

ПРОСВЕТОВ Артем Владимирович

**ПЕРЕМЕННОСТЬ
РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
И ШИРОКОПОЛОСНЫЕ СПЕКТРЫ
АККРЕЦИРУЮЩИХ ЧЁРНЫХ ДЫР
В МАЛОМАССИВНЫХ
ДВОЙНЫХ СИСТЕМАХ**

Специальность:

01.03.02 — Астрофизика и звёздная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук



Работа выполнена в Институте космических исследований
Российской академии наук (ИКИ РАН)

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, заведующий астрономическим
отделом Главной (Пулковской) астрономической обсерватории
Российской академии наук (ГАО РАН)

ГНЕДИН Юрий Николаевич

доктор физико-математических наук, руководитель отдела
релятивистской астрофизики Государственного астрономического
института им. П. К. Штернберга Московского государственного
университета имени М. В. Ломоносова (ГАИШ МГУ)

ШАКУРА Николай Иванович

Ведущая организация:

Казанский (Приволжский) федеральный университет (КФУ)

Защита диссертации состоится **19 декабря 2016 года в __ часов**
на заседании диссертационного совета Д 002.113.02 на базе ИКИ РАН
по адресу: 117997, Москва, Профсоюзная ул., 84/32, ИКИ РАН,
конференц-зал

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИКИ РАН

Автореферат разослан __ октября 2016 года

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 002.113.02



О. Ткаченко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Рентгеновские новые (маломассивные двойные, обычно находящиеся в «выключенном» состоянии, но временами вспыхивающие на несколько месяцев из-за нестационарной аккреции на чёрную дыру или нейтронную звезду со слабым магнитным полем) интересны тем, что содержат более 80 % (Черепашук, 2003) всех чёрных дыр, открытых в Галактике.

Во «включённом» высоком состоянии в их рентгеновском спектре наблюдаются две компоненты излучения: мягкая, связанная с чёрнотельным излучением внешних холодных непрозрачных областей аккреционного диска, и жёсткая, степенная с фотонным индексом $\sim 1,5-2,5$, простирающаяся до энергий $E > 100$ кэВ. Считается, что она формируется в результате комптонизации низкочастотных фотонов во внутренней горячей оптически тонкой области диска, раздутой из-за тепловой неустойчивости (Сюняев, Титарчук, 1980). Когда источник находится во «включённом» низком состоянии, эта область имеет особенно большой размер и на энергиях $h\nu > 1$ кэВ в спектре видна только жёсткая компонента; внешние области диска, как предполагается, отвечают лишь за ультрафиолетовое, оптическое и инфракрасное излучение системы. Собственное излучение диска в этих диапазонах может многократно усиливается из-за рентгеновского облучения и прогрева поверхности внешних областей. Так как система маломассивная, оптическое излучение звезды-спутника мало, поэтому создаются идеальные условия для исследования взаимосвязи оптического и рентгеновского излучения диска и проверки описанной выше картины его формирования.

К сожалению, одновременные рентгеновские и оптические наблюдения рентгеновских новых в жёстком состоянии пока достаточно редки и сколько-нибудь полного сравнения теории с наблюдениями сделано не было. Немногие существующие наблюдения не дают оснований успокаиваться:

- корреляция оптического и рентгеновского излучения как на короткой временной шкале (секунды и миллисекунды, см. Канбах и др., 2001), так и на масштабе дней и месяцев (например, Кориат и др., 2009) оказывается более сложной, чем в описанной простой картине;
- рентгеновский прогрев в пределах стандартного аккреционного диска — недостаточно сильным, чтобы объяснить наблюдаемые оптические потоки (Сулейманов и др., 2008);
- широкополосный спектр излучения источника, по крайней мере в отдельных случаях, описывается единым степенным законом не только в рентгеновском, но и в оптическом и радиодиапазонах (например, Томсик и др., 2008).

Все эти факты заставляют задуматься о роли синхротронного излучения и других нетепловых процессов в его формировании (Веледина, Поутанен, 2015). В этих условиях любые новые наблюдения источников — кандидатов в чёрные дыры, выполненные одновременно в рентгене и оптике, приобретают важнейшее значение. Исследованию связи оптической, инфракрасной и ультрафиолетовой компоненты излучения с рентгеновской в маломассивных двойных системах посвящена одна из частей данной диссертационной работы.

Другим наиболее характерным наблюдательным проявлением аккрецирующих чёрных дыр в двойных системах является быстрая нерегулярная переменность рентгеновского излучения (Гребенев и др., 1993; ван дер Клис, 2006). Переменности подвержено прежде всего жёсткое излучение, формирующееся в результате комптонизации в центральной горячей оптически тонкой области аккреционного диска (или в разреженной короне над оптически толстым диском). В условиях действия высоких температур, магнитоактивных процессов, сильной турбулентности, растущей роли давления излучения и необходимости эффективного перераспределения энергии от ионов к электронам развивается целый спектр неустойчивостей (тепловая, магниторотационная, вязкостная и др.), которые и приводят к наблюдаемой переменности. Естественно ожидать, что исследуя переменность рентгеновского излучения, можно получить

важную информацию как собственно о неустойчивостях, так и в целом о структуре и основных параметрах аккреционного течения в диске.

Исследования переменности, как правило, ограничиваются построением по рентгеновским кривым блеска источника в разных диапазонах энергий спектров фурье-мощности и кросс-корреляционных функций (ван дер Клис, 1989). Получаемые спектры мощности обычно состоят из одной или нескольких компонент частотно-ограниченного («красного») шума (Нолан и др., 1981; ван дер Клис, 2006) и иногда — пиков квазипериодических осцилляций (quasi-periodic oscillation, QPO) на низких (0,1–1 Гц; Гребенев и др., 1991; Вихлинин и др., 1994б) и/или высоких (~10 Гц; Миямото и др., 1990; Беллони и др., 2012) частотах. Было предложено много разных моделей для объяснения таких спектров (например, Нолан и др., 1981; Бэк и др., 1987; Вихлинин и др., 1994а; Минешиге и др., 1994; Любарский, 1997; Титарчук и др., 2007), но ни одна из них не даёт полной, исчерпывающей (и бесспорной!) картины их формирования, а механизм возникновения QPO, похоже, и во все остаётся необъяснённым. К тому же, являясь статистическими моментами второго порядка, спектры мощности неизбежно несут лишь ограниченную информацию о нелинейных механизмах переменности, по сравнению с исходными кривыми блеска. Все более очевидно, что анализ спектров мощности и кросс-корреляционных спектров, если и ни исчерпал себя, дать новые идеи для теоретического моделирования дисковой аккреции уже не может и для исследования быстрой переменности таких систем необходимо искать другие более изощрённые методы. В ряде работ (например, Лохнер и др., 1989; Миямото и др., 1990) такие попытки уже предпринимались. Применение элементов фрактального анализа для систем, содержащих чёрную дыру, проводилось авторами работы (Лохнер и др., 1989), однако их внимание было направлено на анализ траекторий в фазовом пространстве и поиск по этим траекториям аттракторов малой размерности. Оценка фрактальной размерности кривой блеска наиболее известного источника, содержащего аккрецирующую чёрную дыру, Cyg X-1 была выполнена Миямото и др. (1988) по данным спутника GINGA. Они нашли, что в стандартном рентгеновском диапазоне с уменьшением временного масштаба от 3 до 0,1 с фрактальная размерность кривой блеска источника уменьшается до ~1,6. Авторы работы (Миямото и др.) использовали box-counting-метод, и эти результаты могут быть проверены и улучшены с помощью более современных методов R/S-анализа и MF-DFA-

анализа. Этому исследованию посвящена вторая часть диссертационной работы. В целом данное исследование показывает, что анализ кривых блеска чёрных дыр с помощью фрактальной размерности имеет научный потенциал и может дать дополнительную информацию о геометрии аккреционного течения в маломассивных двойных системах, содержащих чёрную дыру или нейтронную звезду.

Цель работы

Цель данной диссертационной работы состоит в исследовании свойств аккрецирующих чёрных дыр, входящих в маломассивные двойные системы, а именно:

- в исследовании свойств излучения маломассивных двойных систем, содержащих чёрную дыру, в широком — от оптического и инфракрасного — до жёсткого рентгеновского диапазонов энергий;
- в исследовании быстрой переменности рентгеновского излучения чёрных дыр в маломассивных двойных системах, в том числе методами фрактального анализа.

Круг задач диссертационной работы включает:

- анализ широкополосных (от инфракрасного до жёсткого рентгеновского диапазона) спектров излучения чёрных дыр в маломассивных двойных системах, а также выявление механизмов, ответственных за эти спектры излучения в разных спектральных состояниях источников;
- исследование корреляции оптической, инфракрасной и ультрафиолетовой компонент излучения с рентгеновской в маломассивных двойных системах, содержащих чёрную дыру;
- проверку соответствия общепринятой модели оптического и инфракрасного излучения аккрецирующих чёрных дыр в маломассивных двойных системах с наблюдательными данными;
- исследование явления QPO в кривых блеска аккрецирующих чёрных дыр, а также корреляции параметров QPO с другими наблюдательными проявлениями чёрных дыр;
- применение методов фрактального анализа для получения новой информации о физических процессах, ответственных за наблюдаемую форму спектров мощности рентгеновского излучения чёрных дыр и, прежде всего, за формирование QPO.

Научная новизна

В диссертационной работе получены указания на то, что оптическое и инфракрасное излучение аккрецирующих чёрных дыр в маломасштабных двойных системах формируется отличным от предполагавшегося ранее способа. Этот вывод имеет большое значение для теоретической интерпретации излучения таких систем, для построения общей модели, способной объяснить их наблюдательные проявления, а также для планирования и интерпретации оптических и широкополосных наблюдений этих источников.

К исследованию быстрой переменности кривых блеска аккрецирующих чёрных дыр применены методы фрактального анализа и продемонстрирована их перспективность в оперативном выявлении сеансов наблюдений, содержащих QPO. Это позволяет более эффективно планировать наблюдения и исследовать быструю переменность источников. Показана связь фрактальной размерности кривых блеска данных источников с параметрами спектра мощности, а также с формой отдельных рентгеновских всплесков, её формирующих, что позволяет поставить новые ограничения на конкурирующие модели формирования LFN и QPO.

Теоретическая и практическая ценность работы

Чёрные дыры — уникальные объекты, привлекающие к себе огромное внимание вследствие загадочности и удивительности происходящих вблизи них процессов, а также в силу экстремального состояния вещества, излучения, магнитного и гравитационного поля в их окрестности. Процессы, происходящие в таких условиях, невозможно смоделировать на Земле в лабораториях, поэтому наблюдение чёрных дыр способно дать очень весомый вклад в фундаментальную физику. В работе получены указания на то, что оптическое и инфракрасное излучение аккрецирующих чёрных дыр в маломасштабных двойных системах формируется отличным от предполагавшегося ранее способом. Этот вывод имеет огромное значение для теоретической интерпретации таких систем, для построения общей модели, способной объяснить наблюдательные проявления, а также для планирования и интерпретации оптических и широкополосных наблюдений таких систем. К исследованию кривых блеска аккрецирующих чёрных дыр применён метод фрактального анализа и показана его перспективность в исследовании быстрой переменности

их излучения. С помощью этого нового метода получены важные ограничения на модель формирования LFN и QPO в спектрах мощности, что позволит сдвинуть вперед исследования в этой области, пребывающие в последние годы в состоянии близком к стагнации, и дать им новый импульс для развития.

Апробация работы

Результаты диссертационной работы представлялись на семинарах отдела астрофизики высоких энергий Института космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) и конференциях молодых учёных, проводимых в ИКИ РАН, Международной научной конференции INTEGRAL Workshop (Дублин, 2010), всероссийских конференциях серии «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра» (Москва, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014), Всероссийских научных конференциях Московского физико-технического института (МФТИ) (53-я, 54-я, 55-я), Международной конференции «Зельдович-100» (Москва, 2014), Международной конференции «Физика нейтронных звёзд» (Санкт-Петербург, 2011, 2014), докладывались на Международной ассамблее COSPAR (Committee on Space Research, Москва, 2014), Международной конференции MSS-14 «Трансформация волн, когерентные структуры и турбулентность» (Москва, 2014).

Список трудов в реферируемых журналах по теме диссертации включает 5 работ.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, двух глав (второй и третьей), заключения и списка цитируемой литературы. Объём диссертации — 97 страницы, в том числе 44 рисунка и 7 таблиц. Список литературы содержит 115 ссылок.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во **Введении** даётся обзор представлений о чёрных дырах, описание проблем, затронутых в диссертационной работе, ставятся цели

и обосновывается актуальность работы; приводятся описание используемых в исследовании оптических и рентгеновских телескопов и обсерваторий INTEGRAL, SWIFT, RXTE, PTT-150, а также даётся описание методов R/S-анализа и MFDFA-анализа.

Вторая глава диссертационной работы посвящена исследованию рентгеновских новых в широком энергетическом диапазоне от оптического, инфракрасного и ультрафиолетового до жесткого рентгеновского излучения.

Исследованию рентгеновской новой SWIFT J174510.8-262411 посвящена *первая часть второй главы*. Параграфы 2.1.1 и 2.1.2 содержат краткое описание источника и описание анализа данных соответственно. Рентгеновская новая SWIFT J174510.8-262411, известная также под именами SWIFT J1745.1-2624 или SW J1745-26, была впервые обнаружена 16 сентября 2012 г. в $\sim 2,5^\circ$ от галактического центра (Каммингс и др., 2012а,б; Вовк и др., 2012), но оставалась достаточно яркой и год спустя. Согласно наблюдениям спутника SWIFT и обсерватории INTEGRAL в рентгеновском диапазоне ранней весной 2013 г. она характеризовалась жёстким степенным спектром излучения с фотонным индексом $\alpha \approx 1,4 \pm 0,1$ (Сбаруфати и др., 2013; Куулкерс и др., 2013), близким к наблюдавшемуся в первые дни после начала вспышки (Вовк и др., 2012; Томсик и др., 2012; Гребенев, Сюняев, 2012; Беллони и др., 2012). Параграф 2.1.3 содержит подробное описание результатов квазиодновременных наблюдений источника в различных энергетических диапазонах. Приведена долговременная кривая блеска, а также изображение источника, полученное телескопом RTT-150 3 июня 2013 г. в оптических фильтрах i, r, g . Потоки от источника в оптических фильтрах z, i, r, g сведены в таблицу. Также приведён широкополосный спектр излучения источника SWIFT J174510.8-26241 по наблюдениям телескопами обсерваторий SWIFT и PTT-150 в мае-июне 2013 г. Оказалось, что спектр излучения источника на затухающей стадии вспышки хорошо описывается простым степенным законом с поглощением (например, Сбаруфати и др., 2013). Сделана оценка допустимого размера области возможного чёрнотельного излучения аккреционного диска в источнике в мае-июне 2013 г. согласно его наблюдению телескопами обсерватории SWIFT и PTT-150 (рис. 1). Присутствие аккреционного диска во время жёсткого (низкого) спектрального состояния чёрных дыр в двойных системах предполагает широко известная модель «усечённого» аккреционного диска. Холодное кольцо может присутствовать на радиусах $R_{in} \gtrsim 6 \cdot 10^5$ км только при ограниченных значениях температуры его поверхности ($T \lesssim 0,4$ эВ).

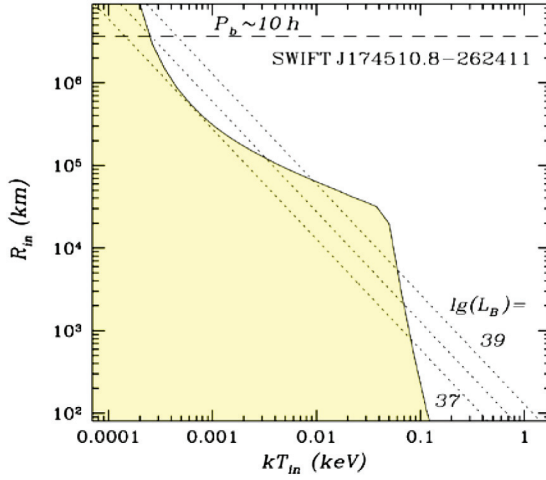


Рис. 1. Допустимый размер области возможного чёрнотельного излучения аккреционного диска в источнике SWIFT J174510.8-262411 в мае-июне 2013 г. согласно его наблюдению телескопами обсерватории SWIFT и PTT-150 (см. текст). Пунктирными линиями показана зависимость внутреннего радиуса диска от температуры для стандартного диска при полной светимости $LB = Mc^2/12$, равной 10^{39} , 10^{38} и 10^{37} эрг·с⁻¹ (M — темп аккреции), штриховой кривой — размер двойной системы с периодом 10 ч, характерным для рентгеновских новых

Существование холодного кольца на радиусах $R_{in} \lesssim 6 \cdot 10^5$ км возможно при условии, что полная светимость не превышает 10^{37} эрг/с, однако физически представить такой диск довольно сложно.

Вторая часть второй главы посвящена исследованию рентгеновского транзиента MAXI J1836-194. В параграфах 2.2.1 и 2.2.2 представлено краткое описание источника MAXI J1836-194 и результаты анализа данных наблюдений обсерваторий INTEGRAL и SWIFT соответственно. Приведена кривая блеска источника MAXI J1836-194 с момента его открытия в августе 2011 г. по конец июля 2012 г., полученная телескопами XRT, UVOT и BAT обсерватории SWIFT, а также приведён фрагмент кривой блеска, полученный телескопом IBIS обсерватории INTEGRAL. Поток как жёсткого, так и мягкого излучения, дойдя до некоторого уровня (~ 10 мКраб в диапазоне BAT и 1,5 мКраб в диапазоне XRT), замедлил дальнейшее падение и более месяца оставался неизменным, после чего резко скачком упал ниже уровня детектирования.

Как рентгеновская переменность источника, так и его оптическая переменность в целом показывают высокую степень корреляции с эволюцией жёсткого рентгеновского потока на масштабе дней и недель. На рис. 2 приведён спектр излучения источника MAXI J1836-194, полученный по данным его квазиодновременных наблюдений телескопами IBIS/ISGRI, XRT и UVOT 27–28 марта 2012 г.

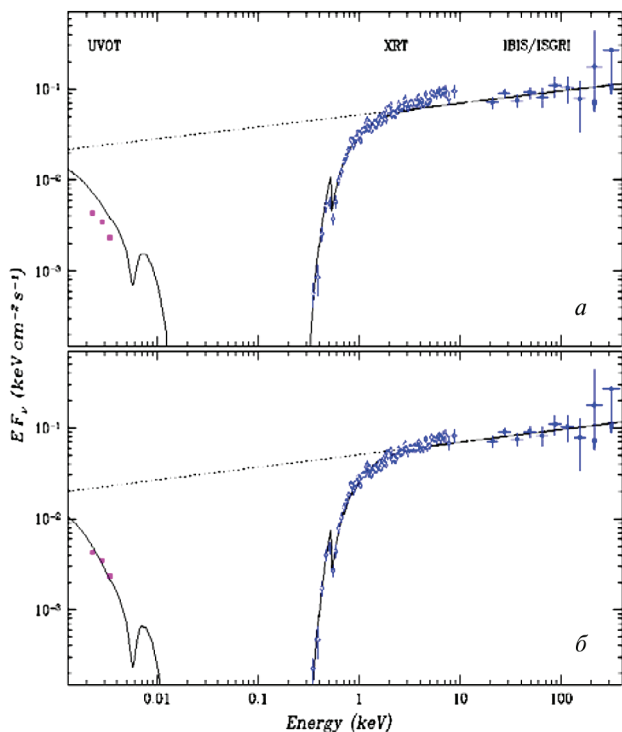


Рис. 2. Спектр рентгеновского излучения источника MAXI J1836-194, полученный обсерваториями INTEGRAL и SWIFT 27–28 марта 2012 г. Сплошной линией показана его аппроксимация степенной моделью с поглощением, пунктирной линией — та же модель, скорректированная на поглощение. Рисунки отличаются использованием разных подходов к аппроксимации спектров: используется либо χ^2 -, либо С-статистика. Соответственно лучше или хуже описываются данные в мягком (0,6–3 кэВ) или жёстком (5–8 кэВ) диапазонах телескопа XRT. Оптические точки при аппроксимации не учитывались, тем не менее, видно, что в случае экстраполяции степенного спектра в оптическую область прекрасно согласуется с наблюдениями

Рентгеновский спектр достаточно хорошо описывается простой степенной моделью с поглощением в широком диапазоне 0,3–400 кэВ без признаков завала на высоких энергиях или дополнительной компоненты излучения на низких. Единственное отличие спектра от этой модели наблюдается в диапазоне 5–8 кэВ. Необходимо отметить, что именно в этой области энергий количество отсчётов, зарегистрированных телескопом XRT в отдельных пикселах, быстро уменьшается и аппроксимацию спектров правильнее проводить, используя не стандартную статистику χ^2 , а так называемую С-статистику (Ноусек, Шу, 1986). Проведённая с её помощью аппроксимация показывает, что действительно — интенсивность отмеченной особенности заметно уменьшается, а найденное таким образом решение описывает широкополосный спектр более естественным и физически обоснованным образом (см. рис. 2b). Замечательно, что когда полученная с помощью С-статистики степенную модель рентгеновского спектра была продолжена в оптическую область, она точно прошла через все U-, B-, V-точки, полученные телескопом UVOT обсерватории SWIFT в ходе одновременных наблюдений. Таким образом, во время исследуемых наблюдений спектр источника описывался единым степенным законом в широчайшем диапазоне энергий от оптики до мягких гамма-лучей.

Третья часть второй главы посвящена исследованию рентгеновского транзиента MAXI J1828-249. В параграфах 2.3.1 и 2.3.2 представлено краткое описание источника MAXI J1828-249 и результаты анализа данных наблюдений обсерваторий INTEGRAL, SWIFT и RTT-150. Приведена кривая блеска с момента открытия транзиента (15 октября 2013 г.) и до конца февраля 2014 г. В мягком (2–4 кэВ) диапазоне вспышка транзиента имеет характерный для рентгеновских новых вид FRED с быстрым (~5 дней) подъёмом до уровня ~100–150 мКраб и медленным (~50 дней) квазиэкспоненциальным спадом. Через ~50 дней началась вторая намного более слабая вспышка источника, что также характерно для новых (так называемое «колено» в их кривых блеска). По наблюдениям в январе 2014 г. поток в мягких диапазонах (особенно в диапазоне 4–10 кэВ) был всё ещё заметно выше, чем перед началом второй вспышки. Необходимо отметить короткий (~10 дней) провал на ~40–50 % в кривой блеска в диапазоне 2–4 кэВ, наблюдающийся вскоре после максимума блеска. Подобный провал наблюдался ранее в кривой блеска рентгеновской новой MAXI J1836-194 и был объяснён переходом источника в более жёсткое спектральное состояние в стандартном рентгеновском диапазоне, вероятно, свя-

занное с исчезновением мягкой чёрнотельной спектральной компоненты (или заметным уменьшением её температуры). В жёстком (>20 кэВ) диапазоне поток от источника после его резкого включения 15 октября 2013 г. до уровня ~ 40 мКраб в дальнейшем менялся плавно, демонстрируя медленный рост до ~ 60 мКраб в первые два месяца после вспышки и последующий столь же медленный спад до ~ 40 мКраб. Через ~ 100 дней после начала вспышки поток скачкообразно уменьшился в ~ 4 раза, а затем продолжил медленно падать. Спектральные измерения, выполненные в это время (14 февраля 2014 г.) телескопом SWIFT/XRT, показали, что источник перешёл в жёсткое состояние и его рентгеновский $0,5\text{--}10$ кэВ спектр описывается простым степенным законом с фотонным индексом $1,7 \pm 0,15$ (Томсик, Корбел, 2014). К этому моменту относятся и первая регистрация радиоизлучения от источника MAXI J1828-294 (Корбел, 2014). Радиоисточник был зарегистрирован с потоком $\approx 1,3$ мЯн на $3,5$ см и имел плоский спектр, предполагающий синхротронное происхождение и самопоглощение. Также приведены кривые блеска источника в оптическом и ультрафиолетовых фильтрах (U, B и W1) по данным измерений телескопом UVOT обсерватории SWIFT. Наблюдаемая переменность во многих деталях повторяет переменность в мягком рентгеновском диапазоне, свидетельствуя, что OUV-излучение формируется в той же области, что и рентгеновское, скорее всего — в аккреционном диске. Ещё лучше это видно на рентгеновских кривых блеска за период с октября 2013 г. по февраль 2014 г., которые даны в сравнении с кривой блеска в фильтре M2 телескопа UVOT. В обоих диапазонах поток падает по единому закону. Для исследования эволюции широкополосного спектра источника из всех имеющихся данных были отобраны семь интервалов времени с максимально широким энергетическим покрытием от оптики до жесткого рентгена. Спектр излучения источника, полученный во время первого интервала наблюдений (15–18 октября 2013 г.), т.е. почти сразу после открытия, приведён на рис. 3. Использовались данные квазиодновременных наблюдений телескопами IBIS/ISGRI, BAT, XRT и UVOT. Относительная нормировка данных полагалась равной единице для всех приборов. Штриховой линией показан результат его наилучшей аппроксимации, сплошной — тот же модельный спектр, скорректированный на поглощение в межзвёздной среде (т.е. исходный спектр источника). Поглощение в низкочастотной части рентгеновского спектра описывалось аппроксимацией Мориссона, Маккамона (1981, программа *WABS* в XSPEC), в оптическом спектре — программой

REDDEN, где цветовая поправка $E(B-V)$ полагалась равной величине $N_H/(5,6 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2})$ (см. Драйн, 2003). Стоит отметить ещё раз, что измеренное значение N_H оказалось очень близким к среднему галактическому поглощению, ожидаемому в данном направлении, $N_H \cong (1,7 \pm 0,2) \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2}$ (Калберла и др., 2005). На энергиях ниже $\sim 25 \text{ эВ}$ в рамках данной модели в наблюдаемом спектре источника доминирует степенная компонента излучения, почти на порядок величины превосходящая поток излучения, связанный с вязкой диссипацией энергии во внешних областях диска.

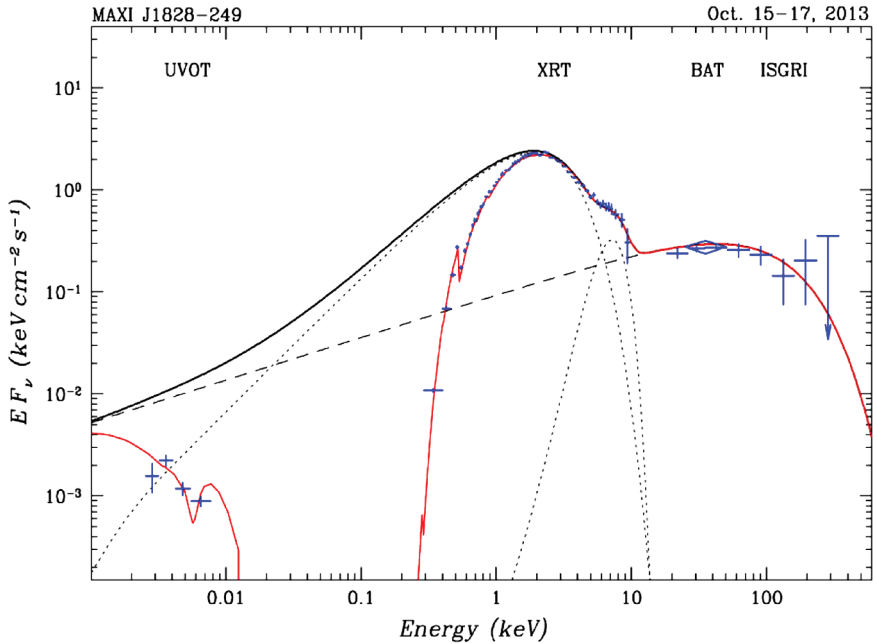


Рис. 3. Широкополосный (0,002–400 кэВ) спектр излучения источника MAXI J1828–249, полученный обсерваториями INTEGRAL и SWIFT 15–18 октября 2014 г. Жирной сплошной (чёрной) линией показана его аппроксимация принятой моделью (см. текст), тонкой сплошной (красной) линией — та же модель, после учёта межзвёздного поглощения. Штриховой линией показана жёсткая компонента спектральной модели, связанная с комптонизацией (аппроксимированная степенным законом с экспоненциальным завалом на высоких энергиях), пунктирными — другие компоненты модели: излучение чёрнотельного диска и гауссова линия флуоресценции железа на энергии 6,4 кэВ

Считается, что рентгеновское излучение внутренних областей диска может перехватываться внешними областями и, перерабатываясь в них, повышать температуру поверхности диска. Соответственно, должно увеличиваться OIR-излучение системы. Поток излучения, переизлучаемый единицей поверхности диска, в инфракрасной и оптической областях даётся уравнением (Шакура, Сюняев, 1973; Лютый, Сюняев, 1976):

$$Q_{irr} = \frac{L_x(1-\beta_d)}{4\pi R^2} \left(\frac{H}{R} \right)^m \left(\frac{d \ln H}{d \ln R} - 1 \right).$$

Здесь $H \approx R'$ — полутолщина диска на данном радиусе; $\beta_d \approx 0,9$ — рентгеновское альbedo его поверхности (учитывающее, что излучение падает под очень малыми углами); $m = 1$, если внутренняя область диска раздута из-за тепловой и вековой неустойчивости и поэтому излучает почти изотропно, и $m = 2$, если излучающая область имеет плоскую поверхность. Будем предполагать $m = 1$. Сравнение Q_{irr} с потоком излучения, связанным с вязкой диссипацией энергии в диске (Шакура, Сюняев, 1973)

$$Q_{vis} = \frac{3}{8\pi} \frac{GM\dot{M}}{R^3} \left[1 - \left(\frac{R_0}{R} \right)^{1/2} \right] \approx \frac{3L_d}{4\pi R^2} \left(\frac{R_0}{R} \right)$$

показывает, что рентгеновский прогрев поверхности диска преобладает над вязким на расстояниях R от центра, превышающих критический радиус

$$R_{irr} \approx \frac{30}{\gamma-1} \left(\frac{L_d}{L_x} \right) \left(\frac{H}{R} \right)^{-m} R_0 \sim 36000 \left(\frac{L_d}{L_x} \right) R_0.$$

Основной вклад в оптическое излучение диска без рентгеновского прогрева дают области вблизи радиуса $R_v \approx 9600 (L_d/10^{38} \text{ эрг}\cdot\text{с}^{-1})^{1/3} R_0 < R_{irr}$. Здесь $L_d = 0,08 M c^2 \gg L_x$ — полное энерговыделение в диске из-за турбулентной вязкости. Из рис. 3 хорошо видно, что полная светимость жёсткой степенной компоненты ($\approx L_x$) значительно (в 5–10 раз) уступает даже светимости излучения чёрнотельного аккреционного диска, меньшей L_d . В стандартной модели Шакуры, Сюняева (1973) $\gamma = 9/8$ и $H/R \approx 6,7 \cdot 10^{-3} (R/R_0)^{1/8}$ зависит от R слабо. Температура поверхности диска в нагретой области $T_s = (Q_{irr}/\sigma + Q_{vis}/\sigma)^{1/4} \approx (Q_{irr}/\sigma)^{1/4}$, где σ — постоянная Стефана-Больцмана, падает с радиусом по закону $\sim R^{-1/2+m/32} \approx R^{-15/32}$.

В области диска, где влияние прогрева поверхности мало, падение температуры более быстрое $T_s \approx R^{-3/4}$ (Шакура, Сюняев, 1973). На рис. 4 сплошными линиями показаны спектры такого прогретого рентгеновским излучением диска, полученные для разных значений отношения L_X/L_d в предположении, что степенная компонента испытывает излом в жёсткой области (вблизи ~ 1 кэВ) и на более низких энергиях падает по закону Релея-Джинса (практически не давая вклада в оптическое и инфракрасное излучение системы).

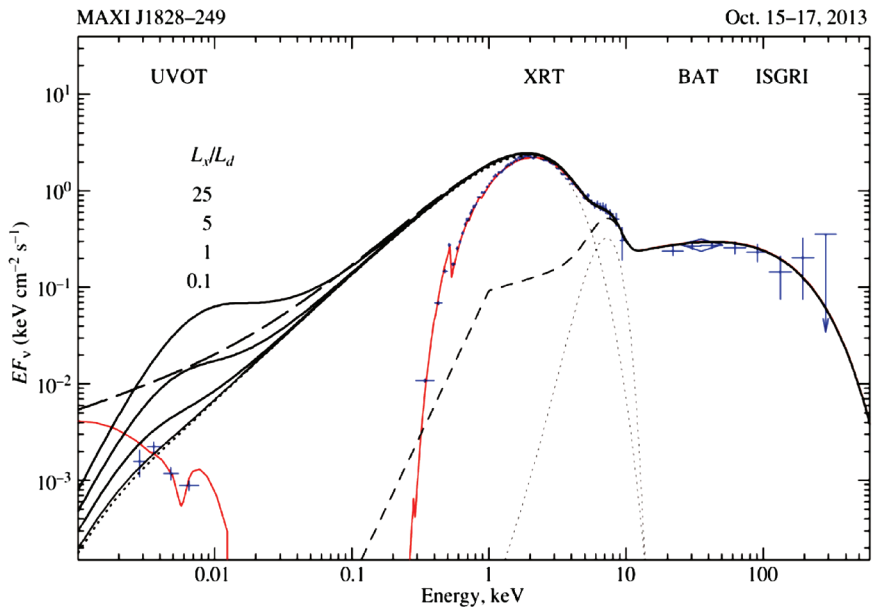


Рис. 4. Тот же, что на рис. 3, широкополосный спектр излучения источника MAXI J1828-249, полученный обсерваториями INTEGRAL и SWIFT 15–18 октября 2013 г., но аппроксимированный моделью с быстро исчезающей ниже 1 кэВ степенной компонентой (штриховая линия с короткими штрихами), учитывающей при этом облучение многоцветного чёрнотельного аккреционного диска жёстким излучением центральной области диска (сплошные линии). Рассмотрены разные возможные значения отношения светимости жёсткого излучения к полной светимости диска $L_X/L_d = 25$; 5; 1; 0,1. Штриховой линией с длинными штрихами показана аппроксимация с доминирующим вкладом непрерывной степенной компоненты (см. рис. 3)

Из сравнения со степенной компонентой в спектре на рис. 3, показанной на данном рисунке длинными штрихами, видно, что переизлучение (рентгеновский прогрев поверхности диска) действительно мог бы объяснить наблюдаемое OIR излучение источника MAXI J1828-249, но только при условии, что $L_X \gtrsim 5L_d$, т.е. в присутствии дополнительного мощного центрального источника рентгеновского излучения. В случае аккреции на чёрную дыру таким источником могло бы быть только излучение джетов, что маловероятно. Хотя прогрев заметно повышает оптическую и инфракрасную светимость диска, он оказывается явно недостаточным для объяснения наблюдаемого оптического излучения системы. К тому же, в действительности удельная светимость жёсткого излучения этого источника во время обсуждаемых наблюдений была много меньше этой величины, что хорошо видно из сравнения амплитуд жёсткой и мягкой (чёрнотельной) рентгеновских компонент спектра, представленных на рис. 3 (спектры даны в виде EF_v , где F_v — спектр излучения, поэтому в логарифмической шкале рисунка их амплитуды пропорциональны светимости). Подобным образом можно аппроксимировать все широкополосные спектры, измеренные вблизи или сразу после максимума блеска рентгеновской новой MAXI J1828-249 (соответствующие первым шести интервалам наблюдений). Увеличение наклона степенной компоненты в течение первой недели наблюдений оказалось не столь сильным, как посчитали авторы работы (Кривонос, Цыганков, 2013). В последующем наклон даже слегка уменьшился (до $\sim 1,4$), хотя к февралю вернулся к прежнему значению $\sim 1,7$. Конечно, реальная жёсткость спектра в рентгеновском диапазоне зависела не только от этого наклона, но и от энергии экспоненциального завала, уменьшавшейся со временем. Положение внутреннего края чёрнотельной области диска, установившееся вскоре после начала вспышки, в последующем почти не менялось, тогда как температура поверхности диска постепенно уменьшалась. Быстро уменьшалась и интенсивность флуоресцентной линии железа — она была заметна лишь в первые дни после вспышки, когда диск подходил совсем близко к чёрной дыре. На рис. 5 приведены три спектра, соответствующие разным этапам эволюции источника, показаны в сравнении с модельным спектром, зарегистрированным во время первого наблюдения. Третий спектр, показанный на этом рисунке, был зарегистрированный в феврале 2014 г. на затухающей стадии вспышки. Этот спектр заметно отличается от первых шести, являясь чисто степенным, без явных признаков чёрнотельной компоненты.

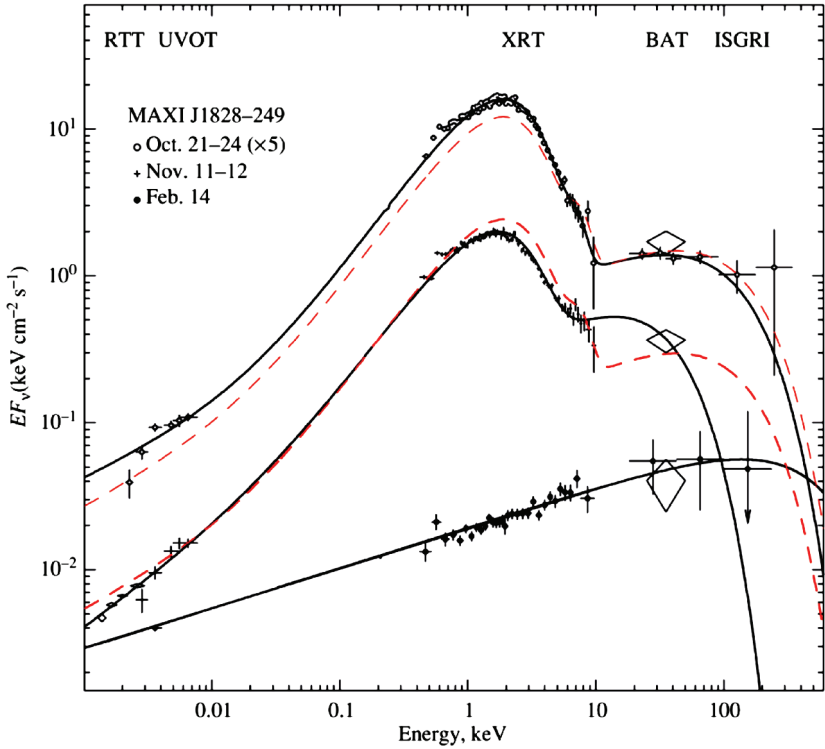


Рис. 5. Эволюция широкополосного спектра излучения рентгеновской новой MAXI J1828-249 в октябре 2013 – феврале 2014 гг. по данным наблюдений обсерваториями INTEGRAL (прибор ISGRI) и SWIFT (BAT, XRT и UVOT), а также телескопом RTT-150. Спектр, измеренный 21–24 октября, смещён для удобства вверх умножением на 5. Штриховой линией для сравнения показан спектр (его аппроксимация), полученный во время первого наблюдения (15–17 октября 2013 г.).

Вторая глава диссертационной работы завершается выводами на основе проведённого анализа данных наблюдений транзиентных источников SWIFT J1745.1-2624, MAXI J1836-194 и MAXI J1828-249 обсерваториями SWIFT, INTEGRAL и PTT-150:

- во время исследуемых этапов вспышек большинство источников оставались в «жёстком» спектральном состоянии и, по-видимому, сохраняли степенную форму спектра с поглощением в широчайшем диапазоне энергий от инфракрасного до жёсткого рентгеновского излучения;

- в спектрах источников, находящихся в «жёстком» состоянии, не обнаружено следов чёрнотельного излучения, которое могло бы быть связано с внешними холодными областями аккреционного диска, присутствие которого наряду с высокотемпературной внутренней областью предполагает модель «обрезанного» диска. Область чёрнотельного излучения могла присутствовать лишь на очень больших расстояниях от чёрной дыры $R_{in} \gtrsim 6 \cdot 10^5$ км, у самого внешнего края диска;
- в спектрах источника, находящегося в «двухкомпонентном» состоянии с яркой мягкой чёрнотельной компонентой, основной вклад в оптическое и инфракрасное излучение давала степенная компонента спектра, значительно превосходящая чёрнотельное излучение диска даже с учётом облучения аккреционного диска жёстким излучением из центральной области;
- оптическая переменность источников в целом совпадала с рентгеновской на масштабе дней и недель, подтверждая вывод о едином спектре;
- результаты наших наблюдений предполагают, что значительная часть оптического и инфракрасного излучения аккрецирующих чёрных дыр формируется в области основного энерговыделения, т. е. там же, где образуется и жёсткое излучение источников.

Третья глава диссертационной работы посвящена исследованию квазипериодических осцилляций в спектрах мощности аккрецирующих чёрных дыр.

Первая часть третьей главы посвящена R/S-анализу кривых блеска рентгеновского микроквазара GX 339-4. Частотно-ограниченный шум в спектре мощности является одним из признаков не просто случайного, а хаотического поведения физической системы, т. е. наличия у неё фрактальных свойств (Заславский, Сагдеев, 1988). В случае кривых блеска это означает их масштабную инвариантность — самоподобие на разных масштабах времени. Для более строгого (количественного) определения степени масштабной инвариантности кривой блеска можно вычислить её фрактальную или хаусдорфову размерность. По фрактальной размерности, в частности, можно судить о степени нелинейности уравнений, описывающих процесс аккреции. Предметом исследования в данной части диссертационной работы является зависимость фрактальной размерности кривых блеска в рентгеновском диапазоне от физических

свойств источника излучения, а именно от параметров аккреционного течения. По результатам анализа наблюдений маломассивной двойной системы GX 339-4, содержащей чёрную дыру, можно прийти к выводам, что фрактальная размерность сигнала практически не зависит от таких свойств аккреционного течения, как температура или радиус внутреннего края аккреционного диска, спектральное состояние или светимость источника. С увеличением светимости источника фрактальная размерность незначительно уменьшается с 1,43 до 1,40 (рис. 6), что возможно связано с уменьшением вклада пуассоновского шума в сигнал. Примечательно, что для наблюдений, во время которых спектр мощности источника содержал QPO, значения фрактальной размерности D попадают в достаточно широкий диапазон 1,01–1,39, а для остальных сеансов оказываются почти одинаковыми и в целом более высокими $D \approx 1,40$ –1,46.

Была исследована зависимость D от энергии на примере двух наблюдений источника GX 339-4 (с QPO и без QPO). При отсутствии QPO фрактальная размерность кривой блеска источника от энергии почти не зависит. В случае присутствия QPO фрактальная размерность на энергиях ниже 15 кэВ быстро падает. Дальнейший анализ показал ярко выраженную нелинейную зависимость между фрактальной размерностью кривых блеска и частотой QPO (рис. 7). Было показано, что характерная величина фрактальной размерности кривых блеска GX 339-4 и Cyg X-1 на соответствующих временных масштабах совпадает. Таким образом, существуют наблюдения GX 339-4, в которых фрактальная размерность кривых блеска значительно отклоняется от своего характерного значения ($D = 1,45 \pm 0,05$); в этих же случаях наблюдаются квазипериодические осцилляции.

Во второй части третьей главы исследуется спектр мощности рентгеновской новой SWIFT J174510.8-262411 (далее SW J1745-26) и его эволюция на ранней стадии вспышки 2012 г. — вблизи максимума блеска. Анализ данных наблюдений рентгеновской новой SW J1745-26, выполненных обсерваториями INTEGRAL и SWIFT в сентябре 2012 г., показал присутствие в спектре мощности её рентгеновского излучения, наряду с низкочастотным шумом, сильного пика QPO, частота которого эволюционировала со временем с 0,3 Гц (вблизи максимума вспышки) до 2,3 Гц (спустя две недели — на затухающей стадии) (рис. 8). Амплитуда LFN и QPO в общей переменности рентгеновского потока со временем менялась слабо, но была при этом в 5–6 раз ниже в диапазоне энергий 3–10 кэВ по сравнению с амплитудой в диапазоне 20–80 кэВ.

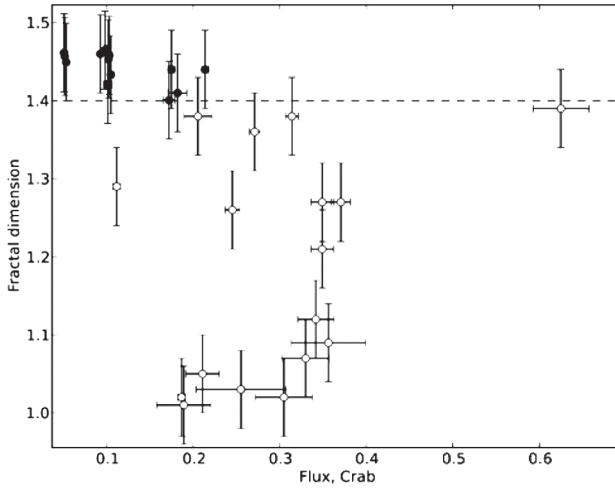


Рис. 6. Зависимость фрактальной размерности кривой блеска D от потока фотонов (в [Краб]) от источника GX 339-4 в диапазоне 2,9–36,0 кэВ, заштрихованные точки — наблюдения без пика QPO в спектре фурье-мощности, незаштрихованные точки — наблюдения с QPO. Штриховая линия на уровне $D = 1,4$ разделяет наблюдения на две группы

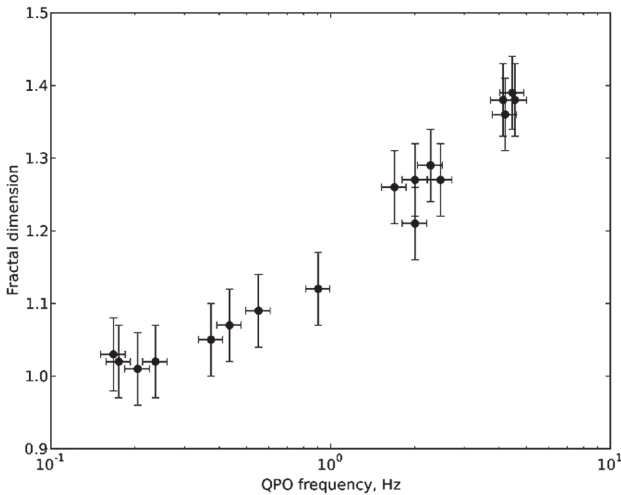


Рис. 7. Зависимость фрактальной размерности D рентгеновских кривых блеска от частоты QPO для источника GX 339-4 в диапазоне энергий 2,9–36 кэВ

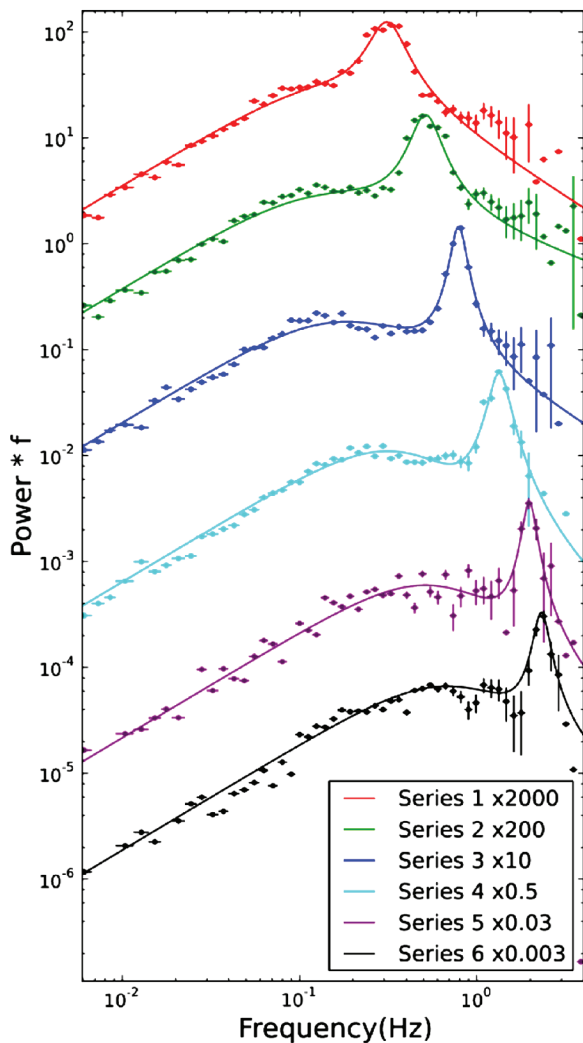


Рис. 8. Спектры мощности рентгеновской новой SW J1745-26, полученные телескопом IBISD/ISGRI обсерватории INTEGRAL в сентябре 2012 г. в диапазоне 20–80 кэВ. Первый спектр снят вблизи максимума блеска источника, последний — спустя две недели. За это время поток от источника упал приблизительно в два раза. Сплошные линии показывают результат аппроксимации спектров мощности функциями Кинга (основной профиль) и Лоренца (пик QPO). Видно, что со временем частота QPO смещается в область высоких частот

Выявлена связь частоты пика QPO с частотой излома в спектре мощности LFN и с потоком рентгеновского излучения. Спектр жёсткого рентгеновского излучения новой в рассмотренный период времени эволюционировал от стандартного спектра аккрецирующей чёрной дыры в жёстком состоянии (типа спектра источника Лебедь X-1) к чисто степенному (без явных признаков экспоненциального завала на высоких энергиях) и более крутому (с фотонным индексом $\alpha \approx 2,5$) спектру. Наблюдаемая картина может быть объяснена формированием жёсткого рентгеновского излучения источника путём комптонизации в центральной высокотемпературной области, окружающей чёрную дыру, радиус которой, а соответственно и её оптическая толщина по томсоновскому рассеянию, уменьшается со временем, а электронная температура плазмы в этой области возрастает. Если QPO связаны с неоднородностями течения, формируемыми на границе высокотемпературной области и стандартного аккреционного диска, и их частота отражает кеплеровскую частоту движения этих неоднородностей на внешнем радиусе, размер области уменьшился за время наблюдений почти в 3,5 раза: с $\sim 820 R_g$ до $\sim 230 R_g$. Радиоизлучение источника и его поляризация демонстрировали удивительную корреляцию с присутствием QPO в спектре мощности рентгеновских флуктуаций и с частотой QPO (рис. 9, радиоданные взяты из работы Куррана и др., 2013). Не ясно, формировалось ли радиоизлучение за счёт синхротронного излучения электронов в высокотемпературном облаке плазмы или в релятивистских джетах. В последнем случае объяснить корреляцию с присутствием QPO довольно сложно. Примечательно, что фрактальная размерность кривых блеска источника SW J1745-26 на низких энергиях ($\lesssim 15$ кэВ) сильно зависит от присутствия QPO в спектре мощности и от их частоты, тогда как на высоких энергиях (20–80 кэВ) изменения фрактальных свойств сигнала не наблюдается. При этом сама мощность низкочастотного шума LFN и пика QPO на низких энергиях была в 5–6 раз ниже их мощности на высоких энергиях. Этот результат подтверждает наблюдение, сделанное при анализе данных источника GX 339-4. Таким образом, связь фрактальной размерности с QPO не может следствием простого подавления случайного шума мощным регулярным процессом (осцилляциями). В рамках описанной картины образования жесткого излучения источника за счёт комптонизации это наблюдение можно объяснить следующим образом: на низких энергиях наблюдаются фотоны, испущенные вблизи внешней границы высокотемпературного облака (поверхностью холодного аккреционного диска вблизи его внутреннего края).

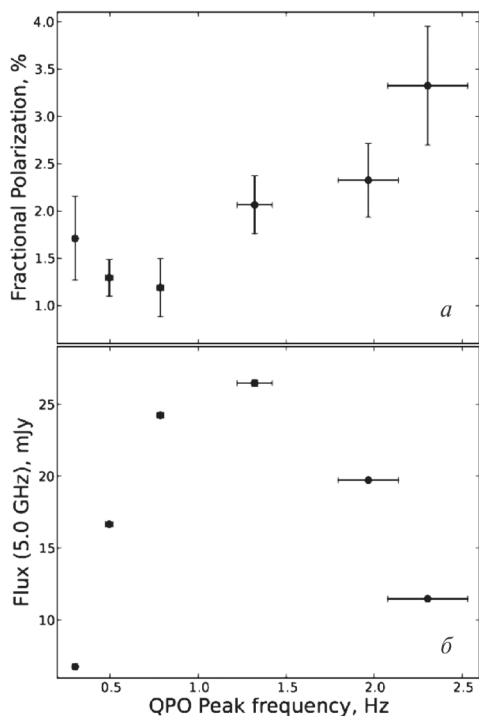


Рис. 8. Зависимость поляризации радиоизлучения (5,0 ГГц) от частоты пика QPO: степень поляризации практически монотонно возрастает с увеличением частоты QPO (а), поток радиоизлучения показывает явную связь с присутствием пика QPO в спектре мощности (б)

Самые мягкие из них почти не испытали рассеяний в облаке, более жёсткие испытали сравнительно небольшое число рассеяний. Если в этой области действовали сильно нелинейные процессы, влияющая на число фотонов, информация о них сохранится и найдёт отражение в измеренной кривой блеска. Важно, что заметная доля фотонов, регистрируемая в мягком диапазоне, испускается поверхностью диска на некотором удалении от внутренней границы и поэтому «не знает» о существовании квазипериодических осцилляций. В жёстком диапазоне наблюдаются лишь фотоны, испущенные непосредственно у границы (действует геометрический фактор видимости облака со стороны диска) и испытавшие много рассеяний в облаке, а потому форма пиков на кривой блеска претерпевает изменения в зависимости от диапазона энергий. Модуляция с мед-

ленным квазипериодом «выживает», хотя ширина пика QPO должна с ростом энергии возрастать. И это действительно наблюдается: ширина пика QPO в сеансе № 3 была равна $\Delta f_{QPO} \approx 0,166 \pm 0,009$ Гц в диапазоне телескопа IBIS/ISGRI и $\Delta f_{QPO} \approx 0,137 \pm 0,024$ Гц в диапазоне телескопа JEM-X.

К сожалению, собственно нелинейные механизмы, приводящие к QPO, все ещё остаются неизвестными.

В **Заключении** перечислены основные результаты, полученные в диссертационной работе, а также отмечена научная перспективность использования фрактального анализа для исследования быстрой хаотической переменности излучения аккрецирующих чёрных дыр в маломассивных двойных системах.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

В диссертационной работе приведены результаты анализа наблюдений обсерваториями INTEGRAL, SWIFT, RXTE и RTT-150 маломассивных двойных системах, содержащих чёрную дыру. Исследовались источники SWIFT J174510.8-262411, MAXI J1836-194, GX 339-4 и MAXI J1828-249. По результатам исследования были сделаны следующие выводы.

1. Ультрафиолетовое, оптическое и инфракрасное (UVOIR) излучение рентгеновских новых (SWIFT J174510.8-262411, MAXI J1836-194) в их «жёстком» состоянии (на затухающей стадии вспышки) после коррекции на межзвездное поглощение может быть успешно описано продолжением их рентгеновского спектра, степенного в диапазоне 0,3–60 кэВ с экспоненциальным завалом на высоких (>60 кэВ) энергиях.
2. Присутствия чёрнотельного излучения, которое могло бы быть связано с внешними холодными областями аккреционного диска, в широкополосных (1 эВ – 200 кэВ) спектрах этих источников в их «жёстком» состоянии выявлено не было. При темпе аккреции, соответствующем наблюдаемой рентгеновской светимости, измеренный поток UVOIR излучения источников более чем на порядок величины превосходил возможный вклад внешних областей диска.
3. UVOIR излучение рентгеновской новой MAXI J1828-249, наблюдаемое вблизи максимума вспышки 2013 г., не могло быть объяснено исключительно чёрнотельным излучением

внешних областей аккреционного диска, даже многократно усиленным прогревом его поверхности жёсткими фотонами. Недостающее UVOIR излучение источника может быть получено экстраполяцией в данную область степенной компоненты его жёсткого рентгеновского излучения.

4. UVOIR излучение рентгеновских новых SWIFT J174510.8-262411, MAXI J1836-194 и MAXI J1828-249 может быть объяснено в предположении, что доминирующая его часть образуется в области основного энерговыделения вблизи чёрной дыры — там же, где формируется их жёсткое излучение.
5. Выполнено измерение фрактальной размерности быстрой (<1000 с) переменности кривых блеска ряда аккрецирующих чёрных дыр. Обнаружена корреляция фрактальной размерности кривых блеска в мягком/стандартном (<15 кэВ) диапазоне с частотой пика QPO в спектрах мощности источников GX 339-4 и SWIFT J174510.8-262411.
6. У кривых блеска источников GX 339-4 и SWIFT J174510.8-262411, в диапазоне 20–80 кэВ в наблюдениях с зарегистрированным QPO изменение фрактальной размерности было меньше, чем в мягком/стандартном диапазоне, не смотря на большую мощность QPO и LFN в переменности их излучения.
7. Обнаружена корреляция между интенсивностью радиоизлучения, степенью его поляризации, присутствием и частотой пика QPO в рентгеновских кривых блеска источника SWIFT J174510.8-262411.

Список публикаций по теме диссертации

Основные результаты диссертации изложены в следующих статьях:

1. *Гребенев С. А., Просветов А. В., Сюняев Р. А.* Вторая вспышка кандидата в черные дыры MAXI J1836-194 по данным наблюдений обсерваториями SWIFT и INTEGRAL // Письма в Астроном. журн. 2013. Т. 39. С. 415-422 (Astron. Lett., 2013, 39, 367-374).
2. *Гребенев С. А., Просветов А. В., Буренин Р. А.* Широкополосный спектр излучения рентгеновской новой SWIFT J174510.8-262411 на затухающей стадии вспышки // Письма в Астроном. журн. 2014. Т. 40. С. 198–204 (Astron. Lett., 2014, 40, 171-176).

3. *Просветов А. В., Гребенев С. А.* Фрактальный анализ кривых блеска микроквазара GX 339-4 // Письма в Астрон. журн. 2014. Т. 40. С. 761–774 (Astron. Lett., 2014, 40, 691–703).
4. *Просветов А. В., Гребенев С. А.* QPO и LFN в спектре мощности быстрой переменности рентгеновской новой SWIFT J174510.8-262411 // Письма в Астрон. журн. 2015. Т. 41. С. 595–608 (Astron. Lett., 2015, 41, 549-561).
5. *Гребенев С. А., Просветов А. В., Буренин Р. А., Кривонос Р. А., Мещеряков А. В.* Рентгеновская новая MAXI J1828-249. Эволюция широкополосного спектра излучения во время вспышки 2013–2014 гг. // Письма в Астрон. журн. 2016. Т. 42. С. 88–101.

Все работы опубликованы в журнале, входящем в перечень ВАК. Все основные положения исследований изложены в данных статьях.

Литература

1. *Беллони и др.* (T. Belloni, M. Cadolle Bel, P. Casella, et al.), Astron. Telegram 4450 (2012).
2. *Беллони и др.* (T. M. Belloni, A. Sanna, and M. Mendez), MNRAS 426, 1701 (2012).
3. *Бэк и др.* (P. Bak, C. Tang, and K. Wiesenfeld), Phys. Rev. Lett. 59, 381 (1987).
4. *ван дер Клис* (M. van der Klis), Compact stellar X-ray sources (Ed. W. Lewin, M. van der Klis, Cambridge Astrophys. Ser., No. 39. Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press, 2006), p. 39.
5. *ван дер Клис* (M. van der Klis), Proc. NATO ASI “Timing Neutron Stars” (Cesme, Izmir, Turkey, 4–15 April 1988, Ed. H. Ogelman, E. P. J. van den Heuvel, NY USA: Kluwer Acad./Plenum Publ., 1989), p. 27.
6. *Веледина, Поутанен* (A. Veledina, J. Poutanen), MNRAS 448, 939 (2015).
7. *Вихлинин и др.* (A. Vikhlinin, E. Churazov, and M. Gilfanov), Astron. Astrophys. 287, 73 (1994a).
8. *Вихлинин и др.* (A. Vikhlinin, E. Churazov, M. Gilfanov, R. Sunyaev, A. Dyachkov, N. Khavenson, R. Kremnev, K. Sukhanov, et al.), Astrophys. J. 424, 395 (1994b).
9. *Вовк и др.* (I. Vovk, C. Ferrigno, E. Drave, et al.), Astron. Telegram 4381 (2012).

10. *Гребенев и др.* (S. Grebenev, R. Sunyaev, M. Pavlinsky, E. Churazov, M. Gilfanov, A. D'yachkov, N. Khavenson, K. Sukhanov, et al.), *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 97, 281 (1993).
11. *Гребенев и др.* (Гребенев С.А., Сюняев Р.А., Павлинский М.Н., Деханов И.А.), *Письма в Астрон. журн.* 17, 985 (1991).
12. *Гребенев, Сюняев* (S.A. Grebenev and R.A. Sunyaev), *Astron. Telegram* 4401 (2012).
13. *Драйн* (B. T. Draine), *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 41, 241 (2003).
14. *Заславский, Сагдеев* (Заславский Г.М., Сагдеев Р.З.), *Введение в нелинейную физику: от маятника до турбулентности и хаоса* (М.: Наука, 1988).
15. *Калберла и др.* (P.M.W. Kalberla, W.B. Burton, D. Hartmann et al.), *Astron. Astrophys.*, 440, 775 (2005).
16. *Каммингс и др.* (J.R. Cummings, C. Gronwall, D. Grupe, et al.), *GCN Circ.* 13774 (2012a).
17. *Каммингс и др.* (J.R. Cummings, S.D. Barthelmy, W.H. Baumgartner, et al.), *GCN Circ.* 13775 (2012b).
18. *Канбах и др.* (G. Kanbach, C. Straubmeier, H.C. Spruit, and T. Belloni), *Nature* 414, 180 (2001).
19. *Корбел и др.* (S. Corbel, J.A. Tomsick, T. Tzioumis), *Astron. Telegram* 5911 (2014).
20. *Кориат и др.* (M. Coriat, S. Corbel, M.M. Buxton, C.D. Bailyn, J.A. Tomsick, et al.), *MNRAS* 400, 123 (2009).
21. *Кривонос, Цыганков* (R. Krivonos, S. Tsygankov), *Astron. Telegram* 5492 (2013).
22. *Курран и др.* (P.A. Curran, M. Coriat, J.C.A. Miller-Jones et al.), (2013).
23. *Лохнер и др.* (J.C. Lochner, J.H. Swank, and A.E. Szymkowiak), *Astrophys. J.* 337, 823 (1989).
24. *Любарский* (Yu. E. Lyubarskii), *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 292, 679 (1997).
25. *Лютый, Сюняев* (Лютый В.М., Сюняев Р.А.), *Астрон. журн.* 53, 511 (1976).
26. *Минешиге и др.* (S. Mineshige, N.B. Ouchi, and H. Nishimori), *Publ. Astron. Soc. Japan* 46, 97 (1994).
27. *Миямото и др.* (S. Miyamoto, S. Kitamoto, K. Misuda, and T. Dotani), *Proc. Inter. Symp. "Physics of Neutron Stars and Black Holes"* (Tokyo, 1–3 February 1988, Ed. Y. Tanaka, Tokyo: Univ. Academy Press, Inc., 1988), p. 227.
28. *Моррисон, Маккаммон* (R. Morrison, D. McCammon), *Astrophys. J.* 270, 119 (1983).

29. *Нолан и др.* (P.L. Nolan, D.E. Gruber, J.L. Matteson, L.E. Patterson, R. Rothschild, J.P. Doty, A.M. Levine, W.H.G. Lewin, and F.A. Primini), *Astrophys. J.* 246, 494 (1981).
30. *Нouseк, Шу* (J.A. Nousek, D.R. Shue), *Astrophys. J.* 342, 1207 (1989).
31. *Поутанен, Веледина* (J. Poutanen, A. Veledina), *Space Sci. Rev.* 183, 61 (2014).
32. *Сбаруфати и др.* (B. Sbarufatti, J.A. Kennea, M.C. Stroh, D.N. Burrows, P.A. Evans, et al.), *Astron. Telegram* 4782 (2013).
33. *Сулейманов и др.* (V.F. Suleimanov, G.V. Lipunova, and N.I. Shakura), *Astron. Astrophys.* 491, 267 (2008).
34. *Сюняев, Титарчук* (R.A. Sunyaev and L.G. Titarchuk), *Astron. Astrophys.* 86, 121 (1980).
35. *Титарчук и др.* (L. Titarchuk, N. Shaposhnikov, and V. Arefiev), *Astrophys. J.* 660, 556 (2007).
36. *Томсик и др.* (J.A. Tomsick, E. Kalemci, P. Kaaret, S. Markoff, S. Corbel, et al.), *Astrophys. J.* 680, 593 (2008).
37. *Томсик и др.* (J.A. Tomsick, M. Del Santo, T. Belloni), *Astron. Telegram* 4393 (2012).
38. *Томсик и др.* (J.A. Tomsick, S. Corbel), *Astron. Telegram* 5886 (2014).
39. *Черепашук* (Черепашук А. М.), *Успехи физ. наук* 173, 345 (2003).
40. *Шакура, Сюняев* (N.I. Shakura and R.A. Sunyaev), *Astron. Astrophys.* 24, 337 (1973).

Содержание

Общая характеристика работы	1
Актуальность темы	1
Цель работы	4
Научная новизна	5
Теоретическая и практическая ценность работы	5
Апробация работы	6
Структура диссертации	6
Основное содержание диссертационной работы	6
Основные результаты, выносимые на защиту	22
Список публикаций по теме диссертации	24
Литература	25