



УТВЕРЖДАЮ
Директор ИКИ РАН
академик Д.М.Зеленый

2016 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института космических исследований Российской Академии Наук (ИКИ РАН) на диссертацию «Переменность рентгеновского излучения и широкополосные спектры аккрецирующих черных дыр в маломассивных двойных системах», представленную Просветовым Артемом Владимировичем на соискание степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 - «Астрофизика и звездная астрономия».

Диссертация «Переменность рентгеновского излучения и широко-полосные спектры аккрецирующих черных дыр в маломассивных двойных системах» выполнена в отделе Астрофизики высоких энергий ИКИ РАН. В период подготовки диссертации соискатель А.В.Просветов работал в указанном отделе в должности младшего научного сотрудника.

В 2012 г. А.В.Просветов окончил очную аспирантуру Московского физико-технического института (государственного университета) (МФТИ) по специальности «Астрофизика и звездная астрономия». Удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов выдано в 2012 г. МФТИ.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук Гребнев Сергей Андреевич, заведующий лабораторией Рентгеновской и гамма-астрономии ИКИ РАН.

Доклад А.В. Просветова по теме диссертации заслушен и обсужден на заседании НТС отдела Астрофизики высоких энергий ИКИ РАН.

По результатам рассмотрения диссертации «Переменность рентгеновского излучения и широкополосные спектры аккрецирующих черных дыр в маломассивных двойных системах» ПРИНЯТО СЛЕДУЮЩЕЕ ЗАКЛЮЧЕНИЕ:

Актуальность темы и направление исследования

Рентгеновские вспышки аккрецирующих черных дыр предоставляют уникальную возможность для исследования режимов (и геометрии) аккреционного течения, реализуемых при разных темпах аккреции вещества на черную дыру. Наиболее полную информацию о свойствах и физических процессах в таких объектах можно получить по эволюции на масштабе месяцев и дней широкополосных спектров их излучения (охватывающих несколько диапазонов энергий), но также по быстрой (минуты и секунды) хаотической переменности их рентгеновского излучения.

В частности, анализ рентгеновских спектров показывает, что многие наблюдаемые свойства аккрецирующих черных дыр в маломассивных рентгеновских системах могут быть объяснены в рамках модели «усеченного диска». Согласно этой модели аккреционный диск

состоит из двух зон: холодной внешней, являющейся источником мягкого теплового рентгеновского излучения, и горячей оптически тонкой внутренней, ответственной за жесткое излучение. Считается, что оно формируется при комптонизации низкочастотных фотонов внешней зоны на высокотемпературных электронах внутренней зоны. Спектральные переходы между разными состояниями («жестким/низким», «мягким/высоким», «двух-компонентным» и другими) объясняются просто изменением размера внутренней зоны. Предполагается, что за ультрафиолетовое, оптическое и инфракрасное излучение системы отвечают внешние области холодного аккреционного диска, прогретые рентгеновским излучением из центральной зоны. Поскольку рассматриваются маломассивные рентгеновские системы, вклад звезды-спутника черной дыры в оптическое и инфракрасное излучение системы, как правило, заметно уступает излучению аккреционного диска.

Одновременные рентгеновские и оптические наблюдения рентгеновских новых в ярком состоянии пока достаточно редки и сколько-нибудь полного сравнения описанной теории с наблюдениями сделано не было. Такому сравнению, основанному на исследованиях широкополосных спектров рентгеновских новых, простирающихся от оптической и инфракрасной области до жесткой рентгеновской, посвящена первая часть диссертационной работы. В частности:

1. на основе квазисовременных наблюдений ряда рентгеновских новых (SWIFT J174510.8-262411, MAXI J1836-194 и MAXI J1828-249) приборами астрофизических обсерваторий ИНТЕГРАЛ, SWIFT, MAXI/ISS, телескопом РТТ-150 проведен спектральный анализ их излучения в широком (от оптического и инфракрасного и до жесткого рентгеновского) диапазоне энергий;
2. проведено сравнение общепринятой модели формирования оптического и инфракрасного излучения аккрецирующих черных дыр в маломассивных двойных системах с наблюдательными данными, во всех рассмотренных случаях показана ее несостоятельность; обсуждены другие возможности.

Другим актуальным вопросом исследований галактических аккрецирующих черных дыр является происхождение низкочастотного шума (LFN) и квазипериодических осцилляций (QPO) в спектрах мощности их рентгеновского излучения. Для низкочастотных (ниже 1 Гц) QPO на сегодняшний день нет исчерпывающей теории, объясняющей их происхождение, не известна даже область аккреционного диска, ответственная за них. Для получения дополнительной информации об этих явлениях:

1. проведен фурье-анализ переменности излучения и измерение фрактальной размерности рентгеновских кривых блеска черных дыр GX 339-4 (по данным обсерватории RXTE) и SWIFT J174510.8-262411 (по данным обсерваторий INTEGRAL и SWIFT);
2. установлена зависимость параметров спектра мощности (частоты, ширины и амплитуды пика QPO, частоты излома в спектре LFN) указанных аккрецирующих черных дыр от их рентгеновского потока, интенсивности радиоизлучения, степени его поляризации;
3. установлена связь между изменением фрактальной размерности кривой блеска и частотой пика QPO на энергиях 0.3-15 кэВ, показано отсутствие такой связи на более высоких энергиях; найдено возможное объяснение такому поведению кривых блеска; предложен основанный на измерении фрактальной размерности метод выявления наблюдений, содержащих QPO.

Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации

Результаты, выносимые на защиту, получены лично автором диссертации. В процессе работы

автором осуществлялись: обработка и анализ результатов наблюдений рассмотренных источников разными приборами, разработка и тестирование программ измерения фрактальной размерности по их кривым блеска; проведение всех расчетов; анализ полученных результатов. По теме диссертации было опубликовано 5 работ в рецензируемых научных изданиях, определяющую роль в подготовке и написании которых сыграл автор диссертации.

Степень достоверности результатов проведенных исследований

Достоверность полученных в диссертации результатов основана на:

1. их публикации в ведущем российском рецензируемом журнале по астрономии и астрофизике, входящем в перечень ВАК;
2. представлении и обсуждении результатов работы (в том числе в виде устных докладов) на семинарах, российских и международных конференциях (HEA, INTEGRAL Workshops, COSPAR, MSS и др.);
3. полученные результаты хорошо соотносятся с теоретическими оценками, а так же с измерениями, полученными другими методами.

Научная новизна результатов исследований

Впервые построены широкополосные спектры излучения ряда рентгеновских новых SWIFT J174510.8-262411, MAXI J1836-194, и MAXI J1828-249. В ходе их анализа показано, что оптическое, инфракрасное и жесткое рентгеновское излучение данных источников в «жестком» состоянии может быть описано единым степенным законом (с экспоненциальным завалом на высоких энергиях), искаженным лишь фотопоглощением. В оптическом и инфракрасном диапазоне не выявлено признаков присутствия чернотельного излучения, которое могло бы быть связано с внешними холодными областями аккреционного диска. Продемонстрировано, что в спектрах источника, находящегося в «мягком» состоянии, основной вклад в оптическое и инфракрасное излучение также давала степенная компонента спектра, значительно превосходящая чернотельное излучение диска даже с учетом прогрева его поверхности рентгеновскими фотонами из горячей центральной зоны. Таким образом впервые показано, что оптическое и инфракрасное излучение аккрецирующих черных дыр в маломассивных двойных системах в значительной мере формируется в той же области основного энерговыделения, которая ответственна за жесткое рентгеновское излучение.

Проведен оригинальный фурье-анализ переменности рентгеновского излучения ряда аккрецирующих черных дыр, входящих в маломассивные двойные системы. Впервые к анализу рентгеновских кривых блеска таких источников применены методы R/S анализа, Max-Spectrum анализа и MF-DFA анализа. В результате применения указанных методов фрактального и фурье-анализа, обнаружено, что величина фрактальной размерности зависит от наличия QPO в спектре мощности рентгеновских флуктуаций. Выявлена зависимость фрактальной размерности кривых блеска от частоты пика QPO в диапазоне энергий 2–15 кэВ во вспышках объектов GX 339-4 и SWIFT J174510.8-262411 (по данным обсерваторий RXTE, INTEGRAL и SWIFT). Выявлено отсутствие значимых изменений фрактальных свойств у кривых блеска этих источников в диапазоне 20–200 кэВ, не смотря на большую амплитуду пика QPO и большую мощность LFN, чем в мягком диапазоне. В качестве объяснения этого наблюдения в рамках модели «дробового» шума было сделано предложение о том, что форма пиков на кривой блеска претерпевает изменения в зависимости от диапазона энергий. Отмечена связь между радио- и рентгеновским излучением источника, выраженная в том, что частота пика QPO коррелирует с интенсивностью и степенью поляризации радиоизлучения его релятивистских струй.

Практическая значимость исследований

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

К исследованию кривых блеска аккрецирующих черных дыр применены методы фрактального анализа и продемонстрирована их перспективность в быстром 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 формой отдельных рентгеновских всплесков, ее формирующих, что позволяет поставить новые ограничения на конкурирующие модели формирования LFN и QPO.

Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем

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 Астрономический журнал, 2013, 39, 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 Астрономический журнал, 2014, 40, 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 Астрономический журнал, 2014, 40, 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 Астрономический журнал, 2015, 41, 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 Астрономический журнал, 2016, 42, 88-101.

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

Соответствие содержания диссертации паспорту специальности 01.03.02 – «Астрофизика и звёздная астрономия»

Задачи, рассмотренные в диссертации, относятся к классу, заявленному в паспорте специальности 01.03.02 – «Астрофизика и звёздная астрономия», как «Исследование физических процессов, связанных с генерацией излучения (электромагнитного, нейтринного, гравитационного), распространения и поглощения излучения в космических средах; разработка методов анализа электромагнитного излучения в различных спектральных диапазонах в применении к астрономическим наблюдениям».

ВЫВОД. Кандидатская диссертация Просветова Артема Владимировича «Переменность рентгеновского излучения и широкополосные спектры аккрецирующих черных дыр в маломассивных двойных системах» соответствует «Положению о порядке присуждения ученых степеней». В рамках диссертационного исследования автором были приведены результаты анализа наблюдений орбитальных астрофизических обсерваторий ИНТЕГРАЛ, SWIFT, RXTE, MAXI и телескопа РТТ-150. Предметом исследования являлось аккреционное течение в маломассивных двойных системах, содержащих черную дыру. Исследовались рентгеновские новые SWIFT J174510.8-262411, MAXI J1836-194, GX 339-4 и MAXI J1828-249. Автором исследования было показано, что:

- 1) Ультрафиолетовое, оптическое и инфракрасное (UVOIR) излучение рентгеновских новых (SWIFT J174510.8-262411, MAXI J1836-194) в их «жестком» 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 чернотельного излучения, которое могло бы быть связано с внешними холодными областями аккреционного диска, в широкополосных (1 эВ - 200 кэВ) спектрах этих источников в их «жестком» состоянии выявлено не было. При темпе аккреции, соответствующем наблюдаемой рентгеновской светимости, измеренный поток UVOIR излучения источников более чем на порядок величины превосходил возможный вклад диска.
- 3) UVOIR излучение рентгеновской новой MAXI J1828-249, наблюдаемое вблизи максимума вспышки 2013 г., не могло быть объяснено исключительно чернотельным излучением внешних областей аккреционного диска, даже многократно усиленным прогревом его поверхности жесткими фотонами. Недостающее UVOIR излучение источника может быть получено экстраполяцией в данную область степенной компоненты его жесткого 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 черной дыры - там же, где формируется их жесткое излучение.
- 5) 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, находящихся в "жестком" состоянии.
- 6) У кривых блеска источников GX 339-4 и SWIFT J174510.8-262411, находящихся в "жестком" состоянии, в наблюдениях в диапазоне 20 – 80 кэВ 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, а также степенью его поляризации и частотой пика QPO в рентгеновских кривых блеска источника SWIFT J174510.8-262411.

Диссертация “Переменность рентгеновского излучения и широкополосные спектры аккрецирующих черных дыр в маломассивных двойных системах” Просветова Артема Владимировича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 – «Астрофизика и звездная астрономия».

Заключение принято на заседании НТС отдела Астрофизики высоких энергий ИКИ РАН. Присутствовало на заседании 18 чел. Результаты голосования: «за» - 18 чел., «против» - 0 чел., «воздержалось» - 0 чел., протокол от «22» марта 2016 г.

Ученый секретарь НТС
отдела Астрофизики высоких энергий ИКИ РАН,
к.ф.-м.н.



В.А. Арефьев