

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
НАУКИ СПЕЦИАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи  
УДК 524.3.735:520.82/84;  
524.3-43:520.82/84

Винокуров Александр Сергеевич

**Наблюдательные проявления ультраярких  
рентгеновских источников и сверхкритической  
дисковой аккреции**

Специальность: 01. 03. 02 – астрофизика и звездная астрономия

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в  
Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Специальной  
астрофизической обсерватории Российской академии наук

Научный доктор физико-математических наук, профессор,  
руководитель: заведующий Лаборатории физики звезд,  
**Фабрика Сергей Николаевич**  
САО РАН

Официальные доктор физико-математических наук, профессор,  
оппоненты: **Постнов Константин Александрович**  
ГАИШ МГУ

кандидат физико-математических наук, доцент,  
**Шиманский Владислав Владимирович**  
ФГАОУ ВО КФУ

Ведущая Федеральное государственное бюджетное учреждение  
организация: науки Институт космических исследований  
Российской академии наук, г. Москва

**Защита состоится** 20 октября 2016 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 002.203.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук по адресу: 369167, САО РАН, п. Нижний Архыз, Карачаево-Черкесская республика, Россия

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке САО РАН.

Автореферат разослан "\_\_\_" сентября 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
Д 002.203.01, к.ф.-м.н.

Шолухова О. Н.

## Актуальность темы

Ультраяркие рентгеновские источники (Ultraluminous X-ray sources, ULX) являются переменными в рентгеновском диапазоне объектами, изотропная светимость которых превышает эддингтоновский предел для черных дыр звездных масс ( $> 10^{39}$  эрг/с). ULX наблюдаются в галактиках и являются одними из лучших кандидатов в аккрецирующие черные дыры. Однако, механизм и геометрия аккреции в этих объектах до сих пор не установлены. Вопрос о природе ультраярких рентгеновских источников является важнейшим, поскольку массы черных дыр в этих объектах до сих пор не определены.

Для объяснения феномена ULX рассматриваются две основные конкурирующие интерпретации. Согласно одной из них, это сверхкритические аккреционные диски вокруг черных дыр звездных масс в двойных системах, наблюдаемые близко к оси аккреционного диска [7, 13, 14, 23]. Режим сверхкритической аккреции был впервые описан Шакурой и Сюняевым [26]. Единственным известным в природе сверх-аккретором является SS 433, и в этом отношении его можно считать прототипом ULX [7]. Ориентация ULX такова, что наблюдатель может увидеть внутренние области канала в сверхкритическом аккреционном диске. При такой ориентации важную роль начинают играть эффекты геометрической коллимации излучения в направлении наблюдателя, что приводит к увеличению наблюдаемого рентгеновского потока во много раз [19, 20] и позволяет объяснить существование объектов со светимостями вплоть до  $10^{41}$  эрг/с [8].

В рамках второй интерпретации предполагается, что ультраяркие рентгеновские источники являются так называемыми черными дырами "промежуточных масс" со стандартными аккреционными дисками [4]. Массы таких черных дыр составляют  $10^2 - 10^4 M_{\odot}$ . Согласно современным представлениям существуют два основных канала формирования черных дыр промежуточных масс: в результате эволюции низкометаллических звезд населения III типа [17] или в ядрах молодых звездных скоплений в процессе слияния звезд [9, 22]. Тем не менее, такие объекты до сих пор остаются гипотетическими. В любом случае ULX должны быть в тесных двойных системах с массивной звездой-донором, способной обеспечить достаточный темп аккреции на черную дыру для появления объекта с рентгеновской светимостью  $> 10^{39}$  эрг/с.

Ультраяркие рентгеновские источники были открыты в 2000 г. в резуль-

тате наблюдений рентгеновской обсерватории Chandra. За прошедшие 15 лет на различных рентгеновских обсерваториях было получено огромное количество наблюдательного материала, обнаружено более 450 кандидатов в ULX [28], показано, что форма спектров ULX не может быть адекватно описана ни составной моделью стандартного диска со степенной компонентой, ни моделью slim-дисков [11]. Тем не менее, несмотря на активные исследования ULX в рентгеновском диапазоне, вопрос о величине масс черных дыр в этих объектах остается открытым. По-видимому, решающую роль в ответе на этот вопрос может сыграть изучение свойств ультраярких рентгеновских источников в оптическом диапазоне, тем более, если используются методы спектроскопии.

Систематические исследования ULX в оптическом диапазоне только начинаются. С оптическими источниками отождествлены менее 50 ультраярких рентгеновских источников [10, 24]. В большинстве случаев такие отождествления не являются однозначными: в круг ошибок координат рентгеновских объектов попадает несколько оптических источников. Только около 20 ULX имеют надежные оптические отождествления со звездообразными источниками, для которых известны спектральные распределения энергии в широком диапазоне длин волн [27, 29]. Количество отождествленных в оптике ULX, для которых были проведены спектральные наблюдения, составляет менее 10 объектов [6, 16, 18, 25].

В оптическом диапазоне двойники ультраярких рентгеновских источников оказались очень слабыми объектами, самые яркие из которых имеют видимую звездную величину около  $21^m$  [18]. Звездные величины большинства оптических двойников ULX находятся в диапазоне  $m_V = 21^m - 23^m$  [27]. Столь слабые в оптическом диапазоне объекты доступны для спектральных наблюдений только на самых крупных телескопах мира.

Исследования окружения ультраярких рентгеновских источников показало наличие вокруг многих из них оболочечных туманностей [21]. Формы этих туманностей, а также обнаруженные изменения лучевых скоростей в них [15], свидетельствуют в пользу существования дополнительного источника энергии, динамически возмущающего межзвездную среду, которым могут быть релятивистские струи или слабо коллимированные ветра сверхкритических дисков [1].

В настоящей работе рассматривается спектральный и фотометрический материал, позволяющий детально исследовать свойства оптических двойников ультраярких рентгеновских источников, сделать выводы об однородности класса этих объектов. Используемые в работе методы, такие как оптическая спектроскопия в широком диапазоне длин волн и моделирование спектральных распределений ULX от рентгеновского до оптического диапазонов, могут стать ключом к пониманию природы этих объектов. Все это обуславливает актуальность данной работы.

## Цели и задачи работы

Целью предпринимаемого в диссертации исследования является:

- спектральное исследование выборки оптических двойников ультраярких рентгеновских источников. Проведение фотометрических измерений оптических двойников ULX по данным космического телескопа им. Хаббла с целью дальнейшего использования этих результатов для проверки модели спектральных распределений энергии;
- проведение детальных астрометрических исследований с целью поиска новых оптических отождествлений ультраярких рентгеновских источников;
- сравнение всех доступных оптических спектров ULX и выяснение типа этих спектров. Определение наиболее вероятной области формирования оптических спектров ULX: звезда-донор, стандартный диск вокруг черной дыры промежуточной массы, сверхкритический диск вокруг черной дыры звездной массы;
- моделирование спектральных распределений энергии (SED) сверхкритических аккреционных дисков в оптическом, ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах с целью объяснения наблюдаемых SED ULX.

## Научная новизна работы

Все основные результаты работы являются новыми и состоят в следующем:

1. Проведена спектроскопия оптических двойников ультраярких рентгеновских источников на телескопах Subaru (Holmberg II X-1, Holmberg IX X-1, NGC 4559 X-7, NGC 5204 X-1) и БТА (NGC 4395 ULX-1). Проведен детальный анализ спектров оптических двойников восьми ультраярких рентгеновских источников: Holmberg II X-1, Holmberg IX X-1, NGC 4559 X-7, NGC 5204 X-1, NGC 4395 ULX-1, NGC 5408 X-1, NGC 1313 X-2 и NGC 7793 P13. Эти ультраяркие рентгеновские источники представляют собой полную выборку объектов, для которых когда-либо была проведена глубокая спектроскопия в оптическом диапазоне;
2. Впервые показано, что все ультраяркие рентгеновские источники, для которых имеются спектральные данные в оптическом диапазоне, обладают одним и тем же типом спектра, подобным спектрам звезд LBV (Яркие Голубые Переменные) в горячем состоянии или звезд WNLh (поздние Вольфа-Райе звезды азотной последовательности с линиями водорода), а также спектру единственного известного в нашей Галактике сверхкритического аккреционного диска SS 433. Показано, что исследованные ультраяркие рентгеновские источники представляют собой однородный класс объектов. На основе данных оптической спектроскопии ультраярких рентгеновских источников обнаружено, что эти объекты, наиболее вероятно, являются сверхкритическими аккреционными дисками с черными дырами звездных масс;
3. По результатам спектроскопии впервые показано, что ширина эмиссионной линии He II  $\lambda 4686$  в ультраярких рентгеновских источниках как правило меньше ширины линии H $\alpha$ , что свидетельствует в пользу формирования этих линий в плотных ветрах сверхкритических аккреционных дисков. Такая ситуация наблюдается в SS 433, LBV, звездах Вольфа-Райе, а также в горячих сверхгигантах. Обладающая бóльшей оптической толщиной линия H $\alpha$  будет формироваться в более далеких и высокоскоростных областях ветра, чем линия He II. Это принципиально

отличается от рентгеновских транзиентов с черными дырами в двойных системах (V404 Cyg, GRO J1655–40, GX 339–4), в которых ветер, истекающий с поверхности аккреционного диска, наблюдается над диском;

4. Отождествлены в оптическом диапазоне три ультраярких рентгеновских источника NGC 5474 X-1, M66 X-1 и NGC 4559 X-10. Показано, что все три объекта являются одними из самых слабых в оптическом диапазоне ультраярких рентгеновских источников, по типу спектров они представляют собой холодные сверхгиганты спектрального класса F-G. В результате анализа отношения рентгеновской к оптической светимости ультраярких рентгеновских источников обнаружено, что NGC 5474 X-1 и M66 X-1 имеют наибольшее среди хорошо изученных объектов отношение рентгеновской к оптической светимости около 7000 – 8000;
5. Показано, что оптическая светимость ультраярких рентгеновских источников как сверхкритических аккреционных дисков может сильно зависеть от темпа аккреции: при снижении темпа аккреции оптическая светимость уменьшается, температура ветра возрастает. При понижении темпа аккреции вклад звезды-донора в оптическое излучение ультраярких рентгеновских источников увеличивается;
6. На основе результатов проведенной оптической фотометрии, а также фотометрических и рентгеновских данных, взятых из литературы, предложен новый метод определения принадлежности объекта к ультраярким рентгеновским источникам по высокому отношению рентгеновской светимости к оптической. Обнаружено, что любой источник с отношением рентгеновской к оптической светимости больше 100–200 является надежным кандидатом в ультраяркие рентгеновские источники;
7. Разработана модель сверхкритического аккреционного диска в рамках приближения Шакуры-Сюняева, способная объяснить спектральное распределение энергии ультраярких рентгеновских источников в оптическом, ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах. Модель позволяет получать оценки масс черных дыр и начальных темпов аккреции.

## Теоретическая и практическая значимость

Результаты диссертации имеют как практическую, так и теоретическую ценность. В работе приводится уникальный для данного класса объектов спектральный материал. Полученные ширины и эквивалентные ширины линий могут быть использованы для проверки различных гипотез относительно природы ультраярких рентгеновских источников. Обнаруженные три новых оптических двойника расширяют список отождествленных в оптическом диапазоне ULX. Автором предложен новый метод определения принадлежности любого рентгеновского источника к ULX по высокому отношению рентгеновской к оптической светимостей. Разработанная спектральная модель сверхкритических аккреционных дисков позволяет объяснить наблюдаемые распределения энергии ULX от рентгеновского до оптического диапазона. Дальнейшее развитие модели сверхкритических аккреционных дисков потенциально ведет к возможности определения масс черных дыр и темпов аккреции в ULX, а планируемое ее включение в пакет XSPEC откроет к ней доступ широкой научной общественности.

## Положения, выносимые на защиту

На защиту выносятся следующие основные результаты и положения:

1. Результаты спектроскопии и анализа спектров оптических двойников семи ультраярких рентгеновских источников. Сделан вывод, что эти объекты обладают одним и тем же типом спектра, сходным со спектрами звезд LBV в их горячей фазе или звездами WNLh, а также спектром SS 433. Показано, что исследованные ультраяркие рентгеновские источники представляют собой однородный класс объектов и являются сверхкритическими аккреционными дисками с черными дырами звездных масс;
2. Зависимость оптической светимости ультраярких рентгеновских источников как сверхкритических аккреционных дисков от темпа аккреции: при снижении темпа аккреции оптическая светимость уменьшается, температура ветра сверхкритического диска возрастает. Вывод о том, что



источник с отношением рентгеновской к оптической светимости больше 100–200 является надежным кандидатом в ультраяркие рентгеновские источники;

3. Модель сверхкритического аккреционного диска на основе приближения Шакуры-Сюняева, которая объясняет спектральные распределения энергии ультраярких рентгеновских источников от оптического до рентгеновского диапазона;
4. Отождествление в оптическом диапазоне двух ультраярких рентгеновских источников в галактиках NGC 5474 и M66. Объекты NGC 5474 X-1 и M66 X-1 являются одними из самых слабых в оптическом диапазоне ультраярких рентгеновских источников, по типу спектров они представляют собой холодные сверхгиганты спектрального класса F-G.

## Апробация работы

Результаты работ обсуждались на семинарах Специальной Астрофизической Обсерватории РАН, в университете г. Киото, Токийском технологическом институте (Япония), университете г. Потсдам (Германия). Результаты докладывались на следующих российских и международных конференциях:

1. Всероссийская конференция "Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра – 2013"; Москва, 23-26 декабря 2013 г.
2. Всероссийская конференция "Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра – 2014"; Москва, 22-25 декабря 2014 г.
3. Международная конференция "Radiation mechanisms of astrophysical objects: classics today"; Санкт-Петербург, 21-25 сентября 2015 г.
4. Всероссийская конференция "Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра – 2015"; Москва, 21-24 декабря 2015 г.
5. Международная конференция "ULXs and their environments"; Strasbourg, France, 13-16 июня 2016 г.

## Публикации по теме диссертации

Материалы диссертации опубликованы в шести статьях. Основные результаты изложены в трех работах, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, которые включены в перечень журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций.

Статьи, опубликованные в рецензируемых журналах:

1. Vinokurov A., Fabrika S., Atapin K.; "Ultra-luminous X-ray sources as supercritical accretion disks: Spectral energy distributions"; *Astrophysical Bulletin*, Volume 68, Issue 2, pp. 139–153 (2013)
2. Fabrika S., Ueda Y., Vinokurov A., Sholukhova O., Shidatsu M.; "Supercritical accretion disks in ultraluminous X-ray sources and SS 433"; *Nature Physics*, Volume 11, pp. 551–553 (2015)
3. Avdan S., Vinokurov A., Fabrika S., Atapin K., Avdan H., Akyuz A., Sholukhova O., Aksaker N., Valeev A.; "Optical counterparts of two ULXs in NGC 5474 and NGC 3627 (M66)"; *MNRAS*, Volume 455, pp. L91–L95 (2016)

Статья в сборнике конференции:

4. Fabrika S., Vinokurov A., Atapin K., Sholukhova O.; "Super-Eddington accretion disks in Ultraluminous X-ray sources"; in *Proceedings of the International Workshop "Quark Phase Transition in Compact Objects and Multimessenger Astronomy: Neutrino Signals, Supernovae and Gamma-Ray Bursts"*, Russia, Nizhnij Arkhyz (SAO RAS), Terskol (BNO INR RAS), 7-14 October 2015, pp. 37-42 (2016)

Статьи, выложенные в архив препринтов astro-ph:

5. Fabrika S., Vinokurov A., Atapin K.; "Ultraluminous X-ray sources as super-Eddington accretion disks"; arXiv:1601.05971 (2016)
6. Vinokurov A., Fabrika S., Atapin K.; "Optical counterparts of two ultraluminous X-ray sources NGC 4559 X-10 and NGC 4395 ULX-1"; arXiv:1606.03024 (2016)

## Личный вклад автора

Автор настоящей работы принимал активное участие в подготовке к наблюдениям и наблюдениях на телескопах БТА и Subaru. Автором были выполнены обработка всех спектральных данных; астрометрические измерения по данным Chandra и HST; фотометрия изображений, полученных на космическом телескопе им. Хаббла. Совместно с соавторами была разработана модель сверхкритических аккреционных дисков. В всех работах автор внес равноценный вклад в обсуждение и интерпретацию результатов наряду с соавторами.

## Краткое содержание и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитированной литературы из 171 наименования, содержит 157 страниц машинописного текста, включая 18 рисунков и 11 таблиц.

**Во введении** обсуждается актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, а также основные результаты, выносимые на защиту. Приводится обзор, в котором описываются история открытия ультраярких рентгеновских источников (ULX), их основные наблюдательные проявления в рентгеновском и оптическом диапазонах, изменение представлений о природе ULX по мере исследования этих объектов и накопления новых данных. Кратко изложены структура и содержание работы, дается характеристика научной новизны и практической ценности полученных результатов, приводится список работ, в которых опубликованы результаты диссертации.

**В первой главе** описываются основные наблюдательные характеристики исследуемых ULX и использованные в работе спектральные и фотометрические данные. В разделе 1.1 для всех исследованных 13 ULX приводятся координаты рентгеновских источников, расстояния до их родительских галактик, величины межзвездного поглощения на луче зрения, исправленные за межзвездное поглощение оценки рентгеновских светимостей и видимые звездные величины объектов. В разделе 2.2 описаны наблюдательные данные оптических двойников ULX и их окружения, полученные на спектрографах FOCAS [12] телескопа Subaru и SCORPIO [2] телескопа БТА САО РАН в

режиме длиннощелевой спектроскопии, а также архивные данные телескопа VLT (спектрограф FORS [3]) и данные, заимствованные из литературы. В разделе 1.3 дано подробное описание основных этапов обработки спектральных данных, анализ которых проводится в следующих главах. Обсуждаются особенности выполненной обработки данных с каждого инструмента, а также проблемы экстракции и учета фона, возникающие при обработке спектров слабых объектов в тесных звездных полях, и методы их решения. В разделе 1.4 приводится описание и представлены методы фотометрии архивных данных наблюдений космического телескопа им. Хаббла на трех различных камерах: ACS, WFPC2 и WFC3. Для каждой из камер описываются особенности обработки данных, полученных с их помощью.

**Вторая глава** посвящена спектральному исследованию оптических двойников ULX, в первую очередь анализу и интерпретации спектров NGC 5204 X-1, NGC 4559 X-7, Holmberg II X-1 и Holmberg IX X-1, полученных с очень высоким отношением сигнал-шум в ходе наблюдений на телескопе Subaru в 2011 году. В разделе 2.1 представлен обзор результатов предыдущей спектроскопии оптических двойников ULX в ультрафиолетовом, оптическом и инфракрасном диапазонах. В разделе 2.2 анализируются оптические спектры NGC 5204 X-1, NGC 4559 X-7, Holmberg II X-1 и Holmberg IX X-1. В спектрах этих объектов были обнаружены широкие эмиссионные линии He II  $\lambda 4686$ , He I  $\lambda 5876$ , H $\beta$  и H $\alpha$ . Кроме того, в спектре Holmberg IX X-1 обнаружены эмиссии He I  $\lambda \lambda 6678, 7065$ , а в спектре Holmberg II X-1 – линия He II  $\lambda 5411$ . Для всех спектральных линий определены (либо даются оценки сверху) их эквивалентные ширины, для ярких линий найдены ширины (FWHM) и лучевые скорости. Исходя из наблюдаемых отношений эквивалентных ширин линий He II, He I и H I показано, что содержание водорода и гелия в этих объектах близко к солнечному. Измерение лучевой скорости линии He II  $\lambda 4686$  в объектах NGC 5204 X-1, NGC 4559 X-7 и Holmberg IX X-1 показало, что амплитуда ее переменности не превышает значение 500 км/с и имеет среднее значение примерно 200 – 250 км/с. По данным Subaru обнаружено, что в спектрах ULX ширина линии He II от ночи к ночи меняется до трех раз, а эквивалентная ширина этой линии – до двух раз. На основе измеренных ширин линий He II  $\lambda 4686$  и H $\alpha$  в спектрах NGC 5204 X-1, NGC 4559 X-7, Holmberg II X-1, Holmberg IX X-1 и NGC 5408 X-1 (архивные данные телескопа VLT) рас-

считано среднее для пяти объектов отношение ширин линий He II  $\lambda 4686$  и H $\alpha$   $FWHM(He II)/FWHM(H\alpha) \approx 0.8$ .

В разделе 2.3 анализируются спектры оптических двойников 8 ультраярких рентгеновских источников: Holmberg II X-1, Holmberg IX X-1, NGC 4559 X-7, NGC 5204 X-1, NGC 4395 ULX-1, NGC 5408 X-1, NGC 1313 X-2 и NGC 7793 P13. Эти ULX представляют собой полную выборку объектов, для которых когда-либо была проведена глубокая спектроскопия в оптическом диапазоне. Однако, результаты исследования NGC 4395 ULX-1 не были опубликованы в рецензируемом издании, поэтому на защиту выносятся результаты анализа спектров семи объектов. На основе проведенного анализа показано, что исследуемые ULX обладают одним и тем же типом спектра, являются объектами одной природы, то есть представляют собой однородный класс объектов. Сравнение спектров ULX со спектрами объектов других классов, включая анализ положения ULX на классификационной диаграмме Краутера и Смита [5], показывает, что ультраяркие источники по типу своих спектров имеют сильное сходство со звездами WNLh (поздние звезды Вольфа-Райе азотной последовательности с линиями водорода) или LBV (Яркие Голубые Переменные) в горячей фазе, а также с единственным известным в Галактике сверхаккретором SS 433.

В разделе 2.4 обсуждается вопрос об области формирования оптических спектров исследуемых ULX. Известны три возможные интерпретации оптических спектров ULX в зависимости от места их формирования: звезда-донор, стандартный аккреционный диск с IMBH и сверхкритический аккреционный диск с черной дырой звездной массы. Показано, что наблюдаемая амплитуда лучевой скорости линии He II  $\lambda 4686$  не согласуется с ожидаемыми скоростями звезд-доноров в системах с черными дырами промежуточных масс. Приводятся оценки темпа потери массы звездой-донором в тесной двойной системе с аккрецией газа на черную дыру из ветра донора. Показано, что звезда WNL-типа не способна обеспечить темпы истечения газа в ветре, необходимые для обеспечения наблюдаемых рентгеновских светимостей ULX. Обнаруженная переменность ширины и эквивалентной ширины линии He II в спектрах ULX от ночи к ночи также не соответствует тому, что может наблюдаться в звездах. На основе анализа отношения ширин линий He II и H $\alpha$  в спектрах ULX и транзиентных рентгеновских двойных с самопрогревающимися дисками во

время их вспышек, делается вывод, что эти линии не могут излучаться в аккреционном диске. Показано, что ветра сверхкритических дисков (как у SS 433), подобные ветрам LBV и WNLh, способны объяснить основные наблюдаемые свойства ULX. На основе представленных аргументов делается вывод, что наиболее вероятной областью формирования излучения ULX в эмиссионных линиях является ветер сверхкритического аккреционного диска, а не звезда-донор или стандартный аккреционный диск с черной дырой промежуточной массы. Показано, что температуры таких ветров в ультраярких источниках значительно выше (70–200 кК), а темпы истечения ниже (в 1.5–6 раз), чем в SS 433.

В заключении главы делается вывод, что исследованные ультраяркие рентгеновские источники, наиболее вероятно, представляют собой сверхкритические аккреционные диски с черными дырами звездных масс. Материалы второй главы опубликованы в работах [2], [4], [5] и [6], основные результаты – в работе [2].

**В третьей главе** описывается отождествление в оптическом диапазоне и исследование четырех ультраярких рентгеновских источников NGC 5474 X-1, M66 X-1, NGC 4559 X-1 и NGC 4395 ULX-1. Оптические двойники первых трех источников обнаружены впервые. В разделе 3.1 дано подробное описание проведенной астрометрии, приводятся координаты оптических двойников и карты отождествления объектов.

В разделе 3.2 представлены результаты фотометрии этих ULX по данным космического телескопа им. Хаббла и результаты спектроскопии их окружения по данным БТА/SCORPIO. Показано, что NGC 5474 X-1, M66 X-1 и NGC 4559 X-10 являются одними из слабейших в оптическом диапазоне ультраяркими рентгеновскими источниками: их абсолютные звездные величины в полосе  $V$  находятся в диапазоне от  $-5.3^m$  до  $-4.2^m$ , а по типу спектров все три объекта представляют собой холодные сверхгиганты класса F-G. Обнаружено, что оптический двойник NGC 4395 ULX-1, абсолютная звездная величина в фильтре  $V$  которого равна  $-6.2^m$ , имеет горячий степенной спектр, подобный спектрам большинства других ярких в оптическом диапазоне ULX. По наблюдаемым отношениям линий бальмеровской серии водорода в спектрах туманностей вокруг NGC 5474 X-1, NGC 4559 X-1 и NGC 4395 ULX-1 определены величины межзвездного поглощения в направлении этих объектов.

Спектроскопия оптического двойника NGC 4395 ULX-1 выявила наличие широкой линии He II в двух из трех наблюдений источника. Спектр оптического двойника NGC 5474 X-1 является голубым, однако основной вклад вносит ближайшая к источнику звезда 23.0 звездной величины. Сам же оптический двойник по данным HST имеет значительно более красный цвет. Кроме того, в результате проведенных наблюдений этого ULX обнаружена галактика с эмиссионными линиями на  $z=0.359$ , а также скопление с Вольфа-Райе особенностями в спектре, принадлежащее галактике NGC 5474.

Разделы 3.3 и 3.4 посвящены анализу отношения рентгеновской к оптической светимости отождествленных ультраярких рентгеновских источников и распределения ULX по абсолютным звездным величинам их оптических двойников. Обнаружено, что NGC 5474 X-1 и M66 X-1 являются ультраяркими источниками с наибольшим среди хорошо изученных ULX отношением рентгеновской к оптической светимости. Показано, что высокое отношение рентгеновской к оптической светимости ULX является критерием, по которому можно отличить эти объекты от фоновых галактик с активными ядрами и от других объектов. Сделан вывод, что любой источник с отношением рентгеновской к оптической светимости больше 100–200 является надежным кандидатом в ультраяркие рентгеновские источники. Построено распределение ULX по абсолютным звездным величинам (16 объектов, включая NGC 5474 X-1, M66 X-1, NGC 4559 X-1 и NGC 4395 ULX-1). Показано, что оптическая светимость ультраярких рентгеновских источников в рамках модели сверхкритических аккреционных дисков сильно зависит от первоначального темпа аккреции: при снижении темпа аккреции оптическая светимость уменьшается, температура ветра возрастает. Представлены доводы в пользу того, что для ULX с низкой оптической светимостью возможен значительный вклад звезды-донора в оптический спектр объекта, тогда как для большинства ярких объектов с  $M_V \lesssim -6^m$  доминирующим должно быть излучение ветра.

Результаты третьей главы опубликованы в работах [3] и [6], основные результаты – в статье [3]. На защиту выносятся только результаты исследования NGC 5474 X-1 и M66 X-1, опубликованные в работе [3], результаты исследования остальных двух объектов не были опубликованы в рецензируемом журнале.

**В четвертой главе** представлена разработанная на основе приближе-

ния Шакуры-Сюняева [26] модель сверхкритического аккреционного диска с истекающим с его поверхности ветром. Она была успешно применена для анализа наблюдаемых распределений энергии в спектрах ULX от рентгеновского до оптического диапазона. В разделе 4.1 подробно описывается версия модели сверхкритического аккреционного диска (SCAD), опубликованная в работе [1]. В этой версии модели не рассматривались процессы комптонизации и коллимация излучения каналом ветра, поскольку основной акцент был сделан на моделировании спектров ULX в ультрафиолетовом и оптическом диапазонах. В разделе 4.1 приведены результаты моделирования спектральных распределений пяти ULX (Holmberg II X-1, NGC 6946 ULX-1, NGC 1313 X-1, NGC 1313 X-2 и NGC 5408 X-1) в оптическом диапазоне и в рентгеновском диапазоне ниже энергий 1.5 кэВ, поскольку на этих энергиях роль комптоновского рассеяния в формировании спектров объектов мала. В рамках модели были получены оценки масс черных дыр исследованных ULX в диапазоне от 8 до 20 масс Солнца и оценки начальных темпов аккреции от 150 до 270 эддингтоновских. Показано, что учет коллимации излучения приводит к уменьшению получаемых значений масс черных дыр в 2 – 3 раза при углах раствора ветрового канала  $\theta_f \approx 45^\circ \div 60^\circ$ ; в то же время, уменьшение угла раствора канала приводит к возрастанию оценки масс обратно пропорционально  $\sin^2 \theta_f$ . Таким образом, оценки масс по-прежнему будут соответствовать черным дырам звездных масс. В разделе 4.3 на примере моделирования спектра NGC 5408 X-1 показано, что новая версия модели (SCADc), в которой учитываются комптонизация и коллимация излучения, позволяет воспроизводить наблюдаемые спектры ULX во всем "стандартном" рентгеновском (0.3–10 кэВ) и оптическом диапазонах. При этом, получаемые массы черных дыр и темпы аккреции, как и в случае модели SCAD, так и в случае модели SCADc соответствуют сверхкритической аккреции на черные дыры звездных масс. Основные результаты главы опубликованы в работе [1].

**В заключении** сформулированы результаты и выводы диссертационной работы.

**В списке литературы** дан перечень публикаций, цитируемых и используемых в данной работе.



## Список цитированной литературы

- [1] Abolmasov, P., Fabrika, S., Sholukhova, O., & Afanasiev, V. 2007, *Astrophysical Bulletin*, 62, 36
- [2] Afanasiev, V. L., & Moiseev, A. V. 2005, *Astronomy Letters*, 31, 194
- [3] Appenzeller, I., et al. 1998, *The Messenger*, 94, 1
- [4] Colbert, E. J. M., & Mushotzky, R. F. 1999, *Astrophys. J.*, 519, 89
- [5] Crowther, P. A., & Smith, L. J. 1997, *Astronom. and Astrophys.*, 320, 500
- [6] Cseh, D., Gris e, F., Kaaret, P., Corbel, S., Scaringi, S., Groot, P., Falcke, H., & K rding, E. 2013, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.*, 435, 2896
- [7] Fabrika, S., & Mescheryakov, A. 2001, in *IAU Symposium, Vol. 205, Galaxies and their Constituents at the Highest Angular Resolutions*, ed. R. T. Schilizzi, 268
- [8] Feng, H., & Soria, R. 2011, *New Astronomy Rev.*, 55, 166
- [9] Freitag, M., G rkan, M. A., & Rasio, F. A. 2006, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.*, 368, 141
- [10] Gladstone, J. C., Copperwheat, C., Heinke, C. O., Roberts, T. P., Cartwright, T. F., Levan, A. J., & Goad, M. R. 2013, *Astrophys. J. Suppl.*, 206, 14
- [11] Gladstone, J. C., Roberts, T. P., & Done, C. 2009, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.*, 397, 1836
- [12] Kashikawa, N., et al. 2000, in *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, Vol. 4008, Optical and IR Telescope Instrumentation and Detectors*, ed. M. Iye & A. F. Moorwood, 104–113
- [13] Katz, J. I. 1986, *Comments on Astrophysics*, 11, 201
- [14] King, A. R., Davies, M. B., Ward, M. J., Fabbiano, G., & Elvis, M. 2001, *Astrophys. J.*, 552, L109
- [15] Lehmann, I., et al. 2005, *Astronom. and Astrophys.*, 431, 847

- [16] Liu, J.-F., Bregman, J. N., Bai, Y., Justham, S., & Crowther, P. 2013, *Nature*, 503, 500
- [17] Madau, P., & Rees, M. J. 2001, *Astrophys. J.*, 551, L27
- [18] Motch, C., Pakull, M. W., Soria, R., Grisé, F., & Pietrzyński, G. 2014, *Nature*, 514, 198
- [19] Ohsuga, K., & Mineshige, S. 2011, *Astrophys. J.*, 736, 2
- [20] Ohsuga, K., Mori, M., Nakamoto, T., & Mineshige, S. 2005, *Astrophys. J.*, 628, 368
- [21] Pakull, M. W., & Mirioni, L. 2003, in *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica*, vol. 27, Vol. 15, *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series*, ed. J. Arthur & W. J. Henney, 197–199
- [22] Portegies Zwart, S. F., Baumgardt, H., Hut, P., Makino, J., & McMillan, S. L. W. 2004, *Nature*, 428, 724
- [23] Poutanen, J., Lipunova, G., Fabrika, S., Butkevich, A. G., & Abolmasov, P. 2007, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.*, 377, 1187
- [24] Ptak, A., Colbert, E., van der Marel, R. P., Roye, E., Heckman, T., & Towne, B. 2006, *Astrophys. J. Suppl.*, 166, 154
- [25] Roberts, T. P., Gladstone, J. C., Goulding, A. D., Swinbank, A. M., Ward, M. J., Goad, M. R., & Levan, A. J. 2011, *Astronomische Nachrichten*, 332, 398
- [26] Shakura, N. I., & Sunyaev, R. A. 1973, *Astronom. and Astrophys.*, 24, 337
- [27] Tao, L., Feng, H., Grisé, F., & Kaaret, P. 2011, *Astrophys. J.*, 737, 81
- [28] Walton, D. J., Roberts, T. P., Mateos, S., & Heard, V. 2011, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.*, 416, 1844
- [29] Yang, L., Feng, H., & Kaaret, P. 2011, *Astrophys. J.*, 733, 118



Бесплатно

Винокуров Александр Сергеевич

Наблюдательные проявления ультраярких рентгеновских источников и  
сверхкритической дисковой аккреции

Зак. №201с Уч.изд.лит. 1.0 Тираж 100

---

САО РАН