1. Измерение рентгеновского фона производилось на основе наблюдения площадок неба, непосредственно примыкающих к источнику. Для спектрального анализа была использована версия матрицы отклика инструмента от 3 апреля 1997 г. Для того, чтобы избежать ошибок, связанных с неточностями в определении функции отклика прибора и инструментального фона, данные ниже 20 и выше 150 кэВ были исключены из рассмотрения.

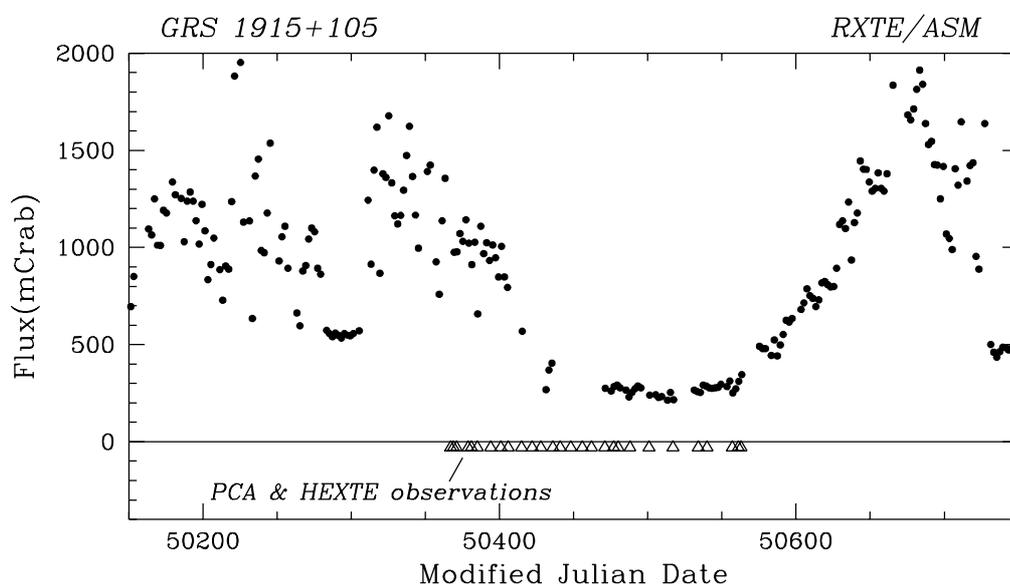


Рис. 2.1. Кривая блеска GRS 1915+105 в диапазоне 2 – 12 кэВ по данным наблюдений монитора всего неба (ASM) орбитальной рентгеновской обсерватории RXTE. Даты наблюдений источника приборами PCA и HEXTE отмечены треугольниками. Эти наблюдения были выбраны с целью исследования поведения источника во время состояния с низкой светимостью и переходов между состояниями.

На Рис. 2.1 изображена кривая блеска источника GRS 1915+105 в диапазоне 2 – 12 кэВ, полученная по данным монитора всего неба (ASM) обсерватории RXTE. До конца октября 1996 г. (MJD ~ 50386) источник находился в ярком “вспышечном” состоянии (BC), характеризовавшимся высоким уровнем переменности, со средним значением потока ~ 1 Краб. В последующий период произошел постепенный переход GRS 1915+105 в состояние с низкой рентгеновской светимостью (здесь и далее HC), продолжавшееся в течение ~ 200 дней. Вышеупомянутый переход между состояниями соответствовал падению рентгеновской светимости ис-

точника с $\sim 10^{39}$ эрг/с до $\sim 2 \times 10^{38}$ эрг/с (предполагая расстояние до источника равным 12.5 кпс). Согласно данным приборов обсерватории RXTE, начиная с ~ 25 апреля 1997 г. (MJD = 50564 ¹) GRS 1915+105 перешел обратно в состояние с высокой светимостью.

Далее приведено подробное описание результатов систематического анализа спектральных и временных характеристик излучения источника GRS 1915+105 в период НС и переходов между состояниями.

2.2.1 Эволюция параметров энергетического спектра.

Для аналитической аппроксимации широкополосного спектра источника в диапазоне 3 – 150 кэВ были использованы максимально упрощенные модели (вариант модели излучения оптически толстого “многоцветного” аккреционного диска (Шакура, Сюняев, 1973), предложенный в работах Мицуды и др., 1984 и Макишимы и др., 1986 ² и степенной закон с экспоненциальным завалом ³), поскольку основную цель исследования составляло выяснение общего характера спектральной эволюции GRS 1915+105. Все спектры источника демонстрируют значимое отклонение от используемой модели в области 6 – 8 кэВ ($\sim 2 - 3\%$ от интенсивности континуума), что объясняется присутствием комплекса спектральных особенностей, связанных с процессами поглощения и испускания излучения атомами и ионами элементов группы железа (в связи с довольно низким энергетическим разрешением прибора РСА в диапазоне 6 – 8 кэВ ($\Delta E \sim 1$ кэВ), детальный анализ этой области спектра не представляется возможным). Наличие таких особенностей может рассматриваться как дополнительное свидетельство существования в спектре GRS 1915+105 дополнительной компоненты, возникающей в результате взаимодействия жесткого излучения центрального источника со сравнительно плотным нейтральным или ионизированным веществом, однако ее аналитическая аппроксимация определенной моделью требует четкого физического обоснования. ⁴ По этой причине мы решили не включать эту компоненту в спектральную модель.

В связи с заметной неопределенностью в матрице отклика РСА в области низких

¹ MJD – модифицированная Юлианская дата (JD): MJD = JD - 2400000

² В модели спектр диска представляется в виде:

$f(E) = \frac{8\pi}{3} \left(\frac{r_{in}}{D}\right)^2 \cos i \int_{T_{out}}^{T_{soft}} \left(\frac{T}{T_{soft}}\right)^{-11/3} B(E, T) \frac{dT}{T_{soft}}$, где E – энергия фотона, $B(E, T)$ – Планковский спектр, соответствующий энергии фотона E и температуре T , i – угол наклона плоскости аккреционного диска к лучу зрения, T_{soft} – максимальная температура во внутренней зоне диска, T_{out} – температура на внешней границе диска, D – расстояние до источника. Поскольку этот спектр отличается от точного решения (см. Гребенев, 1996), значения r_{in} и T_{soft} , получаемые в рамках данной аппроксимации, не следует интерпретировать как радиус и температуру вещества на внутренней границе аккреционного диска. Следует также отметить, что при попытке связать эти наблюдаемые параметры с реальными физическими характеристиками диска требуется принимать во внимание тот факт, что в модели не учитывается видоизменение спектра излучения из-за эффектов электронного рассеяния и эффектов общей теории относительности (Шакура и Сюняев, 1973; Шимура и Такахара, 1995)

³ $f(E) \sim E^{-\alpha} \exp(-E/E_{cut})$, где α – фотонный индекс, E_{cut} – энергия завала

⁴ Результаты аппроксимации спектров GRS 1915+105 с использованием модели Комптоновского отражения от нейтральной и ионизованной среды приведены в работе Грейнера и др., 1998.

энергий, величина Галактического межзвездного поглощения в направлении на источник была зафиксирована на уровне $N_{\text{H}}L = 5 \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$, определенном из наблюдений рентгеновской обсерватории ASCA (Эбисава и др., 1995). Значения потока от источника в широком энергетическом диапазоне вычислялись по результатам одновременной аппроксимации данных приборов PCA (3 – 20 кэВ) и HEXTE (20 – 150 кэВ) и перенормировки в соответствии с нормализацией данных PCA.

Для получения общей картины спектральной эволюции источника GRS 1915+105 мы исследовали его спектры, усредненные за каждый сеанс наблюдений. Для определения характера эволюции спектральных параметров в отдельных наблюдениях с относительно высоким уровнем переменности рентгеновского потока был проведен анализ спектров источника, накопленных в течение 16 – 80 секундных интервалов.⁵ Подобная методика обработки данных наблюдений предоставляет уникальную возможность исследовать спектральную переменность GRS 1915+105 на масштабах времени от нескольких десятков секунд до нескольких месяцев.

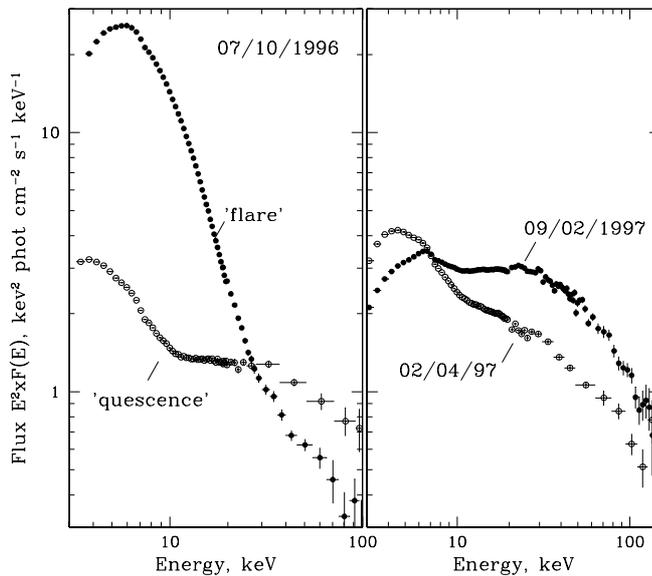


Рис. 2.2. Характерные широкополосные энергетические спектры GRS 1915+105 в единицах $F(E)E^2$ во вспышечном состоянии с высокой светимостью (а) и в состоянии с низкой светимостью (б) по данным приборов PCA и HEXTE. Закрашенные и открытые кружки на рис. (а) представляют спектры источника во “вспышке” и в “выключенном” состоянии соответственно.

Для сравнения с состоянием с низкой светимостью (НС) мы провели анализ данных наблюдений GRS 1915+105 во вспышечном состоянии с высокой светимостью (ВС) (7, 13, 15 октября 1996 г.), непосредственно предшествовавшем переходу в НС. Характерные широкополосные спектры источника в ВС представлены на рис. 2.2а. Находясь в этом состоянии, источник демонстрирует чрезвычайно сложный характер спектральной переменности на различных временных масштабах (Беллони и др., 1997а, б; Таам и др., 1997), причем наиболее интересной чертой является существование двух отдельных типов широкополосного спектра, соответствующих высокому (“вспышка”) и низкому (“выключенное” состояние) уровням светимости.

⁵Для этой части спектрального анализа использовались только данные прибора PCA, ввиду недостаточной статистической значимости данных HEXTE, накопленных за столь короткие временные интервалы.

В целом спектр GRS 1915+105 в ВС может быть представлен в виде суммы мягкой и жесткой спектральных компонент. Форма высокоэнергичной части спектра в “выключенном” состоянии довольно хорошо аппроксимируется степенным законом с наклоном по числу фотонов $\sim 2.0 - 2.6$, укрупняющимся до $\sim 3.0 - 3.5$, начиная с энергии 25 – 30 кэВ, в то время как во “вспышке” жесткая компонента представляется степенным законом с наклоном $\sim 3.0 - 3.5$. Характерная цветовая температура мягкой спектральной компоненты T_{soft} составляет ~ 1 кэВ и ~ 2 кэВ в “выключенном” состоянии и “вспышке” соответственно (см. Беллони и др., 1997б).

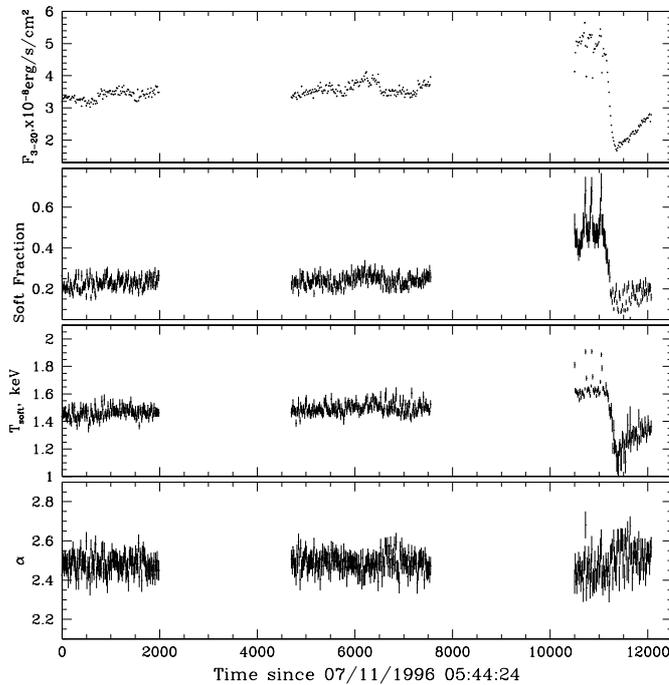


Рис. 2.3. Эволюция параметров энергетического спектра GRS 1915+105 во время наблюдения PCA 7 ноября 1996 г. (для аналитической аппроксимации спектра использовались модели излучения “многоцветного” аккреционного диска с характерной температурой T_{soft} (см. текст) и степенной закон ($f(E) \sim E^{-\alpha}$, E – энергия фотона, α – фотонный индекс), величина Галактического межзвездного поглощения была зафиксирована на значении $N_H L = 5 \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$). Каждая точка соответствует усреднению данных за 16-секундные интервалы. Вклад мягкой компоненты равен отношению светимости мягкой спектральной компоненты излучения к полной светимости в диапазоне энергий 3 – 20 кэВ, скорректированных на межзвездное поглощение.

Согласно данным приборов RXTE, начиная с 23 октября 1996 г. GRS 1915+105 начал переход из состояния с высокой в состояние с низкой светимостью, продолжавшийся до 28 ноября. В это время источник демонстрирует сильную переменность рентгеновского потока и спектральных свойств, чередуя вспышечную активность со сравнительно спокойными периодами. На рис. 3 показан пример короткопериодической переменности спектральных параметров рентгеновского излучения GRS 1915+105 во время наблюдения, проведенного 7 ноября 1996 г. Как явствует из рис. 2.3, изменения рентгеновского потока от источника тесно связаны со значительными вариациями параметров жесткой и мягкой спектральных компонент. При

переходе к масштабам нескольких дней также выявляется корреляция между спектральными параметрами, в частности, жесткостью высокоэнергичной части спектра и полной рентгеновской светимостью источника (рис. 2.4, 2.5, 2.6). Следует отметить, что по мере того, как рентгеновский поток от источника падает с переходом в НС, становится заметным завал жесткой спектральной компоненты, приходящийся на область энергий $\sim 70 - 120$ кэВ (рис. 5).

Широкополосный спектр GRS 1915+105 в состоянии с низкой рентгеновской светимостью также удовлетворительно описывается двухкомпонентной моделью, состоящей из относительно слабой мягкой компоненты с характерной цветовой температурой $T_{soft} \sim 1.0 - 1.7$ кэВ и доминирующей жесткой компоненты, аппроксимируемой степенным законом с фотонным индексом $\sim 1.8 - 2.4$ и экспоненциальным завалом с энергией $\sim 60 - 120$ кэВ (рис. 2.2 б).

Результаты аппроксимации данных наблюдений GRS 1915+105 приборами PCA и HEXTE в период с 7 октября 1996 г. по 25 апреля 1997 г. приведены на рис. 2.4 и 2.5 (данные HEXTE в диапазоне 20 – 150 кэВ описывались степенным законом с экспоненциальным завалом, данные PCA в диапазоне 3 – 20 кэВ аппроксимировались суммой модели излучения оптически толстого “многоцветного” диска и степенного закона).

2.3 Эволюция характера короткопериодической переменности.

Для количественного анализа короткомасштабных вариаций рентгеновского потока от GRS 1915+105, были получены кривые блеска в энергетических диапазонах 2 – 13 и 13 – 60 кэВ с временным разрешением 0.01 с, и на их основе произведены спектры мощности источника в интервале частот 0.01 – 50 Гц. В случае наблюдений с высокой относительной амплитудой изменения потока на масштабах 100 – 1000 с, спектры мощности производились для отдельных частей наблюдения, выделенных в соответствии со средним уровнем рентгеновской светимости. Частотные интервалы в спектрах мощности сгруппированы логарифмически, чтобы уменьшить разброс данных в области высоких частот. После вычитания фона, связанного с пуассоновской статистикой, откорректированного на эффекты мертвого времени, спектры мощности источника представлены в единицах квадрата относительной среднеквадратичной амплитуды флуктуаций рентгеновского потока $(rms/mean)^2$.

В целях исследования эволюции основных временных параметров излучения GRS 1915+105 внутри отдельных наблюдений с относительно высоким уровнем переменности, в соответствии с вышеописанной процедурой были произведены спектры мощности источника, накопленные за 16 – 80 с интервалы.

На рис. 2.7 приведены характерные примеры спектров мощности GRS 1915+105, соответствующие состоянию с высокой светимостью (BC), переходу между состояниями и состоянию с низкой светимостью. Для вспышечного состояния с высокой светимостью изображены два разных типа спектра мощности во “вспышке” и “выключенном” состоянии (рис. 2.7а).

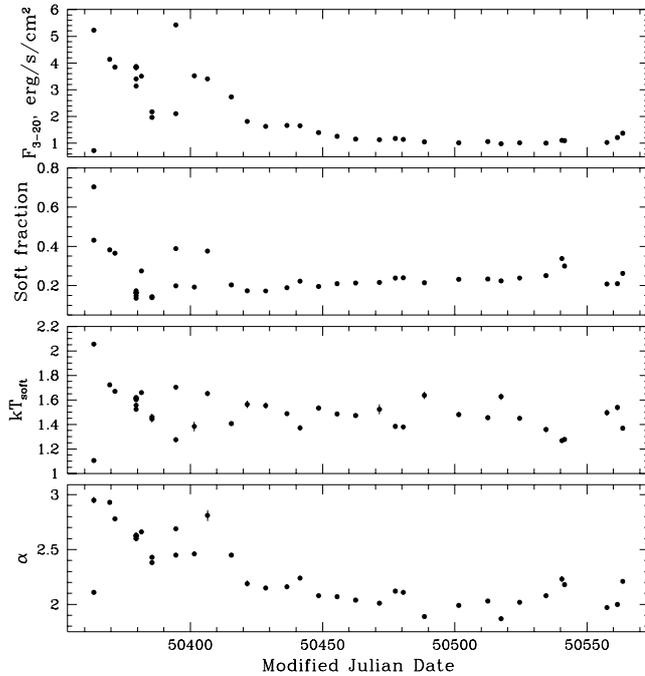


Рис. 2.4. Эволюция параметров энергетического спектра GRS 1915+105 в диапазоне 3 – 20 кэВ по данным PCA (для аналитической аппроксимации спектра использовались модели излучения “многоцветного” аккреционного диска с характерной температурой T_{soft} (см. текст) и степенной закон ($f(E) \sim E^{-\alpha}$), величина Галактического межзвездного поглощения была зафиксирована на значении $N_H L = 5 \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$). Вклад мягкой компоненты равен отношению светимости мягкой спектральной компоненты излучения к полной светимости в диапазоне энергий 3 – 20 кэВ, скорректированных на межзвездное поглощение. Данные наблюдений 7 и 23 октября, а также 7 и 19 ноября 1996 г. представлены несколькими точками по причине сильной переменности источника в этих наблюдениях.

Анализ спектров мощности GRS 1915+105 в период перехода между состояниями с 23 октября по 28 ноября 1996 г. выявил чрезвычайно сложный характер эволюции основных временных характеристик. В частности, наблюдалась корреляция изменения параметров спектра мощности источника с изменениями рентгеновского потока и параметров энергетического спектра в широком диапазоне временных масштабов от нескольких часов до нескольких недель (рис. 2.7б,в). Несмотря на значительные отличия в форме континуума, для всех наблюдений, представляющих данный период, неотъемлемой частью спектра мощности источника является относительно узкий пик квазипериодических осцилляций (QPO) с центральной частотой $\sim 2 - 10$ Гц. Детальный анализ эволюции параметров спектра мощности на коротких временных масштабах по данным наблюдений с высоким уровнем переменности источника позволил выявить корреляцию между центральной частотой QPO и уровнем полного рентгеновского потока и потока энергии в мягкой спектральной компоненте (рис. 2.8).

Начиная с 28 ноября 1996 г., когда источник перешел в состояние с низкой светимостью, его спектр мощности в диапазоне 0.1 – 1 Гц имеет почти плоскую форму,

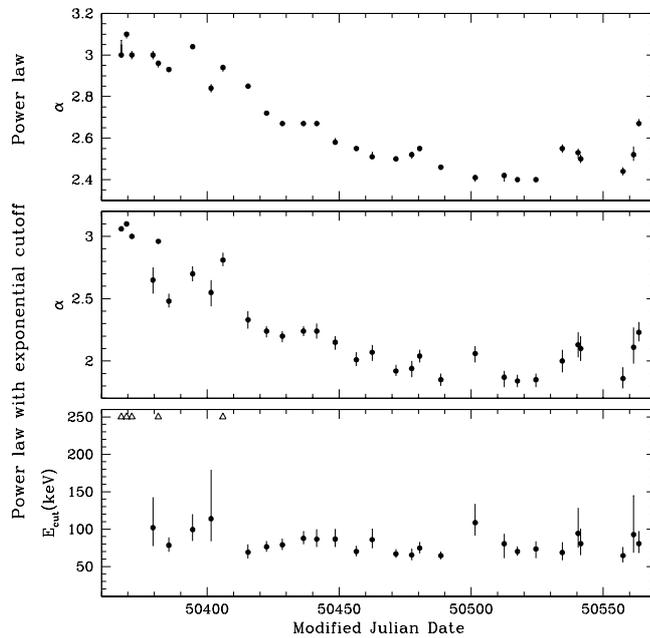


Рис. 2.5. Эволюция параметров высокоэнергичной части спектра источника GRS 1915+105 в диапазоне 20 – 150 кэВ по данным прибора HEXTE; (а) – аппроксимация степенным законом $f(E) \sim E^{-\alpha}$, E – энергия фотона, α – фотонный индекс; (б, в) – аппроксимация степенным законом с экспоненциальным завалом $f(E) \sim E^{-\alpha} \exp(-E/E_{cut})$, E – энергия фотона, α – фотонный индекс, E_{cut} – энергия завала). Треугольниками показана верхняя граница рабочего диапазона HEXTE в случаях наблюдений, когда завал в спектре источника не детектировался прибором.

после чего спадает по степенному закону с показателем $\sim 1.0 - 1.5$ между 1 и 15 Гц и показателем $\sim 2 - 3$ в области выше 15 Гц (рис. 2.7г). Для некоторых наблюдений в спектре мощности присутствует дополнительная компонента (имеющая форму плато с завалом в сторону высоких частот или степенную форму) в районе 0.1 – 1 Гц. Наиболее выразительной особенностью спектра мощности GRS 1915+105 в состоянии с низкой светимостью являются мощные, относительно узкие ($\Delta f/f \sim 0.1 - 0.3$, где f , Δf – частота и характерная ширина пика QPO) пики квазипериодических осцилляций, расположенные вблизи слома в непрерывном спектре. Наряду с основным (наиболее мощным) пиком QPO наблюдается также система пиков–сателлитов, частота и ширина которых связаны с соответствующими параметрами основного пика гармоническим соотношением⁶, причем интенсивность сопутствующих пиков уменьшается по мере увеличения центральной частоты основного пика.

Для количественного описания эволюции временных характеристик GRS 1915+105 в период состояния с низкой светимостью и переходов между состояниями, мы аппроксимировали спектры мощности в диапазоне частот 0.05 – 50 Гц с помощью аналитической модели, описанной ниже. Данные наблюдений 7, 10, 13, 15, 25 октября и 19 ноября 1996 г. были исключены из анализа по причине чрезвычайно сложной формы результирующего спектра, являющегося суперпозицией нескольких типов спектра мощности, соответствующих принципиально разным состояниям источника.

⁶Центральные частоты и ширина QPO–пиков–сателлитов равны 1/2, 2, 3, 4 и т.д. от частоты и ширины основного пика QPO

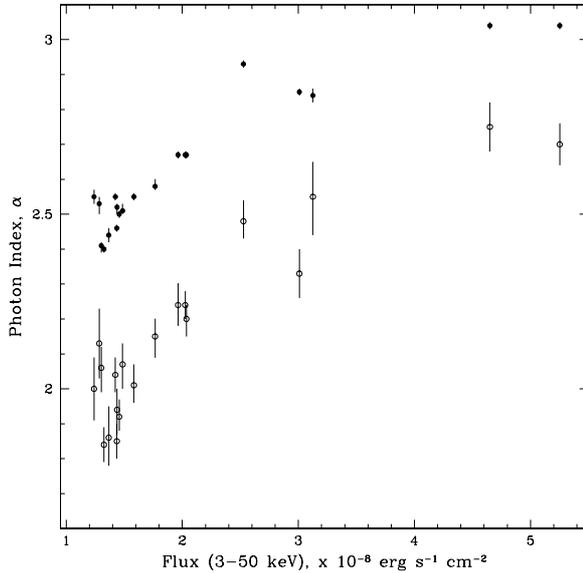


Рис. 2.6. Зависимость наклона высокоэнергичной части спектра источника GRS 1915+105 от уровня рентгеновской светимости в диапазоне 3 – 50 кэВ. Заштрихованные и открытые кружки отражают результаты аппроксимации данных степенным законом и степенным законом с экспоненциальным завалом соответственно.

2.3.1 Аналитическая аппроксимация спектров мощности.

Для аналитической аппроксимации широкополосного спектра мощности GRS 1915+105 использовалась модель, включающая в себя до трех частотно–ограниченных шумовых компонент (band–limited noise BLN), представляющих собой постоянную функцию вплоть до некоторой характеристической частоты, далее спадающую по степенному закону

$$P(f) = \begin{cases} A & f < f^{br} \\ A(f/f^{br})^{-\alpha} & f > f^{br}, \end{cases}$$

где f^{br} – характеристическая частота слома; а также в некоторых случаях дополнительную степенную функцию, отражающую вклад низкочастотного шума

$$P(f) = Bf^{-\alpha},$$

где A и B – нормировки в единицах квадрата среднеквадратичной относительной амплитуды флуктуаций потока источника $(rms/mean)^2$. Пики квазипериодических осцилляций (QPO) моделировались профилем Лоренца с нормировкой, выраженной в тех же единицах. Общий вид модели в применении к данным одного из наблюдений 19 декабря 1996 г. приведен на Рис. 2.9. Исследование формы и параметров QPO пиков показало, что их центральные частоты и ширина связаны гармоническим соотношением. Учитывая этот факт и пытаясь минимизировать число независимых

параметров модели, необходимых для описания спектра мощности источника, мы решили связать центральные частоты и ширину сопутствующих QPO-пигов с соответствующими характеристиками основного пика гармонической зависимостью, оставив свободными параметрами только нормировки компонент, аппроксимирующих QPO.

Значения параметров модели, при которых согласно критерию χ^2 она наилучшим образом описывает спектр мощности источника, приведены в табл. 2.2, 2.3, 2.4 и 2.5. Ошибки и верхние пределы на значения параметров соответствуют уровню в 1σ и 2σ . Как следует из получаемых значений χ^2 , принятая нами модель в целом удовлетворительно описывает совокупность имеющихся экспериментальных данных.

2.4 Корреляция между параметрами короткопериодической переменности рентгеновского излучения источника.

С целью обобщения результатов анализа временных свойств рентгеновского излучения GRS 1915+105 в состоянии с низкой светимостью и в переходах между состояниями, на рис. 2.10 и 2.11 приведены основные параметры аналитической аппроксимации спектров мощности источника (для диапазонов энергий 2–13 и 13–60 кэВ), как функции центральной частоты основного пика QPO. Открытые кружки на этом рисунке соответствуют наблюдениям, покрывающим период переходов между состояниями, а закрашенные кружки состоянию с низкой светимостью).

Диапазон энергий 2–13 кэВ. Как явствует из рис. 2.10, центральная частота QPO сильно антикоррелирует со значением среднеквадратичной относительной амплитуды флуктуаций потока в диапазоне частот 0.05–50 Гц и с относительной *rms* частотно-ограниченной компоненты (VLN) в спектре мощности. Исключение составляют наблюдения 7 ноября 1996 г., 2, 10 и 25 апреля 1997 г., когда вклад низкочастотной шумовой компоненты в переменность становится заметным, что, вероятно, связано с присутствием довольно сильной мягкой компоненты в энергетическом спектре. Та же самая тенденция сохраняется и для мощности основного пика QPO: чем выше частота QPO, тем ниже его относительная *rms*. Центральная частота QPO однозначно связана с частотами словов в континууме ($f_1^{br}, f_2^{br}, f_3^{br}$) (рис. 2.10, 2.11), что является дополнительным указанием на общность процессов генерации QPO и частотно-ограниченных компонент спектра мощности источника.

Диапазон энергий 13–60 кэВ. Большинство корреляций между временными параметрами, найденных для диапазона мягких энергий, сохраняется и для интервала 13–60 кэВ, за исключением полной *rms* и *rms* частотно-ограниченной компоненты (VLN), которые не демонстрируют однозначной связи с центральной частотой QPO.

2.5 Корреляции между спектральными и временными свойствами.

Анализ связи между спектральными и временными свойствами GRS 1915+105 в состоянии с низкой светимостью и в переходах между состояниями показал, что изменение некоторых параметров спектра мощности источника, таких как, например, центральная частота QPO, скоррелировано с изменением параметров энергетического спектра, полученных при его аппроксимации принятой нами упрощенной моделью. На рис. 2.12 отображена зависимость между среднеквадратической амплитудой флуктуаций потока (*rms*) в диапазонах 2 – 13 и 13 – 60 кэВ и энергетическим потоком от GRS 1915+105 в диапазоне 3 – 20 кэВ.

Поскольку вклад мягкой спектральной компоненты в полный поток излучения в интервале энергий 13 – 60 кэВ мал, выбирая этот диапазон, мы получаем возможность изучать временные характеристики излучения жесткой спектральной компоненты. Как видно из рис. 2.12 и 2.13, уровень среднеквадратической амплитуды флуктуаций в этом диапазоне сильно коррелирует с полным рентгеновским потоком и в особенности, с потоком в жесткой спектральной компоненте, которая вносит основной вклад в наблюдаемую светимость источника.

Наибольший интерес представляет корреляция между центральной частотой основного пика QPO и болометрической светимостью мягкой спектральной компоненты излучения источника (рис. 2.14). Основными свойствами обнаруженной корреляции являются:

- 1) близкая к линейной зависимость центральной частоты QPO от потока в мягкой спектральной компоненте в диапазоне потоков $\sim (1.5 - 8.0) \times 10^{-8}$ эрг/с/см²;
- 2) изменение характера зависимости в области потоков ниже $\sim 1.5 \times 10^{-8}$ эрг/с/см²;
- 3) существование двух различных ветвей зависимости, соответствующих переходу из состояния с высокой светимостью в состояние с низкой светимостью (23.10.1996 – 28.11.1996) (Рис. 14, открытые кружки) и состоянию с низкой светимостью с последующим переходом в состояние с высокой светимостью (28.11.1996 – 25.04.1997) (рис. 14, закрашенные кружки);
- 4) независимость характера корреляции от временного масштаба (от нескольких секунд до нескольких месяцев).

2.6 Обсуждение.

В работе представлены результаты систематического анализа данных наблюдений GRS 1915+105 приборами орбитальной рентгеновской обсерватории RXTE с ноября 1996 г. по апрель 1997 г., – в период, когда источник находился в состоянии

с низкой светимостью и совершал переходы между состояниями.

Переход GRS 1915+105 из состояния с высокой в состояние с низкой светимостью характеризуется почти пятикратным падением потока от источника в стандартном рентгеновском диапазоне (2 – 12 кэВ) (рис. 2.1). В отличие от состояния с высокой светимостью с чрезвычайно высоким уровнем вариаций потока, эволюция потока при переходе в низкое состояние и обратно может быть охарактеризована как относительно плавный спад до минимального значения за время ~ 100 дней, сменившийся похожим во всех отношениях подъемом до прежнего уровня.

Широкополосный энергетический спектр излучения GRS 1915+105 в целом удовлетворительно описывается двухкомпонентными моделями, включающими мягкую и жесткую компоненты, с коррекцией на Галактическое межзвездное поглощение (рис. 2.2). Для количественного описания общего характера спектральной эволюции источника мы использовали аппроксимацию спектра совокупностью модели оптически толстого “многоцветного” аккреционного диска (см. замечание в тексте) и степенного закона с экспоненциальным завалом в области высоких энергий.

Переход источника из состояния с высокой в состояние с низкой светимостью ознаменовался сильным уменьшением (до $\sim 15 - 25\%$) вклада мягкой спектральной компоненты в рентгеновскую светимость в диапазоне 3 – 20 кэВ (рис. 2.4). В целом эволюция широкополосного спектра GRS 1915+105 может быть охарактеризована как спад светимости мягкой спектральной компоненты, сопровождающийся постепенным ужесточением высокоэнергичной компоненты спектра по мере уменьшения полной светимости источника, сменившийся ростом потока в мягкой компоненте и укрупнением жесткой компоненты при обратном увеличении полной светимости (рис. 2.4 и 2.5).

Временные свойства GRS 1915+105 также претерпели сильные изменения при переходе в состояние с низкой светимостью. Общая форма спектра мощности в диапазоне частот 0.01 – 50 Гц может быть представлена в виде суммы частотно-ограниченной (представляющей собой плато со степенным спадом в сторону высоких частот начиная с некоторой характерной частоты излома) и степенной низкочастотной шумовой компонент (рис. 2.7). Неотъемлемой частью спектров мощности источника являются мощные, сравнительно узкие ($\Delta f/f \sim 0.1 - 0.3$) пики квазипериодических осцилляций потока (QPO) с центральными частотами $\sim 2 - 10$ Гц, расположенные вблизи характеристических изломов в континууме и сопровождаемые серией дополнительных пиков-гармоник. Сильная взаимозависимость основных временных параметров (таких как, например, центральная частота QPO, характерная частота слома в континууме, относительная среднеквадратичная амплитуда флуктуаций потока) может рассматриваться в качестве указания на общность характера генерации внешне различных компонент спектра мощности.

Наиболее интересным результатом является обнаружение тесной связи между эволюцией спектральных и временных характеристик рентгеновского излучения источника GRS 1915+105. В частности, было показано, что изменение центральной частоты QPO скоррелировано с изменением основных параметров энергетического спектра. Особенно важен тот факт, что рост центральной частоты QPO тесно связан с ростом потока энергии в мягкой спектральной компоненте излучения (рис. 2.14),

причем эта зависимость справедлива в широком интервале временных масштабов от нескольких секунд до нескольких месяцев.

Спектральные и временные свойства GRS 1915+105 и их эволюция в период, упомянутый в данной работе, близки к соответствующим характеристикам других Галактических кандидатов в черные дыры в так называемом “промежуточном” состоянии при переходах из “низкого” в “высокое/сверхвысокое” состояния и обратно: Лебедь X-1 (Беллони и др., 1996, Цуи и др., 1997), GX 339-4 (Гребенев и др., 1993; Мендес, Ван дер Клис, 1996), GS 1124-68 (Миямото и др., 1994; Такизава и др., 1997), GRO J1655-40 (Мендес и др., 1998)). Более того, было выявлено несколько характерных черт поведения GRS 1915+105, демонстрирующих, что состояние источника, наблюдавшееся в октябре 1996 г. – апреле 1997 г., отличается как от канонического “низкого”, так и “высокого/сверхвысокого” состояний и, вероятно, соответствует переходу между этими состояниями:

1) полная рентгеновская светимость источника в этом состоянии составляла $\sim 2 \times 10^{38}$ эрг/с, что значительно ниже уровня светимости в предшествовавшем ему состоянии ($> 10^{39}$ эрг/с), имевшем характерные свойства, близкие к свойствам канонического “высокого/сверхвысокого” состояния;

2) в отличие от типичного “низкого” состояния, спектр источника демонстрирует наличие заметной мягкой спектральной компоненты, но ее вклад в общую светимость ($> 30\%$) достаточно мал в сравнении со вкладом мягкой компоненты в случае “высокого/сверхвысокого” состояния ($\sim 70 - 90\%$);

3) спектр мощности GRS 1915+105 также заметно отличается от спектров в “низком” и “высоком/сверхвысоком” состояниях: в отличие от канонического “высокого” состояния он демонстрирует наличие мощной частотно–ограниченной компоненты (BLN), но в то же время характеристический слом в континууме приходится на область частот $\sim 2 - 10$ Гц, что на порядок превышает частоту слома, наблюдаемую в спектрах мощности Галактических кандидатов в черные дыры в “низком” состоянии (см., например, Беллони, Хазингер, 1990).

4) еще одним отличием от канонического “высокого/сверхвысокого” состояния (Гребенев и др., 1993; Гров и др., 1998) является явное присутствие завала высокоэнергичной компоненты спектра излучения GRS 1915+105 в состоянии с низкой светимости на энергиях $\sim 60 - 120$ кэВ.

Используя результаты анализа данных наблюдений приборами RXTE, мы пришли к выводу, что за исключением некоторых индивидуальных особенностей источника, основные спектральные и временные свойства рентгеновского излучения GRS 1915+105 в рассмотренный период соответствуют свойствам Галактических кандидатов в черные дыры в “промежуточном” состоянии. Наблюдавшиеся тенденции к ужесточению высокоэнергичной части спектра, увеличению относительной rms , уменьшению центральной частоты QPO по мере падения полной светимости источника позволяют предположить, что дальнейшее уменьшение светимости (ниже значений, наблюдавшихся в октябре 1996 г. – апреле 1997 г.) могло бы привести к переходу GRS 1915+105 в состояние, близкое к каноническому “низкому” состоянию, принятому для Галактических кандидатов в черные дыры. Вероятно, источник наблюдался в “промежуточном” состоянии по причине того, что его светимость/температура

аккреции не упали до достаточно низкого уровня.

Литература

- Беллони, Хазингер 1990//Belloni T., Hasinger G., 1990 A&A, **227**, L33
- Беллони и др. 1996//Belloni T., *et al.* 1996, ApJ, **472**, L107
- Беллони и др. 1997a//Belloni T., *et al.* 1997a ApJ, **479**, L145
- Беллони и др. 1997б//Belloni T., *et al.* 1997б ApJ, **488**, L109
- Брадт и др. 1993//Bradt H., Swank J., Rothschild R., 1993 A&ASS, **97**, 355
- Гребенев С. А. // Дис. ... докт. физ.-мат. наук. Москва: Ин-т космических исследований РАН, 1996
- Гребенев и др. 1993//Grebenev S., *et al.* 1993 A&ASS, **97**, 281
- Грейнер и др. 1998//Greiner J., Morgan E.H., Remillard R.A., 1998, **astro-ph/9806323**
- Гров и др. 1998//Grove, J.E., *et al.* 1998 ApJ, **500**, 899
- Жанг, Ягода 1996//Zhang W., Jahoda K., 1996
<http://lheawww.gsfc.nasa.gov/users/keith/deadtime/deadtime.html>
- Жанг и др. 1995//Zhang W., Jahoda K., Swank J.H., Morgan E.H., Giles A.B., 1995 ApJ, **449**, 930
- Кастро-Тирадо и др. 1992//Castro Tirado A., Brandt S., Lund N., 1992 IAU Circ., **N 5590**
- Макишима и др. (Makishima, K., Maejima, Y., Mitsuda K., Bradt H. V., Remillard R. A., Tuohy I. R., Hoshi R., Nakagawa M.)Astrophys. J., 1986, v. 308, p. 635.
- Мендес, Ван дер Клис (Mendez M., Van der Klis M.) // Astrophys. J., 1996, v. 479, p. 926.
- Мендес и др. 1998//Mendez M., Belloni T., Van der Klis M., 1998 ApJ, **489**, L187
- Мирабель, Родригез 1994//Mirabel I.F., Rodriguez L.F., 1994 Nature, **371**, 46
- Мицуда и др. 1984//(Mitsuda K., *et al.* , 1984 PASJ, **36**, 741
- Миямото и др. 1994//Miyamoto S., Kitamoto S., Iga S., Hayashida K., Terada K., 1994 ApJ, **435**, 389
- Морган и др. 1997//Morgan E.H., Remillard R. A., Greiner J., 1997 ApJ, **482**, 993
- Ороц, Байлин 1997//Orosz J.A., Bailyn C.D., 1997 ApJ, **477**, 876
- Пачейсас и др. 1997//Paciesas W. S., *et al.* 1997 A&ASS, **120**, 205
- Сазонов и др. 1994//Sazonov S., Sunyaev R., Alexandrovich N., Borozdin K., 1994 IAU Circ., **N 6080**
- Сазонов и др. 1996//Sazonov S., Sunyaev R., Lund N., 1996 Proc. X-ray Conference (eds. Zimmermann H.U., Truemper J. and Yorke H.), **MPE Report 263**, 187
- Таам и др. 1997//Taam R.E., Chen X., Swank J.H., 1997 ApJ, **485**, L83
- Такизава и др. 1997//Takizawa M., *et al.* , 1997 ApJ, **489**, 272
- Танака, Льюин 1995//Tanaka Y., Lewin W.H.G. 1995 in X-ray Binaries (ed. Lewin W. H. G., Van Paradijs L., van den Heuvel E. P. J.) Cambridge: Cambridge Univ. Press, **126**
- Цуи и др. 1997//Cui W., Zhang S.N., Focke W., & Swank J.H., 1997 ApJ, **484**, 383

- Чен и др. 1997//Chen X., Swank J.H., Taam R.E., 1997 ApJ, **477**, L41
Шакура, Сюняев 1973//Shakura N.I., Sunyaev R.A., 1973 A&A, **24**, 337
Шимура, Такахара 1995//Shimura T., Takahara F. 1995 ApJ, **445**, 780
Штарк 1997//Stark, 1997, <http://lheawww.gsfc.nasa.gov/users/stark/pca/pcabackest.html>
Эбисава и др. 1995//Ebisawa K., White N. E., Kotani T., 1995 IAU Circ., **N 6171**
Ягода К. 1997//Jahoda K., 1997, <http://lheawww.gsfc.nasa.gov/users/keith/pcarmf.html>

Табл. 2.1. Наблюдения GRS 1915+105 приборами орбитальной обсерватории *RXTE* в октябре 1996 г. – апреле 1997 г.

MJD ^b	Дата, UT	Время, UT (ч:м:с)	РСА	Экспозиция ^a , с	
				HEXTE–А	HEXTE–В
50363	07.10.1996	05:44:36 – 11:11:13	10944	1252	1100
50369	13.10.1996	10:03:17 – 14:06:13	7756	1165	1156
50371	15.10.1996	15:10:39 – 22:30:13	7856	1274	1253
50379	23.10.1996	11:53:56 – 18:25:13	9072	1289	1261
50381	25.10.1996	11:52:51 – 17:44:13	7216	1327	1288
50385	29.10.1996	11:53:13 – 17:29:14	5116	2700	2717
50394	07.11.1996	05:42:38 – 09:07:14	7760	2084	2131
50401	14.11.1996	02:17:24 – 03:42:13	2944	888	895
50406	19.11.1996	02:52:20 – 07:39:13	6368	3890	1285
50415	28.11.1996	03:04:13 – 06:16:13	6969	1275	817
50421	04.12.1996	23:25:58 – 03:26:13	1952	1130	1120
50428	11.12.1996	18:42:12 – 22:42:14	9232	2339	2340
50436	19.12.1996	15:47:20 – 19:47:13	8623	2430	2510
50441	24.12.1996	22:04:38 – 01:28:13	5888	1939	1978
50448	31.12.1996	06:48:53 – 10:19:13	7284	1353	1349
50455	07.01.1997	23:50:28 – 04:08:13	3215	2569	2676
50462	14.01.1997	01:29:43 – 03:59:14	6250	1275	1314
50471	23.01.1997	01:39:50 – 05:51:14	9016	2287	2342
50477	29.01.1997	20:57:32 – 01:38:13	9563	2045	1086
50480	01.02.1997	21:08:59 – 01:37:13	9010	2788	2796
50488	09.02.1997	18:41:59 – 00:01:13	9847	2483	2515
50501	22.02.1997	21:14:51 – 23:36:13	5739	1865	1854
50512	05.03.1997	21:20:31 – 22:55:13	4564	1792	1801
50517	10.03.1997	01:07:20 – 04:27:13	5648	1890	1891
50524	17.03.1997	22:10:05 – 01:55:13	7824	3921	3916
50534	27.03.1997	21:43:35 – 23:14:13	3264	990	974
50540	02.04.1997	12:35:28 – 14:14:13	3300	988	996
50557	19.04.1997	10:41:03 – 14:50:13	2368	2181	2086
50561	23.04.1997	03:08:24 – 05:19:13	3520	1093	1064
50563	25.04.1997	14:03:56 – 20:56:14	13105	3467	2481

^a – время экспозиции, скорректированное на эффекты мертвого времени.

^b – модифицированная юлианская дата MJD = JD - 2400000

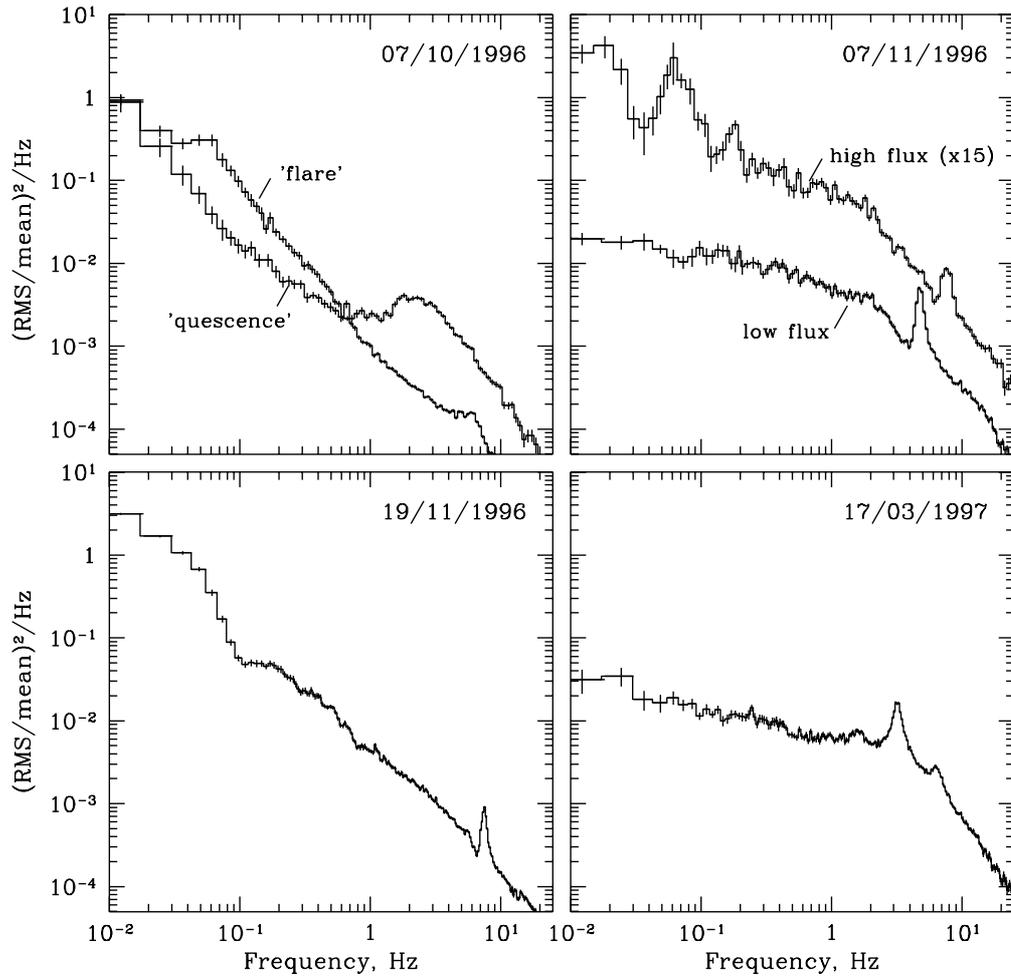


Рис. 2.7. Спектры мощности GRS 1915+105 по данным наблюдений PCA: (а) — во вспышечном состоянии с высокой светимостью; (б) — при переходе между состояниями (вклад мягкой компоненты в общую светимость довольно мал); (в) — при переходе между состояниями (вклад мягкой компоненты в общую светимость достаточно велик); (г) — номинальное состояние с низкой светимостью.

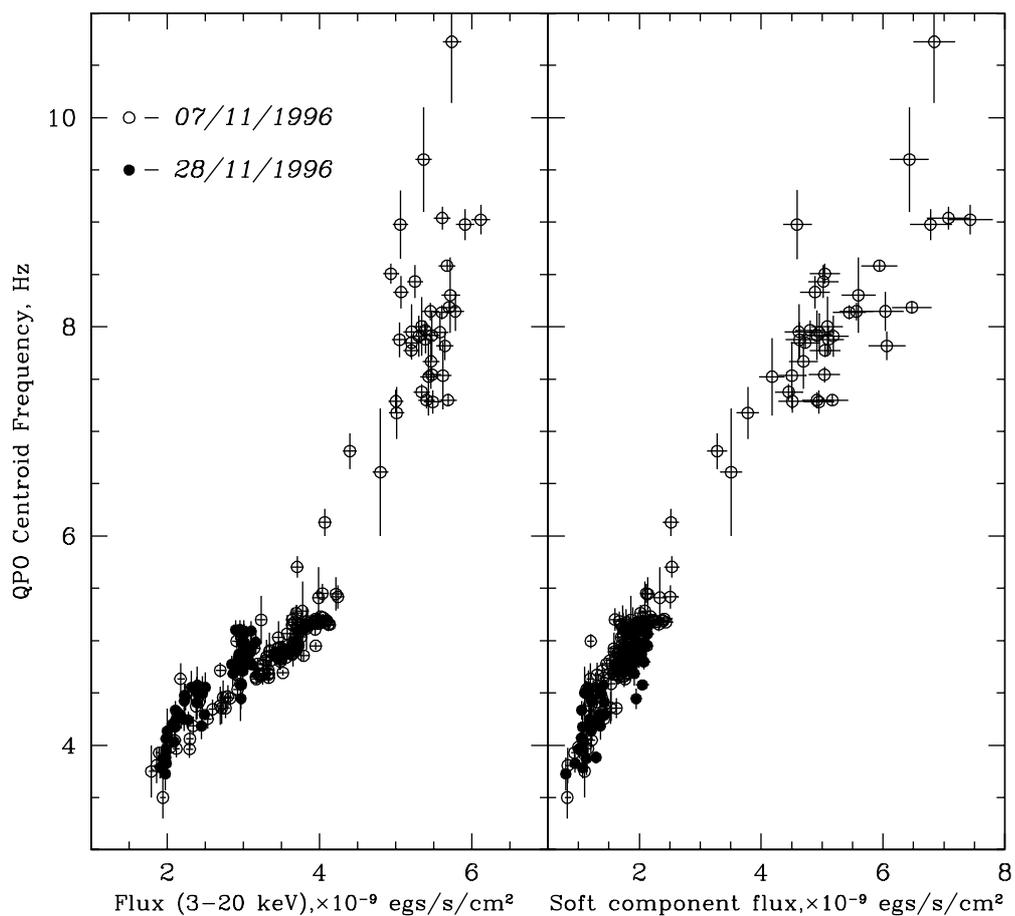


Рис. 2.8. Зависимость между центральной частотой QPO-пика в спектре мощности GRS 1915+105 и уровнем рентгеновского потока от источника в диапазоне 3–20 кэВ и болометрического потока в мягкой компоненте энергетического спектра, скорректированных на Галактическое межзвездное поглощение для наблюдений 7 (открытые кружки) и 28 (закрашенные кружки) ноября 1996 г. Каждая точка представляет данные, усредненные за 16–48 сек интервалы.

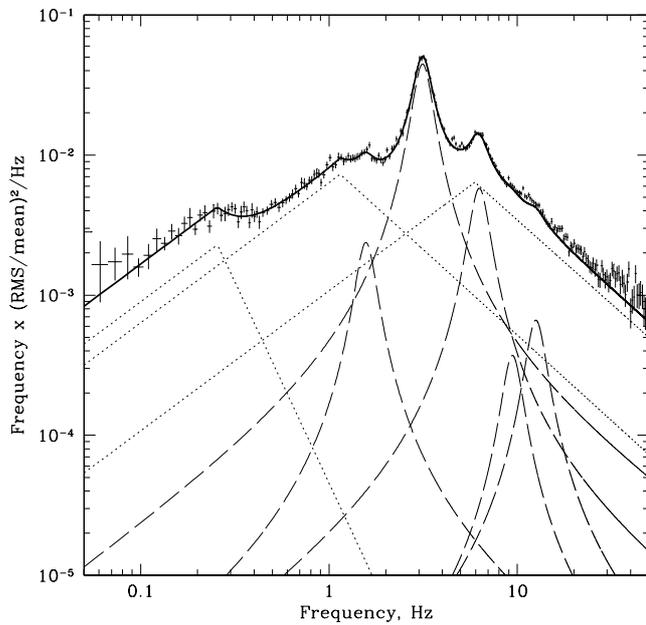


Рис. 2.9. Схематическое представление модели, использовавшейся для аналитической аппроксимации широкополосного спектра мощности излучения GRS 1915+105 в диапазоне 0.05 – 50 Гц в единицах $f \times (rms/mean)^2 / \text{Гц}$, где f – частота, на примере наблюдения 19 декабря 1996 г. Вклады частотно-ограниченных компонент (BLN) и Лоренцевых компонент, аппроксимирующих QPO-пики, изображены с помощью точечных и штриховых линий соответственно.

Табл. 2.2. Параметры аналитической аппроксимации спектра мощности источника GRS 1915+105 в диапазоне энергий 2 – 13 кэВ в период состояния с низкой рентгеновской светимостью и переходов между состояниями. Ошибки и верхние пределы на значения параметров соответствуют уровню в 1σ и 2σ . $f_1^{br}, f_2^{br}, f_3^{br}$ и $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – характеристические частоты слома и показатели степени спадающей части частотно-ограниченных шумовых компонент (см. описание модели в тексте), rms_{BLN} представляет собой сумму rms всех частотно-ограниченных шумовых компонент (BLN) в диапазоне частот 0.05 – 50 Гц. Наблюдения с сильной переменностью были разбиты на отдельные части, соответствующие различным диапазонам наблюдаемого потока излучения от источника.

Дата (UT)	f_1^{br} (Hz)	α_1	f_2^{br} (Hz)		α_2	f_3^{br} (Hz)	α_3	rms_{BLN} (%)
			2 – 13 кэВ					
23.10.96	$0.51^{+0.03}_{-0.08}$	$2.20^{+0.31}_{-0.34}$	$2.58^{+0.03}_{-0.03}$	$5.50^{+0.50}_{-1.23}$		$10.29^{+0.10}_{-0.07}$	$3.10^{+0.09}_{-0.06}$	$14.1^{+0.6}_{-0.5}$
	$0.58^{+0.02}_{-0.02}$	$2.24^{+0.36}_{-0.13}$	$2.16^{+0.03}_{-0.04}$	$3.34^{+0.16}_{-0.17}$		$10.30^{+0.07}_{-0.06}$	$2.88^{+0.06}_{-0.06}$	$13.9^{+0.5}_{-0.6}$
	$0.40^{+0.20}_{-0.04}$	$2.01^{+0.25}_{-0.17}$	$1.89^{+0.04}_{-0.03}$	$3.00^{+0.17}_{-0.13}$		$10.62^{+0.14}_{-0.13}$	$2.97^{+0.09}_{-0.08}$	$13.4^{+0.5}_{-0.5}$
	$0.59^{+0.03}_{-0.02}$	$5.03^{+0.21}_{-2.45}$	1.50	$2.37^{+0.10}_{-0.11}$		$8.81^{+0.13}_{-0.10}$	$3.11^{+0.14}_{-0.09}$	$14.4^{+0.7}_{-0.6}$
29.10.96	$0.24^{+0.01}_{-0.01}$	$1.87^{+0.13}_{-0.10}$	$1.73^{+0.04}_{-0.03}$	$5.02^{+0.37}_{-1.43}$		$5.74^{+0.08}_{-0.05}$	$2.57^{+0.04}_{-0.04}$	$15.4^{+0.3}_{-0.4}$
07.11.96	$0.40^{+0.04}_{-0.03}$	$1.97^{+0.22}_{-0.16}$	$2.02^{+0.03}_{-0.15}$	$3.48^{+0.23}_{-0.30}$		$9.80^{+0.07}_{-0.12}$	$2.78^{+0.09}_{-0.07}$	$13.5^{+0.6}_{-0.6}$
	$0.46^{+0.02}_{-0.03}$	$2.05^{+0.16}_{-0.14}$	$2.19^{+0.04}_{-0.04}$	$3.71^{+0.19}_{-0.18}$		$10.66^{+0.15}_{-0.10}$	$3.00^{+0.08}_{-0.06}$	$13.4^{+0.6}_{-0.5}$
	$1.57^{+0.05}_{-0.09}$	$2.20^{+0.04}_{-0.07}$	–	–		$17.74^{+0.81}_{-0.74}$	$5.68^{+1.13}_{-1.14}$	$11.0^{+1.0}_{-1.3}$
	$0.27^{+0.03}_{-0.03}$	$1.76^{+0.23}_{-0.10}$	$1.53^{+0.05}_{-0.07}$	$3.05^{+1.19}_{-0.52}$		$8.60^{+0.21}_{-0.16}$	$2.59^{+0.14}_{-0.12}$	$12.7^{+0.7}_{-0.8}$
14.11.96	$0.39^{+0.02}_{-0.04}$	$1.82^{+0.24}_{-0.15}$	$1.68^{+0.04}_{-0.04}$	$3.21^{+0.25}_{-0.25}$		$8.55^{+0.08}_{-0.10}$	$2.79^{+0.12}_{-0.07}$	$14.3^{+0.4}_{-0.5}$
28.11.96	$0.38^{+0.01}_{-0.02}$	$1.82^{+0.11}_{-0.09}$	$1.77^{+0.05}_{-0.03}$	$2.86^{+0.15}_{-0.14}$		$9.68^{+0.10}_{-0.13}$	$2.79^{+0.08}_{-0.06}$	$13.5^{+0.5}_{-0.4}$
04.12.96	$0.20^{+0.01}_{-0.01}$	$1.91^{+0.26}_{-0.22}$	$1.43^{+0.03}_{-0.02}$	$1.90^{+0.07}_{-0.05}$		$5.13^{+0.10}_{-0.10}$	$2.63^{+0.11}_{-0.12}$	$18.0^{+0.6}_{-0.6}$
11.12.96	$0.19^{+0.01}_{-0.01}$	$1.77^{+0.25}_{-0.12}$	$1.34^{+0.02}_{-0.03}$	$2.55^{+0.22}_{-0.37}$		$4.86^{+0.17}_{-0.10}$	$2.08^{+0.07}_{-0.04}$	$16.3^{+0.7}_{-0.8}$
19.12.96	$0.26^{+0.01}_{-0.01}$	$3.87^{+0.60}_{-0.55}$	$1.15^{+0.03}_{-0.03}$	$2.22^{+0.21}_{-0.16}$		$5.96^{+0.08}_{-0.13}$	$2.20^{+0.04}_{-0.04}$	$15.6^{+0.6}_{-0.7}$
24.12.96	$0.31^{+0.04}_{-0.02}$	$2.71^{+0.81}_{-0.50}$	$1.47^{+0.03}_{-0.05}$	$2.22^{+0.18}_{-0.19}$		$8.10^{+0.13}_{-0.11}$	$2.60^{+0.14}_{-0.08}$	$14.8^{+0.5}_{-0.4}$
31.12.96	$0.22^{+0.02}_{-0.01}$	$2.96^{+0.49}_{-0.47}$	$1.32^{+0.02}_{-0.02}$	$1.73^{+0.05}_{-0.04}$		$5.48^{+0.06}_{-0.11}$	$2.74^{+0.13}_{-0.15}$	$17.9^{+0.6}_{-0.5}$
07.01.97	$0.22^{+0.01}_{-0.01}$	$2.10^{+0.35}_{-0.29}$	$1.45^{+0.03}_{-0.01}$	$1.73^{+0.05}_{-0.03}$		$5.57^{+0.05}_{-0.09}$	$2.73^{+0.12}_{-0.12}$	$17.4^{+0.5}_{-0.5}$
14.01.97	$0.26^{+0.02}_{-0.01}$	$2.47^{+0.67}_{-0.54}$	$1.48^{+0.04}_{-0.04}$	$1.70^{+0.07}_{-0.04}$		$5.50^{+0.12}_{-0.16}$	$2.84^{+0.17}_{-0.19}$	$17.8^{+0.6}_{-0.5}$
23.01.97	$0.23^{+0.01}_{-0.01}$	$3.20^{+0.54}_{-0.40}$	$1.37^{+0.02}_{-0.04}$	$1.67^{+0.04}_{-0.03}$		$5.38^{+0.09}_{-0.08}$	$2.81^{+0.12}_{-0.12}$	$18.2^{+0.6}_{-0.4}$
29.01.97	$0.30^{+0.01}_{-0.01}$	$1.74^{+0.29}_{-0.37}$	1.40	$1.68^{+0.06}_{-0.04}$		$7.40^{+0.09}_{-0.11}$	$3.14^{+0.25}_{-0.22}$	$15.3^{+0.7}_{-0.6}$
01.02.97	$0.25^{+0.02}_{-0.02}$	$1.50^{+0.18}_{-0.14}$	$1.31^{+0.06}_{-0.04}$	$1.71^{+0.12}_{-0.07}$		$6.95^{+0.10}_{-0.10}$	$2.86^{+0.17}_{-0.17}$	$15.5^{+0.6}_{-0.5}$
09.02.97	$0.15^{+0.01}_{-0.01}$	$1.85^{+0.26}_{-0.20}$	$1.55^{+0.07}_{-0.06}$	$1.61^{+0.03}_{-0.03}$		$4.50^{+0.04}_{-0.04}$	$2.71^{+0.06}_{-0.08}$	$19.6^{+0.5}_{-0.4}$
22.02.97	$0.20^{+0.03}_{-0.03}$	$1.17^{+0.29}_{-0.07}$	$1.62^{+0.09}_{-0.09}$	$1.76^{+0.46}_{-0.22}$		$5.74^{+0.08}_{-0.08}$	$3.05^{+0.21}_{-0.19}$	$18.0^{+0.6}_{-0.7}$
05.03.97	$0.23^{+0.01}_{-0.02}$	$1.98^{+0.58}_{-0.41}$	$1.65^{+0.06}_{-0.11}$	$1.69^{+0.10}_{-0.08}$		$6.23^{+0.10}_{-0.17}$	$3.02^{+0.24}_{-0.25}$	$17.1^{+0.5}_{-0.4}$
10.03.97	$0.17^{+0.02}_{-0.04}$	$2.06^{+0.50}_{-0.42}$	1.60	$1.63^{+0.04}_{-0.04}$		$4.35^{+0.07}_{-0.07}$	$2.65^{+0.10}_{-0.09}$	$20.2^{+0.7}_{-0.5}$
17.03.97	$0.24^{+0.01}_{-0.01}$	$1.90^{+0.33}_{-0.36}$	$1.66^{+0.06}_{-0.07}$	$1.60^{+0.04}_{-0.03}$		$6.35^{+0.10}_{-0.10}$	$3.35^{+0.25}_{-0.51}$	$17.3^{+0.6}_{-0.7}$
26.03.97	$0.34^{+0.03}_{-0.02}$	$2.51^{+0.39}_{-0.62}$	$1.74^{+0.07}_{-0.09}$	$1.68^{+0.06}_{-0.05}$		$7.28^{+0.11}_{-0.20}$	$3.91^{+0.33}_{-0.47}$	$16.4^{+0.6}_{-0.6}$
27.03.97	$0.34^{+0.02}_{-0.02}$	$3.78^{+1.16}_{-0.86}$	1.80	$2.34^{+0.39}_{-0.34}$		$7.25^{+0.15}_{-0.26}$	$2.66^{+0.27}_{-0.27}$	$15.9^{+0.6}_{-0.6}$
02.04.97*	$1.01^{+0.03}_{-0.03}$	$1.67^{+0.13}_{-0.06}$	–	–		$10.35^{+0.28}_{-0.23}$	$3.52^{+0.38}_{-0.38}$	$11.4^{+0.5}_{-0.5}$
10.04.97*	$0.95^{+0.08}_{-0.05}$	$1.66^{+0.13}_{-0.10}$	–	–		$10.98^{+0.43}_{-0.43}$	$4.73^{+0.56}_{-1.22}$	$10.9^{+0.6}_{-0.7}$
19.04.97	$0.17^{+0.02}_{-0.01}$	$2.21^{+0.54}_{-0.44}$	$1.31^{+0.12}_{-0.05}$	$1.58^{+0.06}_{-0.04}$		$5.10^{+0.11}_{-0.10}$	$2.82^{+0.18}_{-0.17}$	$17.8^{+0.6}_{-0.7}$
23.04.97	$0.22^{+0.02}_{-0.01}$	$2.96^{+0.79}_{-0.64}$	$1.42^{+0.03}_{-0.05}$	$1.77^{+0.13}_{-0.07}$		$4.97^{+0.16}_{-0.19}$	$2.46^{+0.18}_{-0.19}$	$18.0^{+0.5}_{-0.6}$
25.04.97*	$0.34^{+0.01}_{-0.01}$	$1.56^{+0.11}_{-0.08}$	$1.63^{+0.03}_{-0.02}$	$3.18^{+0.26}_{-0.24}$		$8.92^{+0.07}_{-0.07}$	$2.81^{+0.12}_{-0.11}$	$13.5^{+0.5}_{-0.5}$

* – для аппроксимации данных наблюдений в модель была добавлена степенная функция частоты, отражающая вклад низкочастотного шума.

Табл. 2.3. То же, что и в Табл. 2, но для энергетического диапазона 13 – 60 кэВ.

Дата (UT)	f_1^{br} (Hz)	α_1	f_2^{br} (Hz)	α_2	f_3^{br} (Hz)	α_3	rms_{BLV} (%)
<i>13 – 60 кэВ</i>							
23.10.96	0.66 ^{+0.04} _{-0.05}	2.92 ^{+0.55} _{-0.60}	2.05 ^{+0.05} _{-0.03}	4.32 ^{+0.42} _{-0.37}	6.79 ^{+0.17} _{-0.16}	2.27 ^{+0.09} _{-0.08}	23.8 ^{+0.9} _{-0.9}
	0.60 ^{+0.02} _{-0.02}	2.31 ^{+0.31} _{-0.32}	2.16 ^{+0.04} _{-0.04}	5.00 ^{+0.43} _{-1.54}	7.07 ^{+0.16} _{-0.15}	2.42 ^{+0.10} _{-0.09}	23.2 ^{+0.9} _{-1.0}
	0.59 ^{+0.04} _{-0.05}	2.16 ^{+0.35} _{-0.13}	2.00	4.71 ^{+0.55} _{-0.40}	6.96 ^{+0.15} _{-0.21}	2.43 ^{+0.11} _{-0.09}	22.9 ^{+1.0} _{-1.0}
	0.58 ^{+0.04} _{-0.03}	2.54 ^{+1.14} _{-0.49}	1.39 ^{+0.09} _{-0.06}	2.00 ^{+0.63} _{-0.23}	5.90 ^{+0.14} _{-0.21}	2.81 ^{+0.51} _{-0.37}	25.1 ^{+1.3} _{-1.5}
29.10.96	0.25 ^{+0.01} _{-0.01}	1.45 ^{+0.02} _{-0.01}	1.77 ^{+0.03} _{-0.04}	6.38 ^{+0.34} _{-1.89}	5.57 ^{+0.23} _{-0.45}	4.08 ^{+0.32} _{-0.58}	24.4 ^{+0.5} _{-0.5}
07.11.96	0.41 ^{+0.02} _{-0.03}	1.63 ^{+0.19} _{-0.14}	1.94 ^{+0.06} _{-0.07}	4.23 ^{+0.65} _{-0.54}	6.56 ^{+0.19} _{-0.23}	2.49 ^{+0.25} _{-0.18}	23.0 ^{+0.8} _{-1.0}
	0.48 ^{+0.03} _{-0.02}	1.83 ^{+0.17} _{-0.15}	2.01 ^{+0.07} _{-0.04}	4.58 ^{+0.63} _{-0.37}	7.17 ^{+0.11} _{-0.18}	2.31 ^{+0.12} _{-0.07}	22.9 ^{+0.8} _{-0.9}
	1.81 ^{+0.12} _{-0.06}	2.98 ^{+0.25} _{-0.21}	–	–	11.65 ^{+0.58} _{-0.39}	2.44 ^{+0.35} _{-0.16}	17.7 ^{+1.5} _{-2.0}
	0.49 ^{+0.07} _{-0.04}	2.94 ^{+2.03} _{-1.06}	1.50 ^{+0.13} _{-0.12}	1.99 ^{+0.51} _{-0.27}	6.83 ^{+0.51} _{-0.87}	2.48 ^{+0.68} _{-0.32}	23.3 ^{+1.0} _{-1.4}
14.11.96	0.39 ^{+0.02} _{-0.02}	1.47 ^{+0.06} _{-0.04}	1.70 ^{+0.06} _{-0.06}	4.82 ^{+1.04} _{-1.07}	5.32 ^{+0.16} _{-0.03}	3.11 ^{+0.33} _{-0.30}	23.5 ^{+0.7} _{-0.6}
28.11.96	0.35 ^{+0.05} _{-0.05}	1.41 ^{+0.04} _{-0.03}	1.46 ^{+0.03} _{-0.05}	2.79 ^{+0.27} _{-0.17}	6.73 ^{+0.12} _{-0.08}	3.39 ^{+0.40} _{-0.31}	22.2 ^{+0.6} _{-0.6}
04.12.96	0.20 ^{+0.01} _{-0.01}	1.43 ^{+0.06} _{-0.03}	1.01 ^{+0.08} _{-0.04}	3.18 ^{+1.02} _{-0.99}	3.17 ^{+0.09} _{-0.02}	2.59 ^{+0.15} _{-0.14}	23.6 ^{+0.8} _{-0.8}
11.12.96	0.20 ^{+0.01} _{-0.01}	1.49 ^{+0.09} _{-0.08}	1.01 ^{+0.05} _{-0.04}	3.59 ^{+0.49} _{-0.37}	3.07 ^{+0.21} _{-0.08}	2.01 ^{+0.14} _{-0.18}	21.2 ^{+0.9} _{-0.9}
19.12.96	0.26 ^{+0.01} _{-0.01}	2.59 ^{+0.31} _{-0.27}	1.10 ^{+0.02} _{-0.02}	3.84 ^{+0.68} _{-0.82}	3.66 ^{+0.35} _{-0.10}	2.04 ^{+0.06} _{-0.06}	21.5 ^{+0.8} _{-0.9}
24.12.96	0.38 ^{+0.01} _{-0.01}	4.15 ^{+0.73} _{-0.97}	1.34 ^{+0.03} _{-0.02}	3.46 ^{+0.37} _{-0.35}	4.81 ^{+0.14} _{-0.05}	2.18 ^{+0.08} _{-0.07}	21.0 ^{+0.9} _{-0.9}
31.12.96	0.22 ^{+0.01} _{-0.01}	1.80 ^{+0.24} _{-0.20}	1.07 ^{+0.04} _{-0.04}	5.47 ^{+1.00} _{-1.98}	3.20 ^{+0.12} _{-0.06}	2.17 ^{+0.09} _{-0.06}	21.0 ^{+0.6} _{-0.8}
07.01.97	0.21 ^{+0.03} _{-0.01}	1.46 ^{+0.18} _{-0.19}	1.07 ^{+0.06} _{-0.03}	2.71 ^{+1.01} _{-0.62}	3.69 ^{+0.24} _{-0.11}	2.24 ^{+0.19} _{-0.17}	19.5 ^{+0.8} _{-0.8}
14.01.96	0.28 ^{+0.01} _{-0.01}	2.87 ^{+0.58} _{-0.43}	0.94 ^{+0.04} _{-0.04}	1.50 ^{+0.10} _{-0.07}	3.77 ^{+0.15} _{-0.13}	2.89 ^{+0.41} _{-0.29}	19.7 ^{+0.8} _{-0.6}
23.01.97	0.22 ^{+0.02} _{-0.01}	1.91 ^{+0.31} _{-0.26}	0.98 ^{+0.04} _{-0.02}	1.39 ^{+0.05} _{-0.04}	3.80 ^{+0.09} _{-0.11}	3.40 ^{+0.40} _{-0.36}	19.1 ^{+0.8} _{-0.7}
29.01.97	0.34 ^{+0.03} _{-0.02}	1.94 ^{+0.28} _{-0.33}	1.23 ^{+0.04} _{-0.03}	1.54 ^{+0.10} _{-0.06}	5.21 ^{+0.16} _{-0.22}	3.40 ^{+0.77} _{-0.74}	18.9 ^{+1.0} _{-0.9}
01.02.97	0.27 ^{+0.02} _{-0.02}	1.26 ^{+0.03} _{-0.04}	1.18 ^{+0.03} _{-0.02}	4.18 ^{+1.00} _{-0.80}	4.45 ^{+0.10} _{-0.10}	3.73 ^{+0.29} _{-0.31}	19.2 ^{+0.8} _{-0.8}
09.02.97	0.17 ^{+0.01} _{-0.01}	1.32 ^{+0.07} _{-0.05}	1.43 ^{+0.13} _{-0.06}	2.31 ^{+0.23} _{-0.27}	3.37 ^{+0.19} _{-0.20}	2.23 ^{+0.18} _{-0.19}	18.0 ^{+0.8} _{-0.7}
22.02.97	0.25 ^{+0.04} _{-0.05}	1.26 ^{+0.03} _{-0.04}	1.03 ^{+0.05} _{-0.06}	5.05 ^{+0.95} _{-1.05}	3.84 ^{+0.20} _{-0.12}	2.94 ^{+0.37} _{-0.15}	18.0 ^{+0.7} _{-0.8}
05.03.97	0.25 ^{+0.02} _{-0.02}	1.24 ^{+0.81} _{-0.05}	0.95 ^{+0.08} _{-0.07}	2.14 ^{+1.50} _{-0.75}	4.75 ^{+0.11} _{-0.20}	3.58 ^{+1.16} _{-0.63}	18.2 ^{+0.8} _{-0.7}
10.03.97	0.16 ^{+0.02} _{-0.02}	1.26 ^{+0.05} _{-0.04}	–	–	2.47 ^{+0.07} _{-0.05}	2.15 ^{+0.13} _{-0.09}	18.5 ^{+0.8} _{-0.6}
17.03.97	0.26 ^{+0.01} _{-0.01}	1.51 ^{+0.41} _{-0.06}	0.98 ^{+0.07} _{-0.06}	1.39 ^{+1.80} _{-0.08}	4.32 ^{+0.06} _{-0.12}	3.91 ^{+0.50} _{-0.64}	18.1 ^{+0.8} _{-0.9}
26.03.97	0.37 ^{+0.03} _{-0.02}	2.12 ^{+0.73} _{-0.58}	1.18 ^{+0.16} _{-0.10}	1.27 ^{+0.08} _{-0.09}	4.79 ^{+0.09} _{-0.21}	4.00 ^{+1.02} _{-0.97}	18.0 ^{+0.9} _{-0.9}
27.03.97	0.33 ^{+0.03} _{-0.02}	1.91 ^{+0.71} _{-0.41}	1.34 ^{+0.08} _{-0.08}	4.20 ^{+0.51} _{-1.78}	4.87 ^{+0.23} _{-0.18}	2.38 ^{+0.29} _{-0.18}	18.0 ^{+0.9} _{-0.8}
02.04.97*	0.81 ^{+0.04} _{-0.01}	1.47 ^{+0.05} _{-0.03}	–	–	6.78 ^{+0.56} _{-0.80}	3.55 ^{+0.60} _{-0.43}	16.7 ^{+0.8} _{-0.9}
10.04.97*	0.67 ^{+0.04} _{-0.04}	1.41 ^{+0.08} _{-0.07}	–	–	5.55 ^{+0.18} _{-0.18}	3.85 ^{+0.75} _{-0.50}	18.4 ^{+0.9} _{-1.0}
19.04.97	0.19 ^{+0.01} _{-0.03}	1.63 ^{+0.27} _{-0.25}	1.28 ^{+0.02} _{-0.20}	3.39 ^{+0.39} _{-0.94}	4.50 ^{+0.20} _{-0.14}	2.00 ^{+0.05} _{-0.02}	17.2 ^{+0.8} _{-0.9}
23.04.97	0.20 ^{+0.01} _{-0.02}	1.62 ^{+0.28} _{-0.06}	0.87 ^{+0.03} _{-0.03}	1.47 ^{+0.25} _{-0.07}	4.00 ^{+0.15} _{-0.17}	3.14 ^{+0.65} _{-0.48}	18.3 ^{+0.7} _{-0.7}
25.04.97*	0.34 ^{+0.01} _{-0.01}	1.37 ^{+0.06} _{-0.04}	1.48 ^{+0.03} _{-0.03}	4.23 ^{+0.54} _{-0.58}	5.80 ^{+0.16} _{-0.19}	3.39 ^{+0.41} _{-0.42}	18.8 ^{+0.8} _{-0.7}

* – для аппроксимации данных наблюдений в модель была добавлена степенная функция частоты, отражающая вклад низкочастотного шума.

Табл. 2.4. Параметры аппроксимации спектра мощности источника GRS 1915+105 в период состояния с низкой рентгеновской светимостью и переходов между состояниями, не включенные в Табл. 2 и 3. f_{QPO} , FWHM – центральная частота и ширина основного пика QPO, rms_n^{QPO} – интегральная относительная среднеквадратическая амплитуда флуктуаций в QPO – гармонике с номером n , соответствующим отношению ее центральной частоты к центральной частоте основного QPO-пика.

Дата (UT)	f_{QPO} (Hz)	FWHM (Hz)	rms_1^{QPO} (%)	$rms_{1/2}^{QPO}$ (%)	rms_2^{QPO} (%)	rms_3^{QPO} (%)	$\chi^2(d.o.f)$
<i>2 – 13 кэВ</i>							
23.10.96	$5.02^{+0.01}_{-0.02}$	$0.71^{+0.03}_{-0.04}$	$5.9^{+0.4}_{-0.5}$	< 2.5	< 1.5	< 1.0	381.0(205)
	$5.07^{+0.01}_{-0.01}$	$0.66^{+0.04}_{-0.03}$	$5.4^{+0.5}_{-0.5}$	$1.9^{+0.6}_{-0.6}$	< 2.0	< 1.2	371.(205)
	$5.12^{+0.02}_{-0.01}$	$0.77^{+0.05}_{-0.04}$	$5.4^{+0.5}_{-0.5}$	$2.3^{+0.5}_{-0.5}$	< 2.1	< 1.0	322.7(205)
	$4.45^{+0.01}_{-0.01}$	$0.70^{+0.03}_{-0.04}$	$7.2^{+0.6}_{-0.5}$	$2.9^{+0.4}_{-0.4}$	< 2.0	< 1.3	383.1(205)
29.10.96	$3.22^{+0.01}_{-0.01}$	$0.65^{+0.01}_{-0.02}$	$12.2^{+0.2}_{-0.3}$	< 0.5	$3.5^{+0.3}_{-0.3}$	$0.8^{+0.4}_{-0.4}$	251.7(205)
07.11.96	$4.81^{+0.01}_{-0.01}$	$0.57^{+0.02}_{-0.03}$	$6.4^{+0.5}_{-0.6}$	$1.5^{+0.5}_{-0.6}$	< 2.3	< 1.9	380.8(205)
	$5.08^{+0.01}_{-0.01}$	$0.68^{+0.02}_{-0.02}$	$5.9^{+0.5}_{-0.5}$	$1.5^{+0.5}_{-0.5}$	< 2.0	< 1.3	430.9(205)
	$7.83^{+0.04}_{-0.04}$	$0.80^{+0.10}_{-0.08}$	$2.6^{+0.5}_{-0.6}$	–	–	–	272.5(178)
	$4.20^{+0.03}_{-0.03}$	$1.22^{+0.10}_{-0.10}$	$8.7^{+0.6}_{-0.6}$	$3.5^{+0.8}_{-0.9}$	< 2.3	< 1.8	290.7(205)
14.11.96	$4.25^{+0.01}_{-0.02}$	$0.68^{+0.03}_{-0.03}$	$8.0^{+0.3}_{-0.3}$	$2.5^{+0.5}_{-0.5}$	< 1.0	< 1.0	304.9(205)
28.11.96	$4.63^{+0.03}_{-0.01}$	$0.94^{+0.02}_{-0.03}$	$7.9^{+0.2}_{-0.2}$	$2.4^{+0.3}_{-0.4}$	< 1.5	< 1.0	356.1(205)
04.12.96	$2.81^{+0.01}_{-0.01}$	$0.41^{+0.01}_{-0.01}$	$11.1^{+0.4}_{-0.4}$	$2.2^{+0.3}_{-0.4}$	$5.0^{+0.2}_{-0.3}$	$1.5^{+0.3}_{-0.3}$	418.2(208)
11.12.96	$2.77^{+0.01}_{-0.01}$	$0.81^{+0.02}_{-0.02}$	$13.0^{+0.1}_{-0.3}$	< 2.2	$6.3^{+0.05}_{-0.05}$	$2.3^{+0.4}_{-0.3}$	290.6(205)
19.12.96	$3.11^{+0.01}_{-0.01}$	$0.76^{+0.03}_{-0.02}$	$12.1^{+0.3}_{-0.2}$	$3.7^{+0.5}_{-0.5}$	$5.5^{+0.2}_{-0.3}$	$2.1^{+0.5}_{-0.4}$	235.5(205)
24.12.96	$3.90^{+0.01}_{-0.01}$	$0.79^{+0.03}_{-0.03}$	$10.2^{+0.3}_{-0.3}$	$2.5^{+0.5}_{-0.5}$	$2.7^{+0.4}_{-0.4}$	$1.1^{+0.4}_{-0.4}$	362.3(205)
31.12.96	$2.80^{+0.01}_{-0.01}$	$0.61^{+0.02}_{-0.03}$	$11.8^{+0.2}_{-0.4}$	$2.9^{+0.6}_{-0.5}$	$6.2^{+0.9}_{-1.0}$	$2.1^{+0.4}_{-0.4}$	229.4(205)
07.01.97	$2.91^{+0.01}_{-0.01}$	$0.67^{+0.02}_{-0.02}$	$12.1^{+0.6}_{-0.3}$	$2.3^{+0.6}_{-0.6}$	$5.9^{+0.2}_{-0.2}$	$2.1^{+0.3}_{-0.3}$	298.0(205)
14.01.97	$2.92^{+0.01}_{-0.01}$	$0.63^{+0.03}_{-0.02}$	$11.6^{+0.3}_{-0.3}$	$2.1^{+0.8}_{-0.8}$	$5.5^{+0.3}_{-0.3}$	$1.9^{+0.3}_{-0.3}$	220.5(205)
23.01.97	$2.80^{+0.01}_{-0.01}$	$0.58^{+0.01}_{-0.02}$	$12.0^{+0.3}_{-0.3}$	$2.2^{+0.6}_{-0.5}$	$4.5^{+0.4}_{-0.4}$	< 2.2	316.2(205)
29.01.97	$3.64^{+0.02}_{-0.01}$	$0.99^{+0.03}_{-0.02}$	$11.4^{+0.2}_{-0.3}$	$3.2^{+0.4}_{-0.4}$	$3.6^{+0.8}_{-0.9}$	$1.6^{+0.5}_{-0.6}$	296.0(202)
01.02.97	$3.56^{+0.01}_{-0.01}$	$0.96^{+0.03}_{-0.03}$	$11.4^{+0.2}_{-0.2}$	$3.7^{+0.4}_{-0.4}$	$3.8^{+0.4}_{-0.4}$	$1.3^{+0.4}_{-0.3}$	342.8(205)
09.02.97	$2.26^{+0.01}_{-0.01}$	$0.43^{+0.01}_{-0.01}$	$12.4^{+0.3}_{-0.3}$	$2.6^{+0.4}_{-0.3}$	$5.4^{+0.2}_{-0.2}$	$2.0^{+0.6}_{-0.5}$	251.5(205)
22.02.97	$2.98^{+0.01}_{-0.01}$	$0.61^{+0.02}_{-0.02}$	$11.3^{+0.3}_{-0.3}$	$3.2^{+0.5}_{-0.4}$	$4.0^{+0.6}_{-0.5}$	< 0.8	232.4(205)
05.03.97	$3.24^{+0.01}_{-0.01}$	$0.64^{+0.04}_{-0.03}$	$11.1^{+0.4}_{-0.4}$	$2.9^{+0.8}_{-0.7}$	$3.8^{+0.7}_{-0.7}$	< 1.1	270.1(205)
10.03.97	$2.21^{+0.01}_{-0.01}$	$0.35^{+0.02}_{-0.02}$	$12.2^{+0.4}_{-0.4}$	$2.4^{+0.5}_{-0.6}$	$5.5^{+0.4}_{-0.4}$	< 1.0	257.4(205)
17.03.97	$3.21^{+0.01}_{-0.01}$	$0.64^{+0.03}_{-0.02}$	$11.3^{+0.4}_{-0.4}$	$2.8^{+0.5}_{-0.5}$	$4.0^{+0.4}_{-0.5}$	< 1.5	256.3(205)
26.03.97	$3.52^{+0.01}_{-0.01}$	$0.71^{+0.05}_{-0.03}$	$10.6^{+0.4}_{-0.5}$	$1.7^{+0.8}_{-0.7}$	$3.1^{+0.6}_{-0.6}$	$1.8^{+0.6}_{-0.6}$	214.0(205)
27.03.97	$3.65^{+0.01}_{-0.01}$	$0.84^{+0.05}_{-0.04}$	$10.9^{+0.5}_{-0.5}$	< 1.5	$3.3^{+0.8}_{-0.8}$	< 1.5	206.0(205)
02.04.97	$4.90^{+0.01}_{-0.03}$	$1.47^{+0.06}_{-0.05}$	$9.2^{+0.3}_{-0.3}$	$3.4^{+0.4}_{-0.4}$	$2.1^{+0.7}_{-0.7}$	$1.3^{+0.6}_{-0.6}$	311.2(206)
10.04.97	$4.44^{+0.01}_{-0.01}$	$1.29^{+0.05}_{-0.05}$	$10.6^{+0.4}_{-0.4}$	$4.1^{+0.4}_{-0.4}$	$4.1^{+0.6}_{-0.6}$	< 2.4	283.9(206)
19.04.97	$2.53^{+0.01}_{-0.01}$	$0.61^{+0.03}_{-0.03}$	$12.8^{+0.4}_{-0.4}$	$2.2^{+0.8}_{-0.7}$	$5.6^{+0.6}_{-0.5}$	< 0.7	209.8(205)
23.04.97	$2.72^{+0.01}_{-0.01}$	$0.59^{+0.03}_{-0.03}$	$12.3^{+0.4}_{-0.4}$	$1.7^{+0.8}_{-0.8}$	$5.4^{+0.6}_{-0.6}$	< 1.3	233.0(205)
25.04.97	$4.27^{+0.01}_{-0.01}$	$1.14^{+0.03}_{-0.03}$	$9.9^{+0.2}_{-0.2}$	$3.1^{+0.4}_{-0.4}$	$5.9^{+0.5}_{-0.4}$	$1.3^{+0.4}_{-0.3}$	458.0(205)

Табл. 2.5. То же, что и в Табл. 4, но для энергетического диапазона 13 – 60 кэВ.

Дата (UT)	f_{QPO} (Hz)	FWHM (Hz)	rms_1^{QPO} (%)	$rms_{1/2}^{QPO}$ (%)	rms_2^{QPO} (%)	rms_3^{QPO} (%)	$\chi^2(d.o.f)$
<i>13 – 60 кэВ</i>							
23.10.96	$5.14^{+0.07}_{-0.03}$	$0.66^{+0.09}_{-0.07}$	$7.0^{+0.6}_{-0.5}$	$3.7^{+0.8}_{-0.7}$	< 2.2	< 1.7	256.0(144)
	$5.15^{+0.10}_{-0.10}$	$0.83^{+0.10}_{-0.10}$	$7.0^{+0.6}_{-0.6}$	$3.5^{+0.8}_{-0.8}$	$2.3^{+0.8}_{-0.7}$	< 1.8	268.5(144)
	$5.20^{+0.05}_{-0.10}$	$0.79^{+0.10}_{-0.10}$	$6.8^{+0.5}_{-0.7}$	$3.8^{+0.9}_{-0.7}$	< 2.5	< 2.0	234.5(144)
	$4.51^{+0.03}_{-0.02}$	$0.64^{+0.07}_{-0.06}$	$8.6^{+0.5}_{-0.5}$	$4.0^{+0.9}_{-0.6}$	< 2.0	< 2.5	237.8(144)
29.10.96	$3.23^{+0.01}_{-0.01}$	$0.69^{+0.01}_{-0.02}$	$16.2^{+0.3}_{-0.4}$	< 1.2	$2.7^{+0.7}_{-0.6}$	$2.4^{+0.7}_{-0.8}$	207.1(144)
07.11.96	$4.88^{+0.02}_{-0.05}$	$0.51^{+0.05}_{-0.05}$	$7.5^{+0.6}_{-0.5}$	$2.2^{+0.6}_{-0.5}$	< 3.0	< 1.3	238.3(144)
	$5.15^{+0.05}_{-0.08}$	$0.71^{+0.05}_{-0.06}$	$7.4^{+0.6}_{-0.6}$	$3.5^{+0.8}_{-0.8}$	$2.5^{+0.4}_{-0.5}$	< 1.6	321.3(144)
	$7.83^{+0.04}_{-0.04}$	$0.98^{+0.14}_{-0.14}$	$7.4^{+0.8}_{-0.9}$	–	–	–	137.7(93)
	$4.25^{+0.05}_{-0.05}$	$1.20^{+0.20}_{-0.19}$	$11.1^{+0.7}_{-0.7}$	$4.8^{+0.8}_{-0.7}$	–	–	107.6(88)
14.11.96	$4.28^{+0.01}_{-0.03}$	$0.63^{+0.06}_{-0.05}$	$8.6^{+0.5}_{-0.5}$	$3.1^{+0.5}_{-0.9}$	$2.2^{+0.8}_{-0.8}$	< 2.0	240.2(144)
28.11.96	$4.65^{+0.02}_{-0.02}$	$1.03^{+0.05}_{-0.06}$	$9.4^{+0.3}_{-0.3}$	$3.2^{+0.7}_{-0.7}$	< 1.6	< 2.0	224.7(144)
04.12.96	$2.81^{+0.01}_{-0.01}$	$0.42^{+0.02}_{-0.02}$	$13.5^{+0.4}_{-0.5}$	$2.3^{+0.7}_{-0.7}$	$3.4^{+0.5}_{-0.4}$	< 1.6	164.1(144)
11.12.96	$2.78^{+0.01}_{-0.01}$	$0.80^{+0.04}_{-0.03}$	$14.9^{+0.5}_{-0.3}$	$2.6^{+0.5}_{-0.4}$	$4.00^{+0.5}_{-0.4}$	< 1.4	176.6(144)
19.12.96	$3.12^{+0.01}_{-0.01}$	$0.73^{+0.03}_{-0.03}$	$13.3^{+0.5}_{-0.3}$	$3.2^{+0.9}_{-1.0}$	$3.1^{+0.5}_{-0.5}$	< 1.1	147.9(144)
24.12.96	$3.91^{+0.02}_{-0.01}$	$0.74^{+0.05}_{-0.04}$	$10.3^{+0.4}_{-0.4}$	$2.6^{+0.5}_{-0.8}$	< 1.0	< 1.0	209.5(144)
31.12.96	$2.81^{+0.01}_{-0.01}$	$0.50^{+0.03}_{-0.02}$	$11.9^{+0.4}_{-0.4}$	$2.7^{+0.8}_{-0.8}$	$2.9^{+0.5}_{-0.5}$	< 1.0	132.8(144)
07.01.97	$2.91^{+0.01}_{-0.01}$	$0.57^{+0.03}_{-0.02}$	$12.0^{+0.4}_{-0.4}$	$2.7^{+0.3}_{-0.3}$	$3.1^{+0.5}_{-0.5}$	< 1.0	170.6(144)
14.01.97	$2.92^{+0.01}_{-0.01}$	$0.54^{+0.04}_{-0.03}$	$11.1^{+0.4}_{-0.4}$	$2.1^{+0.6}_{-0.6}$	$2.5^{+0.3}_{-0.3}$	< 1.0	163.7(144)
23.01.97	$2.80^{+0.01}_{-0.01}$	$0.48^{+0.03}_{-0.02}$	$11.4^{+0.3}_{-0.3}$	$2.3^{+0.5}_{-0.5}$	$3.5^{+0.5}_{-0.6}$	< 1.0	157.2(144)
29.01.97	$3.67^{+0.01}_{-0.02}$	$0.90^{+0.04}_{-0.05}$	$11.0^{+0.3}_{-0.3}$	$1.9^{+0.5}_{-0.6}$	$1.8^{+0.6}_{-0.6}$	< 1.5	200.7(145)
01.02.97	$3.55^{+0.01}_{-0.01}$	$0.72^{+0.04}_{-0.05}$	$10.0^{+0.3}_{-0.3}$	$2.9^{+0.6}_{-0.5}$	$3.0^{+0.6}_{-0.6}$	< 2.0	195.8(144)
09.02.97	$2.26^{+0.01}_{-0.01}$	$0.45^{+0.02}_{-0.02}$	$12.4^{+0.3}_{-0.3}$	$1.6^{+0.7}_{-0.6}$	$4.0^{+0.4}_{-0.4}$	$1.5^{+0.5}_{-0.5}$	158.5(144)
22.02.97	$2.98^{+0.01}_{-0.01}$	$0.51^{+0.03}_{-0.03}$	$10.3^{+0.3}_{-0.3}$	$3.3^{+0.6}_{-0.6}$	$2.9^{+0.6}_{-0.6}$	< 1.3	175.4(144)
05.03.97	$3.25^{+0.01}_{-0.01}$	$0.61^{+0.05}_{-0.04}$	$11.0^{+0.4}_{-0.3}$	$3.4^{+0.8}_{-0.8}$	$1.8^{+0.6}_{-0.6}$	< 2.2	123.1(144)
10.03.97	$2.21^{+0.01}_{-0.01}$	$0.33^{+0.01}_{-0.02}$	$11.1^{+0.4}_{-0.4}$	$2.4^{+0.5}_{-0.5}$	$3.7^{+0.4}_{-0.3}$	< 1.2	139.7(144)
17.03.97	$3.21^{+0.01}_{-0.01}$	$0.58^{+0.03}_{-0.03}$	$10.8^{+0.4}_{-0.3}$	$2.7^{+0.4}_{-0.5}$	$3.3^{+0.5}_{-0.5}$	< 1.4	140.3(144)
26.03.97	$3.52^{+0.01}_{-0.01}$	$0.70^{+0.06}_{-0.07}$	$10.3^{+0.5}_{-0.5}$	$2.3^{+1.1}_{-0.9}$	$2.3^{+0.5}_{-0.6}$	< 1.5	145.8(144)
27.03.97	$3.64^{+0.01}_{-0.01}$	$0.77^{+0.07}_{-0.07}$	$10.7^{+0.3}_{-0.5}$	$3.0^{+0.6}_{-0.7}$	$2.5^{+0.5}_{-0.6}$	< 1.3	129.2(144)
02.04.97	$4.86^{+0.03}_{-0.02}$	$1.60^{+0.12}_{-0.05}$	$10.4^{+0.5}_{-0.5}$	$2.4^{+0.8}_{-0.8}$	< 2.1	< 1.5	168.8(144)
10.04.97	$4.45^{+0.03}_{-0.03}$	$0.82^{+0.12}_{-0.10}$	$8.3^{+0.5}_{-0.6}$	< 3.0	$2.9^{+0.9}_{-0.9}$	< 3.0	179.7(148)
19.04.97	$2.55^{+0.01}_{-0.02}$	$0.77^{+0.04}_{-0.04}$	$13.4^{+0.4}_{-0.3}$	$1.2^{+0.6}_{-0.5}$	$3.4^{+0.6}_{-0.7}$	< 1.0	176.5(144)
23.04.97	$2.71^{+0.01}_{-0.01}$	$0.58^{+0.03}_{-0.03}$	$12.5^{+0.5}_{-0.4}$	$2.8^{+0.7}_{-0.7}$	$3.7^{+0.3}_{-0.4}$	< 1.7	120.5(144)
25.04.97	$4.28^{+0.02}_{-0.01}$	$1.05^{+0.06}_{-0.06}$	$9.9^{+0.3}_{-0.2}$	$2.8^{+0.6}_{-0.6}$	$2.5^{+0.5}_{-0.4}$	$1.7^{+0.8}_{-0.9}$	232.5(144)

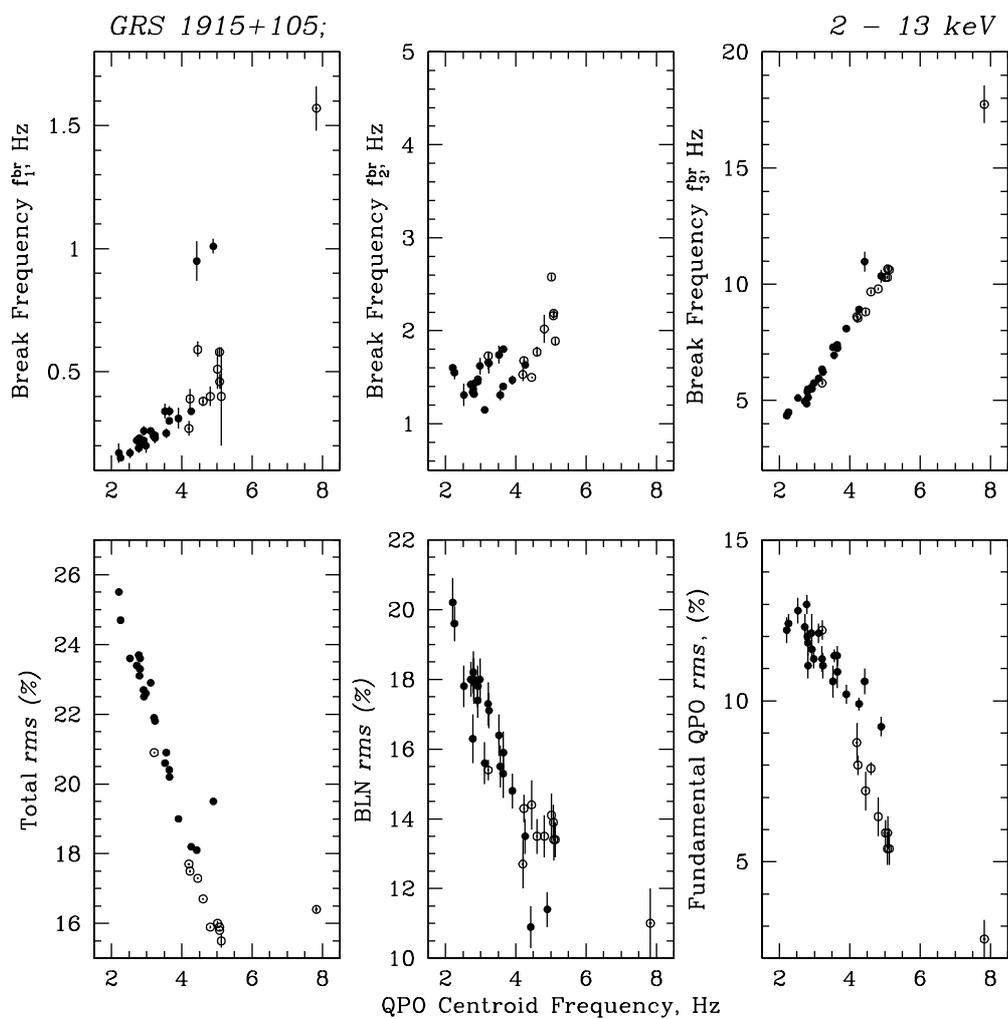


Рис. 2.10. Параметры аппроксимации спектров мощности источника GRS 1915+105 как функции центральной частоты основного пика QPO (диапазон энергий 2 – 13 кэВ). Открытые кружки соответствуют наблюдениям, покрывающим период переходов между состояниями (до 28 ноября 1996 г.); закрасненные кружки соответствуют состоянию с низкой светимостью.

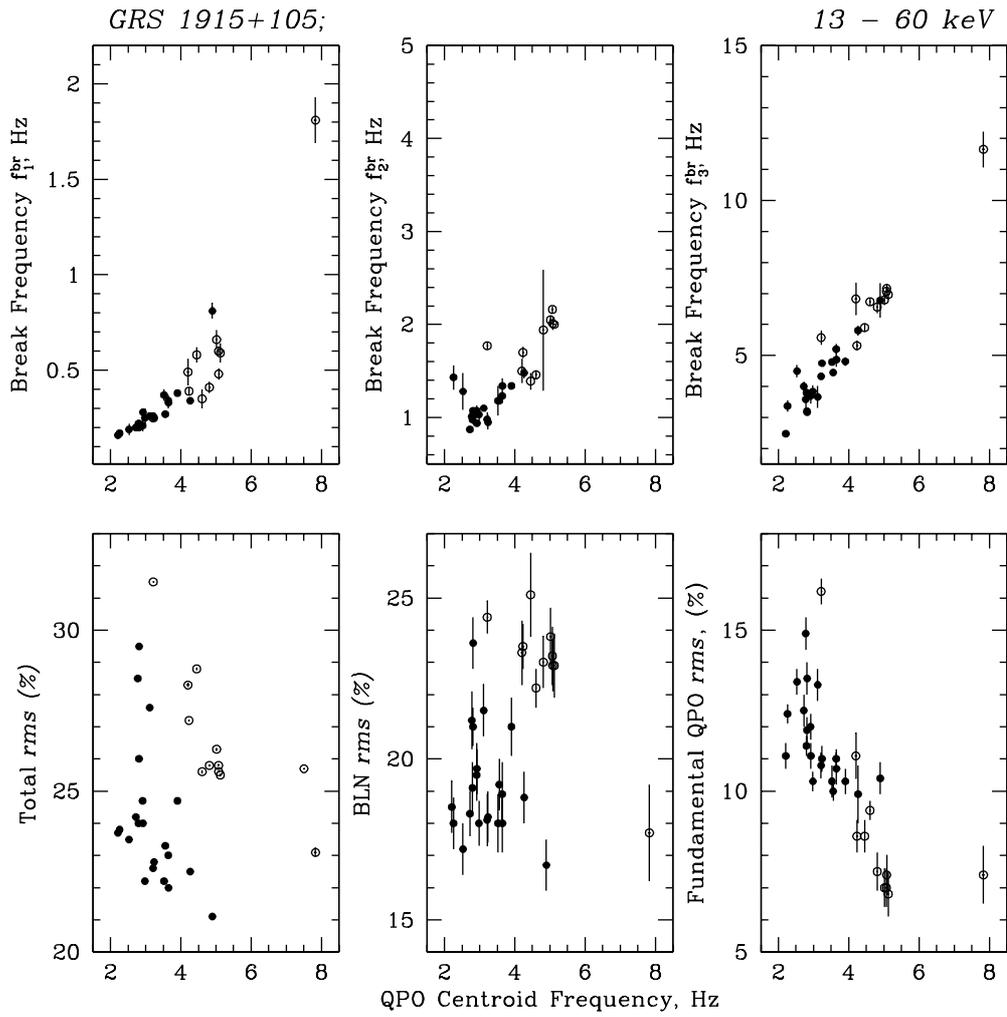


Рис. 2.11. То же самое, что и рис. 2.10, но для диапазона энергий 13 – 60 кэВ.

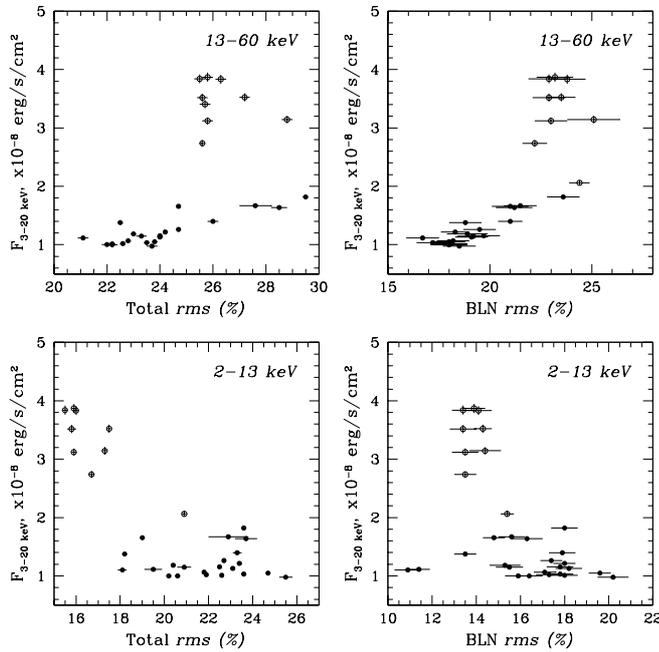


Рис. 2.12. Полная относительная среднеквадратичная амплитуда флуктуаций потока (rms) и относительная rms частотно-ограниченной компоненты (BLN) спектра мощности источника (диапазоны энергий 2 – 13 и 13 – 60 кэВ) как функции рентгеновского потока в диапазоне 3 – 20 кэВ. Открытые кружки соответствуют наблюдениям в период перехода между состояниями (23.10.1996 – 28.11.1996); закрашенные кружки соответствуют состоянию с низкой светимостью и возврату в состояние с высокой светимостью (28.11.1996 – 25.04.1997).

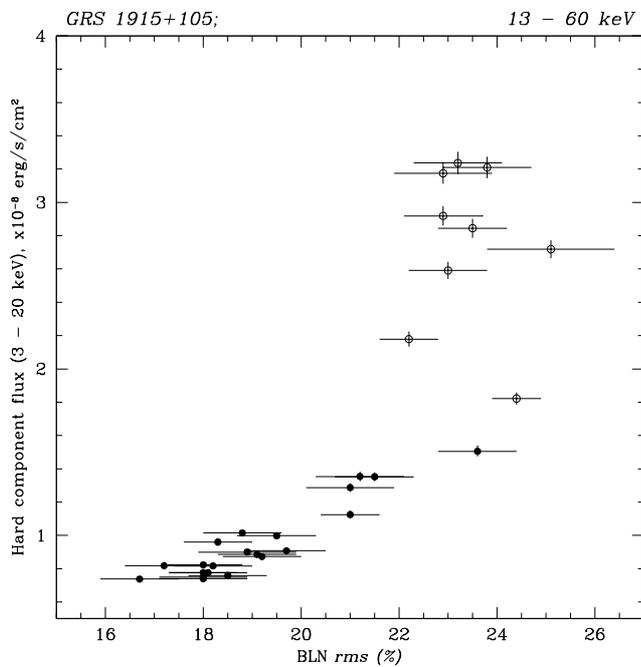


Рис. 2.13. Полная относительная среднеквадратичная амплитуда флуктуаций потока (rms) и относительная rms частотно-ограниченной компоненты (BLN) спектра мощности источника (диапазон энергий 13 – 60 кэВ) как функция потока в жесткой спектральной компоненте в диапазоне 3 – 20 кэВ. Открытые кружки соответствуют наблюдениям в период перехода между состояниями (23.10.1996 – 28.11.1996); закрашенные кружки соответствуют состоянию с низкой светимостью и возврату в состояние с высокой светимостью (28.11.1996 – 25.04.1997).

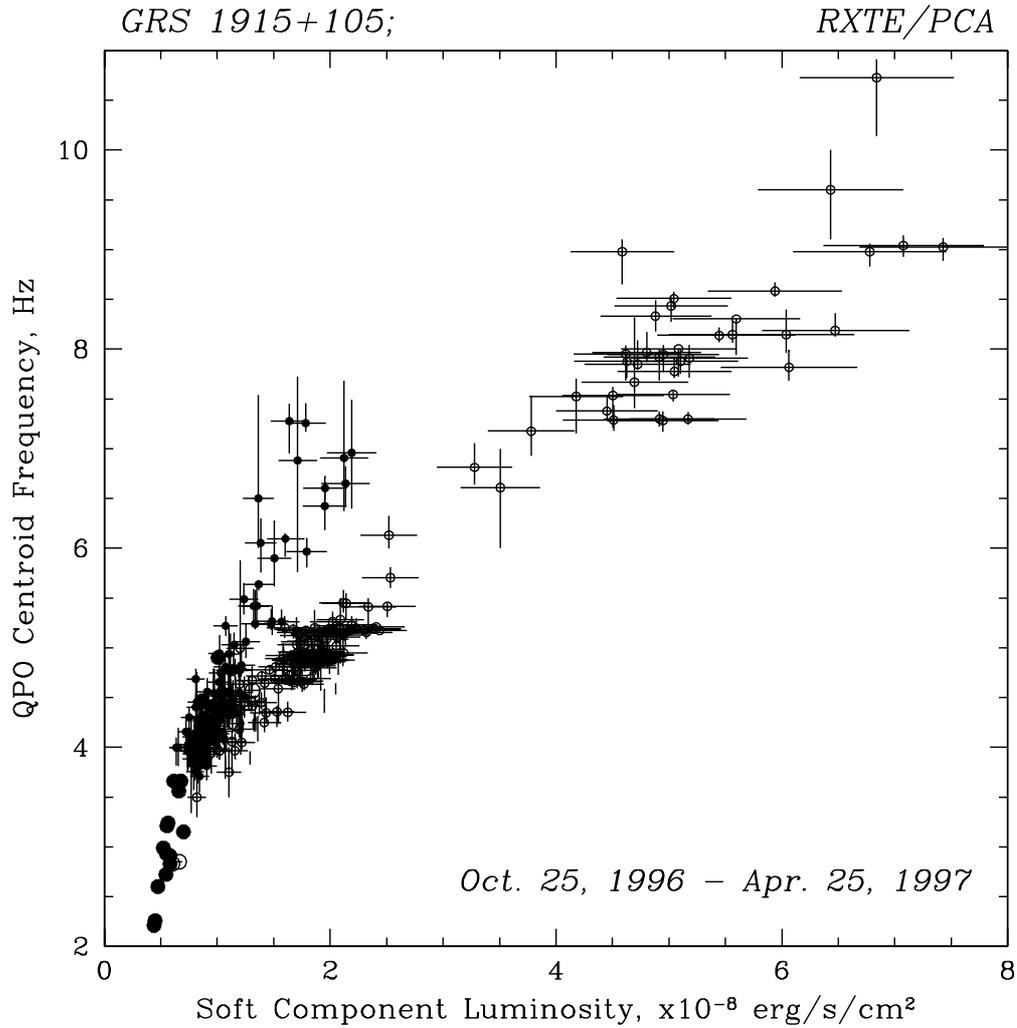


Рис. 2.14. Зависимость между центральной частотой основного пика QPO в спектре мощности GRS 1915+105 и болометрическим потоком в мягкой спектральной компоненте, полученным по результатам аппроксимации энергетического спектра (см. текст) для наблюдений в ноябре 1996 г. – апреле 1997 г. Открытые кружки соответствуют наблюдениям, в период перехода между состояниями (23.10.1996 – 28.11.1996); закрашенные кружки соответствуют состоянию с низкой светимостью и возврату в состояние с высокой светимостью (28.11.1996 – 25.04.1997). Большие кружки отражают данные, усредненные за целое наблюдение, маленькие кружки – данные, усредненные за 16 – 80 секундные интервалы.

Глава 3

GRS 1915+105 в период яркого вспышечного состояния.

3.1 Наблюдения.

Изучение эволюции спектральных и временных свойств рентгеновского излучения GRS 1915+105 в периоды яркого вспышечного состояния представляет особый интерес, так как позволяет получить информацию о характеристиках и геометрии аккреционного потока вблизи черной дыры в экстремально широком диапазоне режимов аккреции. Для этой цели нами были отобраны несколько наблюдений источника во вспышечном состоянии, включающих большую часть репрезентативных типов переменности (Табл. 3.1). Для исследования временных и спектральных свойств источника использовались данные прибора PCA, записанные в “*binned*”, “*single binned*” и “*event*”-форматах.

Табл. 3.1. Наблюдения GRS 1915+105 прибором PCA орбитальной обсерватории RXTE в ярком вспышечном состоянии.

Код наблюдения	Дата, UT	Время, UT	Экспозиция ^a , с
10408-01-01-01	06/04/96	05:39	5068
10408-01-10-00	26/05/96	17:12	6128
10408-01-38-00	07/10/96	05:44	9766
10408-01-44-00	25/10/96	11:52	8250
20402-01-01-00	07/11/96	05:42	6948
20402-01-28-00	18/05/97	16:19	7349
20402-01-33-00	18/06/97	12:58	6093
20402-01-35-00	07/07/97	14:53	5718
20402-01-59-00	17/12/97	02:10	8795

^a — экспозиция, скорректированная на эффекты мертвого времени прибора PCA.

3.1.1 Спектральный анализ.

В целях определения характера эволюции спектральных параметров в пределах каждого отдельного наблюдения был проведен анализ спектров источника, накопленных в течение 4–16 секундных интервалов. Спектральный анализ данных РСА проводился с использованием матрицы отклика прибора версии 3.2.1 (Jahoda, 1997). Для учета неточностей в ее определении мы добавили 1% систематическую ошибку к статистическим ошибкам данных при аппроксимации энергетических спектров источника аналитическими моделями в диапазоне энергий 3–20 кэВ. Полученные значения спектральных потоков от источника были откорректированы с учетом эффектов мертвого времени (Zhang & Jahoda 1996).

Для аналитической аппроксимации спектров источника в диапазоне 3–20 кэВ как и в случае состояния с низкой светимостью были использованы максимально упрощенные модели (вариант модели излучения оптически толстого “многоцветного” аккреционного диска (Shakura & Sunyaev 1973; Mitsuda *et al.* 1984; Makishima *et al.* 1986) (см. обсуждение в главе 2).

3.1.2 Временной анализ.

Для количественного анализа эволюции параметров короткомасштабной переменности рентгеновского потока от GRS 1915+105 были получены кривые блеска для последовательности 4–секундных интервалов в энергетическом диапазоне 2–30 кэВ с временным разрешением 0.002 с, и на их основе произведены спектры мощности источника в интервале частот 0.25–250 Гц. Точки в спектрах мощности были сгруппированы в частотных интервалах по 0.25 Гц. После вычитания фона, связанного с пуассоновской статистикой, откорректированного на эффекты мертвого времени, спектры мощности источника представлены в единицах квадрата относительной среднеквадратичной амплитуды флуктуаций рентгеновского потока ($rms/mean$)². Параметры спектра (центральная частота пика QPO, характерная частота слома частотно–ограниченной шумовой компоненты) определялись путем его аппроксимации в диапазоне частот 0.5–15 Гц аналитической моделью, состоящей из двух лоренциан, аппроксимирующих QPO и частотно–ограниченную шумовую компоненту (типичное значение ошибки в определении частоты QPO составляет $\sim 0.2–0.3$ Гц).

3.2 Классификация состояний.

Несмотря на крайне разнообразный характер спектральной и временной переменности GRS 1915+105, его поведение может быть сведено к последовательности сменяющих друг друга двух основных типов спектрально–временных состояний: “жестких” состояний, характеризующихся присутствием ярко выраженной (а иногда доминирующей) жесткой компоненты энергетического спектра, сравнительно высоким уровнем короткопериодической переменности со спектром мощности, доминированным частотно–ограниченной и QPO компонентами; “мягких” состояний,

характеризующихся энергетическим спектром с решающим вкладом мягкой компоненты и низким уровнем переменности рентгеновского потока на малых временных масштабах. Каждый из типов состояний, в свою очередь, может быть разбит на подклассы с отличием в основных свойствах энергетического спектра и в уровне светимости (см. обсуждение ниже). Два характерных примера эволюции GRS 1915+105 в период вспышечного состояния приведены на Рис. 3.1.

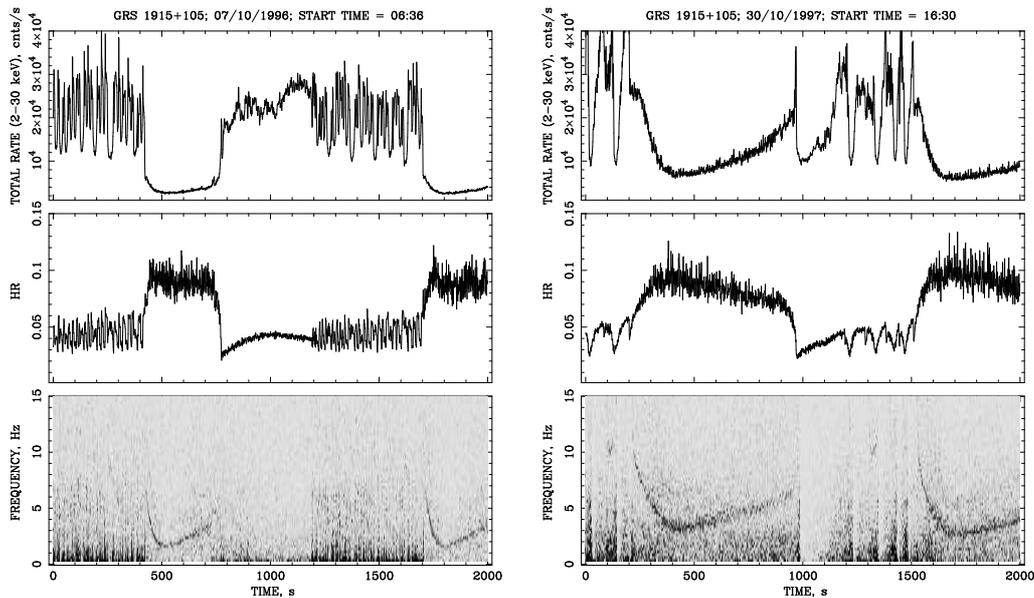


Рис. 3.1. Временные истории рентгеновского потока GRS 1915+105 в период вспышечного состояния в диапазоне энергий 2 – 30 кэВ (*верхние панели рисунка*), соответствующие коэффициенты жесткости спектра, равные соотношению потоков в энергетических диапазонах 13 – 30 и 2 – 13 кэВ ($(13 - 30 \text{ keV}) / (2 - 13 \text{ keV})$) (*средние панели рисунка*) и динамические спектры мощности (*нижние панели рисунка*) для наблюдений 7 октября 1996 г. (*левая часть рисунка*) и 30 октября 1997 г. (*правая часть рисунка*). Пик QPO в спектре мощности источника выглядит как 'U' – образная черная полоса на изображении динамического спектра мощности.

3.2.1 Переходы между состояниями.

На Рис. 3.2, 3.3 и 3.4 представлены типичные примеры быстрых спектрально–временных переходов GRS 1915+105 в период вспышечного состояния. Отличительной чертой переходов из “жесткого” в “мягкое” состояние является общее смягчение энергетического спектра и падение уровня короткопериодической переменности рентгеновского потока. Из анализа одновременных наблюдений GRS 1915+105 в рентгеновском, инфракрасном и радио–диапазонах была установлена

связь этих переходов с появлением мощных сколламированных релятивистских выбросов (Mirabel *et al.* 1998). Примечательно, что время, за которое происходит переход, практически постоянно и составляет порядка 1 сек и то, что каждый переход сопровождается локальным всплеском рентгеновского потока сравнительно малой продолжительности $\sim 5 - 10$ сек, синхронизированным с появлением релятивистских выбросов.

В результате систематического анализа данных большого количества наблюдений GRS 1915+105 удалось выделить два вида переходов источника из “жесткого” в “мягкое” состояние, сходных по характеру эволюции формы энергетического спектра и уровня короткопериодической переменности: 1) переходы, приводящие к увеличению полной рентгеновской светимости (Рис. 3.2); 2) переходы, приводящие к уменьшению рентгеновского потока (Рис. 3.3, 3.4).

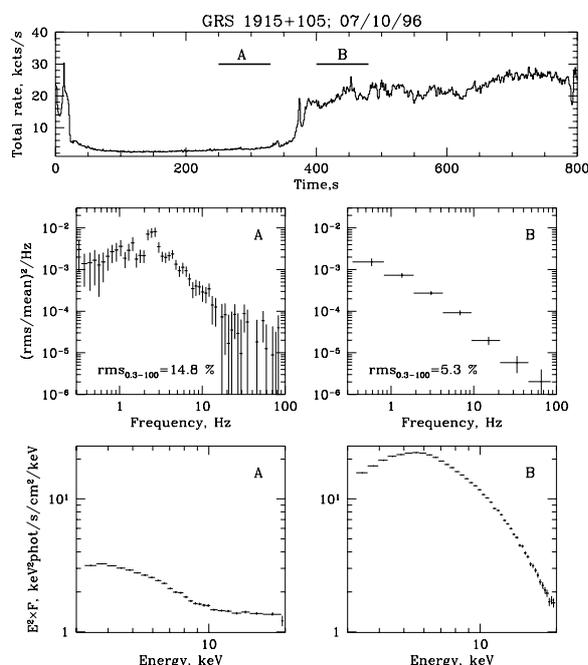


Рис. 3.2. Изменение свойств энергетического спектра и спектра мощности GRS 1915+105 при переходе из “жесткого” в “мягкое” состояние во время наблюдения 7 октября 1996 г. Толстыми линиями и буквами “А” и “В” в верхней части рисунка отмечены временные интервалы, которым соответствуют приведенные в нижней части рисунка энергетические спектры и спектры мощности. “А” и “В” — интервалы обозначают “жесткое” и “мягкое” состояния соответственно.

3.2.2 Эволюция спектральных и временных параметров.

Характерный пример эволюции параметров модельной аппроксимации энергетического спектра источника во время переходов между “жестким” и “мягким” состояниями приведен на Рис. 3.5: переход ознаменовался резким скачком в значениях всех параметров, что характеризует принципиальное изменение физических условий в аккреционном потоке. Как следует из Рис. 3.5, спектральная эволюция GRS 1915+105 в период “жестких” состояний характеризуется плавным изменением параметров (наклона жесткой компоненты, цветовой температуры мягкой компоненты и др.), скоррелированных с изменением рентгеновского потока. В отли-

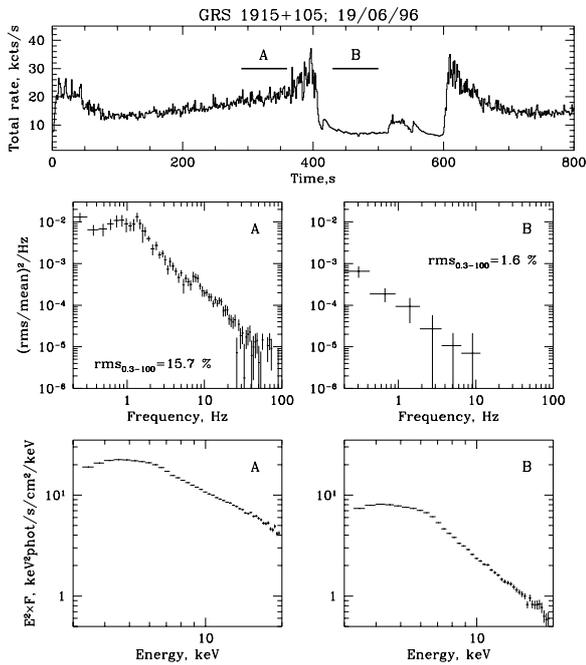


Рис. 3.3. Изменение свойств энергетического спектра и спектра мощности GRS 1915+105 при переходе из “жесткого” в “мягкое” состояние во время наблюдения 19 июня 1996 г. Толстыми линиями и буквами “А” и “В” в верхней части рисунка отмечены временные интервалы, которым соответствуют приведенные в нижней части рисунка энергетические спектры и спектры мощности. “А” и “В”—интервалы обозначают “жесткое” и “мягкое” состояния соответственно.

чие от плавного характера изменения свойств спектра в пределах отдельных состояний, переход между ними знаменуется резким скачком (за время ~ 1 сек) некоторых параметров, таких как, например, наклон жесткой спектральной компоненты (Рис. 3.5), совпадающим с вышеупомянутым всплеском светимости. Примечательно, что всплеск светимости, наблюдаемый в конце “жесткого” состояния, не меняет общего направления изменения светимости мягкой спектральной компоненты, что наряду с другими вышеупомянутыми фактами может быть объяснено в рамках двухфазной модели аккреционного потока (см. обсуждение).

Эволюция свойств короткопериодической переменности GRS 1915+105 во вспышечном состоянии в целом скоррелирована с эволюцией энергетического спектра. Характерной чертой спектра мощности в “жестком” состоянии является наличие пика квазипериодических осцилляций в области частот $\sim 1 - 12$ Гц, центральная частота которого меняется в прямом соответствии с изменением рентгеновского потока. Та же самая тенденция наблюдается для двух других основных характеристик спектра мощности: амплитуды короткопериодических вариаций рентгеновского потока и характеристической частоты слома частотно—ограниченной шумовой компоненты. Подобно энергетическому спектру, переходы между состояниями сопровождаются резким изменением свойств спектра мощности, — исчезновением QPO и значимой частотно—ограниченной компонент, а также скачком полной амплитуды короткопериодической переменности на временном масштабе ~ 1 сек (Рис. 3.1).

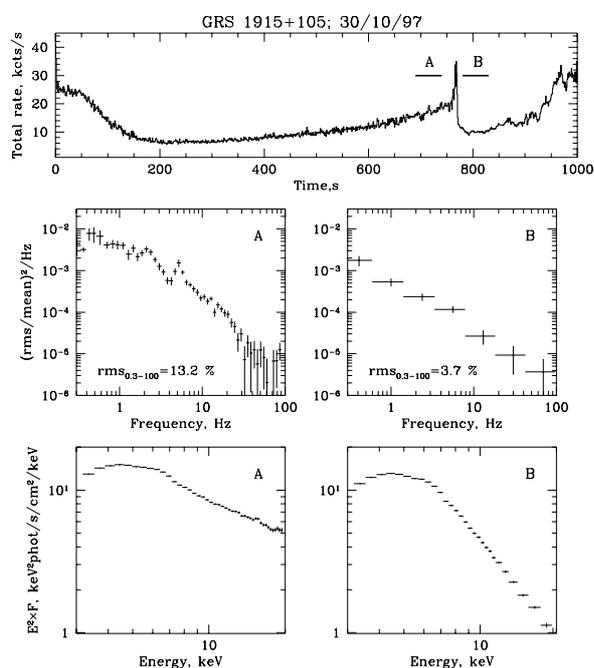


Рис. 3.4. Изменение свойств энергетического спектра и спектра мощности GRS 1915+105 при переходе из “жесткого” в “мягкое” состояние во время наблюдения 30 октября 1997 г. Толстыми линиями и буквами “А” и “В” в верхней части рисунка отмечены временные интервалы, которым соответствуют приведенные в нижней части рисунка энергетические спектры и спектры мощности. “А” и “В”—интервалы обозначают “жесткое” и “мягкое” состояния соответственно.

3.3 Корреляция свойств спектральной и временной эволюции в период “жестких” состояний.

Поскольку изменение спектральных и временных параметров высокоэнергичного излучения GRS 1915+105 связано с изменением рентгеновского потока, интересно исследовать также их взаимную зависимость. Для этого мы провели одновременный анализ энергетических спектров и спектров мощности источника, накопленных за 16-секундные интервалы, аппроксимируя их аналитическими моделями, описанными выше. Так как ранее нами была установлена однозначная зависимость между частотой QPO и остальными параметрами спектра мощности (см. предыдущую главу), центральная частота QPO используется, как количественная мера, характеризующая общие свойства спектра мощности. Результаты вышеописанного анализа приведены на Рис. 3.6. Примечательна корреляция между частотой QPO и болометрическим потоком в мягкой спектральной компоненте и полным рентгеновским потоком в диапазоне энергий 3–20 кэВ, сходная в качественном отношении с ранее обнаруженными для состояния с низкой светимостью GRS 1915+105 (см. Гл. 2).

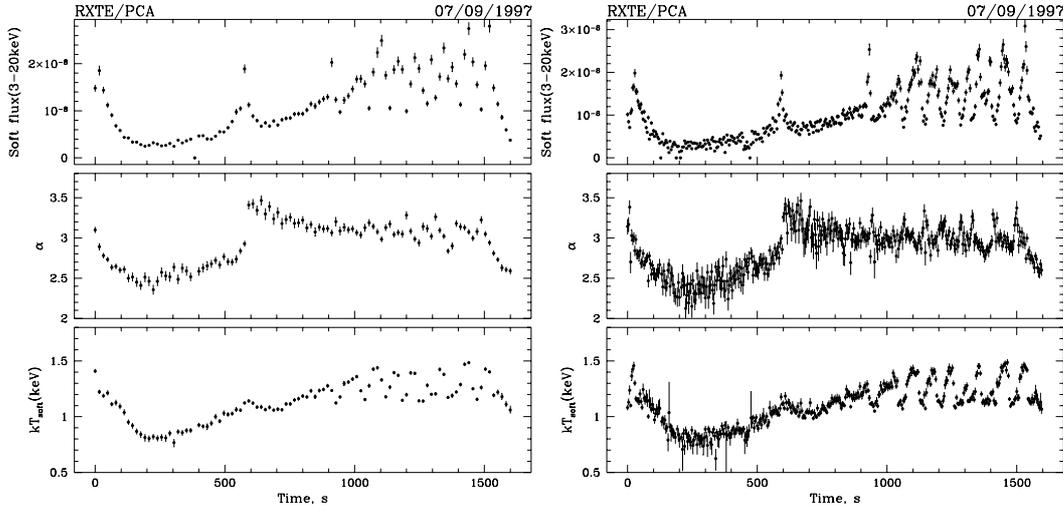


Рис. 3.5. **Левая часть рисунка:** Эволюция параметров аппроксимации энергетического спектра GRS 1915+105 (см. описание модели в тексте) в наблюдении 7 октября 1997 г. (яркое вспыхивающее состояние, временное разрешение 16 сек). Первые ~ 600 сек наблюдения соответствуют “жесткому” состоянию, которое сменяется “мягким” состоянием (переход 2 типа). На *верхней панели рисунка* изображено изменение потока в мягкой компоненте, на *средней панели* — изменение наклона жесткой спектральной компоненты и на *нижней панели* — изменение характеристической цветовой температуры мягкой спектральной компоненты. **Правая часть рисунка:** То же самое, но с временным разрешением 4 сек.

3.4 Корреляция между длительностью “жестких” состояний и соответствующей частотой QPO в спектре мощности.

Используя данные из нашего набора наблюдений GRS 1915+105 во вспыхивающем состоянии, был проведен анализ связи длительности “жестких” состояний и характерной частоты связанного с ними пика QPO. Длительность “жестких” состояний определялась на основе свойств энергетического спектра. В качестве характерного значения бралось минимальное значение частоты QPO, достигнутое в каждом “жестком” состоянии. На Рис. 3.7 изображена полученная зависимость длительности “жестких” состояний, t_{hard} от минимальной частоты QPO, f_{QPO} . Для всех наблюдений, использовавшихся в анализе, наблюдается сильная антикорреляция этих двух величин. Зависимость t_{hard} от f_{QPO} имеет форму, близкую к степенной функции для значений t_{hard} короче, чем $\sim 100 - 200$ сек и, вероятно, уплощается в области больших длительностей “жестких” состояний. В соответствии со значениями наклона обнаруженной степенной зависимости, Γ , наблюдения могут быть разбиты на две отдельно стоящие группы: $\Gamma \sim 2.1 - 2.4$ для наблюдений 06/04/96, 07/10/96, 18/06/97, 07/07/97 и 17/12/97 (**первая группа, левая часть** Рис. 3.7); $\Gamma \geq 3.0$ для наблюдений 26/05/96, 25/10/96, 07/11/96 and 18/05/97 (**вторая группа, пра-**

вая часть Рис. 3.7). Анализ временных историй рентгеновского потока от источника выявил существенное различие между наблюдениями, относящимися к этим двум группам: для первой группы переход из “жесткого” в “мягкое” состояние сопровождается ростом потока в диапазоне 2 – 30 кэВ (Рис. 3.1, левая часть), в то время как для второй группы при этом происходит падение потока (Рис. 3.1, правая часть). Следующим чрезвычайно важным фактором является различие в свойствах энергетического спектра источника в “жестком” состоянии: для первой группы мягкая компонента вносит сильный вклад ($\sim 50\%$ и выше) в общую рентгеновскую светимость в диапазоне 3 – 20 кэВ, а для второй группы спектр доминирован жесткой спектральной компонентой (вклад мягкой компоненты не превышает 25%).

3.5 QPO и “жесткие” состояния, как возможные проявления динамической и вязкой эволюции аккреционного диска.

Исследование эволюции рентгеновского излучения GRS 1915+105 во время вспышечного состояния показали, что она может быть представлена как последовательность двух чередующихся основных спектрально–временных состояний. Одновременный анализ свойств энергетического спектра и характера короткопериодической переменности в пределах “жестких” состояний на сравнительно коротких временных масштабах выявил: 1) сильную корреляцию между частотой QPO и параметрами мягкой спектральной компоненты, 2) зависимость между продолжительностью “жестких” спектральных состояний и характерным радиусом оптически толстого аккреционного диска (определенного в рамках аппроксимации моделью многотемпературного диска). Учитывая (1) и (2), естественно ожидать некий сорт корреляции между частотой QPO и характерной длительностью “жестких” состояний.

Для объяснения наблюдательных проявлений процесса аккреции на черные дыры и нейтронные звезды был предложен ряд моделей, предполагающих наличие горячей оптически тонкой области вблизи компактного объекта, ответственной за производство жесткой спектральной компоненты энергетического спектра и окружающего ее оптически непрозрачного аккреционного диска, генерирующего мягкую спектральную компоненту. В качестве одного из возможных объяснений явления квазипериодических осцилляций при этом предлагается взаимодействие между вышеупомянутыми частями аккреционного потока на динамическом времени на их границе (Molteni *et al.* 1996; Titarchuk, Lapidus & Muslimov 1998). В последующем анализе мы также будем предполагать пропорциональность частоты QPO и Кеплеровской частоты на границе аккреционного диска и внутренней горячей области.

В стандартной теории аккреционного диска (Shakura & Sunyaev 1973) характерное время вязкой эволюции радиационно–доминированного диска, t_{visc} :

$$t_{visc} \sim 1.2 \times 10^{-5} \alpha^{-1} \dot{m}^{-2} r^{7/2} \text{ сек}, \quad (3.1)$$

где α – параметр вязкости, \dot{m} – темп аккреции в диске в единицах критического, m – масса компактного объекта в солнечных массах, r – расстояние от компактного

объекта в единицах 3 гравитационных радиусов. Подставив выражение для Кеплеровской частоты, $f_K \approx 2200 m^{-1} r^{-3/2}$ Гц, получаем:

$$t_{visc} \sim 740 \alpha^{-1} m^{-4/3} \dot{m}^{-2} f_K^{-7/3} \text{ сек} \quad (3.2)$$

Полученная зависимость, $t_{visc} \propto f_K^{-7/3}$, довольно хорошо согласуется с наблюдаемым соотношением между длительностью “жестких” состояний и минимальной частотой QPO для первой группы наблюдений (Рис. 3.7, левая часть). Следует также отметить, что для части этих наблюдений обнаружена корреляция между длительностью “жестких” состояний и максимальным значением характерного радиуса излучающей области (Belloni 1997b).

Предполагая, что частота QPO пропорциональна Кеплеровской частоте ($f_{QPO} = f_K/l$), а длительность “жестких” состояний пропорциональна характерному вязкому времени диска ($t_{hard} = t_{visc}/k$), становится возможным оценить значение темпа аккреции, \dot{m} в диске:

$$\dot{m} \sim \left(\frac{\alpha}{0.1}\right)^{-1/2} \left(\frac{m}{33}\right)^{-2/3} \left(\frac{k t_{hard}}{100 \text{сек}}\right)^{-1/2} (l f_{QPO})^{-7/6}, \quad (3.3)$$

где масса компактного объекта нормирована на значение $33 M_\odot$, полученное в рамках интерпретации устойчивого QPO на частоте ~ 67 Гц, как проявления осцилляций с Кеплеровской частотой вблизи последней устойчивой орбиты вокруг шварцшильдовской черной дыры (Morgan *et al.* 1997). Значения темпа аккреции в диске, \dot{m} , полученные таким образом для наблюдений, входящих в первую группу, находятся в пределах: $\dot{m} \sim (0.11 - 0.17)(\alpha/0.1)^{-1/2} (m/33)^{-2/3} k^{-1/2} l^{-7/6}$ (Рис. 3.7). Соотношение темпов аккреции, определяемых в рамках этого метода, находится в хорошем согласии с результатами спектрального анализа, где за меру темпа аккреции в разные моменты времени принимаются значения болометрической светимости мягкой спектральной компоненты, соответствующие одинаковым значениям частоты QPO.

Если явление квазипериодических осцилляций связано с выделенной областью в аккреционном потоке, а именно, внутренней границей оптически непрозрачного диска, которая движется на характерном вязком временном масштабе, естественно ожидать корреляцию частоты QPO и темпа ее изменения со временем. Предполагая, что увеличение частоты QPO в период “жестких” состояний обусловлено вязким движением внутренней границы радиационно-доминированного аккреционного диска в направлении компактного объекта:

$$\left(\frac{df_{QPO}}{dt}\right) = \left(\frac{df_{QPO}}{dr}\right) v_r(r) \sim \alpha \dot{m}^2 m^{7/3} f_{QPO}^{10/3}, \quad (3.4)$$

где $v_r(r)$ — скорость радиального дрейфа вещества в диске на радиусе r (Shakura & Sunyaev 1973). Интегрируя уравнение (3.4), получаем:

$$f_{QPO}^{-7/3}(t_0) - f_{QPO}^{-7/3}(t) = A(t - t_0), \quad (3.5)$$

где $A \sim \alpha \dot{m}^2 m^{7/3}$ — константа, зависящая от основных параметров аккреционного диска. На Рис. 3.8 показано сравнение этой зависимости с данными для обеих групп

наблюдений. Для первой группы наблюдений зависимость (3.5) в целом описывает как фазу подъема, так и фазу первоначального спада частоты QPO в “жестком” состоянии, с разными значениями коэффициента A . Примечательно, что значение коэффициента A для фазы нарастания частоты QPO остается практически постоянным на протяжении всего наблюдения, т.е. на временном масштабе $\sim 10^4$ сек (Рис. 3.8, *верхняя часть*). Для второй группы наблюдений только фаза нарастания частоты QPO достаточно хорошо согласуется с аналитической зависимостью (3.5), в то время, как начальный спад имеет более сложную структуру (Рис. 3.8, *нижняя часть*). Следует также отметить, что для второй группы наблюдений наряду с фазами спада и подъема частоты QPO часто присутствует дополнительный участок, где частота QPO остается практически постоянной. Совокупность вышеперечисленных фактов может рассматриваться, как возможная причина отклонения зависимости между t_{hard} и f_{QPO} от закона $t_{hard} \sim f_{QPO}^{-7/3}$ для второй группы наблюдений.

Литература

- Belloni *et al.* 1997//Belloni T., *et al.* 1997 ApJ, **488**, L109
Makishima *et al.* 1986//Makishima K., *et al.* 1986 ApJ, **308**, 635
Mirabel *et al.* 1998//Mirabel *et al.* 1998 A&A, **330**, L9
Mitsuda *et al.* 1984//Mitsuda K., *et al.* 1984 PASJ, **36**, 741
Molteni *et al.* 1996//Molteni D., *et al.* 1996 ApJ, **457**, 805
Morgan *et al.* 1997//Morgan E., *et al.* 1997 ApJ, **482**, 993
Shakura & Sunyaev 1973//Shakura N., & Sunyaev R., 1973 A&A, **24**, 337
Titarchuk, Lapidus & Muslimov 1998//Titarchuk L., Lapidus I., & Muslimov A. 1998 ApJ, **499**, 315
Zhang & Jahoda 1996//Zhang W., Jahoda K. <http://lheawww.gsfc.nasa.gov/users/keith/deadtime/deadtime.htm>

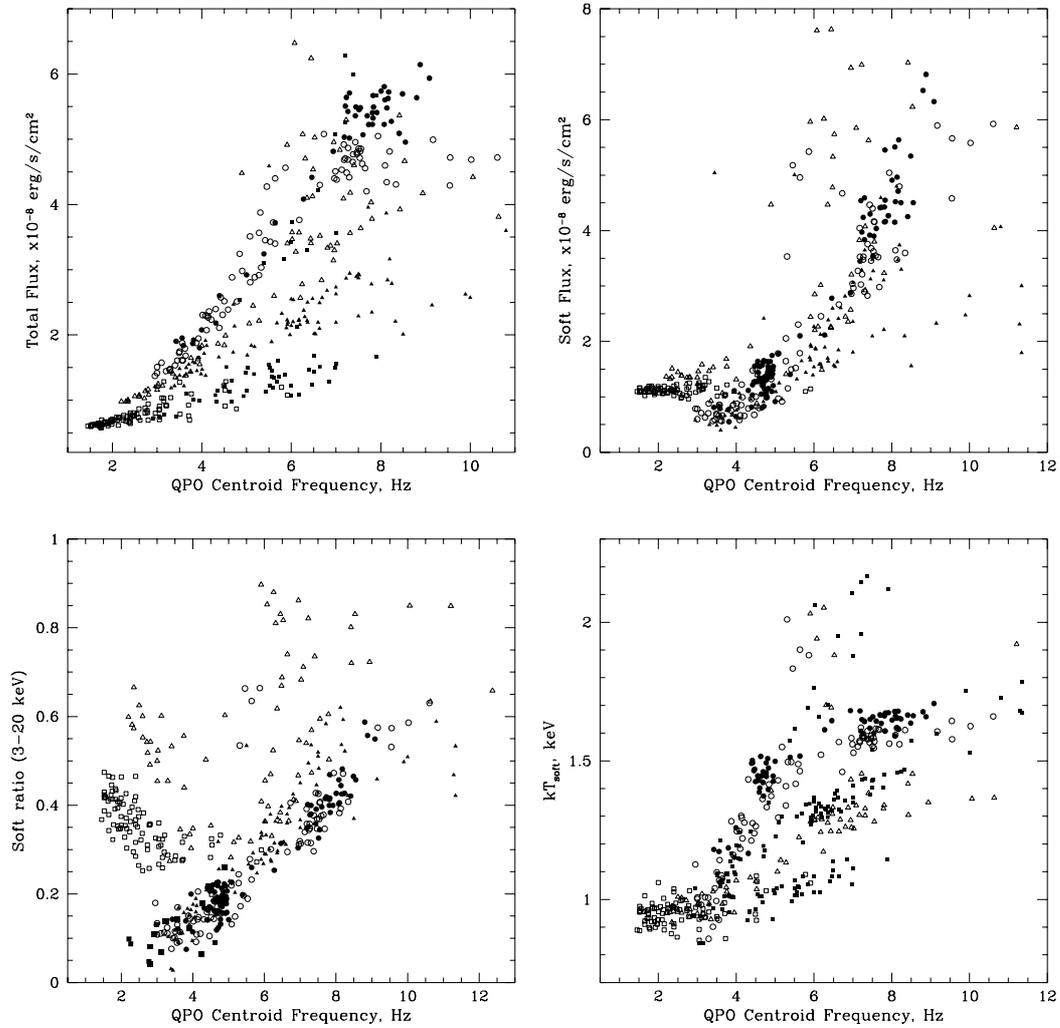


Рис. 3.6. Зависимость параметров аналитической аппроксимации энергетического спектра для нескольких наблюдений GRS 1915+105 во вспышечном состоянии ('Total flux' — полная светимость в диапазоне энергий 3–20 кэВ; 'Soft component flux' — болометрический поток в мягкой спектральной компоненте; 'Soft ratio' — вклад мягкой компоненты в полную светимость в диапазоне энергий 3–20 кэВ; ' kT_{soft} ' — цветовая температура мягкой компоненты) от соответствующего значения центральной частоты QPO–пика ('QPO centroid frequency').

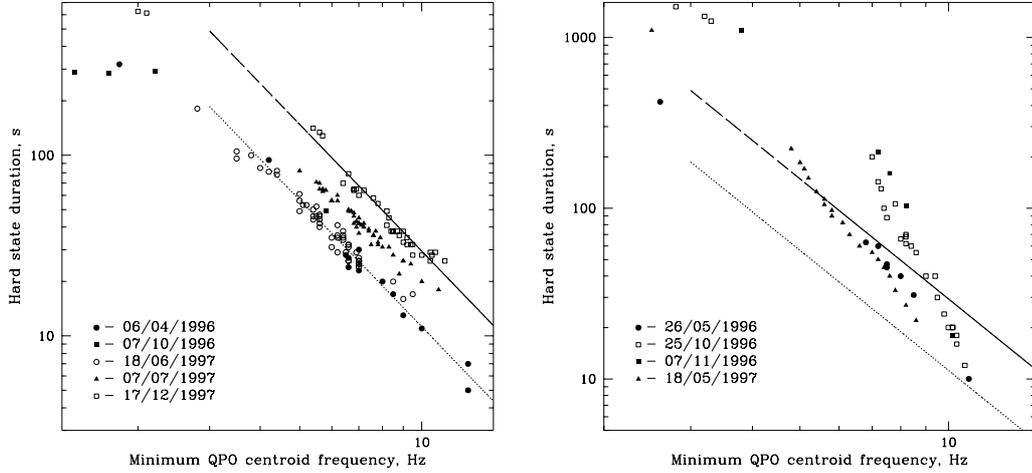


Рис. 3.7. Связь между длительностью “жесткого” состояния и соответствующей минимальной частотой QPO для набора наблюдений GRS 1915+105 в ярком вспышечном состоянии (Табл. 3.1) (данные для первой группы наблюдений (см. объяснение в тексте) представлены в *левой части рисунка*; данные для второй группы изображены в *правой части рисунка*). Зависимости $t_{\text{visc}} \propto f_K^{-7/3}$ характерного времени вязкой эволюции внутренней границы радиационно-доминированного диска от кеплеровской частоты на этой границе при темпах аккреции $\dot{m} \sim 0.11(\alpha/0.1)^{-1/2}(m/33)^{-2/3}$ и $\dot{m} \sim 0.17(\alpha/0.1)^{-1/2}(m/33)^{-2/3}$ показаны с помощью *штриховой и точечной* линий соответственно.

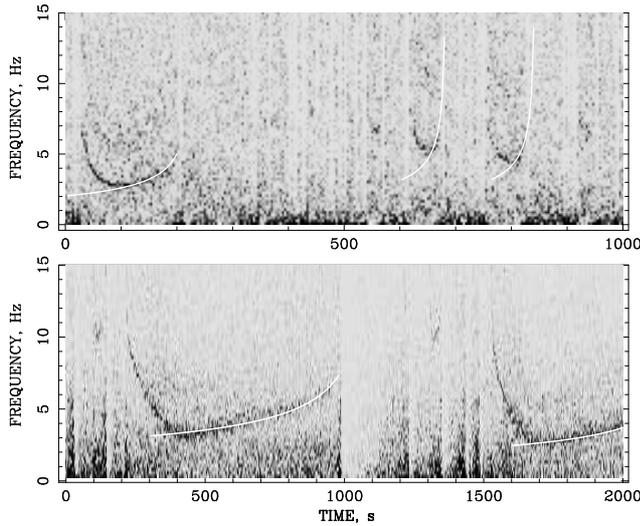


Рис. 3.8. Динамические спектры мощности GRS 1915+105, соответствующие первой (18/06/1997, *верхняя часть рисунка*) и второй группам наблюдений (30/10/1997, *нижняя часть рисунка*). Ожидаемая зависимость центральной частоты QPO от времени, полученная в рамках модели вязкой эволюции положения внутренней границы радиационно-доминированного аккреционного диска приведена в виде белых линий, наложенных на наблюдаемый трек QPO.

Глава 4

Двухфазная модель аккреционного потока в GRS 1915+105.

4.1 Наблюдательные предпосылки.

Наиболее продуктивной в настоящее время моделью аккреционного потока вблизи черной дыры является модель, включающая внутреннюю оптически тонкую горячую область (корона и т.д.), окруженную оптически непрозрачным аккреционным диском. В ряде работ в модель включается дополнительная компонента, представляющая собой фронт ударной волны, возникающей из-за аккреции вещества, обладающего малым начальным угловым моментом (Chakrabarti & Titarchuk 1995).

Согласно результатам наблюдений источника GRS 1915+105 в различных спектрально–временных состояниях (состоянии с низкой светимостью, ярком вспышечном состоянии и в период переходов между этими состояниями) были установлены несколько основных закономерностей его спектрально–временных свойств, позволяющих трактовать поведение источника в рамках вышеупомянутой полуэмпирической двухкомпонентной модели:

1. увеличение светимости источника сопровождается укрупнением жесткой компоненты энергетического спектра и увеличением относительного вклада мягкой компоненты в полный рентгеновский поток;
2. увеличение светимости источника сопровождается увеличением характерной частоты максимума его спектра мощности и, в особенности, центральной частоты QPO; полный рентгеновский поток и болометрический поток в мягкой спектральной компоненте демонстрируют четкую корреляцию с частотой QPO;
3. эволюция спектра мощности GRS 1915+105 характеризуется положительной корреляцией между центральной частотой QPO и частотами характеристических сломов частотно–ограниченных шумовых компонент;
4. изменение рентгеновского потока во время вспышечного состояния сопровождается скоррелированной эволюцией спектральных и временных характеристик излучения источника;
5. наличествует корреляция между длительностью “жестких” спектральных со-

стояний в период вспышечного состояния и характеристической частотой связанного с ними QPO.

4.2 Модель аккреционного потока.

Предположим, что аккреционный поток в GRS 1915+105 представляет собой совокупность внутренней оптически тонкой области, окруженной оптически непрозрачным аккреционным диском (Рис. 4.1). Будем считать, что жесткая компонента энергетического спектра источника генерируется во внутренней области в процессе комптонизации (Sunyaev & Titarchuk 1980), а мягкая спектральная компонента обусловлена излучением внешнего диска, описываемого стандартными уравнениями (Shakura & Sunyaev 1973; Shakura & Sunyaev 1976). Предположим, что явление квазипериодических осцилляций связано со взаимодействием двух вышеупомянутых частей аккреционного потока на динамическом времени, соответствующем положению границы между ними (Molteni *et al.* 1996; Titarchuk, Lapidus & Muslimov 1998). Руководствуясь этими предположениями, мы можем связать изменение центральной частоты QPO в спектре мощности, f_{QPO} с изменением внешнего радиуса горячей области (или внутреннего радиуса оптически толстого диска), который, в свою очередь, определяет полную светимость источника и свойства его энергетического спектра.

Рассмотрим возможный сценарий эволюции спектральных и временных характеристик излучения источника, связанной с движением границы между двумя частями аккреционного потока на сравнительно коротких временных масштабах в предположении постоянства темпа аккреции. Вводя эффективный радиус границы, r_B , получаем, что

$$f_{QPO} \propto r_B^{-3/2} \quad (4.1)$$

Уменьшение внешнего радиуса оптически тонкой области/внутреннего радиуса диска приводит к увеличению характерных частот переменности (в том числе к увеличению центральных частот QPO, f_{QPO} и частот слома частотно—ограниченных шумовых компонент, f_{br}) и росту полной рентгеновской светимости и светимости мягкой спектральной компоненты, что в действительности является характерной чертой эволюции свойств рентгеновского излучения GRS 1915+105 в различных состояниях (Рис. 3.6, 2.8, 2.14).

Рост потока мягких фотонов и увеличение оптической толщи во внутренней области, связанные с движением границы внутрь, обуславливают наблюдаемое постепенное увеличение наклона жесткой компоненты спектра источника и в определенный момент способны вызвать катастрофическое охлаждение и даже полное исчезновение горячей области (что, возможно, наблюдается при резких скачках параметров жесткой спектральной компоненты) и радикальному изменению свойств короткопериодической переменности (Рис. 3.5, 3.2, 3.3, 3.4)). Следует также отметить, что подобные резкие переходы отмечены сильной вспышкой рентгеновской светимости и ассоциированы с резким повышением активности в инфракрасном и радио—диапазонах и явлением сколламированных релятивистских выбросов

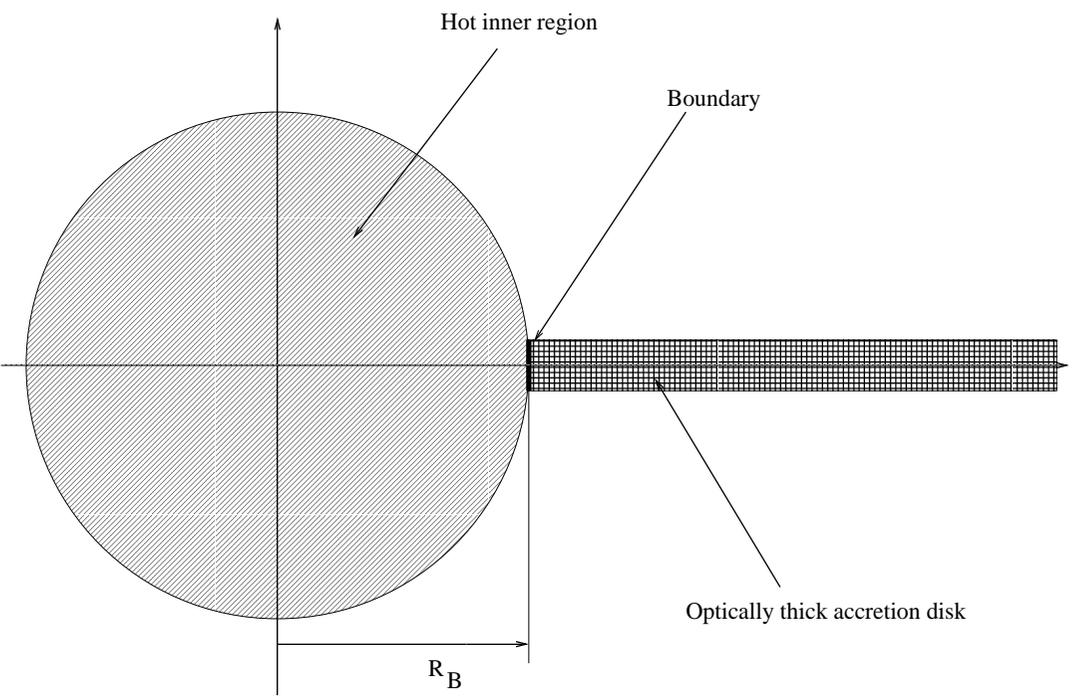


Рис. 4.1. Схема двухкомпонентной модели аккреционного потока вблизи компактного объекта в системе GRS 1915+105

(Mirabel *et al.* 1998). Дальнейшие свойства источника в “мягком” состоянии сильно зависят от пространственного положения внутренней границы оптически непрозрачного диска: в тех случаях, когда диск подходит достаточно близко к компактному объекту, светимость источника оказывается значительно выше светимости в “жестком” состоянии (первый тип переменности, Рис. 3.1, *левая половина*), в противном случае она ниже, и мы наблюдаем ее плавное нарастание, вероятно, обусловленное движением границы диска внутрь (второй тип переменности, Рис. 3.1, *правая половина*, Рис. 3.3, 3.4, 3.5).

Вязкая эволюция внутренней границы аккреционного диска должна приводить к определенному характеру изменения частоты QPO и полного потока в мягкой компоненте. Серия наблюдений GRS 1915+105 во вспышечном состоянии, продемонстрировала корреляцию между длительностью “жестких” спектральных состояний, t_{hard} и характеристической частотой связанного с ними QPO (Рис. 3.7). Более того, отождествление циклов смены “жестких” и “мягких” состояний с вязкой эволюцией внутреннего края аккреционного диска и вышеупомянутое предположение о природе QPO приводят к хорошему согласию с данными эксперимента, предсказывая функциональную форму зависимости длительности “жестких” состояний от частоты QPO и характер эволюции QPO от времени:

$$t_{hard} \propto f_{QPO}^{-7/3} \quad (4.2)$$

$$f_{QPO}^{-7/3}(t_0) - f_{QPO}^{-7/3}(t) \propto t - t_0, \quad (4.3)$$

С другой стороны, смещение частоты QPO может быть объяснено движением внешней границы горячей области по мере накопления вещества в районе фронта ударной волны, возникающей из-за аккреции вещества, обладающего малым начальным угловым моментом (Chakrabarti 1999).

Вариации частот квазипериодических осцилляций (и скоррелированное с ними изменение частоты характеристического максимума спектра мощности) могут быть однозначно связаны с изменением некоего эффективного радиуса в системе и, в особенности, внутреннего радиуса оптически толстого аккреционного диска. Поскольку светимость аккреционного диска является функцией как темпа аккреции, так и внутреннего радиуса диска, мы не можем приписывать изменение светимости источника только изменениям темпа аккреции. Более того, светимость источника может довольно сильно варьироваться даже при постоянном темпе аккреции, если изменяется геометрия аккреционного потока.

Литература

- Chakrabarti & Titarchuk 1995//Chakrabarti S., & Titarchuk L. 1995 ApJ, **452**, 226
 Chakrabarti 1999//Chakrabarti S., 1999, A&A, **351**, 185
 Molteni *et al.* 1996//Molteni D., *et al.* 1996 ApJ, **457**, 805
 Shakura & Sunyaev 1973//Shakura N., & Sunyaev R., 1973 A&A, **24**, 337

Shakura & Sunyaev 1976//Shakura N., & Sunyaev R., 1976 MNRAS, **175**, 613

Sunyaev & Titarchuk 1980//Sunyaev R., & Titarchuk L. 1980 A&A, **86**, 121

Titarchuk, Lapidus & Muslimov 1998//Titarchuk L., Lapidus I., & Muslimov A. 1998 ApJ, **499**, 315

Часть IV

**Ограничения на параметры
пространственного распределения
и функцию светимости жестких
рентгеновских транзиентных
источников (по результатам
наблюдений телескопа СИГМА и
современных рентгеновских
мониторов всего неба WATCH и
BATSE).**

4.3 Введение.

В главе проводится анализ, призванный поставить ограничение на параметры пространственного распределения жестких транзиентных источников (рентгеновских Новых) и их функцию светимости. При этом используются результаты наблюдений телескопа СИГМА и современных мониторов всего неба (all-sky monitors), работающих в жестком рентгеновском диапазоне: WATCH и BATSE.

За период с 1990 по 1997 гг. в результате наблюдений области Центра Галактики (области с угловым размером $10^\circ \times 10^\circ$) телескопом СИГМА были открыты три жестких транзиентных источника: KS/GRS 1730–312, GRS 1739–278 и GRS 1737–31 (Vargas *et al.* 1996; Vargas *et al.* 1997; Sunyaev *et al.* 1997). Предполагая среднюю продолжительность вспышки транзиентного источника лежащей в пределах от недели до месяца, и временное покрытие наблюдений телескопа СИГМА, можно оценить полное число таких источников, имеющих рентгеновский поток более ~ 100 мКраб (что соответствует уровню значимости детектирования источника телескопом $\sim 5 - 6\sigma$ в наблюдении продолжительностью в 1 день), вспыхивающих в пределах вышеупомянутой области в течение года: $\geq 1.5 \text{ год}^{-1}$.

В настоящее время для описания пространственного распределения видимого звездного вещества в Галактике используется четырехкомпонентная модель, предложенная Бакаллом и Сонефрой (Bahcall 1986). В ней предполагается, что Галактика состоит из диска, сфероидальной составляющей, центрального балджа и массивного невидимого гало. На Рис. 4.2 изображено распределение звездной массы на луче зрения как функция расстояния до земного наблюдателя для различных условий наблюдения.

Согласно результатам наблюдений телескопа АРТ–П орбитальной обсерватории “Гранат”, распределение рентгеновских источников в области неба внутри $\sim 5^\circ$ от Центра Галактики хорошо согласуется с распределением звездной массы (Grebenev *et al.* 1995). Анализ данных более ранних экспериментов (Einstein, Sky Lab и др.) также выявил сходство пространственного распределения рентгеновских источников и звездной массы в области неба, примыкающей к Центру Галактики (вне центрального градуса от Центра) (Skinner 1993). Далее мы предполагаем, что пространственное распределение жестких транзиентных источников (рентгеновских Новых) также следует распределению звездной массы в Галактике.

4.4 Пространственное распределение галактических рентгеновских Новых.

Характеристики пространственного распределения и функции светимости транзиентных источников являются основными параметрами, однозначно определяющими ожидаемое количество этих объектов, которое способен зарегистрировать прибор с заданным уровнем чувствительности ¹. Это позволяет определять параме-

¹Поскольку мы говорим о детектировании новых источников, под функцией светимости предполагается функция светимости источников в максимуме блеска

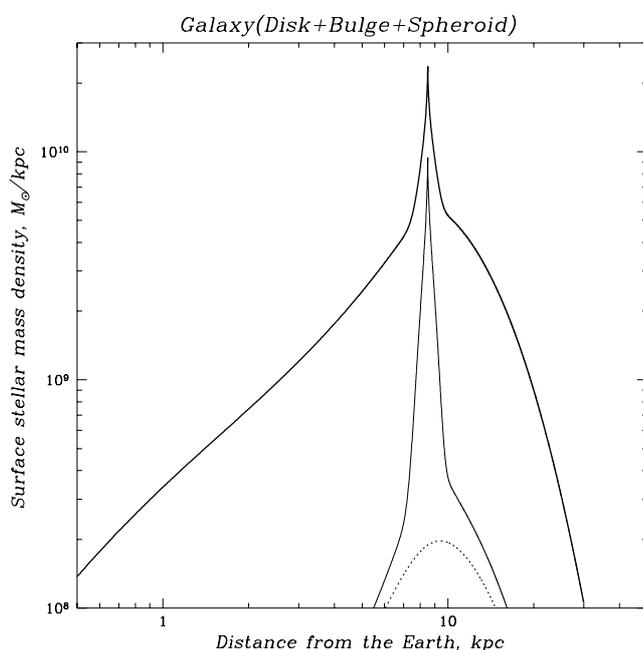


Рис. 4.2. Поверхностная плотность звездной массы в Галактике в модели Бакалла и Сонейры (Bahcall 1986) как функция расстояния до земного наблюдателя для различных условий наблюдения. *Толстая линия* соответствует наблюдению всей небесной сферы, *тонкая линия* — наблюдению прямоугольной площадки неба размером $10^\circ \times 10^\circ$, центрированной в направлении на Центр Галактики, *точечная линия* — наблюдению прямоугольной площадки неба размером $10^\circ \times 10^\circ$, центрированной в направлении на точку с галактическими координатами: $l = 20^\circ; b = 0^\circ$

тры функции распределения и функции светимости источников на основе сравнения количества источников, зарегистрированных приборами с различной чувствительностью, полем зрения и др.

Телескоп СИГМА орбитальной обсерватории “Гранат” имеет относительно высокую чувствительность ~ 100 мКраб ($\sim 5 - 6\sigma$ в наблюдении продолжительностью в 1 день) в диапазоне $35 - 150$ кэВ и довольно узкое поле зрения $\sim 17^\circ \times 18^\circ$. В свою очередь, мониторы всего неба (all-sky monitors), работающие в жестком рентгеновском диапазоне (WATCH, BATSE), непрерывно обзоревают сразу практически всю небесную сферу² и способны обнаружить источник рентгеновского излучения с потоком выше ~ 300 мКраб (Сазонов 1997). При вышеупомянутой чувствительности современные мониторы всего неба способны регистрировать источники со светимостью в максимуме вспышки порядка 10^{37} эрг/с, расположенные в пределах ~ 4.3 кпс от Земли, в то время как телескоп СИГМА имеет возможность регистрировать более удаленные объекты, но в пределах сравнительно небольшой области Галактики. Используя число источников, открытых телескопом СИГМА в области Центра Галактики, и предполагая известным пространственное распределение и функцию светимости этих источников, можно оценить ожидаемое число транзиентов, которое способны задетектировать современные мониторы всего неба.

Согласно результатам современных исследований, общая форма логарифмиче-

²продолжительность разрывов в наблюдениях приборов, связанная с особенностями орбиты, пренебрежимо мала в сравнении с характерной длительностью вспышек галактических транзиентных источников

ской функции светимости Галактических транзиентных источников довольно хорошо описывается Гауссовым распределением (Chen, Livio & Shrader 1997). В вычислениях мы использовали следующее представление функции светимости:

$$\left(\frac{dN}{d(\log L)}\right) \sim \exp\left(-\frac{\log(L) - \log(L_0)}{\sigma}\right)^2, \quad (4.4)$$

где σ — логарифмическая ширина распределения, L_0 — центральная светимость. На Рис. 4.3 изображено ожидаемое соотношение N_{all}/N_{SIGMA} между числом транзиентных источников, одновременно задетектированных соответственно телескопом СИГМА в области Центра Галактики и мониторами всего неба на всей небесной сфере. *Сплошными* линиями показаны соотношения, полученные в предположении Гауссовой формы логарифмической функции светимости (каждая кривая помечена соответствующим значением характерной ширины функции светимости) и пространственного распределения источников, повторяющего распределение звездной массы в Галактике; *штриховые* линии соответствуют той же форме функции светимости и дисковому пространственному распределению источников. Как следует из Рис. 4.3, предположения о широкой функции светимости и пространственном распределении, не имеющем концентрации к Центру Галактики (к примеру, дисковом распределении) приводят к соотношению N_{all}/N_{SIGMA} , значительно превышающему единицу. Это означает, что для таких предположений, число источников, задетектированных телескопом СИГМА в области Центра Галактики (оценка полного числа таких объектов в области Центра Галактики за 6-летний период (1991 — 1997 гг.) после коррекции на временное покрытие наблюдений телескопа СИГМА составляет ~ 9), должно быть значительно меньшим, чем число источников, задетектированных мониторами всего неба за тот же самый период. Эти выводы входят в серьезное противоречие с результатами наблюдений: за период непрерывных наблюдений с 1991 по 1997 г. мониторами WATCH и BATSE открыто 6 жестких рентгеновских транзиентных источников.

Сопоставляя результаты наблюдений и модельные оценки, можно получить следующие ограничения на свойства пространственного распределения и функции светимости галактических жестких рентгеновских Новых:

- 1) распределение жестких транзиентных источников имеет концентрацию в области Центра Галактики и, в особенности, отличается от дискового распределения;
- 2) если предположить, что пространственное распределение рентгеновских Новых следует распределению видимой звездной массы, то среднее значение их максимальной светимости близко к 10^{37} эрг/с со сравнительно малым характерным разбросом (менее, чем в 3—4 раза).

Наблюдения телескопа СИГМА позволяют изучать вспышечную активность для ~ 20 % видимой звездной массы в Галактике (предполагая среднюю светимость источников равной $\sim 10^{37}$ эрг/с и чувствительность прибора $\sim 50 - 100$ мКраб). Используя этот факт и предполагая прямую пропорциональность числа рентгеновских Новых количеству видимой звездной массы, оценка полного числа рентгеновских Новых, ежегодно вспыхивающих в Галактике, дает $\sim 6 - 7$ источников, что находится в общем согласии с результатами других исследований (White & Paradijs 1997)

и недавних наблюдений приборами с более высокой чувствительностью (Remillard *et al.* 1998).

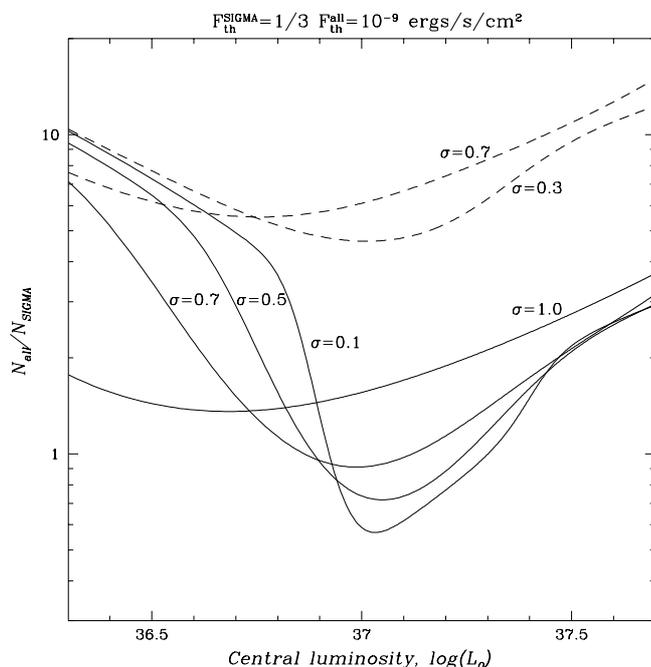


Рис. 4.3. Ожидаемое соотношение числа источников N_{SIGMA}/N_{all} , открытых телескопом СИГМА в области Центра Галактики $\sim 10^\circ \times 10^\circ$ и рентгеновскими мониторами всего неба (WATCH, BATSE), как функция положения центра и характерной ширины Гауссовой функции светимости транзиентных источников. Чувствительность на детектирование новых источников принята равной 100 мКраб и 300 мКраб для прибора СИГМА и мониторов всего неба соответственно.

4.5 Заключение.

Применение результатов наблюдений галактических рентгеновских Новых телескопом СИГМА орбитальной обсерватории “Гранат” и современными мониторами всего неба, работающими в жестком рентгеновском диапазоне, позволяет поставить следующие ограничения на свойства пространственного распределения и функции светимости этих объектов:

- 1) пространственное распределение рентгеновских Новых демонстрирует дополнительную концентрацию в области Центра Галактики, подобно распределению видимой звездной массы в Галактике;
- 2) если пространственное распределение рентгеновских Новых следует распределению видимой звездной массы, то средняя максимальная светимость этих объектов оказывается $\sim 10^{37}$ эрг/с с достаточно малым разбросом.

Литература

- Bahcall 1986//Bahcall J., 1986 ARA&A, **24**, 577
 Grebenev *et al.* 1995//Grebenev S., 1995 Proc. X-ray Conference, Wurzburg, Germany, 141
 Сазонов 1997//Сазонов С. Ю., 1997, частное сообщение

Skinner 1993//Skinner J., 1993 A&AS, **97**, 149

Sunyaev *et al.* 1997//Sunyaev R., *et al.* 1997 IAU Circ. **N 6599**

Vargas *et al.* 1996//Vargas M., *et al.* 1996 A&A, **313**, 828

Vargas *et al.* 1997//Vargas M., *et al.* 1997 ApJ, **476**, L23

Часть V

Анализ широкополосных спектров галактических кандидатов в черные дыры в высоком и сверхвысоком состояниях в рамках модели комптонизации излучения аккреционного диска на сходящемся потоке аккрецируемого вещества.

Смена спектральных состояний является одним из наиболее интересных наблюдательных проявлений галактических кандидатов в черные дыры. Классификация состояний включает два основных типа: “высокое”/ “сверхвысокое” и “низкое” состояния. Типичный энергетический спектр в “высоком”/”сверхвысоком” состоянии представляется в виде суммы тепловой мягкой компоненты с эффективной температурой ~ 1 кэВ и протяженного жесткого “хвоста”, имеющего степенную форму вплоть до энергий в несколько сотен кэВ. В отличие от “высокого” состояния, стандартное “низкое” состояние характеризуется жестким степенным спектром с квазиэкспоненциальным завалом в области энергий $\sim 50 - 150$ кэВ.

Согласно результатам теоретических исследований, образование энергетического спектра в двух вышеупомянутых типах состояний является следствием качественно разных механизмов (Chakrabarti & Titarchuk 1995). В случае “низкого” состояния, — это механизм комптонизации низкоэнергичного излучения на тепловых электронах с характерной температурой порядка нескольких десятков кэВ (Sunyaev & Titarchuk 1980). Такая интерпретация предусматривает существование горячей оптически тонкой области аккреционного потока вблизи компактного объекта, взаимодействующей с излучением оптически непрозрачного диска. Возрастание потока мягких фотонов от диска в “высоком” состоянии должно приводить к падению температуры и изменению других физических параметров внутренней области, что затрудняет объяснение спектральных свойств рентгеновского излучения в рамках механизма тепловой комптонизации.

Альтернативным механизмом, применяемым для объяснения спектральных свойств кандидатов в черные дыры в “высоком” состоянии, является комптонизация низкоэнергичного излучения на относительно холодном оптически толстом сходящемся потоке аккрецируемого вещества вблизи компактного объекта. В простейшем случае рассматривается модель, включающая направленный поток вещества вблизи горизонта событий черной дыры, облучаемый потоком мягких фотонов, идущим от внутренней границы аккреционного диска (Titarchuk *et al.* 1997; Titarchuk & Zannias 1998). Основными чертами, характеризующими энергетические спектры, получаемые в рамках этой модели являются:

1. наличие двух спектральных компонент, одна из которых образована фотонами, испытавшими достаточно большое число рассеяний (жесткий “хвост”);
2. степенная форма жесткой спектральной компоненты вплоть до энергий в несколько сотен кэВ;
3. завал в спектре начиная с энергий порядка энергии покоя электрона.

Мы провели рассмотрение свойств широкополосных спектров ряда галактических кандидатов в черные дыры в рамках модели комптонизации излучения аккреционного диска на сходящемся потоке аккрецируемого вещества, включив ее в стандартный пакет программ, используемый для спектрального анализа. В анализе были использованы данные наблюдений источников GRO J1655-40, GRS 1915+105, GRS 1739-278, 4U 1630-47, XTE J1755-32, и EXO 1846-031 приборами PCA и HEXTE орбитальной обсерватории RXTE и GSPC обсерватории EXOSAT в диапазонах энергий 3.5 – 150 и 3.5 – 20 кэВ (Рис. 4.4) (Borozdin *et al.* 1999). Основными па-

раметрами модели являются температура мягких фотонов, впрыскиваемых в район комптонизации, T_0 , доля мягких фотонов, f , испытавших большое число рассеяний и попавших к наблюдателю, и наклон жесткой спектральной компоненты, α , определяемый темпом аккреции вещества в сходящемся потоке и его физическими параметрами.

Как следует из Рис. 4.4, модель достаточно хорошо аппроксимирует данные наблюдений в диапазоне энергий 3.5 – 150 кэВ, предоставляя приемлемые значения параметров аккреционного потока. Однако, одни эти результаты не способны однозначно ответить на вопрос о применимости модели, поскольку остается неясным вопрос о наличии предсказываемого высокоэнергичного завала в спектре на энергиях порядка энергии покоя электрона. Решающую роль в разрешении этого вопроса должны сыграть будущие наблюдения приборами с высокой чувствительностью, работающими в жестком рентгеновском и мягком γ -диапазонах.

Литература

Borozdin *et al.* 1999//Borozdin K., *et al.* 1999 ApJ, 512, 367

Chakrabarti & Titarchuk 1995//Chakrabarti S., & Titarchuk L. 1995 ApJ, **452**, 226

Titarchuk *et al.* 1997//Titarchuk L., Mastichiadis A., & Kylafis N. 1997 ApJ, **487**, 834

Titarchuk & Zannias 1998//Titarchuk L., & Zannias T. 1998 ApJ, **493**, 863

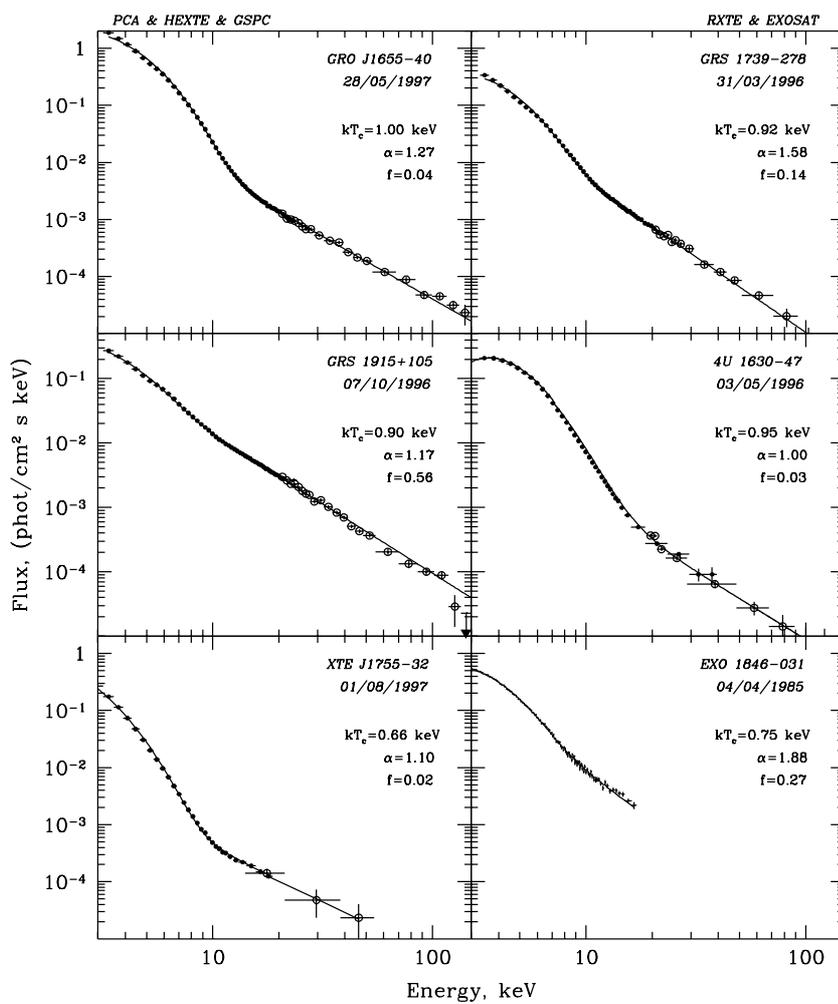


Рис. 4.4. Широкополосные спектры галактических кандидатов в черные дыры в “высоком”/”сверхвысоком” спектральном состоянии по данным орбитальных обсерваторий RXTE и EXOSAT. Сплошные линии представляют собой аналитическую аппроксимацию данных моделью комптонизации низкоэнергичного излучения на сходящемся потоке аккрецируемого вещества вблизи черной дыры.

Часть VI

Временные и спектральные характеристики излучения галактических рентгеновских Новых.

Глава 5

Рентгеновская Новая KS 1730–312

5.1 Локализация и кривая блеска источника

Рентгеновский источник KS/GRS 1730-312 был одновременно обнаружен телескопами СИГМА обсерватории “Гранат” и ТТМ модуля “Квант” орбитальной космической станции “Мир” в ходе наблюдений области Галактического Центра в сентябре 1994 г. В момент открытия 23 сентября поток от источника составлял ~ 130 мКраб в диапазоне 35 – 150 кэВ (Чуразов и др., 1994) и ~ 70 мКраб в диапазоне 2 – 27 кэВ (Бороздин и др., 1994а, б). Используя данные телескопа СИГМА, KS/GRS 1730-312 был локализован в области с координатами:

$$\alpha = 17^h 30^m 14^s; \delta = -31^\circ 10' 54'' \text{ (эпоха 1950)}$$

с точностью ~ 1.5 угл. мин., что в пределах ошибки измерения совпадает с положением, определенным прибором ТТМ (Бороздин и др., 1995).

В момент обнаружения KS/GRS 1730-312 был самым ярким источником в области Галактического Центра в диапазоне 35 – 150 кэВ, превышая по яркости известный источник 1E 1740-2942, который обычно доминирует в этом районе (Рис. 5.1). В последующие после начала вспышки дни телескопом СИГМА наблюдалась та же область неба, что позволило проследить эволюцию рентгеновского излучения от KS/GRS 1730-312 вплоть до его спада ниже уровня чувствительности телескопа СИГМА 28 сентября (Табл. 5.1). Средние значения потока от источника за время вспышки в диапазонах 35 – 75 и 75 – 150 кэВ составили 102 ± 10 и 80 ± 21 мКраб соответственно.

Кривые блеска источника в диапазонах 2 – 10, 10 – 27 и 35 – 150 кэВ, полученные телескопами ТТМ и СИГМА в сентябре 1994 г., приведены на рисунке 5.2. Эволюция рентгеновского потока от KS/GRS 1730-312 с течением времени характеризовалась его быстрым ростом до максимального значения ~ 200 мКраб в диапазоне 35 – 150 кэВ за время ~ 1 дня и быстрым спадом ниже детектируемого телескопом уровня за время ~ 3 дней. Уменьшение интенсивности излучения в жесткой области спектра (35 – 150 кэВ) сопровождалось ее нарастанием в мягкой области (2 – 27

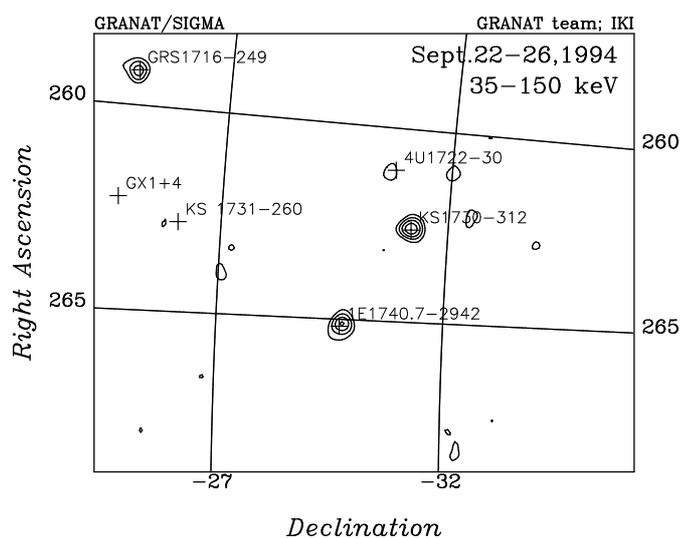


Рис. 5.1. Изображение области Галактического Центра в диапазоне 35 – 150 кэВ 22 – 26 сентября 1994 г. Контуры соответствуют уровню значимости в 3,5,7... стандартных отклонений.

кэВ) с 75 мКраб 23 сентября до 550 мКраб 26 сентября (Бороздин и др., 1994а, б), что свидетельствует об увеличении вклада области относительно низких энергий в общую рентгеновскую светимость KS/GRS 1730-312 в интервале 2 – 300 кэВ.

Для проверки гипотезы о вероятных появлениях источника до вспышки в сентябре 1994 г. был проведен анализ наблюдений телескопом СИГМА области Галактического Центра за 1990-1994 гг. Поток от KS/GRS 1730-312 в диапазоне 35 – 150 кэВ, усредненный за 5 лет, исключая вспышку, составил 1.0 ± 1.5 мКраб. Типичная чувствительность (1σ) за одну серию наблюдений продолжительностью ~ 1 месяца, равна $\sim 4 - 5$ мКраб. В период с 1 по 22 сентября, непосредственно предшествовавший вспышке, усредненный поток из области локализации KS/GRS 1730-312 в диапазоне 35 – 150 кэВ не был статистически значимым: -2 ± 4 мКраб.

Можно выделить два периода, когда из области локализации KS/GRS 1730-312 был зарегистрирован рентгеновский поток со статистической значимостью выше 3σ : с 22 марта по 3 апреля 1993 г.: 31 ± 10 мКраб в диапазоне 35 – 150 кэВ и с 25 февраля по 3 марта 1994 г.: 29 ± 9 мКраб в диапазоне 35 – 75 кэВ. Необходимо отметить недостаточную достоверность факта детектирования источника в этих случаях, так как учитывая полное число проанализированных наблюдений вероятность флук-

Табл. 5.1. Наблюдения KS/GRS 1730-312 телескопом СИГМА в сентябре 1994 г.

Дата, UT	Экспозиция (час) ^a	Поток, мКраб ^b		
		35-75 кэВ	75-150 кэВ	35-150 кэВ
21.50 - 22.30	15.93	-5 ± 27	57 ± 41	21 ± 23
22.42 - 23.98	31.00	166 ± 17	112 ± 28	133 ± 16
24.75 - 25.44	13.88	129 ± 25	106 ± 42	120 ± 23
25.56 - 26.32	15.00	137 ± 28	97 ± 43	120 ± 24
26.44 - 27.85	28.00	65 ± 18	34 ± 31	51 ± 17
28.84 - 29.38	10.81	27 ± 23	-60 ± 48	-10 ± 26
29.50 - 30.25	15.00	11 ± 19	16 ± 25	14 ± 15

^a длительность экспозиции без коррекции на мертвое время прибора.

^b поток в 1 мКраб равен $\sim 7.9 \times 10^{-12}$, $\sim 7.2 \times 10^{-12}$ и $\sim 1.5 \times 10^{-11}$ эрг/с/см² в диапазонах 35 – 75, 75 – 150 и 35 – 150 кэВ соответственно.

туации на уровне 3σ близка к единице.

5.2 Спектр

Спектр KS/GRS 1730-312, усредненный за три наблюдения 22 – 26 сентября 1994 г., на энергиях выше 35 кэВ может быть аппроксимирован степенным законом с показателем $\alpha = 2.51 \pm 0.35$ или моделью тормозного излучения оптически тонкой плазмы с характерной температурой $kT = 70 \pm 24$ кэВ. Наблюдалось некоторое укрупнение спектра источника: фотонный индекс (40 – 300 кэВ) изменился от 2.3 ± 0.2 (22-23 сентября) до 2.8 ± 0.5 (25 – 26 сентября) (Табл. 5.2), хотя по данным телескопа СИГМА этот результат не является статистически значимым.

Широкополосные спектры KS/GRS 1730-312 в интервале энергий 2 – 300 кэВ, построенные по данным телескопов ТТМ и СИГМА, приведены на рис. 3. Для изучения поведения спектра источника были отобраны перекрывающиеся по времени данные обоих приборов. Следует отметить квазиодновременность наблюдений телескопов ТТМ и СИГМА, поскольку их времена интегрирования равны ≈ 20 мин и ≈ 20 час соответственно. Результаты аппроксимации широкополосных (2 – 300 кэВ) спектров KS/GRS 1730-312 приведены в таблице 5.3. Все спектры требуют учета низкочастотного поглощения, соответствующего значению $N_H \approx (3 - 11) \times 10^{22}$ см⁻² в зависимости от используемой модели.

Качественно эволюцию широкополосного спектра источника можно охарактеризовать как появление и быстрый рост мягкой спектральной компоненты, сопровождающийся ослаблением и возможным укрупнением жесткой компоненты (Рис. 5.3). Вклад стандартного рентгеновского диапазона (2 – 10 кэВ) в полную (2 – 300 кэВ) светимость источника возрос с $\approx 20 - 25\%$ (22 – 23 сентября) до $\approx 80 - 90\%$ (26 – 27 сентября).

Табл. 5.2. Параметры аппроксимации спектров GRS/KS 1730-312 в диапазоне 40 – 300 кэВ, полученных телескопом СИГМА 22-27 сентября 1994 г.

Параметр	Дата, Сентябрь 1994			
	22 – 23	24 – 25	25 – 26	26 – 27
<i>Степенной закон</i>				
Наклон спектра, α	2.35 ± 0.19	2.58 ± 0.37	2.80 ± 0.48	$2.30^{+1.45}_{-0.48}$
Поток на 100 кэВ, F_{100}^a	6.97 ± 0.91	5.87 ± 1.40	4.74 ± 1.58	2.43 ± 1.00
$\chi^2(d.o.f.)$	54.4(49)	45.3(49)	50.0(49)	39.2(49)
<i>Спектр тормозного излучения оптически тонкой плазмы</i>				
Температура, кэВ	75 ± 20	65 ± 19	46 ± 31	62^{+93}_{-30}
Поток на 100 кэВ, F_{100}^a	7.42 ± 0.66	6.39 ± 1.40	4.46 ± 2.02	2.44 ± 1.12
$\chi^2(d.o.f.)$	46.6(49)	43.6(49)	50.5(49)	38.7(49)

^a поток в единицах 10^{-5} фот $см^{-2}$ $с^{-1}$ кэВ⁻¹

Табл. 5.3. Параметры аппроксимации широкополосных спектров GRS/KS 1730-312 в диапазоне 2 – 300 кэВ, полученных телескопами ТТМ и СИГМА в ходе совместных наблюдений в сентябре 1994 г.

Параметр	Дата, Сентябрь 1994		
	22 – 23	25 – 26	26 – 27
<i>Степенной закон</i>			
Наклон спектра, α	2.09 ± 0.07	2.77 ± 0.07	3.81 ± 0.13
Поток на 100 кэВ, F_{100}^a	7.48 ± 0.84	5.07 ± 0.92	2.81 ± 1.18
$N_H, \times 10^{22}$ см ²	11.1 ± 4.5	4.66 ± 0.62	6.81 ± 0.63
$\chi^2(d.o.f.)$	113.7(106)	110.2(106)	104.9(106)
<i>Модель комптонизированного излучения</i>			
kT_e , кэВ	27 ± 7	27 ± 14	50^{+100}_{-50}
Оптическая толщина, τ	3.63 ± 0.60	2.17 ± 0.95	$0.78^{+1.02}_{-0.58}$
Поток на 100 кэВ, F_{100}^a	7.65 ± 0.51	3.28 ± 0.10	1.85 ± 0.50
$N_H, \times 10^{22}$ см ²	7.44 ± 3.58	4.16 ± 0.73	6.82 ± 0.66
$\chi^2(d.o.f.)$	102.8(105)	110.3(105)	105.8(105)

^a поток в единицах 10^{-5} фот $см^{-2}$ $с^{-1}$ кэВ⁻¹

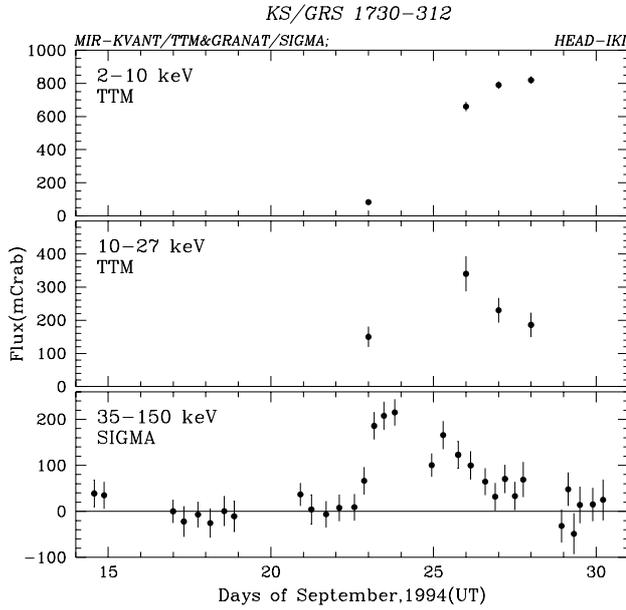


Рис. 5.2. Рентгеновские кривые блеска KS/GRS 1730-312 в диапазонах 2–10 (а), 10–27 (б) и 35–150 (в) кэВ, полученные телескопами ТТМ и СИГМА в сентябре 1994 г. (данные ТТМ взяты из работы Бороздина и др., 1995).

Широкополосный спектр KS/GRS 1730-312, полученный телескопами ТТМ и СИГМА в момент его открытия 22–23 сентября 1994 г., лучше описывается моделью комптонизированного излучения (Сюняев, Титарчук, 1980) ($\chi^2 = 102.8$ на 105 степеней свободы, наилучшие параметры: $kT_e = 26 \pm 7$ кэВ, $\tau = 3.6 \pm 0.6$), чем степенным законом ($\chi^2 = 113.7$ на 106 степеней свободы, наклон 2.1 ± 0.1) (Рис. 5.3; Табл. 5.3).

Спектр KS/GRS 1730-312 полученный 26–27 сентября демонстрирует переход источника в другое спектральное состояние в диапазоне 2–300 кэВ: он имеет ярко выраженную мягкую компоненту и для его описания требуются двухкомпонентные модели, хотя однокомпонентная аппроксимация также неплохо удовлетворяет критерию χ^2 (Табл. 5.3). Мягкая компонента наилучшим образом описывается моделью излучения оптически непрозрачного аккреционного диска (Шакура, Сюняев, 1973; Макишима и др., 1986) с температурой на внутренней границе $T_{in} = 0.9 \pm 0.1$ кэВ и характерным радиусом излучающей области $R_{in} \times (\cos i)^{1/2} = 40_{-10}^{+20}$ км¹ (расстояние до источника принято равным 8.5 кпк). Предположение о степенной зависимости интенсивности жесткой спектральной компоненты от энергии дает наилучшее значение наклона (по числу фотонов) 2.9 ± 0.2 (поток на 100 кэВ $(2.01 \pm 0.75) \times 10^{-5}$ фот с⁻¹ см⁻²). Согласно этой двухкомпонентной модели (1–300 кэВ) потоки (откорректированные на низкочастотное поглощение) в мягкой и жесткой спектральных

¹ Отметим, что для аппроксимации данных использовалась упрощенная модель излучения оптически непрозрачного аккреционного диска, предложенная в работе Макишима и др. (1986) и часто используемая для описания наблюдаемых рентгеновских спектров. Значения T_{in} и R_{in} , получаемые в рамках такой аппроксимации отличаются от точного решения (см., например, Гребенев, 1995), в частности значение R_{in} не следует интерпретировать как радиус внутренней границы аккреционного диска.

компонентах равны $\approx 1.7 \times 10^{-8} \text{ эрг } c^{-1} \text{ см}^{-2}$ и $\approx 0.8 \times 10^{-8} \text{ эрг } c^{-1} \text{ см}^{-2}$ соответственно. Суммарный поток энергии в диапазоне 1 – 300 кэВ составляет $\approx 2.5 \times 10^{-8} \text{ эрг } c^{-1} \text{ см}^{-2}$, что дает значение рентгеновской светимости источника $\approx 2.2 \times 10^{38} \text{ эрг}/c$, предполагая расстояние до него равным 8.5 кпк.

5.3 KS/GRS 1730-312 – Удаленная рентгеновская Новая ?

Результаты наблюдений KS/GRS 1730-312 телескопами ТТМ и СИГМА показывают, что кривая блеска и спектральная эволюция в рентгеновском диапазоне похожи на соответствующие свойства мягких рентгеновских Новых, таких, как GRS/GS 1124-684 (Новая 1991 г. в созвездии Мухи).

На рис. 5.4 приведены рентгеновские кривые блеска KS/GRS 1730-312 и GRS/GS 1124-684. В обоих случаях светимость в жестком рентгеновском диапазоне (35 – 150 кэВ) была максимальна через $\approx 1 - 2$ дня после появления источников, в то время как светимость в диапазоне (1 – 10 кэВ) достигла максимума только на $\approx 6 - 7$ день.

Спектры GRS/GS 1124-684 и KS/GRS 1730-312 также чрезвычайно похожи друг на друга по характеру эволюции (Рис. 5.5). Первоначально они довольно жесткие – фотонный индекс ≈ 2.1 (KS/GRS 1730-312) и $\approx 1.8 - 2.2$ (GRS/GS 1124-684) – и не имеют ярко выраженной мягкой компоненты. Затем в максимуме кривой блеска в спектре доминирует мягкая компонента, хорошо аппроксимируемая моделью оптически толстого аккреционного диска с температурой $T_{in} = 0.9 \pm 0.1$ кэВ (KS/GRS 1730-312) и $T_{in} = 0.92 \pm 0.02$ кэВ (GRS/GS 1124-684) (Ебисава и др., 1994), в то время как жесткая компонента стала заметно круче: фотонный индекс 2.9 ± 0.2 (KS/GRS 1730-312) и $\approx 2.5 - 2.6$ (GRS/GS 1124-684).

Примечателен тот факт, что соотношение потоков в мягкой и жесткой спектральных компонентах в момент максимальной светимости источников в диапазоне 1 – 300 кэВ также было примерно одинаковым: $\approx 1.7 \times 10^{-8} \text{ эрг } c^{-1} \text{ см}^{-2}$ (мягкая), $\approx 0.8 \times 10^{-8} \text{ эрг } c^{-1} \text{ см}^{-2}$ (жесткая) (KS/GRS 1730-312); $\approx 1.9 \times 10^{-7} \text{ эрг } c^{-1} \text{ см}^{-2}$ (мягкая), $\approx 0.6 \times 10^{-7} \text{ эрг } c^{-1} \text{ см}^{-2}$ (жесткая) (GRS/GS 1124-684); в мягкой спектральной компоненте излучалось $\approx 70\%$ и $\approx 80\%$ рентгеновской светимости источников соответственно.

Возможно, что отличием KS/GRS 1730-312 от объектов, называемых рентгеновскими Новыми является то, что он расположен в 3-5 раз дальше от нас (об этом свидетельствует сильное низкочастотное поглощение, наблюдаемое в спектре источника, $N_H \approx (3 - 10) \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$) и поток от него в ≈ 10 раз меньше, чем, например от Новой 1991 г. в созвездии Мухи, в результате чего из-за ограниченной чувствительности и навигационных ограничений удалось пронаблюдать лишь этап первоначального нарастания светимости, когда источник был наиболее ярким. Однако, благодаря удачному стечению обстоятельств полученная информация позволила довольно подробно проследить эволюцию широкополосного (1 – 300 кэВ) спектра.

Отсутствие статистически достоверного детектирования KS/GRS 1730-312 за пять лет наблюдений, предшествовавших вспышке и ее короткая длительность по-

казывают, что большую часть времени источник проводит в состоянии с (35 – 150 кэВ) светимостью, в ≈ 50 раз меньшей, чем во время вспышки, что также делает его похожим на рентгеновские Новые.

Литература

- Бороздин и др. 1994//Borozdin K.N., Alexandrovich N.L., Aref'ev V.A., Sunyaev R.A., 1994 IAU Circ. **N 6083**
- Бороздин и др. 1995//Бороздин К.Н., Александрович Н.Л., Арефьев В.А. и др., 1995 Письма в *Астрономический Журнал*, **21**, 243
- Варгас и др. 1996//Vargas M., Goldwurm A., Paul J., *et al.*, 1996 *A&A*, **313**, 828
- Гильфанов М.Р., Чуразов Е.М., Сюняев Р.А. и др., Письма в *Астрономический Журнал*, **17**, 1059
- Гребенев 1996//Гребенев С. А., Дис. ... докт. физ.-мат. наук. Москва: ин-т космических исследований РАН, 1996
- Гребенев С.А., Сюняев Р.А., Павлинский М.Н. 1992 Письма в *Астрономический Журнал*, **18**, 11
- Ебисава и др. 1994//Ebisawa K., Ogawa M., Aoki T., *et al.* 1994 *PASJ*, **46**, 375
- Китамото и др. 1992//Kitamoto S., Tsunemi H., Miyamoto S., *et al.* 1992 *ApJ*, **494**, 609
- Макишима и др. 1986//Makishima K., Maejima Y., Mitsuda K., *et al.* 1986 *ApJ*, **308**, 635
- Миямото и др. 1991//Miyamoto S., Kimura K., Kitamoto S. *et al.* 1991 *ApJ*, **383**, 784
- Миямото и др. 1993//Miyamoto S., Iga S., Kitamoto S., *et al.* 1993 *ApJ*, **403**, L39
- Сюняев и Титарчук 1980//Сюняев Р.А., Титарчук Л.Г. 1980 *A&A*, **86**, 121
- Чуразов Е.М. и др. 1994//Churazov E., *et al.* 1994 IAU Circ. **N 6083**
- Шакура и Сюняев 1973//Shakura, N.I., & Sunyaev, R.A. 1973 *A&A*, **24**, 337

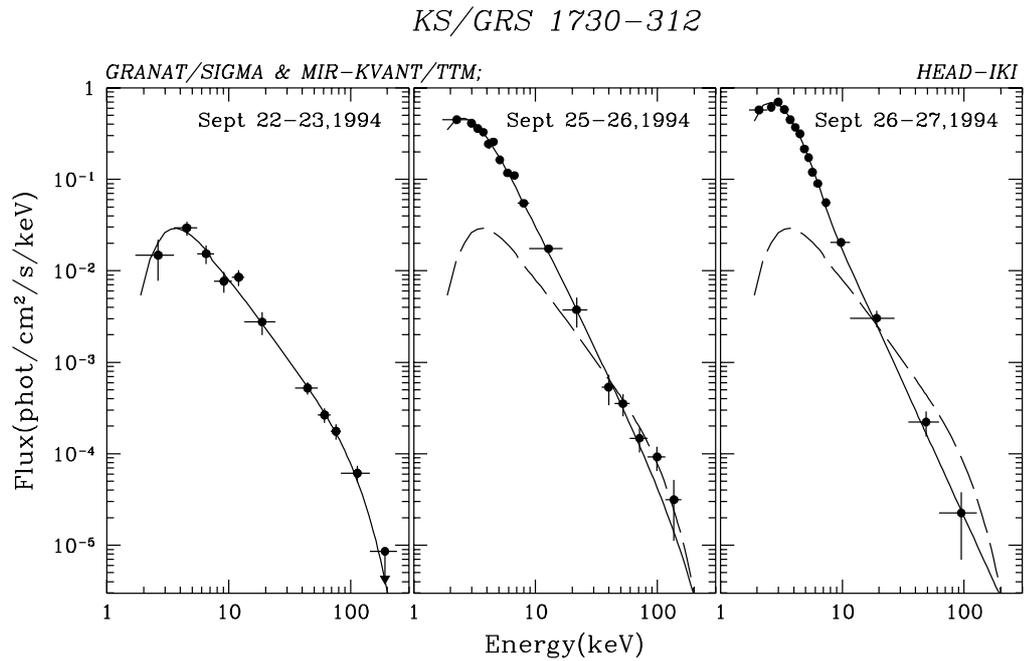


Рис. 5.3. Широкополосные (2 – 300 кэВ) спектры KS/GRS 1730-312 (по данным телескопов ТТМ и СИГМА) (данные ТТМ взяты из работы Бороздина и др. 1995), полученные в сентябре 1994 г.: 22 – 23 сентября (а), 24 – 25 сентября (б), 26 – 27 сентября (в) 1994 г. Сплошные линии соответствуют моделям, наилучшим образом аппроксимирующим данные: комптонизированное излучение (Сюняев, Титарчук, 1980)(а, б); двухкомпонентная модель, состоящая из излучения оптически непрозрачного аккреционного диска и степенного закона (в). Штриховые линии приведены для сравнения и отображают аппроксимацию данных 22 – 23 сентября ($kT_e \approx 26$ кэВ, $\tau \approx 3.6$).

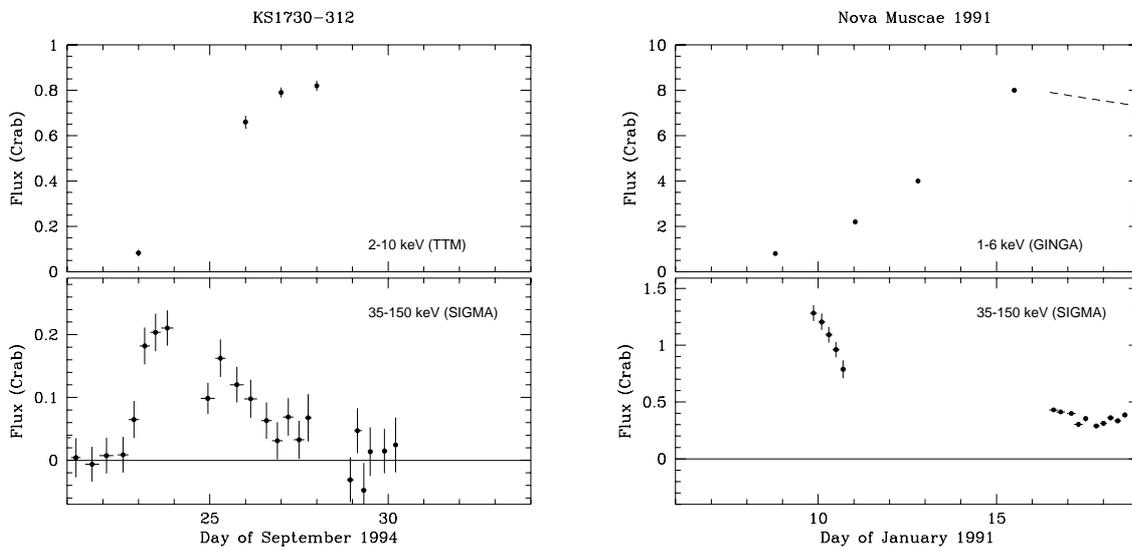


Рис. 5.4. Кривые блеска KS/GRS 1730-312 (а, б) и рентгеновской Новой 1991 г. в созвездии Мухи (в, г) в стандартном (а, в) и жестком (б, г) рентгеновских диапазонах. Данные прибора ТТМ по KS/GRS 1730-312 взяты из работы Бороздина и др. (1995), данные телескопа СИГМА и обсерватории ГИНГА по Новой 1991 г. в созвездии Мухи заимствованы из работ Гильфанова и др. (1991) и Китамото и др. (1992) (Новая в созвездии Мухи была впервые зарегистрирована 8 января 1991 г).

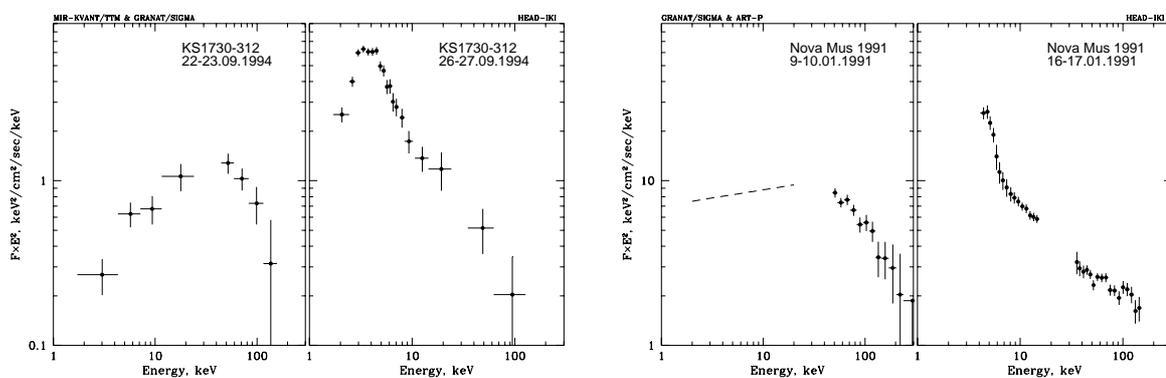


Рис. 5.5. Спектры KS/GRS 1730-312 (*a*, *б*) и рентгеновской Новой 1991 г. в созвездии Мухи (*б*, *г*) (в единицах $E^2 \times F(E)$) в момент появления источников (*a*, *в*) и вблизи максимума рентгеновской светимости источников несколько дней спустя (*б*, *г*). Поведение спектра Новой в созвездии Мухи 9 – 10 января 1991 г. в стандартном рентгеновском диапазоне (штриховая линия на рис. 6б) показано по данным обсерватории ГИНГА из работы Китамото и др., (1992). Данные телескопов ТТМ и АРТ-П в мягком рентгеновском диапазоне (2 – 30 кэВ) взяты из работ Бороздина и др. (1995) и Гребенева и др. (1992).

Глава 6

Рентгеновская Новая GRS 1739–278

6.1 Эволюция GRS 1739–278 в период вспышки 1996 г.

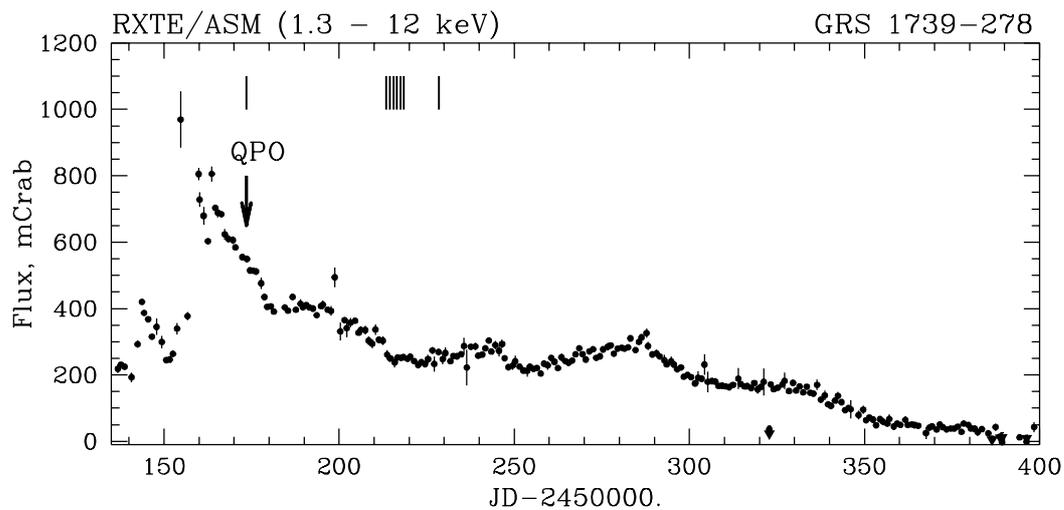


Рис. 6.1. Кривая блеска GRS 1739–278 в стандартном рентгеновском диапазоне (2 – 12 кэВ), полученная по данным монитора всего неба (ASM) орбитальной обсерватории RXTE. По оси времен отложены усеченные Юлианские даты: $TJD = JD - 2450000$, поток от источника приведен в стандартных единицах потока от Крабовидной туманности. Даты наблюдений источника приборами PCA и HEXTE обсерватории RXTE отмечены штрихами в верхней части рисунка.

Рентгеновский источник GRS 1739–278 был открыт телескопом СИГМА орбитальной обсерватории 18 марта 1996 г. в ходе наблюдений области Центра Галактики (Paul *et al.* 1996). Эволюция рентгеновского потока от источника GRS 1739–278 в диапазоне энергий 2 – 12 кэВ во время вспышки 1998 г. изображена на Рис.

6.1 (данные прибора ASM обсерватории RXTE). Согласно результатам анализа эволюции свойств рентгеновского излучения, развитие вспышки источника может быть представлено как последовательность спектрально–временных состояний, сходных с состояниями других галактических кандидатов в черные дыры: “сверхвысокого”, “высокого” и “низкого” состояний (Бороздин и др. 1998). Наблюдения GRS 1739–278 приборами PCA и HEXTE позволили исследовать спектральные и временные характеристики излучения источника в периоды “сверхвысокого” и “высокого” состояний.

Для анализа данных использовались стандартные методы обработки пакетами программ FTOOLS версии 4.2. Нами были получены энергетические спектры источника в диапазонах энергий 3–20 кэВ (данные PCA) и 19–100 кэВ (данные HEXTE) (Рис. 6.2, *нижние панели*) и спектры мощности в интервале частот 0.003–128 Гц (Рис. 6.2, *верхние панели*). Спектры источника в “сверхвысоком” и “высоком” состояниях хорошо описываются совокупностью мягкой и жесткой спектральных компонент, скорректированных на низкочастотное поглощение: переход из одного состояния в другое характеризуется уменьшением эффективной температуры и сильным увеличением вклада мягкой компоненты в общую рентгеновскую светимость.

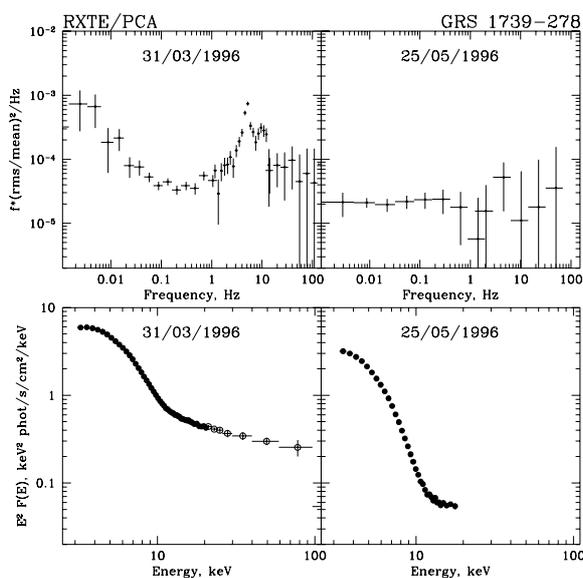


Рис. 6.2. Примеры широкополосных энергетических спектров и спектров мощности GRS 1739–278 в период “сверхвысокого” (*левая часть*) и “высокого” (*правая часть*) состояний по данным приборов PCA и HEXTE.

6.1.1 Обнаружение QPO на частоте ~ 5 Гц.

При детальном исследовании характера короткопериодической переменности GRS 1739–278 во время наблюдения 30 марта 1996 г. было выяснено, что спектр мощности источника характеризуется наличием двух доминирующих пиков квазипе-

риодических осцилляций (QPO) на частотах ~ 5 и ~ 10 Гц (Рис. 6.2, левая верхняя панель) (Borozdin & Trudolyubov 1999).

Параметры аналитической аппроксимации спектров мощности источника в “сверхвысоком” (наблюдение 30/03/1996) и “высоком” (наблюдение 25/05/1996) спектральных состояниях приведены в Табл. 6.1. Как хорошо видно из Рис. 6.2 и Табл. 6.1, переход в “высокое” спектральное состояние ознаменовался качественным изменением свойств короткопериодической переменности источника, а именно, исчезновением значимой частотно–ограниченной шумовой компоненты, пиков QPO и падением полной амплитуды переменности.

Табл. 6.1. Параметры аналитической аппроксимации спектров мощности GRS 1739–278 в “сверхвысоком” (наблюдение 30/03/1996, сумма модели частотно–ограниченной компоненты, двух лоненциан, представляющих QPO, и степенного закона) и “высоком” (наблюдение 25/05/1996, степенной закон) спектральных состояниях

	α_{pl}	f_{br}^{BLN}	f_1^{QPO}	Δf_1^{QPO}	rms_1^{QPO}	f_2^{QPO}	Δf_2^{QPO}	rms_2^{QPO}	rms_{tot}^a
31/03/96	-1.22 ± 0.22	7.3 ± 3.0	5.01 ± 0.04	1.17 ± 0.18	1.62 ± 0.13	9.80 ± 0.35	3.18 ± 1.07	1.17 ± 0.22	$1.92 \pm 0.1 / 3.93 \pm 1.22$
25/05/96	-0.99 ± 0.07								$0.4 \pm 0.2 / 1.2 \pm 0.1$

^a – интегральные амплитуды переменности модельных компонент в диапазонах частот 0.03 – 100 Гц и 0.003 – 100 Гц.

Примечательно, что как и в случае других кандидатов в черные дыры, мощность частотно–ограниченной и QPO–компонент спектра переменности и полная амплитуда переменности источника напрямую связаны со свойствами энергетического спектра и, в особенности, с вкладом жесткой спектральной компоненты в общую рентгеновскую светимость. Это дает основание предположить, что существование вышеупомянутых шумовых компонент является прямым следствием переменности в жесткой спектральной компоненте и отражает характер и временные масштабы изменения физических параметров во внутренней области аккреционного потока.

Литература

Бorozдин и др. 1998//Бorozдин К.Н. и др. 1998 Письма в Астр. Журнал, **24**, 435
 Borozdin & Trudolyubov 1999//Borozdin K., & Trudolyubov S. 1999 ApJ Letters (принята к публикации)
 Paul *et al.* 1996//Paul J., Bouchet L., Churazov E., & Sunyaev R. 1996 IAU Circ. **N 6348**

Глава 7

Рентгеновская Новая GRS 1737–31

7.1 Открытие и локализация источника

Источник GRS 1737-31 был открыт телескопом СИГМА 14 марта 1997 г. в ходе обзора области Центра Галактики (Sunyaev *et al.* 1997) (Таб. 7.1). Несколько днями позже поступили сообщения об обнаружении источника приборами рентгеновских обсерваторий *RXTE* и *BeppoSAX/WFC* (Marshall *et al.* 1997, Cui *et al.* 1997a, Heise 1997). Используя данные телескопа СИГМА, GRS 1737-31 был локализован в области с координатами:

$$\alpha = 17^h 36^m 50^s; \delta = -30^\circ 58' 30'' \text{ (эпоха 1950)}$$

с точностью ~ 2 угл. мин. Следует отметить, что в течение всей серии наблюдений Центра Галактики GRS 1737–31 являлся самым ярким источником в этом районе неба в диапазоне энергий 35 – 150 кэВ (Рис. 7.1).

7.2 Кривые блеска источника в стандартном и жестком рентгеновском диапазонах.

Кривые блеска источника в диапазонах 35 – 75, 75 – 150 и 35 – 150 кэВ характеризуются постоянством уровня жесткого рентгеновского потока (~ 100 мКраб) на масштабе 2 недель (Рис. 7.2, Табл. 7.1).

Согласно результатам наблюдений GRS 1737–31 приборами орбитальной обсерватории *RXTE* (Marshall 1997), начало вспышки источника приходится на период с 17 по 20 февраля 1997 г. Как следует из кривой блеска в стандартном рентгеновском диапазоне (2 – 12 кэВ), поток от источника достиг максимального значения ~ 25 мКраб спустя ~ 2 недели после начала вспышки, после чего последовал его плавный спад с характерным временным масштабом \sim месяца (Рис. 7.3).

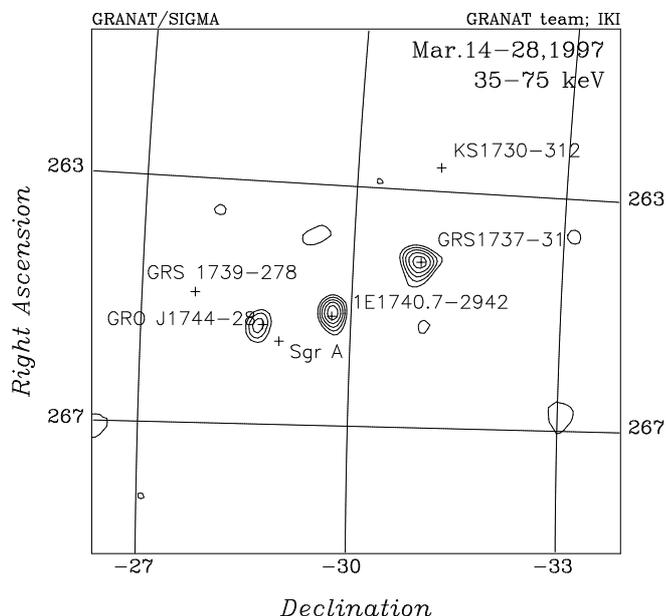


Рис. 7.1. Изображение области Центра Галактики в диапазоне 35–75 кэВ 14–28 марта 1997 г. по данным телескопа СИГМА. Контурсы соответствуют уровню значимости рентгеновского потока в 3, 4, 5, ... стандартных отклонений, координатная сетка соответствует эпохе 1950 г.

Поскольку источник GRS 1737–31 удален на сравнительно небольшое угловое расстояние $\sim 2.4^\circ$ от Центра Галактики, он находился в поле зрения телескопа СИГМА во время большинства наблюдений, проводившихся в рамках обзора области Галактического Центра в 1990–1997 гг., что позволяет непосредственно проверить гипотезу о его вероятных появлениях в период, предшествовавший вспышке 1997 г. В результате анализа данных наблюдений 1990–1996 г. верхний предел (3σ) на значение потока из области локализации источника в диапазоне 35–150 кэВ составил 7.2×10^{-11} эрг/с/см². Наряду с этим наблюдения спутника ROSAT в марте 1991 г. (экспозиция 3233 с) позволяют поставить верхний предел на поток от источника в диапазоне энергий 0.1–2.4 кэВ: $\approx 8.9 \times 10^{-14}$ эрг/с/см² (Boller 1997).

7.3 Спектр

Энергетический спектр GRS 1737–31 в диапазоне 40–300 кэВ характеризуется чрезвычайно высокой жесткостью по сравнению со спектрами одновременно наблюдавшихся в этой области неба источников 1E 1740.7–2942 (кандидат в черные дыры) и GRO J1744–28 (пульсар – барстер) (Рис. 7.4). Фотонный спектр источника, усредненный за период с 14 по 28 марта 1997 г. хорошо аппроксимируется степенным законом с показателем ~ 1.8 или моделью тормозного излучения опти-

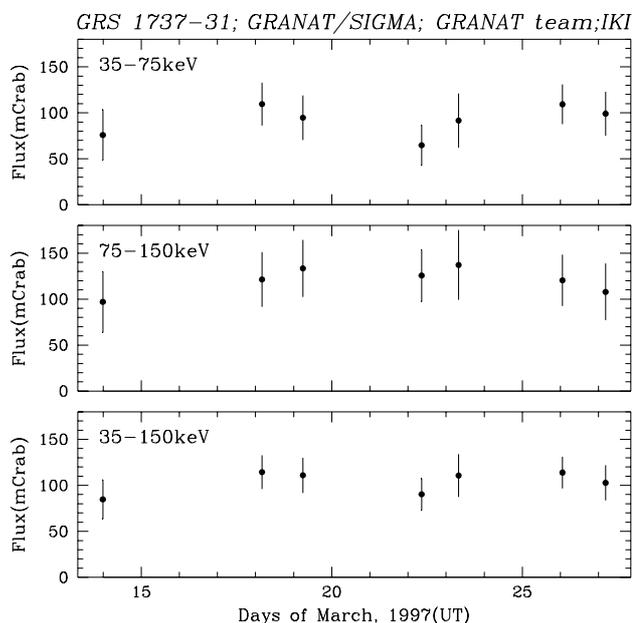


Рис. 7.2. Временные истории рентгеновского потока источника GRS 1737–31 в диапазонах энергии 35–75, 75–150 и 35–150 кэВ в марте 1997 г. по данным телескопа СИГМА.

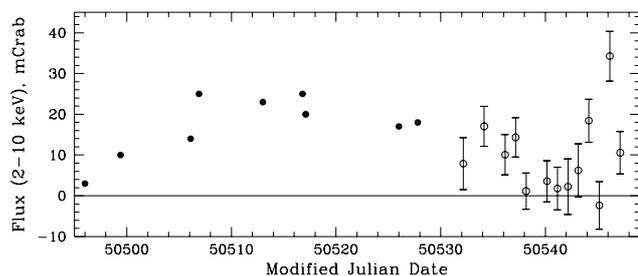


Рис. 7.3. Кривая блеска GRS 1737–31 в стандартном рентгеновском диапазоне (2–12 кэВ) по данным прибора PCA и рентгеновского монитора ASM орбитальной обсерватории RXTE (Cui *et al.* 1997б).

чески тонкой плазмы с характерной температурой ~ 230 кэВ (Табл. 7.2). К сожалению, недостаточно высокая статистическая значимость данных телескопа не позволяет сделать однозначного заключения о характере эволюции спектра источника в жестком рентгеновском диапазоне.

Сопоставление данных телескопа СИГМА с данными одновременных наблюдений GRS 1737–31 прибором PCA орбитальной обсерватории RXTE (Cui *et al.* 1997б) позволяет исследовать свойства широкополосного энергетического спектра источника в диапазоне энергий 3–300 кэВ (Рис. 7.5). Общая форма спектра источника хорошо аппроксимируется степенным законом с фотонным индексом ~ 1.6 , не проявляя признаков присутствия мягкой спектральной компоненты. Требуемое для удовлетворительного описания спектра значение низкочастотного поглощения соответствует эквивалентному числу атомов водорода на луче зрения, N_H , порядка $(4-6) \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$, что хорошо согласуется с предположением о близости источника к Центру Галактики.

Табл. 7.1. Наблюдения GRS 1737–31 телескопом СИГМА в марте 1997 г.

Дата, UT	Экспозиция (час) ^a	Поток, мКраб ^b		
		35-75 кэВ	75-150 кэВ	35-150 кэВ
14.31 - 15.67	22.78	76 ± 27	97 ± 33	85 ± 21
18.68 - 19.65	19.42	110 ± 23	121 ± 30	114 ± 18
19.80 - 20.69	17.90	95 ± 24	133 ± 31	111 ± 19
22.47 - 23.59	21.99	65 ± 22	126 ± 28	90 ± 17
23.71 - 24.71	12.00	92 ± 29	137 ± 38	111 ± 23
26.50 - 27.61	22.14	109 ± 22	120 ± 28	114 ± 17
27.73 - 28.63	17.99	99 ± 24	108 ± 31	103 ± 19

^a длительность экспозиции без коррекции на мертвое время прибора.

^b поток в 1 мКраб равен $\sim 7.9 \times 10^{-12}$, $\sim 7.2 \times 10^{-12}$ фн $\sim 1.5 \times 10^{-11}$ эрг/с/см² в диапазонах 35 – 75, 75 – 150 и 35 – 150 кэВ соответственно.

7.4 Обсуждение

Согласно результатам наблюдений приборами рентгеновских обсерваторий “Гранат” и *RXTE* (Cui *et al.* 1997б) кривые блеска GRS 1737–31 в стандартном и жестком рентгеновском диапазонах схожи с кривыми блеска ряда Галактических рентгеновских Новых, таких как, например, Новая в созвездии Змееносца 1993 г. (GRS 1716–249)(Revnitsev *et al.* 1998). Свойства широкополосного энергетического спектра и спектра мощности источника (Cui *et al.* 1997б) и уровень рентгеновской светимости источника ($\sim 2 \times 10^{37}$ эрг/с) типичны для кандидатов в черные дыры в низком спектральном состоянии. Следует также отметить, что уровень рентгеновской светимости GRS 1737–31 в спокойные периоды по меньшей мере в ~ 25 раз ниже, чем в период вспышки. Все эти факты служат основанием для того, чтобы классифицировать GRS 1737–31 как удаленную рентгеновскую Новую и причислить его к числу кандидатов в черные дыры.

Литература

- Boller 1997//Boller T., 1997, частное сообщение
 Cui *et al.* 1997a//Cui W., *et al.* 1997a IAU Circ. **N 6604**
 Cui *et al.* 1997б//Cui W., *et al.* 1997б ApJ, **487**, L73
 Heise 1997//Heise J., 1997 IAU Circ. **N 6606**
 Marshall *et al.* 1997//Marshall *et al.* 1997 IAU Circ. **N 6603**
 Revnitsev *et al.* 1998//Revnitsev M., *et al.* A&A. 1998, **331**, 557
 Sunyaev *et al.* 1997//Sunyaev R., *et al.* 1997 IAU Circ. **N 6599**

Табл. 7.2. Параметры аналитической аппроксимации спектров источника GRS 1737–31, полученных телескопом СИГМА 14–28 марта 1997 г. в диапазоне 40 – 300 кэВ.

Параметр	
Степенной закон	
Фотонный индекс, α	1.83 ± 0.16
F_{100}^a	5.88 ± 0.47
$\chi^2(\text{d.o.f.})$	53.0(44)
Тормозное излучение оптически тонкой плазмы	
Температура, кэВ	230^{+120}_{-60}
F_{100}^a	5.88 ± 0.47
$\chi^2(\text{d.o.f.})$	54.1(44)

^a спектральный поток на энергии 100 кэВ в единицах $10^{-5} \text{ фот см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ кэВ}^{-1}$

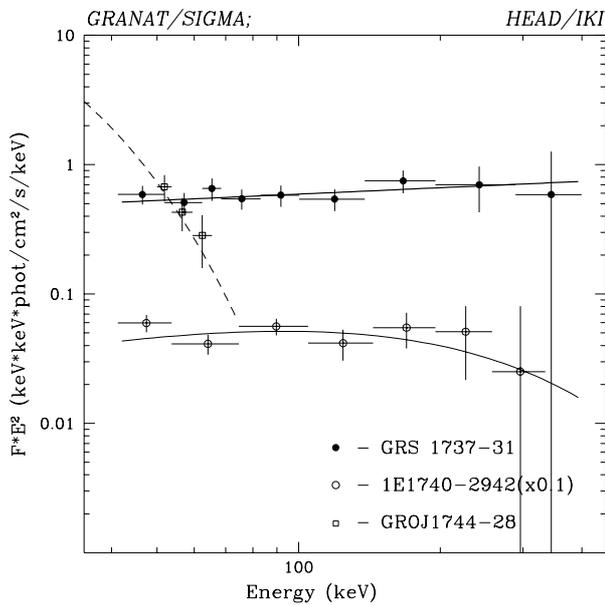


Рис. 7.4. Энергетические спектры источников GRS 1737–31 (закрашенные кружки), 1E 1740-292 (открытые кружки) и GRO J1744-28 (открытые квадраты) в единицах $F(E) \times E^2$, полученные в результате наблюдений телескопом СИГМА в марте 1997 г. Данные, соответствующие 1E 1740-292, домножены на 0.1

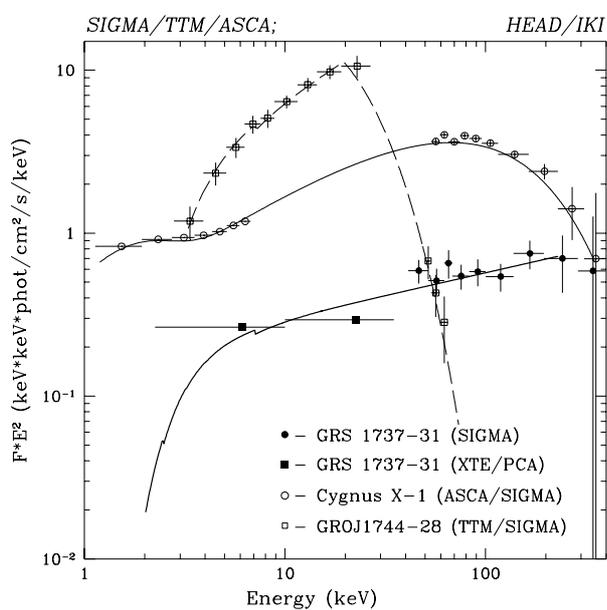


Рис. 7.5. Широкополосные энергетические спектры источников GRS 1737–31 (закрашенные кружки — данные телескопа СИГМА; закрашенные квадраты — данные *RXTE/PCA* (Marshall *et al.* 1997)), Лебедь X–1 (открытые кружки — данные телескопа СИГМА и обсерватории *ASCA*) и GRO J1744–28 (открытые квадраты — данные приборов СИГМА и ТТМ). Данные прибора ТТМ взяты из работы Александровича и др. 1997.

Глава 8

Рентгеновская Новая ХТЕ J1748–288

8.1 Введение.

Рентгеновский источник ХТЕ J1748–288 был открыт монитором всего неба (ASM) обсерватории RXTE 4 июня 1998 (Smith et al. 1998). Последовавшие наблюдения в радиодиапазоне (VLA) выявили присутствие точечного источника, отождествленного с ХТЕ J1748–288 (Hjellming et al. 1998a). Во время наблюдений 14 июня 1998 г. было открыто расширение радиоисточника, объясненное как результат сколламированных релятивистских выбросов вещества из системы. Собственная скорость выбросов, соответствующая принятому расстоянию до источника в ~ 8 кпк, составила ~ 0.93 скорости света (Hjellming et al. 1998b), что позволило причислить его к классу галактических 'микроквazarов'.

Далее приведены результаты анализа эволюции временных и спектральных характеристик источника в период вспышки по данным наблюдений приборами орбитальной обсерватории RXTE (Revnitsev, Trudolyubov and Borozdin 1999). Общие сведения о наблюдениях источника, использовавшихся для анализа, содержатся в Табл. 8.1.

8.2 Кривая блеска и эволюция широкополосного энергетического спектра.

Эволюция рентгеновского потока от источника ХТЕ J1748–288 в различных энергетических диапазонах во время вспышки 1998 г. изображена на Рис. 9.2,а. Согласно результатам анализа эволюции свойств рентгеновского излучения, развитие вспышки источника может быть представлено как последовательность спектрально–временных состояний, сходных с состояниями других галактических кандидатов в черные дыры: “сверхвысокого” (СВС), “высокого” (ВС) и “низкого” (НС) состояний (Рис. 9.2,а). Общий характер эволюции широкополосного энерге-

Табл. 8.1. Наблюдения ХТЕ J1748–288 прибором РСА орбитальной обсерватории RXTE.

#	Номер наблюдения	Дата, UT	Время начала	Экспозиция с ^a
1	30188-05-01-00	04/06/98	20:05:04	16
2	30188-05-02-00	05/06/98	03:03:44	64
3	30171-02-01-00	06/06/98	09:41:20	2655
4	30185-01-01-00	07/06/98	07:56:32	2944
5	...02-00	08/06/98	06:23:28	3027
6	...03-00	09/06/98	12:48:00	3729
7	...04-00	10/06/98	03:38:24	7721
8	...05-00	11/06/98	12:52:16	3439
9	...06-00	13/06/98	12:51:28	3114
10	...07-00	15/06/98	04:53:36	1795
11	...08-00	18/06/98	20:55:12	2327
12	...09-00	22/06/98	22:30:08	3210
13	...10-00	27/07/98	11:39:28	1647
14	...11-00	08/07/98	16:21:52	1295
15	...12-00	13/07/98	06:44:00	2056
16	...13-00	18/07/98	04:00:32	10585
17	...14-00	30/07/98	09:44:48	6841
18	...15-00	05/08/98	18:25:20	4333
19	...16-00	13/08/98	10:17:36	1565
20	...17-00	20/08/98	16:41:20	1704
21	...18-00	25/08/98	03:32:00	1785
22	...19-00	14/09/98	08:17:36	886
23	...20-00	26/09/98	03:29:04	10287

^a — время экспозиции, скорректированное на эффекты мертвого времени.

тического спектра ХТЕ J1748–288 изображен на Рис. 9.2,б. Спектры источника в сверхвысоком и высоком состояниях хорошо описываются совокупностью мягкой и жесткой спектральных компонент, скорректированных на низкочастотное поглощение: переход из одного состояния в другое характеризуется уменьшением эффективной температуры и сильным увеличением вклада мягкой компоненты в общую рентгеновскую светимость с $\sim 10 - 20\%$ до более чем 50% . Последующий переход из высокого в низкое состояние сопровождается уменьшением потока в мягкой компоненте, уменьшением ее эффективной температуры и ужесточением высокоэнергичной части спектра.

8.3 Эволюция характера короткопериодической переменности рентгеновского потока.

Для анализа свойств короткомасштабной переменности рентгеновского потока от ХТЕ J1748–288, нами были произведены кривые блеска источника в диапазоне энергий 2 – 13 кэВ с временным разрешением 0.002 с, и на их основе получены спектры мощности источника в диапазоне частот 0.01 – 250 Гц. В случае наблюдений с относительно высоким уровнем изменения потока на масштабах 100 – 1000 с, спектры мощности производились для отдельных 256–секундных частей наблюдения. Частотные интервалы в спектрах мощности сгруппированы логарифмически, чтобы уменьшить разброс данных в области высоких частот. После вычитания фона, связанного с пуассоновской статистикой, откорректированного на эффекты мертвого времени, спектры мощности представлены в единицах квадрата относительной среднеквадратичной амплитуды флуктуаций потока ($rms/mean$)². Для построения

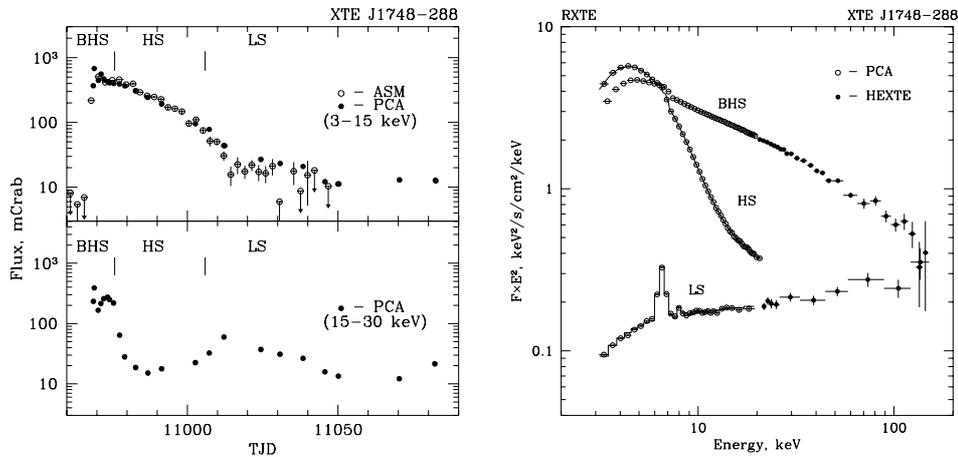


Рис. 8.1. **Слева:** Временные истории рентгеновского потока (в единицах потока от Крабовидной туманности) от XTE J1748–288 во время вспышки 1998 г. Открытые кружки в верхней части рисунка соответствуют данным монитора всего неба (ASM) в диапазоне энергий 1.3 – 12 кэВ, заштрихованные кружки в верхней и нижней частях рисунка соответствуют результатам измерений прибора PCA орбитальной обсерватории RXTE в диапазонах энергий 3 – 15 и 15 – 30 кэВ. Вдоль оси времен отложены усеченные Юлианские даты: $TJD = JD - 2440000$. **Справа:** Широкополосные энергетические спектры XTE J1748–288, соответствующие различным спектрально–временным состояниям, наблюдавшимся в процессе вспышки 1998 г.

спектров мощности источника в области низких частот ($\sim 5 \times 10^{-5} - 0.01$ Гц), где становится заметным вклад вариаций инструментального фона, использовались данные наблюдений с вычтенным вкладом фона.

На Рис. 8.2 представлены характерные спектры мощности источника, соответствующие различным спектрально–временным состояниям, наблюдавшимся в процессе вспышки 1998 г. Спектр мощности в “сверхвысоком” состоянии характеризуется определяющей ролью частотно–ограниченной компоненты с характерным сломом на частотах $\sim 3 - 7$ Гц и наличием мощных, сравнительно узких пиков квазипериодических осцилляций (QPO). Наряду с основным (наиболее мощным) пиком QPO наблюдается также система пиков–сателлитов, центральная частота и ширина которых связаны с соответствующими параметрами основного пика гармоническим соотношением¹. Спектр мощности XTE J1748–288 в “высоком” спектральном состоянии может быть представлен в виде суммы низкочастотной шумовой компоненты и QPO–пика на частоте ~ 0.03 Гц. Для сравнения также приведен спектр мощности источника в “низком” состоянии, хорошо аппроксимирующийся частотно–ограниченной компонентой с характерным сломом на частоте ~ 0.1 Гц (Рис. 8.2).

Для аналитической аппроксимации широкополосного спектра мощности XTE

¹Центральная частота и ширина пиков–сателлитов равны 1/2, 2, 3 и т.д. от частоты и ширины основного пика QPO.

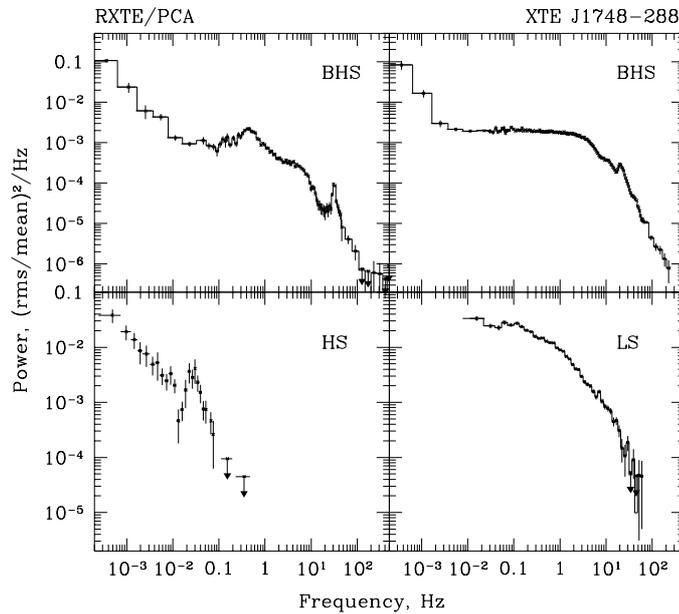


Рис. 8.2. Широкополосные спектры мощности XTE J1748–288, соответствующие различным спектрально–временным состояниям, наблюдавшимся в процессе вспышки 1998 г.

J1748–288 в “сверхвысоком” состоянии в диапазоне частот 0.02 – 150 Гц использовалась модель, представляющая собой сумму частотно–ограниченной компоненты ($P_{BLN}(f) \sim \exp(-f/f_{br})^2$, где f_{br} – характеристическая частота слома частотно–ограниченной компоненты), низкочастотного шума (степенной закон) и нескольких групп Лоренцевых компонент, аппроксимирующих QPO (см. объяснение ниже). Общий вид модели в применении к данным одного из наблюдений 10 июня 1998 г. приведен на Рис. 8.3. Как хорошо видно из врезки Рис. 8.3, форма пиков квазипериодических осцилляций заметно отличается от одиночного профиля Лоренца, обычно применяемого для аппроксимации QPO, демонстрируя укрупнение в области низких частот и наличие дополнительного крыла в области высоких частот. Следует отметить, что подобный эффект наблюдался ранее в рентгеновских источниках GX 339–4 и GS/GRS 1124–68 (Новая в созвездии Мухи 1991 г.), также находившихся в “сверхвысоком” спектральном состоянии (Belloni et al. 1997). В связи с этим для аппроксимации каждого из QPO–пиков использовалась совокупность двух лоренциан с различными частотой, шириной и нормировкой. В результате испытаний модели было выявлено, что полученные значения центральных частот и ширины Лоренцевых компонент, относящихся к основному пику QPO и его сателлитам связаны между собой гармоническим соотношением. Учитывая этот факт и стремясь минимизировать число независимых параметров модели, необходимых для адекватного описания спектра мощности источника, мы связали центральные частоты и ширину сопутствующих QPO–пиков с соответствующими характеристиками основного пика гармонической зависимостью, оставив свободными параметрами только нормировки компонент, аппроксимирующих QPO. Значения параметров вышеописанной модели, при которых согласно критерию χ^2 она наилучшим образом аппроксимирует спектр мощности источника в “сверхвысоком” состоянии, приведены в Табл.

8.2.

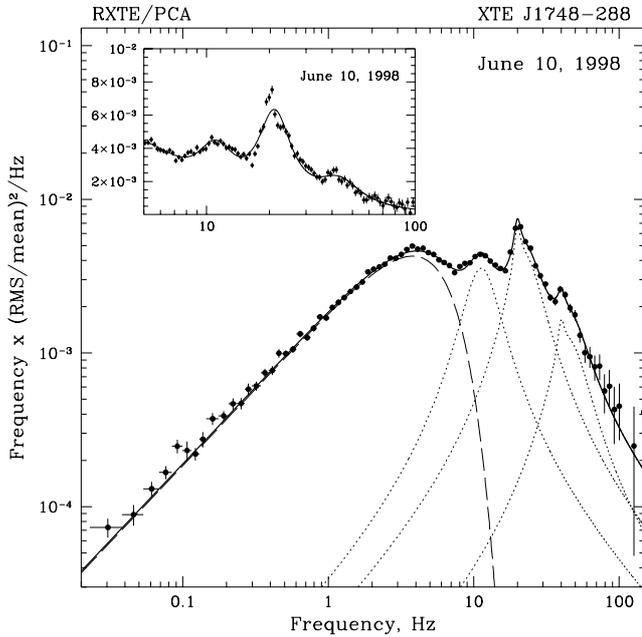


Рис. 8.3. Схематическое представление модели, использовавшейся для аппроксимации широкополосных спектров мощности XTE J1748–288 (в единицах $f \times (rms/mean)^2/Hz$) в “сверхвысоком” спектральном состоянии на примере наблюдения 10 июня 1998 г. Вклады частотно–ограниченной компоненты и Лоренцевых компонент, аппроксимирующих QPO–пики, изображены с помощью штриховой и точечных линий соответственно. Врезка в левом верхнем углу демонстрирует отличие профиля QPO–пиков от профиля Лоренца.

Как будет продемонстрировано ниже, центральная частота QPO изменяется в соответствии с изменением светимости источника на масштабе ~ 100 с (Рис. 8.6), а мощность QPO–пика антикоррелирует с величиной его центральной частоты (Рис. 8.5). Подобное поведение приводит к укрупнению низкочастотной и уплощению высокочастотной части профиля QPO–пика при усреднении данных за целое наблюдение, что может рассматриваться в качестве причины появления наблюдаемого дополнительного высокочастотного крыла QPO–пика.

В целях исследования эволюции на сравнительно коротких временных масштабах ($\sim 100 - 1000$ с) была проведена аналитическая аппроксимация спектров мощности, накопленных за 256–с временные интервалы. При этом для описания спектра мощности использовалась сумма частотно–ограниченной компоненты и лоренцианы (аппроксимирующей основной QPO–пик).

8.4 Связь между эволюцией спектральных и временных параметров.

С целью обобщения результатов анализа временных свойств рентгеновского излучения XTE J1748–28 на рис. 8.4 и 8.5 приведены основные параметры аналитической аппроксимации спектров мощности источника для диапазона энергий 2–13, как функции центральной частоты основного пика QPO. Центральная частота QPO явно коррелирует со значением частоты слома частотно–ограниченной шумовой ком-

Табл. 8.2. Параметры аналитической аппроксимации спектров мощности ХТЕ J1748–288 в диапазоне энергий 2–13 кэВ и интервале частот 0.02–150 Гц. Ошибки на значения параметров соответствуют уровню в 1σ . rms_{total} и rms_{BLN} представляют собой полную относительную среднеквадратическую амплитуду переменности и относительную среднеквадратическую амплитуду частотно–ограниченной компоненты, проинтегрированные в диапазоне частот 0.02–150 Гц, а f_{br} , f_{QPO} и $f_{QPO}^{shoulder}$ – характеристическую частоту слома частотно–ограниченной компоненты и центральные частоты фундаментальной гармоники QPO и дополнительной Лоренцевой компоненты. rms_{QPO}^1 , $rms_{QPO}^{1/2}$ и rms_{QPO}^2 представляют собой относительные среднеквадратические амплитуды переменности фундаментальной гармоники QPO, ее субгармоники и второй гармоники.

#	rms_{total} , %	f_{BLN}^{br} , Hz	rms_{BLN} , %	f_{QPO} , Hz	$f_{QPO}^{shoulder}$	rms_{QPO}^1 , %	$rms_{QPO}^{1/2}$, %	rms_{QPO}^2 , %	χ^2 (dof)
Сверхвысокое состояние (2–13 keV, 0.02–150 Hz)									
2	11.75 ± 0.28	3.79 ± 0.32	8.69 ± 0.71	21.77 ± 0.45	-	5.78 ± 0.77	4.68 ± 0.97	-	33.43(36)*
3	7.38 ± 0.13	6.14 ± 0.14	5.15 ± 0.16	31.60 ± 0.18	-	3.21 ± 0.14	-	-	227.7(183)
4	7.09 ± 0.11	6.15 ± 0.13	4.83 ± 0.14	31.31 ± 0.24	-	2.75 ± 0.20	-	-	229.0(183)
5	12.15 ± 0.06	4.27 ± 0.05	8.80 ± 0.11	23.70 ± 0.10	24.85 ± 0.29	5.44 ± 0.27	4.99 ± 0.20	2.54 ± 0.38	216.8(177)
6	13.19 ± 0.06	3.68 ± 0.04	8.95 ± 0.09	20.17 ± 0.06	21.27 ± 0.17	6.62 ± 0.35	5.57 ± 0.15	3.26 ± 0.30	208.5(177)
7	13.06 ± 0.07	3.79 ± 0.03	9.04 ± 0.05	19.97 ± 0.08	21.54 ± 0.18	6.26 ± 0.33	5.51 ± 0.15	3.31 ± 0.31	209.3(177)
8	12.40 ± 0.07	4.10 ± 0.04	8.91 ± 0.11	22.60 ± 0.18	24.06 ± 0.23	5.50 ± 0.25	5.18 ± 0.18	3.02 ± 0.35	188.0(177)
Высокое состояние (2–13 keV, 5×10^{-4} –0.2 Hz)									
	α_{VLFN}	rms_{VLFN} , %	f_{QPO} , Hz	FWHM, Hz	rms_{QPO} , %				
9–15	-1.14 ± 0.08	0.86 ± 0.09	$(2.9 \pm 0.1) \times 10^{-2}$	$(1.1 \pm 0.4) \times 10^{-2}$	0.77 ± 0.14				

* – спектр мощности в диапазоне частот 0.3–50 Hz (полное время экспозиции 64 с)

поненты (нижняя левая часть рисунка) и антикоррелирует со значением полной относительной среднеквадратичной амплитуды флуктуаций рентгеновского потока (rms) и интегральной rms QPO и частотно–ограниченной шумовых компонент. Подобный вид зависимости наблюдается и для эволюции на относительно коротких временных масштабах: в качестве примера на Рис. 8.5 показана антикорреляция центральной частоты и интегральной rms фундаментального пика QPO для данных наблюдений, сгруппированных в 256–секундные интервалы.

Анализ связи между спектральными и временными свойствами ХТЕ J1748–288 в “сверхвысоком” спектральном состоянии показал, что изменение некоторых параметров спектра мощности источника, таких как, например, центральная частота QPO, скоррелировано с изменением параметров энергетического спектра, полученных при его аппроксимации принятой нами упрощенной моделью. Особый интерес представляет корреляция между центральной частотой основного пика QPO и светимостью мягкой спектральной компоненты излучения источника (Рис. 8.6). Следует также отметить, что данная зависимость справедлива для широкого интервала временных масштабов: от сотен секунд до нескольких дней.

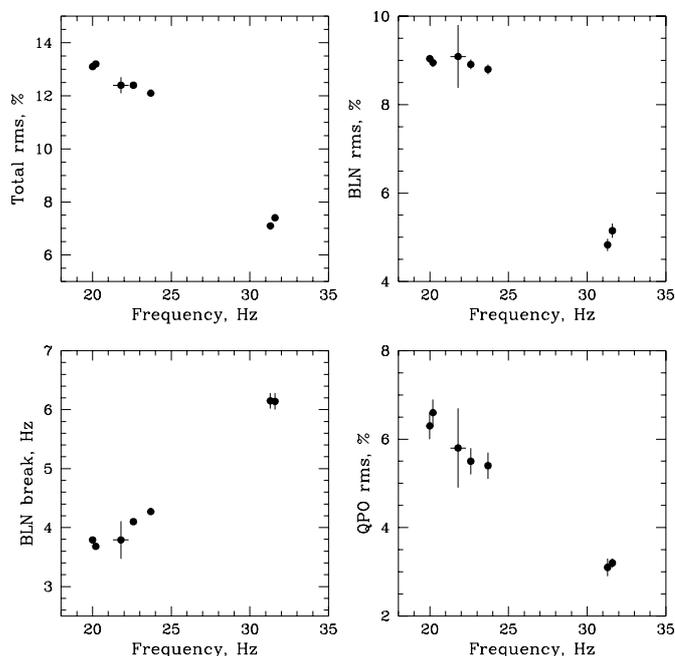


Рис. 8.4. Параметры аналитической аппроксимации спектров мощности источника (полная амплитуда переменности и характеристическая частота слома частотно-ограниченной компоненты — левая часть рисунка; относительная среднеквадратическая амплитуда частотно-ограниченной шумовой компоненты и основного QPO-пика в диапазоне частот 0.02 – 150 Гц — правая часть рисунка) XTE J1748–288 в “сверхвысоком” состоянии как функции центральной частоты основного пика QPO.

Литература

- Belloni *et al.* 1997//Belloni T., *et al.* 1997 A&A, **332**, 857
 Hjellming *et al.* 1998a//Hjellming R.M., *et al.* 1998a IAU Circ. **N 6937**
 Hjellming *et al.* 1998б//Hjellming R.M., *et al.* 1998б AAS Meeting # 193, **103.08**
 Revnivtsev, Trudolyubov & Borozdin 1999//Revnivtsev M., Trudolyubov S. & Borozdin K. 1999, MNRAS (принята к печати) **astro-ph/9903306**
 Smith *et al.* 1998//Smith D.A., 1998 IAU Circ. **N 6932**

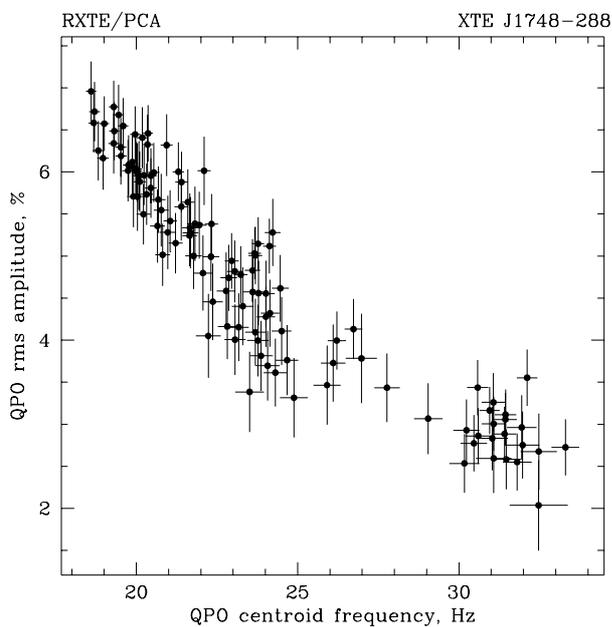


Рис. 8.5. Зависимость между центральной частотой основного пика QPO в спектре мощности XTE J1748–288 и интегральной относительной среднеквадратической амплитудой переменности в этом QPO, полученная по результатам аналитической аппроксимации спектров мощности и энергетических спектров источника, накопленных за 256-с временные интервалы.

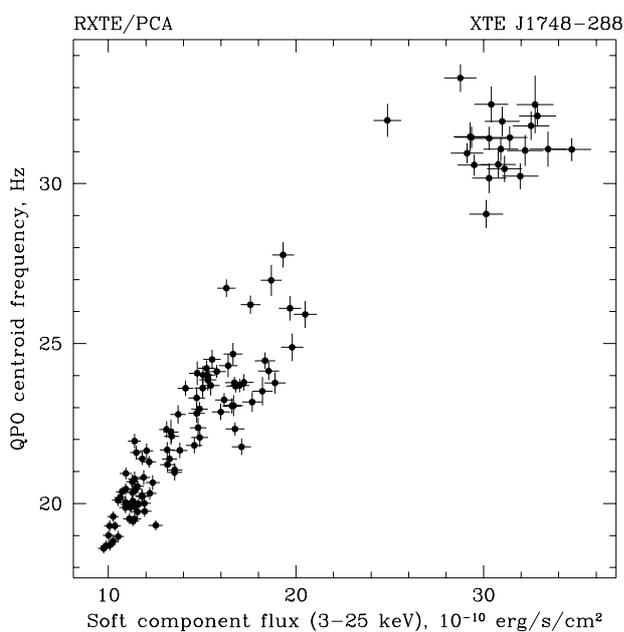


Рис. 8.6. Зависимость между центральной частотой основного пика QPO в спектре мощности XTE J1748–288 в “сверхвысоком” состоянии и потоком в мягкой компоненте энергетического спектра в диапазоне энергий 3–25 кэВ, полученная по результатам аналитической аппроксимации спектров мощности и энергетических спектров источника, накопленных за 256-сек временные интервалы.

Глава 9

Источник 4U 1630–47

9.1 Введение.

Реккурентный рентгеновский источник 4U 1630–47 является предметом изучения вот уже на протяжении почти тридцати лет: первая известная вспышка источника была задетектирована спутником Vela–5B в 1969 г. (Priedhorsky 1986). В последующие годы в результате наблюдений мониторов всего неба различных орбитальных рентгеновских обсерваторий зарегистрирована последовательность повторяющихся вспышек 4U 1630–47 с типичным периодом между отдельными вспышками ~ 600 дней (Jones et al. 1976; Priedhorsky 1986; Parmar, Angelini & White 1995), однако, эта периодичность иногда нарушалась внеочередными вспышками источника (Kaluziński et al. 1978; McCollough et al. 1999). Анализ результатов наблюдений 4U 1630–47 показал сходство его спектральных свойств с соответствующими свойствами галактических кандидатов в черные дыры (Tanaka & Lewin 1995).

Ниже приводятся результаты анализа эволюции временных и спектральных характеристик источника в период вспышки 1998 г. по данным приборов орбитальной обсерватории RXTE (Trudolyubov, Borozdin and Priedhorsky 1999). Общие сведения о наблюдениях источника, использовавшихся для анализа, содержатся в Табл. 9.1.

Табл. 9.1. Наблюдения 4U 1630–47 приборами орбитальной обсерватории RXTE в период вспышки 1998 г.

#	Код наблюдения	TJD ^a	Дата (UT)	Время, UT (ч:м:с)	Экспозиция ^b (с)
1	30178-01-01-00	853.06	09/02/98	01:22	1034
2	30178-01-02-00	853.66	09/02/98	15:44	1134
3	30178-02-01-00	855.05	11/02/98	01:07	3554
4	30188-02-01-00	855.43	11/02/98	10:17	1175
5	30178-01-03-00	855.84	11/02/98	20:11	1438
6	30188-02-02-00	856.12	12/02/98	02:46	1846
7	30178-01-04-00	856.63	12/02/98	15:03	1659
8	30188-02-03-00	856.65	12/02/98	15:38	1509
9	30178-02-01-01	856.87	12/02/98	20:51	2919
10	30188-02-04-00	856.98	12/02/98	23:26	2015
11	30178-01-05-00	857.12	13/02/98	02:47	1441
12	30188-02-05-00	857.71	13/02/98	17:01	2266
13	30178-02-02-00	857.79	13/02/98	19:02	6540
14	30188-02-06-00	858.05	14/02/98	01:05	2168
15	30178-01-06-00	858.70	14/02/98	16:40	1453
16	30188-02-07-00	858.72	14/02/98	17:10	1786
17	30178-02-02-01	858.77	14/02/98	18:31	8414
18	30178-01-07-00	859.84	15/02/98	20:04	1370
19	30188-02-08-00	860.12	16/02/98	02:48	1828
20	30188-02-09-00	860.56	16/02/98	13:29	1597
21	30178-01-08-00	860.72	16/02/98	17:20	1180
22	30178-01-09-00	861.69	17/02/98	16:38	1314
23	30188-02-10-00	861.72	17/02/98	17:21	1620
24	30178-01-10-00	862.65	18/02/98	15:41	1638
25	30188-02-11-00	862.71	18/02/98	16:54	2864
26	30178-02-03-00	862.77	18/02/98	18:22	9296
27	30178-01-11-00	863.70	19/02/98	16:41	1237
28	30188-02-12-00	863.71	19/02/98	17:06	2245
29	30188-02-13-00	864.19	20/02/98	04:26	1233
30	30188-02-14-00	864.32	20/02/98	07:41	1080
31	30178-01-12-00	864.63	20/02/98	15:07	1579
32	30188-02-15-00	865.05	21/02/98	01:06	1510
33	30188-02-16-00	865.32	21/02/98	07:41	912
34	30188-02-17-00	866.64	22/02/98	15:21	1419
35	30178-01-13-00	867.50	23/02/98	11:56	1524
36	30188-02-18-00	868.57	24/02/98	13:38	3620
37	30188-02-19-00	869.65	25/02/98	15:37	1698
38	30188-02-20-00	870.18	26/02/98	04:21	900
39	30178-01-14-00	870.98	26/02/98	23:28	1895
40	30188-02-21-00	871.26	27/02/98	06:11	2175
41	30188-02-21-01	871.41	27/02/98	09:50	772
42	30188-02-22-00	872.34	28/02/98	08:12	4972
43	30188-02-23-00	873.14	01/03/98	03:19	1347
44	30178-01-15-00	874.52	02/03/98	12:23	1400
45	30178-01-16-00	881.58	09/03/98	13:55	1875
46	30178-01-17-00	884.94	12/03/98	22:33	1590
47	30178-01-18-00	889.72	17/03/98	17:08	1359
48	30172-01-05-00	891.65	19/03/98	15:30	9152

^a – усеченная Юлианская дата: TJD=JD-2450000.^b – время экспозиции, скорректированное на эффекты мертвого времени.

9.2 Наблюдения и анализ данных.

Данные наблюдений источника 4U 1630–47, использовавшихся для анализа, были получены с помощью приборов PCA и HEXTE (см. описание в части 1) в период с февраля по апрель 1998 г. Список наблюдений, содержащий дату и эффективное время экспозиции с коррекцией на эффекты мертвого времени, приведен в Табл. 9.1.

9.2.1 Спектральный анализ.

Для спектрального анализа нами были использовались данные прибора PCA в диапазоне энергий 3–20 кэВ. Матрицы отклика прибора производились с помощью последней версии стандартной программы PCARMF v3.5, учет инструментального фона основан на применении модели VLE (Very Large Events). Полученные значения спектральных потоков от источника были откорректированы с учетом эффектов мертвого времени (Zhang & Jahoda 1996). Для учета неточностей в определении матрицы отклика прибора мы добавили 1% систематическую ошибку к статистическим ошибкам данных при аппроксимации энергетических спектров источника аналитическими моделями.

При обработке данных прибора HEXTE также использовались стандартные программы пакета FTOOLS версии 4.2. Измерение рентгеновского фона производилось на основе наблюдения площадок неба, непосредственно примыкающих к источнику. Для спектрального анализа была использована версия матрицы отклика инструмента от 3 апреля 1997 г. Для того, чтобы избежать ошибок, связанных с неточностями в определении функции отклика прибора и инструментального фона, данные ниже 19 и выше 100 кэВ были исключены из рассмотрения.

Для аналитической аппроксимации энергетических спектров источника в диапазоне 3–20 кэВ была использована упрощенная модель, состоящая из суммы модификации модели излучения оптически толстого “многоцветного” аккреционного диска (Shakura & Sunyaev 1973), предложенной в работах Mitsuda *et al.* 1984 и Makishima *et al.* 1986, и степенного закона, скорректированных на эффекты низкочастотного поглощения межзвездной средой. Данные прибора HEXTE описывались простым степенным законом.

9.2.2 Временной анализ.

Для исследования короткопериодической переменности 4U 1630–47 использовались данные прибора PCA, записанные в 'Binned', 'Single Binned' и 'Event'–форматах. На основе этих данных были получены спектры мощности источника в диапазоне частот 0.001–128 Гц и диапазоне энергий 2–13 кэВ. Частотные интервалы в спектрах мощности сгруппированы логарифмически, чтобы уменьшить разброс данных в области высоких частот. После вычитания фона, связанного с пуассоновской статистикой, откорректированного на эффекты мертвого времени, спектры

мощности источника представлены в единицах квадрата относительной среднеквадратичной амплитуды флуктуаций рентгеновского потока $(rms/mean)^2$.

Мы аппроксимировали полученные спектры мощности в диапазоне частот 0.01 – 100 Гц с помощью модели, состоящей из суммы частотно–ограниченной компоненты (лоренциана с центром на нулевой частоте) и нескольких QPO– компонент (профили Лоренца).

9.3 Кривая блеска и эволюция источника.

За четыре года работы обсерватории RXTE было зарегистрировано три вспышки рентгеновского излучения источника 4U 1630–47, отличающихся характером эволюции спектральных и временных параметров (Рис. 9.1). В отличие от вспышек 1996 и 1999 гг., сходных по свойствам со спектральными переходами постоянных источников, таких как Лебедь X–1 (Cui et al. 1998), свойства вспышки 1998 г. были чрезвычайно похожи на свойства классических рентгеновских Новых (Chen, Shrader and Livio 1997).

На Рис. 9.2 изображены более детальные кривые блеска 4U 1630–47 во время вспышки 1998 г. За первые ~ 5 дней вспышки рентгеновский поток от источника возрос до уровня ~ 200 мКраб. Кривая блеска источника в максимуме блеска представляет собой последовательность трех плато (периодов, характеризующихся практически постоянным уровнем рентгеновского потока) длительностью $\sim 6 - 7$ дней, соответствующих различным уровням светимости. Через ~ 30 дней после включения вспышки начался квазиэкспоненциальный спад потока от источника, прерванный вторичным максимумом с характерной продолжительностью ~ 20 дней.

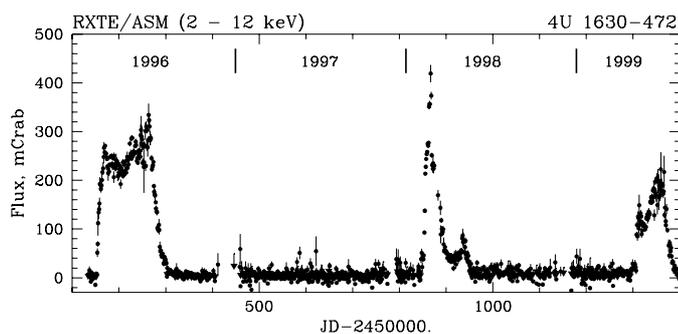


Рис. 9.1. Долговременная кривая блеска 4U 1630–47 в стандартном рентгеновском диапазоне (2 – 12 кэВ), полученная по данным монитора всего неба (ASM) орбитальной обсерватории RXTE. По оси времен отложены усеченные Юлианские даты: $TJD = JD - 2450000.$, поток от источника приведен в стандартных единицах потока от Крабовидной туманности.

Эволюция спектрально–временных свойств 4U 1630–47 в процессе вспышки может быть представлена как последовательность феноменологических состояний, использующихся для описания свойств галактических кандидатов в черные дыры (Tanaka & Lewin 1995). Ниже приведены результаты детального анализа изменения спектральных и временных параметров рентгеновского излучения источника в контексте системы стандартных состояний.

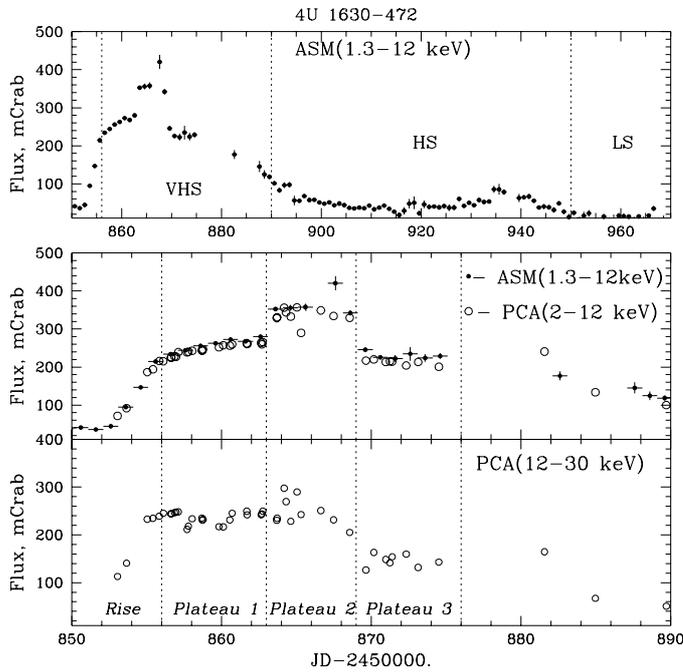


Рис. 9.2. Временные истории рентгеновского потока от 4U 1630–47 во время вспышки 1998 г. в стандартном рентгеновском диапазоне (две верхние панели, данные монитора всего неба (ASM) и прибора PCA орбитальной обсерватории RXTE) и в диапазоне энергий 12–30 кэВ (нижняя панель, данные прибора PCA). Оси времен отложены усеченные Юлианские даты: $TJD = JD - 2450000.$, поток от источника приведен в стандартных единицах потока от Крабовидной туманности. Границы последовательных спектрально–временных состояний источника отмечены с помощью точечных линий.

9.4 Спектральная и временная эволюция источника в период вспышки.

В период вспышки 1998 г. источник 4U 1630–47 продемонстрировал последовательность спектрально–временных состояний, типичных для галактических кандидатов в черные дыры. Благодаря частым наблюдениям источника приборами орбитальной обсерватории RXTE, удалось достаточно подробно исследовать характер его эволюции.

9.4.1 Фаза нарастания потока

Направленные наблюдения источника 4U 1630–47 приборами RXTE начались 9 февраля 1998 г., через неделю после детектирования начала его вспышки монитором ASM. Несколько наблюдений приходится на чрезвычайно интересный период первоначального нарастания рентгеновского потока от источника (наблюдения ##1–5). Широкополосные спектры 4U 1630–47 в этот период представляются в виде суммы доминирующей жесткой компоненты с наклоном $\sim 1.8 - 2.2$ и квазиэкспоненциальным завалом на энергиях $\sim 60 - 70$ кэВ и слабой мягкой компоненты с цветовой температурой $\sim 1.7 - 1.8$ кэВ, составляющей $< 20\%$ от полной светимости источника в диапазоне энергий 3–20 кэВ (Рис. 9.3, 9.4; Табл. 9.2). Монотонное нарастание рентгеновского потока с $\sim 4 \times 10^{-9}$ до $\sim 1.2 \times 10^{-8}$ эрг $s^{-1} cm^{-2}$ сопровождалось укрупнением жесткой спектральной компоненты и увеличением потока в мягкой

спектральной компоненте (9.4).

Широкополосный спектр мощности источника в диапазоне частот 0.01 – 100 Гц характеризуется присутствием доминирующей частотно–ограниченной шумовой и компоненты и нескольких сравнительно узких пиков квазипериодических осцилляций (QPO) ($\Delta f/f \sim 0.1 - 0.3$, где Δf и f – ширина и центральная частота пика QPO), расположенных вблизи характеристического слома частотно–ограниченной компоненты (Рис. 9.5). Для первых двух наблюдений оказалось, что центральные частоты двух QPO–пиков связаны гармоническим соотношением, в то время как для последующих наблюдений это соотношение нарушается. Эволюция спектра мощности в этот период характеризуется падением уровня амплитуды переменности с $\sim 28\%$ до $\sim 11\%$, сопровождаемым увеличением частоты слома частотно–ограниченной компоненты и центральных частот QPO (т.е. систематическим сдвигом эффективного максимума частотного распределения амплитуды переменности в сторону более высоких частот) (Рис. 9.5, 9.6; Табл. 9.3).

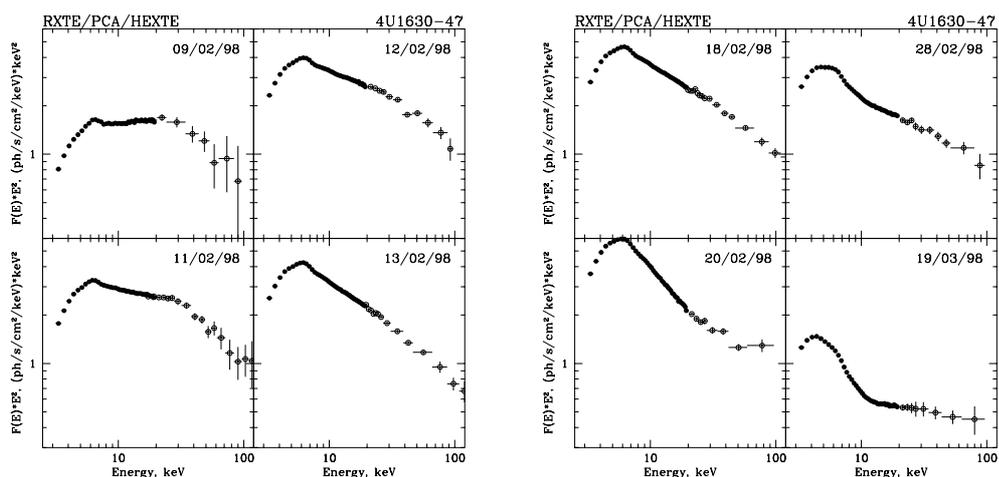


Рис. 9.3. Характерные примеры широкополосных энергетических спектров 4U 1630–47 в период начального нарастания и максимума вспышки 1998 г. *Закрашенные* и *открытые* кружки отражают данные приборов PCA и HEXTE соответственно.

Комплекс спектрально–временных свойств 4U 1630–47 в период нарастания рентгеновского потока схож с соответствующим комплексом свойств галактических кандидатов в черные дыры во время переходов между “высоким”/ “сверхвысоким” и “низким” спектральными состояниями (Тапака & Lewin 1995). Более того, в соответствии с некоторыми общими свойствами спектра и короткопериодической переменности источника данное состояние не может быть классифицировано ни как “низкое”, ни как “высокое/сверхвысокое” состояние и, вероятно, является переходным (см. обсуждение ниже).

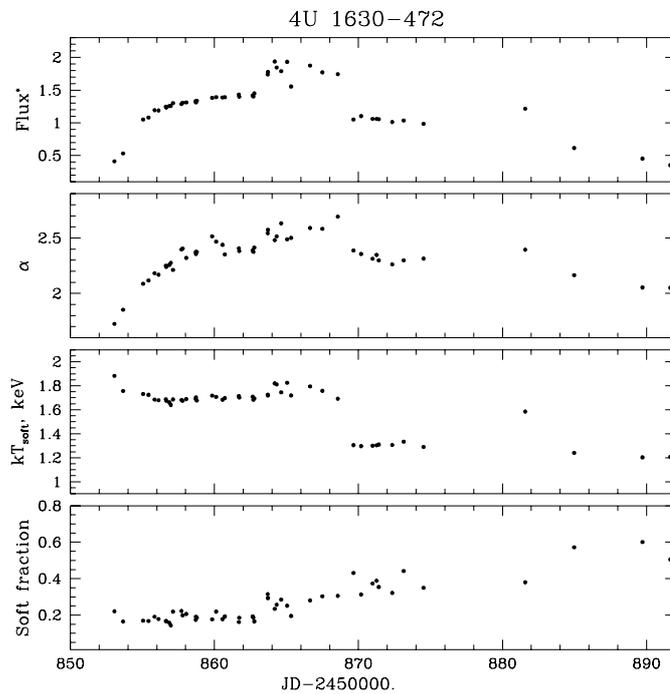


Рис. 9.4. Эволюция параметров аппроксимации энергетического спектра 4U 1630–47 в период вспышки 1998 г. 'Soft fraction' обозначает вклад мягкой спектральной компоненты в полный поток в диапазоне энергий 3–20 кэВ, а 'Flux*' – полный поток от источника в том же диапазоне энергий, скорректированный на эффекты межзвездного поглощения (в единицах $\times 10^{-8} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$).

9.4.2 "Сверхвысокое" состояние (VHS).

Максимум вспышки 4U 1630–47 продлился в течение ~ 25 –30 дней, после чего сменился фазой экспоненциального спада рентгеновского потока. Пик вспышки может быть подразделен на три почти равные части (*плато*, т.к. поток от источника в эти периоды оставался практически постоянным), отличающиеся количественными характеристиками спектра и короткопериодической переменности. Несмотря на некоторые отличия, общие свойства источника в этот период позволяют классифицировать его состояние, как соответствующее стандартному "сверхвысокому" состоянию галактических кандидатов в черные дыры (Miyamoto *et al.* 1991, 1993; Tanaka & Lewin 1995).

Плато 1 Этот период (наблюдения ##6–26) характеризовался слабым ростом потока от источника в диапазоне 3–20 кэВ при среднем значении $\sim 1.4 \times 10^{-8} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$. Широкополосный спектр источника представляется в виде двух основных компонент: слабой мягкой тепловой компоненты с характерной температурой ~ 1.6 –1.7 кэВ и доминирующей жесткой степенной компоненты без признаков высокоэнергичного завала вплоть до энергий ~ 150 кэВ (Рис. 9.3).

Наибольший интерес представляет характер переменности рентгеновского потока от 4U 1630–47 на сравнительно коротких временных масштабах. Как хорошо видно из верхней части Рис. 9.8, кривая блеска источника характеризуется наличием квазипериодической модуляции на масштабах времени ~ 10 –20 сек. Похожий характер переменности наблюдался в случае двух других известных источников GRS 1915+105 (Morgan *et al.* 1997) и GRO J1655–40, находившихся в схожем спек-

тральном состоянии (Remillard *et al.* 1999) (см. Рис. 9.8 (средняя и нижняя панели) и обсуждение ниже).

Спектр мощности источника в этот период доминирован частотно—ограниченной шумовой компонентой, полная среднеквадратическая амплитуда флуктуаций потока в диапазоне частот 0.01 – 100 Гц составляла $\sim 10\%$ (Рис. 9.5, Табл. 9.3). Отличительной чертой спектра мощности на *плато 1* являются две группы пиков QPO: первая группа, расположенная в районе $\sim 0.05 - 0.2$ Гц, обусловленная вышеописанной квазирегулярной модуляцией на масштабах $\sim 10 - 20$ сек, и вторая группа, состоящая из трех пиков на частотах ~ 5 , ~ 7 и ~ 13 Гц. Примечательно, что пик QPO на ~ 13 Гц демонстрирует довольно высокую стабильность центральной частоты и амплитуды переменности с течением времени (Рис. 9.5; Табл. 9.3).

Плато 2 В районе 19 февраля рентгеновский поток от источника совершил резкий подъем и оставался на одном уровне вплоть до 24 февраля (наблюдение #36). Этот период ознаменовался укрупнением жесткой компоненты энергетического спектра и ростом эффективной температуры мягкой компоненты спектра до ~ 1.9 кэВ и падением уровня короткопериодической переменности до $< 2\%$ (Рис. 9.4, 9.5). Исключение составляет только наблюдение #33 (21 февраля), когда поток от источника и все его спектральные и временные характеристики вернулись в состояние, характерное для *плато 1*.

Плато 3 Начиная с наблюдения #36 поток от источника упал до уровня $\sim 1.1 \times 10^{-8}$ эрг $s^{-1} cm^{-2}$ и оставался практически постоянным вплоть до наблюдения #44 (2 марта). Количественные характеристики энергетического спектра и спектра мощности источника в этом состоянии значительно отличаются от *плато 2*: цветовая температура мягкой компоненты упала до ~ 1.3 кэВ, вклад мягкой компоненты в полный поток в диапазоне энергий увеличился до $\sim 40\%$, в то время как произошло уплощение высокоэнергичной части спектра (наклон жесткой компоненты уменьшился до значения ~ 2.3) и некоторое увеличение амплитуды переменности источника до $\sim 4\%$. Спектр мощности 4U 1630–47 в этот период характеризуется наличием частотно—ограниченной компоненты с характерным сломом вблизи $\sim 1 - 2$ Гц и, что наиболее интересно, пика QPO с центральной частотой $\sim 10 - 11$ Гц и амплитудой переменности $\sim 2\%$ (Рис. 9.5, 9.6; Табл. 9.3). Следует также отметить, что подобно 13–Гц QPO во время *плато 1*, 11–Гц QPO также демонстрирует довольно высокую стабильность центральной частоты и амплитуды переменности, что позволяет предположить общность их процесса генерации.

9.4.3 “Высокое” состояние (HS).

После *плато 3* рентгеновский поток от источника начал падать квазиэкспоненциально. Свойства 4U 1630–47 в это время (после 19 марта (наблюдение #46)) позволяют классифицировать его состояние, как соответствующее стандартному “высокому” состоянию.

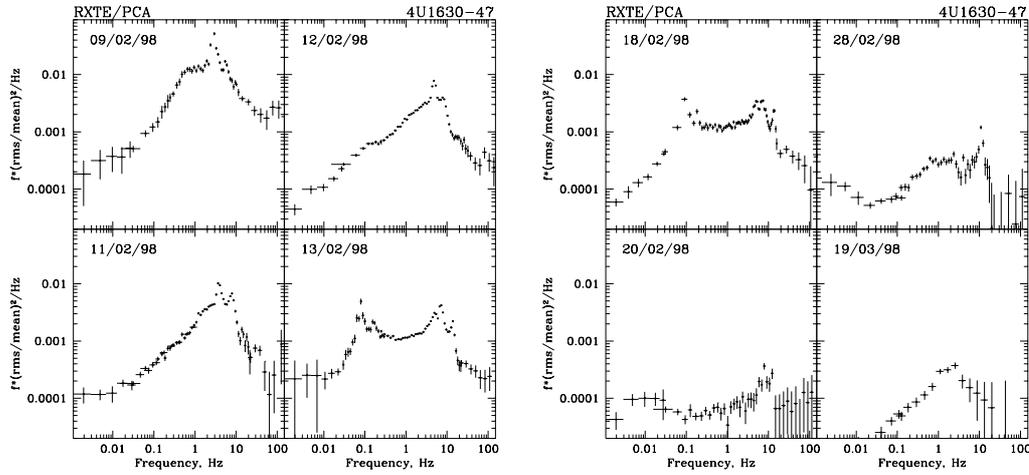


Рис. 9.5. Характерные примеры широкополосных спектров мощности 4U 1630–47 в единицах $f \times (rms/mean)^2/\text{Гц}$ в период вспышки 1998 г.

9.5 Спектральные и временные свойства на начальном этапе вспышки.

Мы провели детальное исследование временных и спектральных свойств излучения 4U 1630–47 в период первоначального нарастания потока, чтобы определить, как это состояние укладывается в рамки “канонической” системы состояний, принятой для галактических кандидатов в черные дыры.

Широкополосный энергетический спектр источника в этот период достаточно жесткий ($\alpha \sim 2$) и имеет завал в области энергий $\sim 60 - 70$ кэВ, вклад мягкой спектральной компоненты в полную светимость достаточно мал: $< 20\%$ (Рис. 9.7). Интересно, что подобный тип энергетического спектра наблюдался также и у других галактических кандидатов в черные дыры в период начала вспышки: GS/GRS 1124–68 (Новая в созвездии Мухи 1991 г.) (Ebisawa *et al.* 1994; Takizawa *et al.* 1997) и KS/GRS 1730–312 (Бороздин и др. 1995; Трудолюбов и др. 1996).

Следует также отметить поразительное сходство свойств энергетического спектра источника 4U 1630–47 период первоначального нарастания потока и источника GRS 1915+105 в состоянии с низкой светимостью (см. Гл. 3) (Рис. 9.7).

Анализ комплекса спектральных и временных характеристик 4U 1630–47 на начальном этапе вспышки позволяет сделать вывод о том, что состояние источника не может быть однозначно классифицировано ни как “высокое”, ни как “низкое”, и скорее всего соответствует промежуточному типу состояний галактических кандидатов в черные дыры.

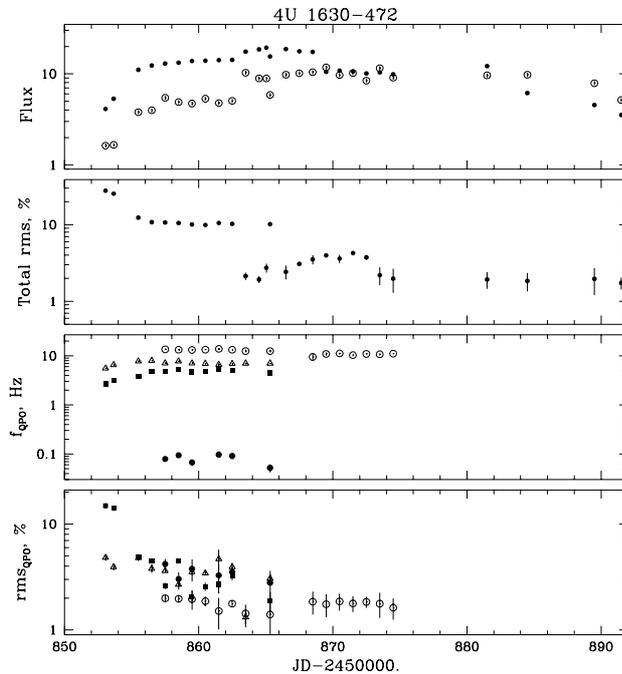


Рис. 9.6. Эволюция основных параметров спектра мощности 4U 1630–47 в период вспышки 1998 г., совмещенная с эволюцией рентгеновского потока (верхняя часть рисунка). Закрашенные и открытые кружки в верхней части рисунка соответствуют полному потоку в диапазоне энергий 3–20 кэВ и болометрическому потоку в мягкой спектральной компоненте. 'Total rms' — обозначает полную среднеквадратическую амплитуду переменности в диапазоне частот 0.01–128 Гц. Нижние панели рисунка демонстрируют эволюцию центральной частоты и амплитуды переменности нескольких QPO-компонент спектра мощности источника.

9.6 Переменность на масштабах 10–20 сек.

Переменность спектрально–временных свойств 4U 1630–47 на *плато 1* представляет особый интерес. Как хорошо видно из Рис. 9.8(верхняя часть), кривая блеска источника характеризуется наличием квазирегулярной модуляции с характерным периодом $\sim 10–20$ сек, проявляющей себя в виде набора пиков QPO в области частот $\sim 0.05–0.1$ Гц.

Нами был проведен подробный анализ переменности основных спектральных и временных параметров, связанной с вышеупомянутой переменностью рентгеновского потока, для наблюдений на *плато 1*. Для этого на основе данных в 'Binned' и 'Event'–форматах были получены энергетические спектры и спектры мощности источника, усредненные за 2–сек временные интервалы, соответствующие 11 интервалам значений рентгеновского потока. Для аналитической аппроксимации энергетических спектров использовалась сумма модели излучения оптически толстого "многоцветного" аккреционного диска и простого степенного закона с коррекцией на межзвездное поглощение, а для аппроксимации спектра мощности — сумма частотно–ограниченной компоненты и двух лоренциан. На Рис. 9.10 и 9.11 приведены энергетические спектры и спектры мощности источника, соответствующие максимально низкому и максимально высокому уровням потока.

Как явствует из Рис. 9.10 и Табл. 9.5, рост потока от источника сопровождается

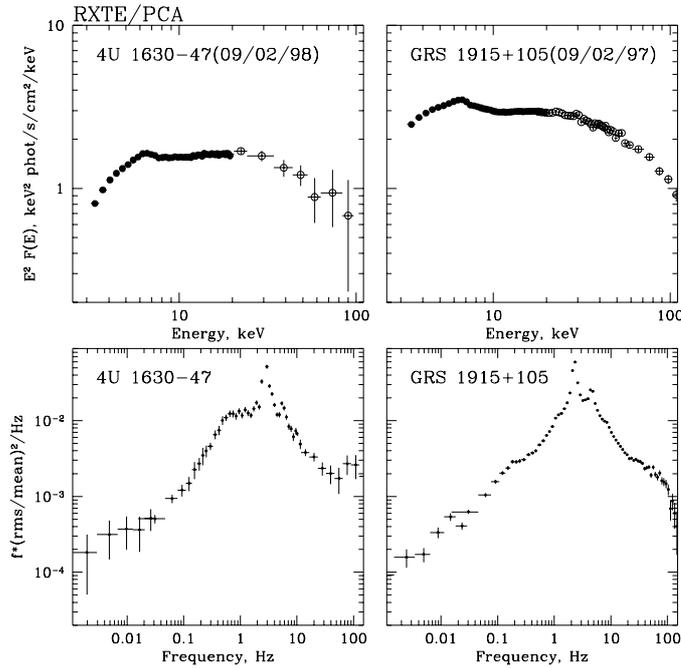


Рис. 9.7. Сходство свойств энергетического спектра и спектра переменности 4U 1630–47 на начальном этапе вспышки 1998 г. (левая половина рисунка) и GRS 1915+105 в состоянии с низкой светимостью (правая половина рисунка). Энергетические спектры и спектры мощности источников представлены в верхней и нижней частях рисунка.

значимым укрупнением жесткой компоненты энергетического спектра и ростом эффективной температуры мягкой спектральной компоненты. Наряду с этим, наблюдается сильное различие в свойствах спектров мощности, соответствующих низкому и высокому уровням светимости: первый характеризуется относительно большой амплитудой переменности $\sim 6.7\%$ (1 – 128 Гц) и наличием двух мощных QPO–пиков на частотах ~ 4.5 и ~ 13 Гц; второй характеризуется низкой амплитудой переменности $\sim 3.5\%$ (1 – 128 Гц), сдвигом одного QPO– пика с ~ 4.5 на ~ 7 Гц и исчезновением QPO на ~ 13 Гц (Рис. 9.11).

Примечательно, что схожий характер переменности наблюдался еще в двух галактических кандидатах в черные дыры – GRS 1915+105 (Morgan *et al.* 1997) и GRO J1655–40 (Remillard *et al.* 1999), что позволяет предположить существование универсального типа переменности, характерного для определенного сравнительно узкого диапазона светимости таких объектов. Этот вывод подтверждается тем, что небольшой скачок потока от 4U 1630–47 при переходе с *плато 1* на *плато 2* и *3* привел к немедленному исчезновению такой переменности.

9.7 Интерпретация спектрально–временных свойств источника.

Наиболее популярной в настоящее время моделью аккреционного потока вблизи черной дыры является модель, включающая внутреннюю оптически тонкую горячую область (корона и т.д.), окруженную оптически непрозрачным аккреционным диском. В ряде работ в модель включается дополнительная компонента, представляю-

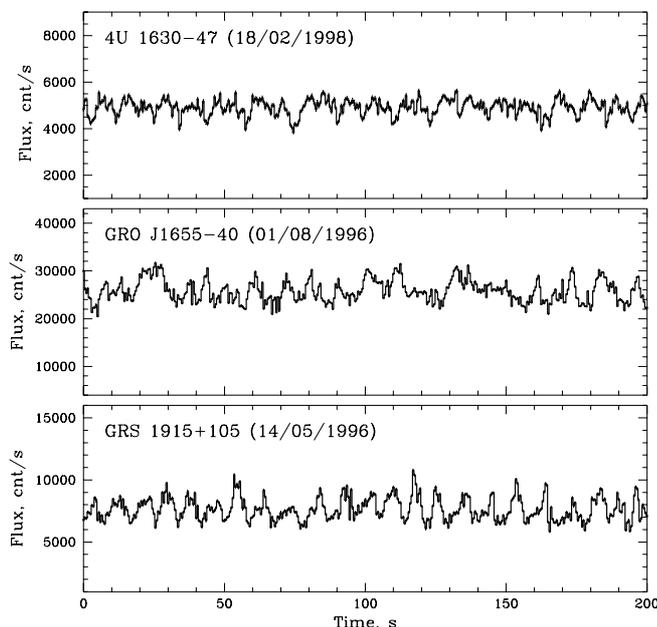


Рис. 9.8. Сходный характер переменности рентгеновского потока 4U 1630–47 (верхняя панель), GRO J1655–40 (средняя панель) и GRS 1915+105 (нижняя панель).

щая собой фронт ударной волны, возникающей из-за аккреции вещества, обладающего малым начальным угловым моментом (Chakrabarti & Titarchuk 1995). Далее будет продемонстрировано, что комплекс спектрально–временных свойств 4U 1630–47 может быть сравнительно хорошо объяснен в рамках таких моделей.

Предположим, что явление квазипериодических осцилляций связано со взаимодействием двух вышеупомянутых частей аккреционного потока на динамическом времени, соответствующем положению границы между ними (Molteni *et al.* 1996; Titarchuk, Lapidus & Muslimov 1998). Руководствуясь этими предположениями, мы можем связать изменение центральной частоты QPO в спектре мощности с изменением внешнего радиуса горячей области (или внутреннего радиуса оптически толстого диска), который, в свою очередь, определяет полную светимость источника и свойства его энергетического спектра.

Наиболее интересным с этой точки зрения является анализ переменности источника на *плато 1*. Присутствие QPO с частотой ~ 13 Гц только в периоды низкой светимости свидетельствует в пользу существования связанной с его возникновением области аккреционного потока, исчезающей, когда светимость источника превышает определенный предел. Такой областью может стать ударная волна на границе между горячей короной и диском (Chakrabarti & Titarchuk 1995; Molteni *et al.* 1996), и QPO может быть связано с резонансными осцилляциями ее фронта. Если QPO на частоте ~ 13 Гц объясняется осцилляциями в ударной волне, то 10–20 сек модуляции потока могут соответствовать времени накопления аккрецируемого вещества вблизи ее фронта. Катастрофическое охлаждение вещества за фронтом ударной волны, вызванное увеличением оптической толщи по Томсоновскому рассе-

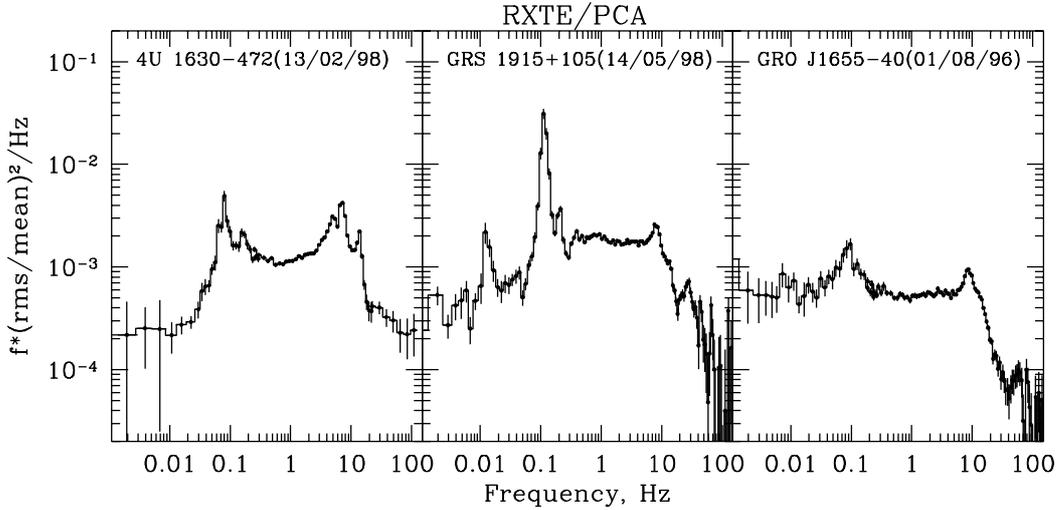


Рис. 9.9. Спектры мощности 4U 1630–47, GRO J1655–40 и GRS 1915+105 для наблюдений со сходным характером переменности на масштабах 10 – 50 сек.

янию, должно приводить к исчезновению или смещению границы внутренней области, что отражается в исчезновении QPO или сильном увеличении его частоты (так что его амплитуда переменности опускается ниже предела детектирования прибором PCA). Сдвиг частоты второго QPO–пика с 4 на 7 Гц также свидетельствует в пользу перемещения эффективной границы между внутренней областью и диском. Наряду с этим, увеличение оптической толщи и падение температуры во внутренней области отражается в укрупнении жесткой компоненты энергетического спектра источника.

Вариации частот квазипериодических осцилляций (и скоррелированное с ними изменение частоты характеристического максимума спектра мощности) могут быть однозначно связаны с изменением некоего эффективного радиуса в системе и, в особенности, внутреннего радиуса оптически толстого аккреционного диска. Поскольку светимость аккреционного диска является функцией как темпа аккреции, так и внутреннего радиуса диска, мы не можем приписывать изменение светимости источника только изменениям темпа аккреции. Более того, светимость источника может довольно сильно варьироваться даже при постоянном темпе аккреции, если изменяется геометрия аккреционного потока.

Наблюдение нескольких *плато* на кривой блеска 4U 1630–47, отличающихся высоким постоянством спектральных и временных характеристик источника позволяет говорить о существовании ряда квази–стационарных режимов аккреции в этой системе.

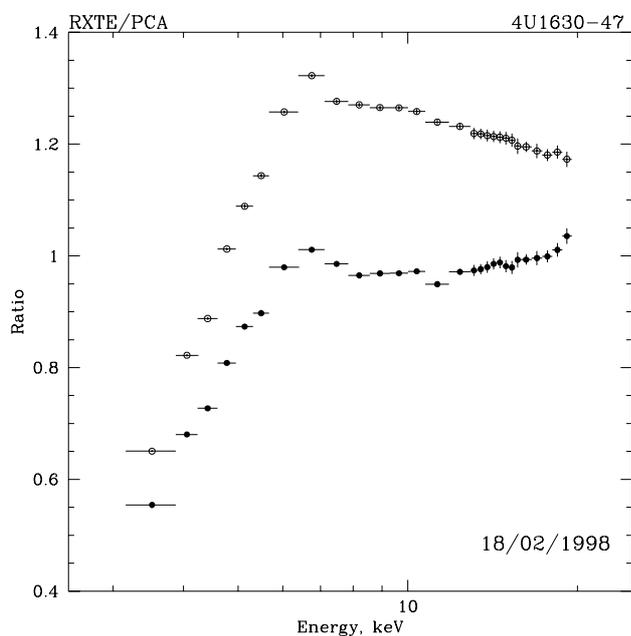


Рис. 9.10. Различие свойств энергетического спектра 4U 1630–47 при низком (закрашенные кружки) и высоком (открытые кружки) уровнях потока для наблюдения 18 февраля (#24). Точки отражают отношение спектров к степенному спектру с наклоном $\alpha = 2.5$.

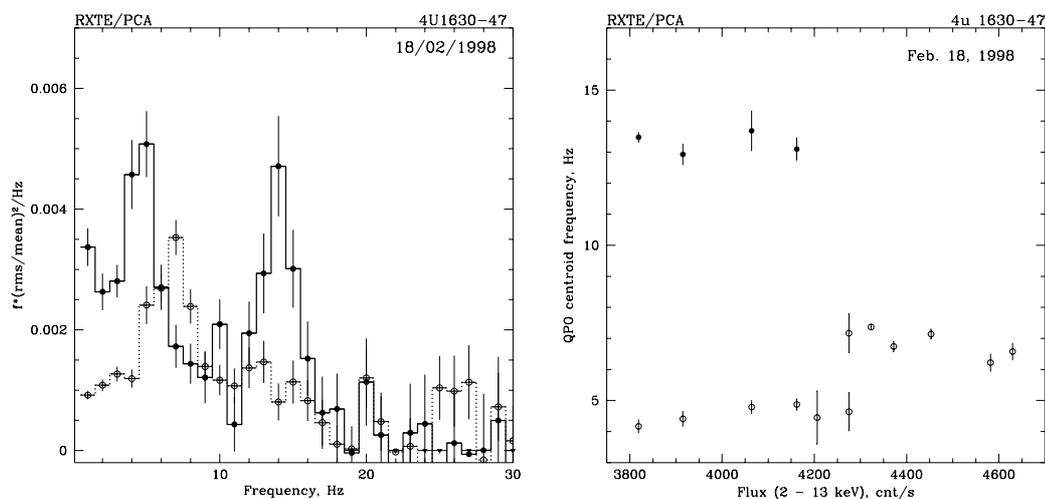


Рис. 9.11. **Слева:** Сравнение спектров мощности источника (в единицах $f \times (rms/mean)^2/\text{Гц}$), соответствующих низкому (закрашенные кружки, сплошные линии) и высокому (открытые кружки, точечные линии) уровням рентгеновского потока в наблюдении 18 февраля (#24). Примечательно, что QPO на частоте ~ 13 Гц доминирует в первом случае и исчезает во втором случае. **Справа:** Зависимость частот QPO–пиков в спектре мощности от рентгеновского потока 4U 1630–47 в диапазоне 2–13 кэВ в том же наблюдении. QPO на частоте ~ 13 Гц не детектируется для потоков более ~ 4200 *отсч/с*. Центральная частота второго QPO–пика испытывает резкий скачок в той же области потоков.

Литература

- Бороздин и др. 1995//Бороздин К.Н. и др. 1995 Письма в *Астрономический Журнал*, **21**, 243
- Chakrabarti & Titarchuk 1995//Chakrabarti S., & Titarchuk L. 1995 *ApJ*, **452**, 226
- Chen, Shrader & Livio 1997//Chen W., Shrader C., & Livio M., 1997 *ApJ*, **491**, 312
- Cui *et al.* 1998//Cui W., *et al.* 1998 *ApJ*, **493**, L75
- Jones *et al.* 1976//Jones C., *et al.* 1976 *ApJ*, **210**, L9
- Kaluzienski *et al.* 1978//Kaluzienski L.J., *et al.* 1978 *IAU Circ.* **N 3197**
- McCollough *et al.* 1999//McCollough M.L., 1999 *IAU Circ.* **N 7165**
- Miyamoto *et al.* 1993//Miyamoto S., *et al.* 1993 *ApJ*, **403**, L39
- Molteni *et al.* 1996//Molteni D., *et al.* 1996 *ApJ*, **457**, 805
- Morgan *et al.* 1997//Morgan E., *et al.* 1997 *ApJ*, **482**, 993
- Parmar, Angelini & White 1995//Parmar A.N., Angelini L. & White N.E., 1995 *ApJ*, **454**, L129
- Priedhorsky 1986//Priedhorsky W.C., 1986 *Ap&SS*, **126**, 86
- Remillard *et al.* 1999//Remillard R., *et al.* 1999 *ApJ*, **522**, 397
- Tanaka & Lewin 1995//Tanaka Y., & Lewin W.H.G., 1995 in *X-ray Binaries*, ed. W. Lewin, J. van Paradijs, E. van der Heuvel, Cambridge Univ. Press, 128
- Titarchuk, Lapidus & Muslimov 1998//Titarchuk L., Lapidus I., & Muslimov A. 1998 *ApJ*, **499**, 315
- Трудолюбов и др. 1996//Трудолюбов С.П. и др. 1996 Письма в *Астрономический Журнал*, **22**, 740
- Trudolyubov, Borozdin & Priedhorsky 1999//Trudolyubov S.P., Borozdin K.N., & Priedhorsky W.C., 1999 *MNRAS* (представлена к публикации), **astro-ph/9911345**
- Zhang & Jahoda 1996//Zhang W., Jahoda K. <http://hea-www.gsfc.nasa.gov/users/keith/deadtime/deadtime.htm>

Табл. 9.2. Параметры аналитической аппроксимации спектра 4U 1630-47 в диапазоне 3 – 20 кэВ моделью, состоящей из суммы модели оптически толстого “многотемпературного” аккреционного диска (Mitsuda et al. 1984) и степенного закона с коррекцией на эффекты межзвездного поглощения. Ошибки на параметры соответствуют уровню значимости в 1σ для принятой дополнительной систематической ошибки в 1%. Для описания данных прибора HEXTE использовалась модель степенного закона. В целях повышения значимости данные HEXTE были усреднены в соответствии с датой наблюдений.

#	T_d , keV	$Norm^a$	$f_{soft}^{bol\ b}$	α_{pl}	N_H^c	f_{total}^d	f_{soft}^e	χ^2 (d.o.f.)	α_{pl}^f
1	1.88 ± 0.06	6.0 ± 0.7	1.63	1.73 ± 0.06	7.22 ± 0.37	4.13	0.91	63.5(40)	2.46 ± 0.07
2	1.76 ± 0.06	8.1 ± 1.2	1.66	1.85 ± 0.05	7.48 ± 0.35	5.32	0.88	59.5(40)	2.55 ± 0.13
3	1.73 ± 0.05	17.6 ± 2.0	3.42	2.09 ± 0.04	7.84 ± 0.31	10.50	1.78	21.7(40)	2.51 ± 0.04
4	1.72 ± 0.06	18.2 ± 2.3	3.48	2.12 ± 0.05	7.71 ± 0.35	10.80	1.81	30.4(40)	
5	1.68 ± 0.04	25.9 ± 2.9	4.49	2.18 ± 0.04	8.05 ± 0.32	11.94	2.29	15.7(40)	
6	1.68 ± 0.05	24.3 ± 2.7	4.17	2.17 ± 0.04	7.78 ± 0.32	11.88	2.12	17.7(40)	2.51 ± 0.03
7	1.69 ± 0.05	23.3 ± 2.8	4.08	2.25 ± 0.04	8.08 ± 0.33	12.47	2.08	26.5(40)	
8	1.68 ± 0.04	24.0 ± 3.0	4.09	2.24 ± 0.04	7.90 ± 0.33	12.33	2.07	23.7(40)	
9	1.66 ± 0.05	23.9 ± 2.1	3.94	2.26 ± 0.03	7.97 ± 0.31	12.57	1.98	25.4(40)	
10	1.64 ± 0.05	23.2 ± 3.3	3.63	2.28 ± 0.03	8.13 ± 0.32	12.60	1.80	19.0(40)	
11	1.69 ± 0.03	32.0 ± 3.0	5.60	2.21 ± 0.04	7.88 ± 0.32	13.01	2.85	21.2(40)	2.71 ± 0.02
12	1.68 ± 0.03	32.8 ± 3.0	5.65	2.40 ± 0.04	8.35 ± 0.33	12.88	2.87	20.2(40)	
13	1.68 ± 0.03	30.1 ± 2.9	5.13	2.41 ± 0.03	8.38 ± 0.32	13.06	2.60	18.6(40)	
14	1.69 ± 0.04	30.1 ± 2.9	5.30	2.32 ± 0.04	8.03 ± 0.33	13.12	2.71	21.3(40)	2.70 ± 0.02
15	1.69 ± 0.04	25.8 ± 3.2	4.53	2.37 ± 0.04	8.22 ± 0.34	13.30	2.31	22.7(40)	
16	1.70 ± 0.04	26.8 ± 3.0	4.87	2.36 ± 0.04	8.03 ± 0.34	13.12	2.50	23.9(40)	
17	1.68 ± 0.03	28.7 ± 2.9	4.90	2.38 ± 0.03	8.23 ± 0.30	13.37	2.48	17.1(40)	
18	1.72 ± 0.03	25.1 ± 3.3	4.72	2.52 ± 0.04	8.83 ± 0.36	13.81	2.44	26.4(40)	2.57 ± 0.06
19	1.71 ± 0.03	32.2 ± 3.3	5.92	2.47 ± 0.04	8.56 ± 0.35	13.92	3.05	19.8(40)	2.70 ± 0.06
20	1.68 ± 0.04	28.0 ± 3.3	4.85	2.44 ± 0.04	8.31 ± 0.34	13.87	2.47	26.4(40)	
21	1.70 ± 0.04	29.2 ± 3.2	5.22	2.35 ± 0.04	7.81 ± 0.35	13.91	2.68	26.8(40)	
22	1.72 ± 0.04	24.0 ± 3.3	4.48	2.41 ± 0.04	8.32 ± 0.36	14.34	2.32	21.6(40)	2.57 ± 0.07
23	1.70 ± 0.04	28.0 ± 3.1	5.07	2.38 ± 0.04	8.02 ± 0.34	14.00	2.60	19.7(40)	
24	1.71 ± 0.04	28.9 ± 3.1	5.31	2.39 ± 0.04	8.02 ± 0.34	14.17	2.73	22.9(40)	2.60 ± 0.02
25	1.68 ± 0.04	29.6 ± 3.1	5.14	2.38 ± 0.04	8.10 ± 0.33	14.03	2.62	21.2(40)	
26	1.69 ± 0.04	26.3 ± 3.0	4.69	2.42 ± 0.04	8.38 ± 0.32	14.51	2.40	19.8(40)	
27	1.73 ± 0.02	55.0 ± 3.9	10.53	2.54 ± 0.05	8.70 ± 0.36	17.39	5.48	19.7(40)	2.76 ± 0.04
28	1.72 ± 0.02	53.2 ± 3.8	10.05	2.57 ± 0.04	8.97 ± 0.35	17.77	5.21	21.0(40)	
29	1.82 ± 0.03	35.2 ± 3.7	8.33	2.48 ± 0.05	8.77 ± 0.37	19.37	4.53	27.1(40)	2.50 ± 0.07
30	1.81 ± 0.03	37.6 ± 3.7	8.76	2.52 ± 0.05	8.69 ± 0.37	18.46	4.75	21.0(40)	
31	1.75 ± 0.02	48.4 ± 4.0	9.70	2.63 ± 0.05	9.12 ± 0.37	17.89	5.09	25.1(40)	
32	1.82 ± 0.03	37.2 ± 3.6	8.91	2.49 ± 0.05	8.77 ± 0.36	19.32	4.86	27.2(40)	2.69 ± 0.05
33	1.72 ± 0.03	31.0 ± 3.9	5.86	2.50 ± 0.05	8.36 ± 0.37	15.55	3.04	28.2(40)	2.58 ± 0.05
34	1.80 ± 0.02	43.6 ± 3.8	9.78	2.59 ± 0.05	8.97 ± 0.37	18.76	5.26	25.6(40)	2.60 ± 0.06
35	1.76 ± 0.02	49.3 ± 3.7	10.15	2.58 ± 0.05	8.75 ± 0.36	17.71	5.36	20.7(40)	2.69 ± 0.06
36	1.69 ± 0.02	58.8 ± 3.9	10.43	2.69 ± 0.04	8.95 ± 0.34	17.43	5.33	26.4(40)	2.68 ± 0.04
37	1.31 ± 0.02	188.1 ± 13.1	11.78	2.39 ± 0.04	6.87 ± 0.27	10.51	4.54	27.6(40)	2.12 ± 0.20
38	1.30 ± 0.03	147.8 ± 14.7	9.04	2.36 ± 0.04	6.94 ± 0.31	11.03	3.45	23.8(40)	2.40 ± 0.06
39	1.30 ± 0.02	167.8 ± 13.7	10.35	2.31 ± 0.03	6.97 ± 0.27	10.61	3.97	23.8(40)	
40	1.30 ± 0.02	171.3 ± 13.1	10.71	2.35 ± 0.03	6.94 ± 0.27	10.61	4.12	17.9(40)	2.42 ± 0.05
41	1.31 ± 0.03	151.7 ± 15.1	9.67	2.30 ± 0.04	6.64 ± 0.30	10.57	3.74	31.7(40)	
42	1.31 ± 0.02	133.8 ± 12.7	8.43	2.26 ± 0.03	6.51 ± 0.28	10.12	3.25	18.2(40)	2.42 ± 0.04
43	1.33 ± 0.02	169.2 ± 12.2	11.55	2.30 ± 0.04	6.77 ± 0.27	10.35	4.57	15.1(40)	2.39 ± 0.08
44	1.29 ± 0.02	151.6 ± 14.3	9.08	2.32 ± 0.03	6.58 ± 0.28	9.85	3.45	23.8(40)	2.43 ± 0.07
45	1.59 ± 0.02	70.5 ± 3.9	9.63	2.42 ± 0.04	7.60 ± 0.30	12.17	4.63	31.2(40)	2.37 ± 0.05
46	1.24 ± 0.02	191.1 ± 12.4	9.78	2.17 ± 0.04	6.06 ± 0.26	6.15	3.52	23.1(40)	2.20 ± 0.16
47	1.20 ± 0.02	174.5 ± 12.2	7.90	2.05 ± 0.05	5.74 ± 0.28	4.54	2.73	39.0(40)	2.05 ± 0.16
48	1.21 ± 0.02	112.1 ± 7.8	5.15	2.05 ± 0.03	4.74 ± 0.25	3.53	1.78	28.6(40)	2.19 ± 0.06

^a – нормировка мягкой спектральной компоненты $N_{diskbb} = \left(\frac{R_{in}(km)}{D_{10kpc}} \right)^2 \cos(\theta)$, where $R_{in}(km)$ – эффективный радиус внутренней части диска, D_{10kpc} – расстояние до источника в единицах 10 кпс, θ – угол наклона плоскости аккреционного диска к лучу зрения

^b – болометрический поток в мягкой спектральной компоненте в единицах $\times 10^{-9} \text{ эрг } c^{-1} \text{ см}^{-2}$

^c – эквивалентное число атомов водорода на луче зрения в единицах $\times 10^{22} \text{ см}^{-2}$

^d – полный поток в диапазоне энергий 3 – 20 кэВ, скорректированный на межзвездное поглощение в единицах $\times 10^{-9} \text{ эрг } c^{-1} \text{ см}^{-2}$

^e – поток в мягкой спектральной компоненте в диапазоне энергий 3 – 20 кэВ, скорректированный на межзвездное поглощение в единицах $\times 10^{-9} \text{ эрг } c^{-1} \text{ см}^{-2}$

^f – фотонный индекс жесткой спектральной компоненты, определенный из аналитической аппроксимации данных HEXTE.

Табл. 9.3. Характеристики спектра мощности 4U 1630–47 в период вспышки 1998 г. Ошибки на параметры соответствуют уровню значимости в 1σ . rms_{total} представляет собой полную среднеквадратическую амплитуду переменности в диапазоне частот 0.02 – 100 Гц, f_{QPO} и rms_{QPO} – центральную частоту и амплитуду переменности фундаментальных QPO–пиков.

Дата, UT	#	rms_{total} , %	f_{QPO} , Hz	rms_{QPO} , %
09/02/98	(1)	27.97 ± 0.24	2.68 ± 0.01 5.60 ± 0.07	14.84 ± 0.90 4.83 ± 0.33
09/02/98	(2)	25.47 ± 0.18	3.21 ± 0.01 6.54 ± 0.08	14.08 ± 0.80 3.93 ± 0.30
11/02/98	(3-5)	12.34 ± 0.09	3.82 ± 0.02 7.77 ± 0.06	4.85 ± 0.30 4.79 ± 0.30
12/02/98	(6-10)	10.83 ± 0.05	4.80 ± 0.01 7.97 ± 0.09	4.44 ± 0.19 3.80 ± 0.35
13/02/98	(11-13)	10.71 ± 0.05	0.079 ± 0.002^1 4.74 ± 0.06 7.05 ± 0.03 13.59 ± 0.08	4.19 ± 0.49 2.61 ± 0.17 3.62 ± 0.11 1.99 ± 0.14
14/02/98	(14-17)	10.56 ± 0.04	0.094 ± 0.002^1 5.38 ± 0.04 7.75 ± 0.13 13.29 ± 0.07	3.03 ± 0.48 4.53 ± 0.16 2.68 ± 0.28 1.97 ± 0.13
15/02/98	(18)	10.10 ± 0.19	0.067 ± 0.005^1 4.69 ± 0.07 7.07 ± 0.04 13.20 ± 0.50	3.77 ± 0.89 2.07 ± 0.29 3.52 ± 0.25 1.95 ± 0.40
16/02/98	(19-21)	9.89 ± 0.10	4.87 ± 0.07 6.94 ± 0.06 13.35 ± 0.15	2.56 ± 0.22 3.44 ± 0.16 1.87 ± 0.20
17/02/98	(22-23)	10.57 ± 0.18	0.097 ± 0.002^1 5.23 ± 0.09 6.62 ± 0.39 13.83 ± 0.34	3.28 ± 0.84 2.67 ± 0.47 4.69 ± 1.04 1.51 ± 0.50
18/02/98	(24-26)	10.24 ± 0.05	0.091 ± 0.002^1 5.03 ± 0.06 6.89 ± 0.15 13.31 ± 0.10	3.53 ± 0.32 3.23 ± 0.29 3.94 ± 0.35 1.77 ± 0.12
19/02/98	(27-28)	2.13 ± 0.23	7.04 ± 0.28 12.56 ± 0.85	1.32 ± 0.26 1.43 ± 0.30
20/02/98	(29-31)	1.93 ± 0.20	–	–
21/02/98	(32)	2.74 ± 0.37	–	–
21/02/98	(33)	10.16 ± 0.32	0.052 ± 0.010^1 4.45 ± 0.16 7.04 ± 0.06 12.25 ± 0.73	2.79 ± 0.83 1.88 ± 0.40 3.05 ± 0.30 1.40 ± 0.63
22/02/98	(34)	2.43 ± 0.50	–	–
23/02/98	(35)	3.09 ± 0.16	–	–
24/02/98	(36)	3.53 ± 0.49	9.50 ± 1.65	1.85 ± 0.45
25/02/98	(37)	3.99 ± 0.17	10.93 ± 0.83	1.75 ± 0.43
26/02/98	(38-39)	3.61 ± 0.44	11.19 ± 0.43	1.86 ± 0.34
27/02/98	(40-41)	4.27 ± 0.19	10.33 ± 0.44	1.78 ± 0.30
28/02/98	(42)	3.74 ± 0.27	10.99 ± 0.13	1.84 ± 0.22
01/03/98	(43)	2.20 ± 0.58	10.76 ± 0.59	1.77 ± 0.47
02/03/98	(44)	1.98 ± 0.69	11.12 ± 0.39	1.62 ± 0.37
09/03/98	(45)	1.93 ± 0.48	7.87 ± 0.26	1.67 ± 0.39
12/03/98	(46)	1.80 ± 0.50	–	–
17/03/98	(47)	1.96 ± 0.75	–	–
19/03/98	(48)	1.74 ± 0.31	–	–

¹ – QPO–пик сопровождается несколькими гармониками.

Табл. 9.4. Свойства различных состояний 4U 1630–47 в период вспышки 1998 г.

Состояние	Дата	F_{total}^a	α^b	E_{cut}^c , кэВ	f_{soft}^d	rms_{total} , %	QPO
Рост потока	9–11 февраля	4–12	1.7–2.2	60–70	< 20 %	12–28	2.5–4 Гц (5–15%)
“Сверхвысокое”	12–18 февраля (<i>плато 1</i>)	12–15	2.2–2.5	>200	14–22 %	10–11	4 QPO на 0.06–14 Гц
	19–24 февраля (<i>плато 2</i>)	17–20	2.5–2.7	>200	23–30 %	2–3.5	слабое или нет
	25 февраля–2 марта (<i>плато 3</i>)	10–11	2.3–2.4	>200	30–45 %	2–4	10–11 Гц (< 2%)
“Высокое” ^e	12 марта – 16 мая	≤ 6	2.0–2.5	>200	> 50 %	< 4	слабое или нет
“Низкое”	после 18 мая	≤ 1	1.5–2.0	50–100	< 10 %	> 20	~0.1–1 Гц

^a – полный поток в диапазоне энергий 3 – 20 кэВ, скорректированный на межзвездное поглощение в единицах $\times 10^{-9} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$

^b – фотонный индекс жесткой спектральной компоненты

^c – энергия завала высокоэнергичной части спектра

^d – вклад мягкой спектральной компоненты в полный поток в диапазоне энергий 3 – 20 кэВ

Табл. 9.5. Основные параметры энергетического спектра 4U 1630–47 в диапазоне энергий 3 – 20 кэВ при максимально низком и высоком уровнях потока для наблюдения 18 февраля (#24), полученные в результате его аппроксимации суммой модели излучения оптически толстого “многоцветного” аккреционного диска и простого степенного закона с коррекцией на межзвездное поглощение, зафиксированное на значении $8 \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$ (данные прибора РСА). Ошибки на параметры соответствуют уровню значимости в 1σ .

	T_d , кэВ	α_{pl}	f_{total}^a	f_{soft}^b	χ^2
Low	1.65 ± 0.06	2.27 ± 0.11	1.20	0.29	34.8(21)
High	1.91 ± 0.20	2.52 ± 0.13	1.62	0.35	29.2(21)

^a – полный поток в диапазоне энергий 3 – 20 кэВ, скорректированный на межзвездное поглощение в единицах $\times 10^{-9} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$

^b – поток в мягкой спектральной компоненте в диапазоне энергий 3 – 20 кэВ, скорректированный на межзвездное поглощение в единицах $\times 10^{-9} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$

Часть VII

**Общие черты эволюции временных
и спектральных характеристик
мягких рентгеновских Новых.**

Как следует из результатов, представленных в работе, эволюция спектрально—временных свойств излучения различных галактических “мягких”¹ рентгеновских Новых демонстрирует ряд общих закономерностей и может быть представлена как последовательность феноменологических состояний, использующихся для описания свойств всего класса кандидатов в черные дыры (Tanaka & Lewin 1995). Можно выделить несколько важнейших закономерностей:

1. Кривые блеска этих источников в стандартном рентгеновском диапазоне (2–12 кэВ) характеризуются наличием сравнительно быстрого первоначального роста рентгеновского потока, сменяющегося короткой фазой максимума и продолжительным квазиэкспоненциальным спадом, изредка нарушаемым одним или несколькими вторичными максимумами (Рис. 9.12).

2. Комплекс спектрально—временных свойств источников в период первоначального нарастания рентгеновского потока свидетельствует в пользу того, что данное состояние не может быть классифицировано ни как “низкое”, ни как “высокое/сверхвысокое” состояние и, вероятно, является переходным. Широкополосный энергетический спектр источника в этот период достаточно жесткий ($\alpha \sim 2$) и имеет завал в области энергий $\sim 60–70$ кэВ, вклад мягкой спектральной компоненты в полную светимость достаточно мал: $< 20\%$, что чрезвычайно похоже на свойства “низкого” состояния (Рис. 5.5, 9.7). В то же время, спектр мощности источника имеет черты, свойственные спектрам мощности кандидатов в черные дыры в “сверхвысоком” спектральном состоянии. Эволюция спектрально—временных параметров источников в этот период характеризуется укрупнением жесткой спектральной компоненты, повышением вклада мягкой спектральной компоненты в общую рентгеновскую светимость и сдвигом максимума спектра мощности в область более высоких частот (самоподобное сокращение временных масштабов переменности).

3. “Сверхвысокое” спектральное состояние (как правило соответствующее максимуму и начальной фазе спада вспышки) характеризуется присутствием сильной или доминирующей жесткой спектральной компоненты и наличием мощных частотно—ограниченных и QPO шумовых компонент спектра переменности. Изменение свойств переменности источника четко скоррелировано с изменением параметров энергетического спектра

4. “Высокое” (спад вспышки и вторичные максимумы) спектральное состояние отличается доминирующей ролью мягкой компоненты энергетического спектра и низким уровнем переменности рентгеновского потока.

5. Изменение свойств переменности источников в фазе первоначального нарастания потока и “сверхвысоком” состоянии четко скоррелировано с изменением параметров энергетического спектра. Увеличение светимости сопровождается укрупнением жесткой компоненты энергетического спектра и увеличением относительного вклада мягкой компоненты в полный рентгеновский поток. Эволюция спектра мощности характеризуется положительной корреляцией между центральной частотой QPO и частотами характеристических слов частотно—ограниченных шумовых

¹Под “мягкими” рентгеновскими Новыми подразумеваются транзиентные источники, в эволюции которых присутствуют фазы, в которых заметную роль в энергетическом спектре играет мягкая тепловая компонента.

компонент. Рост светимости источника сопровождается увеличением характерной частоты максимума его спектра мощности и, в особенности, центральной частоты QPO; полный рентгеновский поток и болометрический поток в мягкой спектральной компоненте демонстрируют четкую корреляцию с частотой QPO.

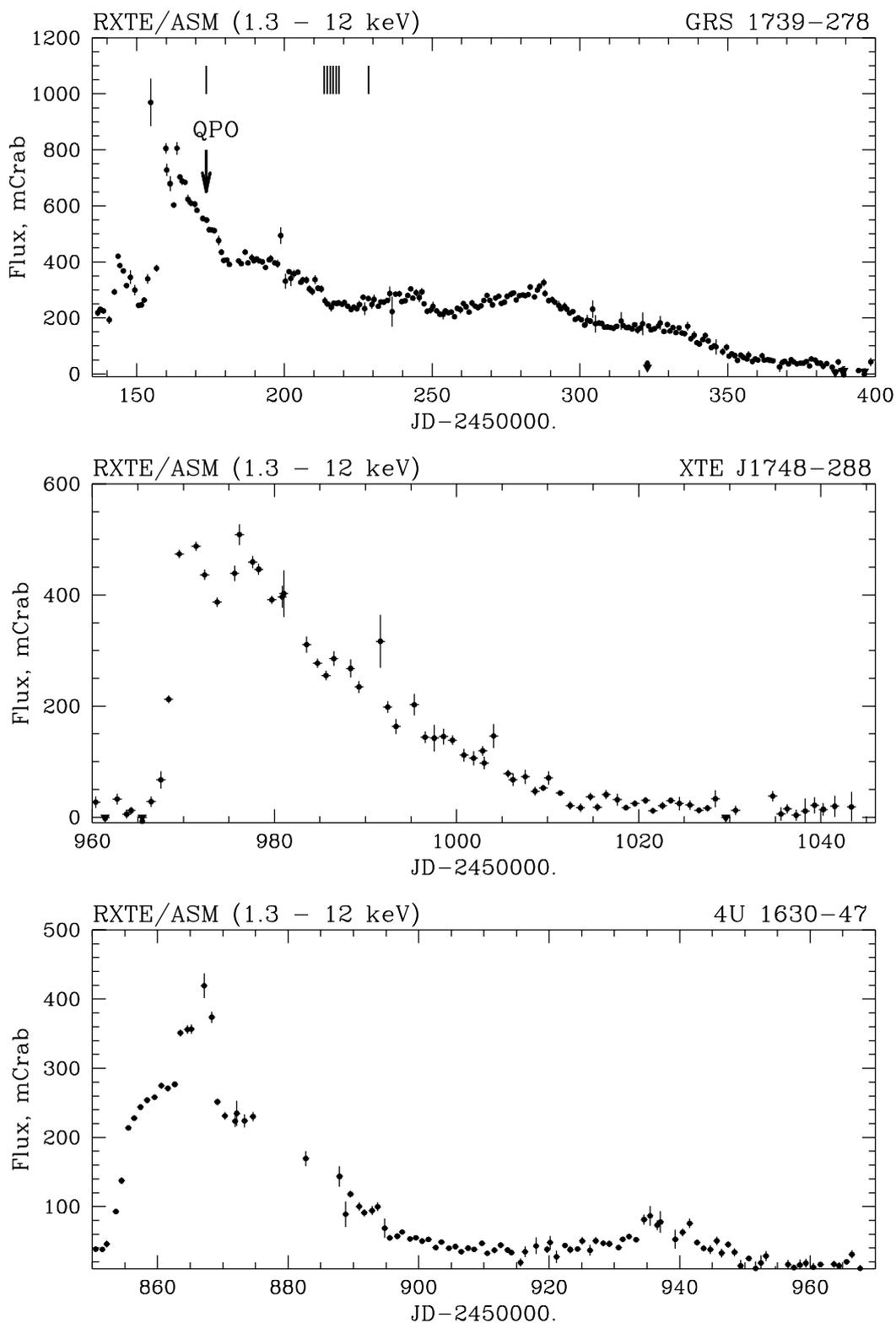


Рис. 9.12. Кривые блеска GRS 1739–278, XTE J1748–288 и 4U 1630–47 в стандартном рентгеновском диапазоне (1.3 – 12 кэВ), полученные по данным монитора всего неба (ASM) орбитальной обсерватории RXTE. По оси времен отложены усеченные Юлианские даты: $TJD = JD - 2450000$., потоки от источников приведены в стандартных единицах потока от Крабовидной туманности.

Часть VIII

Приложение

ПРИЛОЖЕНИЕ

Перенос массы в двойной системе

Рассмотрим двойную систему, состоящую из компактного объекта массы M_1 и нормальной звезды массы M_2 , обращающихся с частотой Ω_B вокруг общего центра.

Если нормальный компонент системы заполняет свою полость Роша, его вещество начинает перетекать на другой компонент через окрестность внутренней точки Лагранжа (Lubow & Shu, 1975; Pringle *et al.*, 1985; Livio, 1992). Рассмотрим качественно гидродинамическую задачу о перетекании вещества в вышеуказанном случае. В целях наглядности считаем, что звезда-компаньон имеет достаточно протяженную конвективную оболочку (что справедливо в случае маломассивных звезд на поздней стадии эволюции), и состояние газа описывается уравнением политропы: $p = K\rho^{5/3}$.

Приращение потенциала Роша в точке $L_1 = (x_1, 0)$, $\Delta\phi = 0$, тогда:

$$\Delta\phi = \phi(x_1, y, 0) - \phi(x_1, 0, 0) \simeq \frac{1}{2} \frac{d^2\phi}{dy^2} y^2|_{L_1} \quad (9.1)$$

Из уравнения для $\phi(x, y)$: $\frac{d^2\phi}{dy^2} \sim \Omega_B^2$.

Процесс перетекания через окрестность точки L_1 сходен с процессом истечения газа через сопло в вакуум: скорость потока приблизительно равна тепловой скорости в газе. Характерное сечение, W , “сопла” может быть оценено из условия достаточности кинетической энергии элемента вещества для преодоления разности гравитационных потенциалов в точках (x_1, W) и $L_1 = (x_1, 0)$, принимающего следующий вид:

$$c_s^2 \simeq \Delta\phi(x_1, W) \simeq \Omega_B^2 W^2, \quad (9.2)$$

откуда:

$$W \simeq \frac{c_s}{\Omega_B} \quad (9.3)$$

Выразим W через параметры звезды-компаньона; из условия гидростатического равновесия атмосферы звезды:

$$-\frac{GM_2}{R^2} = \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dz} = \frac{p}{\rho} \frac{1}{p} \frac{dp}{dz} \simeq \frac{c_s^2}{H}, \quad (9.4)$$

где H - характерная высота атмосферы, R - радиус нормальной звезды. Так как радиус R порядка расстояния между компонентами в тесной двойной системе, уравнение (9.4) может быть переписано в виде: $\Omega_B^2 \sim c_s^2/(HR)$, что вместе с (9.3) дает:

$$W \simeq \sqrt{HR} \quad (9.5)$$

Теперь оценим темп переноса массы \dot{M} через окрестность внутренней точки Лагранжа (L_1), считая что площадь сечения “сопла” порядка W^2 :

$$\dot{M} \sim \rho c_s W^2|_{L_1} \sim \frac{\rho c_s^3}{\Omega_B^2}|_{L_1} \quad (9.6)$$

Определим степень переполнения полости Роша звездой-компаньоном, введя параметр ΔR , равный разности радиуса звезды R и характерного радиуса ее полости Роша R_L . Для принятого ранее уравнения состояния газа $p = K\rho^{5/3}$ имеем: $\rho \sim c_s^3$. Приняв $H \sim \Delta R$, получим:

$$\frac{c_s^2}{\Delta R} \sim \frac{GM_2}{R^2} \sim \Omega_B^2 R \quad (9.7)$$

Подставив в (9.7) выражения для ρ , c_s , W , получаем:

$$\dot{M} \simeq AM_2\Omega_B \left(\frac{\Delta R}{R}\right)^3, \quad (9.8)$$

где A - безразмерный коэффициент, зависящий от профиля плотности в оболочке нормальной звезды и соотношения масс компонент системы (Meyer & Meyer-Hofmeister, 1983).

Литература

- Livio 1992//Livio, M. 1992 in 22d Saas Fee Advanced Course, Interacting Binaries, ed. H. Nussbaumer
 Lubow & Shu 1975//Lubow, S.H., Shu, F.H. 1975 ApJ, **198**, 383
 Meyer F. & Meyer-Hofmeister E.//Meyer F. & Meyer-Hofmeister E. 1983, A&A, **121**, 29