

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**

01. 03. 02 – астрофизика и звездная астрономия

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:

доктор физико-математических

наук, профессор Фабрика С.Н.

Нижний Архыз – 2016

Содержание

Введение	3
Глава 1. Наблюдения и обработка данных	27
1.1. Объекты исследования	27
1.2. Наблюдения на телескопах Subaru и БТА. Архивные данные телескопа VLT	30
1.3. Обработка длиннощелевых спектров ULX	39
1.4. Обработка фотометрических наблюдений ULX по данным космического телескопа им. Хаббла	44
Выводы	52
Глава 2. Анализ спектров ULX	54
2.1. Результаты предыдущей спектроскопии звездобразных оптических двойников ULX	55
2.2. Исследование спектров четырех оптических двойников ULX по данным телескопа Subaru	60
2.3. Сходство со спектрами LBV звезд в горячем состоянии и SS 433	71
2.4. Область формирования спектров ULX	78
Выводы	86
Глава 3. Новые оптические отождествления ультраярких рентгеновских источников	89
3.1. Отождествление в оптическом диапазоне NGC 5474 X-1, M66 X-1, NGC 4559 X-10 и NGC 4395 ULX-1	91
3.2. Фотометрия и спектроскопия	98
3.3. Отношения рентгеновской к оптической светимости NGC 5474 X-1 и M66 X-1	105

3.4. Зависимость оптической светимости от темпов аккреции в сверх- критических аккреционных дисках	108
Выводы	112
Глава 4. Модель сверхкритического аккреционного диска	114
4.1. Модель	116
4.2. Сравнение с наблюдательными данными	125
4.3. Модель SCAD с учетом комптонизации	136
Выводы	138
Заключение	141
Список литературы	144

Введение

Исторический обзор и 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.

История открытия ULX начинается с обнаружения около двух десятков ярких рентгеновских источников в галактиках по данным обсерватории Einstein [39, 71, 100]. Наблюдения ROSAT позволили расширить список ULX-кандидатов до приблизительно 100 объектов [27, 133]. Однако необходимо отметить, что первые списки объектов содержат достаточно большое количество фоновых объектов, таких как проецирующиеся на близкие галактики квазары или катаклизмические переменные нашей Галактики. В одном из последних, составленных по данным ROSAT каталогов [95], включающем 109 кандидатов, Лиу и Брегман минимизировали вклад фоновых источников включением в каталог только тех объектов, которые находятся в пределах изофоты $2D_{25}$ вблизи рукавов или пылевых полос родительских галактик. Также авторы исключили те источники, которые совпали с известными квазарами и фоновыми звездами.

Однако, ультраяркие рентгеновские источники стали очевидным новым классом объектов с 2000-х гг. с началом наблюдений на обсерватории Chandra с ее превосходным пространственным разрешением $\sim 1''$ и хорошей чувствительностью. В 2000 г. введен в эксплуатацию XMM-Newton, обладающий разре-

нием $\sim 10''$, но в 2-10 раз большей чем у Chandra эффективной площадью в диапазоне 0.2-10 кэВ. Как отмечается в работе Робертса и др. [132], "Учитывая передовые возможности обсерваторий Chandra и XMM-Newton, впервые стало достижимой целью детальное изучение ярких точечных рентгеновских источников (в том числе и ULX) в соседних галактиках за пределами локальной группы". По данным Chandra Шварц с соавторами в 2004 г. [148] публикует относительно свободный от различных фоновых объектов каталог, включающий 154 ULX-кандидатов со светимостями $> 10^{39}$ эрг/с. Следующий список Шварца и др. [149], опубликованный в 2011 г. и состоящий из 107 объектов (см. подробнее в главе 3), активно использовался автором настоящей работы для поиска новых оптических отождествлений ULX. Нельзя не упомянуть каталоги Лиу [92] 2011 и Валтона и др. [166] 2011, на настоящее время являющиеся, пожалуй, самыми полными каталогами кандидатов в ULX. Первый составлен по данным Chandra и включает в себя 479 кандидатов в 188 галактиках, второй получен кросскорреляцией 2XMM обзора [168] и RC3 (Third Reference Catalogue of Bright Galaxies [34]) и состоит из 470 ULX-кандидатов в 238 близких галактиках. Несмотря на предпринимаемые авторами меры по "очистке" списков ULX от фоновых объектов, во многих работах сообщается об обнаружении среди кандидатов неизвестных ранее AGN (например, [64, 68]). Таким образом, решение проблемы фоновых объектов актуально и для самых современных каталогов ULX. В главе 3 настоящей работы будут обсуждаться некоторые возможные способы отбора кандидатов в ULX по отношению рентгеновской к оптической светимостям.

Для объяснения феномена ULX существуют 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 [41, 81, 124]. Аккреция является сверхкритической, если темп аккреции превышает эддингтоновский $\dot{M}_{Edd} \simeq 3.2 \times$

$10^{-7} M_{10} M_{\odot}/\text{год}$, где M_{10} - масса черной дыры в единицах $10M_{\odot}$. Единственным известным на настоящий момент сверх-аккретором является SS 433, и в этом отношении его можно считать прототипом ULX [41]. В рамках второй интерпретации ULX рассматриваются как черные дыры промежуточных масс (Intermediate Mass Black Holes, IMBH, $10^2 - 10^4 M_{\odot}$) со стандартными аккреционными дисками (например, [26]). Оба сценария требуют наличия массивного донора на тесной орбите, способного обеспечить темп аккреции выше $\dot{M} \simeq L/\eta c^2 \simeq 2 \times 10^{-7} M_{\odot}/\text{год}$ для светимости $L \sim 10^{39}$ эрг/с, где эффективность аккреции η как правило принимается равной 0.1.

IMBHs, предположительно появившиеся в результате эволюции низкометаллических звезд населения III типа [102], могут образовывать двойные системы вследствие приливного захвата одиночных звезд [16]. Как показали Мадхусудхан с соавторами [103], для повышения эффективности захвата массы таких звезд должны быть более $8 M_{\odot}$. Тем не менее, ожидаемая частота встречаемости подобных систем с IMBH невысока и не согласуется с наблюдаемым количеством ULX [86, 103]. Большинство ULX связаны с областями звездообразования [4, 97, 150] и молодыми звездными скоплениями (например, [123]). Они не распределяются по всему объему галактики, как можно было бы ожидать в случае IMBHs, возникших из звезд населения III типа.

IMBHs также могут формироваться в ядрах молодых звездных скоплений [47, 122], однако в этом случае они должны оставаться внутри скоплений вследствие больших масс IMBH. В работе [123] авторы обнаружили, что большинство ярких рентгеновских источников в галактиках Антенны (NGC 4038/NGC 4039) находятся рядом с очень молодыми скоплениями, а не в самих скоплениях. Они пришли к выводу, что источники были выброшены в результате динамических столкновений звезд в процессе формирования скоплений, а ULX являются массивными рентгеновскими двойными и образовались в результате эволюции звезд с массой свыше $50 M_{\odot}$.

Интерпретация ULX как IMBH со стандартными аккреционными дисками до недавнего времени была наиболее предпочтительной (например, [106, 107, 134, 170]). Этому способствовало наличие в рентгеновских спектрах ULX (стандартный рентгеновский диапазон 0.2-10 кэВ) помимо жесткой компоненты, похожей на степенную с широким распределением фотонного индекса и его пиковым значением $\Gamma \sim 2.0$ [46], мягкого избытка ниже 1 кэВ (обычно 0.1 - 0.4 кэВ [46]). Подобный избыток у черных дыр в двойных системах (Black Hole Binaries, BHВ) связывают с излучением стандартного диска, который отчетливо наблюдается у них в высоком состоянии (high state). Низкие температуры дисков естественным образом объясняются в модели с черными дырами промежуточных масс: температура на внутреннем радиусе диска падает с увеличением массы черной дыры как $T_{in} \propto M_{BH}^{-1/4}$. Таким образом, если для галактических черных дыр с массами порядка $10 M_{\odot}$ характерны температуры около 1 кэВ, то температуры дисков ULX соответствуют массам $\sim 10^3 M_{\odot}$.

Тем не менее, по мере накопления данных с высоким отношением сигнал-шум стало ясно, что ULX не вписываются в общую концепцию. Еще в работах [130, 146] авторы отмечают наличие в спектрах большинства ULX перегиба (curvature) выше 2 кэВ, не согласующегося с ожиданиями для стандартных дисков вокруг IMBH. Более того, в ряде работ (например, [52, 146]) высказывается идея о вероятном присутствии в ULX плотной низкотемпературной короны. Одной из наиболее цитируемых работ, посвященных исследованию наиболее накопленных рентгеновских спектров ULX, в которой подробно описаны особенности спектров ультраярких рентгеновских источников совместно с их интерпретацией, является работа Глэдстоун и др. [51]. Авторами было показано, что рентгеновские спектры ULX в большинстве случаев имеют характерную двухкомпонентную форму с мягким избытком в качестве одного из этих компонентов. Общим свойством спектров ультраярких рентгеновских источников является перегиб в области высоких энергий со спадом в спектрах между 4 и 7 кэВ (см. [22, 51], а

также обзор [46]). Перегиб на высоких энергиях подтвержден недавними исследованиями на NuSTAR [15, 164, 165, 167], которые показали, что в диапазоне выше 10 кэВ ULX имеют очень крутой спектр. Подобная форма спектров не может быть адекватно описана ни составной моделью стандартного диска со степенной компонентой (DISKBB+POWERLAW), ни моделью slim-дисков [51].

Глэдстоун и соавторы [51] выяснили, что наилучшее согласие с наблюдаемой формой спектров дают физические модели комптонизации, однако температуры электронов такой короны получаются довольно низкими (как правило $\lesssim 3$ кэВ), а оптические толщины высокими ($\tau_c \sim 10$). Это сильно отличается от тех величин (температуры электронов более 10 кэВ, оптические толщины менее 1), что характерны для галактических рентгеновских двойных. Такое особое состояние объектов, не наблюдающееся в галактических рентгеновских двойных, было названо "ультраярким" ("ultraluminous state"). Глэдстоун и др. представили модель, из которой следует, что получаемые ранее низкие температуры дисков в действительности могут быть следствием перераспределения энергии (компонизации) в оптически толстой короне или ветре, которые покрывают внутренние части диска. Приводимые авторами оценки внутренних температур диска после учета эффектов комптонизации в большинстве случаев соответствуют черным дырам звездных масс.

В 2013 г. Саттон с соавторами [147] предложили эмпирическую классификацию по типам рентгеновских спектров: broadened disk, в котором невозможно разделить мягкий и жесткий компонент, и hard ultraluminous и soft ultraluminous с доминированием соответственно жесткого и мягкого компонентов. Некоторые авторы (например, [121]) считают, что broadened disk и hard ultraluminous принадлежат одному типу спектров. Саттон и др. указывает на существование тенденции, что объекты с низкой светимостью ($L_X < 3 \times 10^{39}$ эрг/с) преимущественно обладают спектрами типа broadened disk, тогда как остальные два типа спектров преимущественно видны у объектов с большими

светимостями ($L_X \sim 10^{40}$ эрг/с). Существование подобной корреляции между светимостью и формой спектра, по мнению авторов, наводит на мысль о возможном делении объектов по темпам аккреции на близкую к критическому (эддингтоновскому) и сверхкритическому. Однако, данная корреляция является лишь тенденцией и выполняется далеко не для всех объектов (см. например, [79, 121]).

Одной из последних попыток отстоять концепцию IMBH в применении к ULX как классу объектов в целом стало использование спектральной модели Гиерлинского и других DISKIR [48, 49]. Модель с разной степенью успешности была применена для аппроксимации спектров нескольких ULX [17, 60, 152]. DISKIR базируется на стандартной модели многотемпературного диска (DISKBB), но учитывает эффекты комптонизации (в короне, покрывающей внутренние части диска) и облучения диска жесткими квантами. Стоит отметить, что первоначально данная модель разрабатывалась для маломассивных рентгеновских двойных [48, 49].

В моделях, где ультраяркие рентгеновские источники рассматриваются как сверхкритические аккреционные диски (СКАД, Supercritical Accretion Disk или SCAD), требуется наличие геометрической коллимации излучения вдоль луча зрения наблюдателя [41, 124]; эти модели способны объяснить существование объектов со светимостями до 10^{41} эрг/с [46]. Предполагается, что ULX представляют собой наблюдаемые вдоль оси диска аналоги системы SS 433, как уже отмечалось, единственного известного сверх-аккретора в Галактике [40]. SS 433 содержит черную дыру звездной массы, находящуюся в режиме постоянной сверхкритической аккреции с темпом около 300-500 \dot{M}_{Edd} ([40] и ссылки отсюда). В этой системе ветер формирует широкий канал вдоль оси диска, который коллимирует излучение с поверхности диска.

Теоретические исследования сверхкритической дисковой аккреции, вероятно, начинаются с известной статьи Шакуры и Сюняева 1973 г. [138]. В своей

работе авторы показали, что отличительной особенностью сверхкритического режима аккреции является существование характерного радиуса, ниже которого диск становится геометрически толстым, а с его поверхности начинает истекать вещество в виде ветра. Данный радиус называется радиусом сферизации. Авторами было показано, что энерговыделение сверхкритического диска зависит логарифмически от темпа аккреции $L \propto \ln \dot{m}_0$, \dot{m}_0 – темп аккреции в единицах \dot{M}_{Edd} . В расчетах Бисноватого-Когана и Блинникова [19] было показано, что истечение с поверхности диска начинается даже при меньших темпах аккреции, чем эддингтоновский. Однако, в этих ранних работах не была учтена адвекция тепла и излучения. В работах Абрамовица и др. 1980-1988 гг. (например, [5, 6, 73]) была разработана модель сверхкритического аккреционного диска "slim disk", в которой учтена адвекция энергии аккреции внутрь. Основная проблема этой модели заключается в отсутствии ветра, несмотря на то, что в газе диска параметр Бернулли положителен. Позднее М. Абрамовиц поддержал идею, что в slim-дисках должен быть ветер.

Результаты 2D радиационных гидродинамических расчетов (например, [114, 115]), учитывающих в том числе и адвекцию излучения, подтверждают все основные идеи модели SCAD Шакуры и Сюняева. Поутанен с соавторами [124] подошли к проблеме ULX в рамках подхода Шакуры-Сюняева и подтвердили, что основные наблюдаемые особенности спектров ULX могут формироваться в протяженных фотосферах ветров. В опубликованных в 2011 году расчетах Охсуга и Минишиге [113] было показано, что даже в стандартном диске идет истечение из внутренних областей, что подтверждает результаты Бисноватого-Когана и Блинникова [19]. В самых современных магнитогидродинамических расчетах [74, 135] как ветер с поверхности диска, так и формируемый им канал подтверждаются прямо. В последних работах приводятся полностью релятивистские расчеты с учетом магнитных полей (Magnetically Arrested Disk).

Несмотря на огромное количество работ, посвященных исследованию рент-

геновских спектров ультраярких рентгеновских источников, одна лишь рентгеновская спектроскопия не в состоянии дать ответ на вопрос о природе ULX. Однако, ее результаты дают однозначный ответ, что диски в ультраярких рентгеновских источниках не являются стандартными.

Как представляется автору данной работы, ключом к пониманию природы ультраярких рентгеновских источников является их комплексное исследование в разных диапазонах длин волн, среди которых одним из важнейших является оптический диапазон.

Несмотря на то, что каталоги ультраярких рентгеновских источников (например, [92, 166]) включают в себя более 450 кандидатов в ULX, с оптическими источниками отождествлены менее 50 объектов [50, 125]. 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 звездобразными источниками, для которых известны спектральные распределения энергии в широком диапазоне длин волн [151, 171]. Отождествления ULX со звездобразными источниками далее будут именоваться их оптическими двойниками. Количество оптических двойников ULX, для которых были проведены спектральные наблюдения, составляет менее 10 объектов [33, 96, 111, 131]. Значительный вклад в спектральное исследование оптических двойников ультраярких рентгеновских источников внесла наша работа [42], в которой представлены результаты спектроскопии четырех ультраярких рентгеновских источников (Holmberg II X-1, Holmberg IX X-1, NGC 4559 X-7, NGC 5204 X-1), выполненной на телескопе Subaru в феврале 2011. Результатам этой работы посвящена глава 2 данной диссертации.

Большая часть оптических отождествлений ультраярких рентгеновских источников, находящихся в близких галактиках, была найдена по данным космического телескопа им. Хаббла. Примерами могут служить NGC 4559 X-7

[142] (однозначное отождествление этого объекта опубликовано в работе [151]), Holmberg IX X-1 [127], NGC 6946 ULX-1 [77], NGC 1313 X-1 [171], NGC 1313 X-2 [94]. Все эти объекты отождествлены со звездообразными источниками. Оптические двойники некоторых ULX (например, NGC 7793 P13 [111]) были обнаружены в результате исследований, проведенных на различных наземных телескопах. Помимо изучения оптических двойников ультраярких рентгеновских источников, на телескопе им. Хаббла и на наземных телескопах проводятся фотометрические и спектральные исследования их окружения, в частности располагающихся рядом с объектами и, по-видимому, физически связанных с ними молодых звездных скоплений [4, 60, 61].

Исследования окружения ультраярких рентгеновских источников показали наличие вокруг многих из них оболочечных туманностей [120]. Формы этих туманностей, а также обнаруженные изменения лучевых скоростей в них [89], свидетельствуют в пользу существования дополнительного источника энергии, динамически возмущающего межзвездную среду, которым могут быть релятивистские струи или слабоколлимированные ветра сверхкритических дисков [2].

Для ионизации туманностей, окружающих ULX, не требуется больших факторов коллимации излучения. Промежуточные значения фактора коллимации ($B \sim 3 - 5$ [46, 114]) вполне достаточны, чтобы получить как наблюдаемые светимости, так и наблюдаемые формы туманностей. Кроме того, не только рентгеновское излучение может ионизовать туманности. В работе [3], в которой была изучена туманность MF 16, окружающая NGC 6946 ULX-1, авторы показали, что ультрафиолетовое излучение позволяет воспроизвести спектр MF 16. Они предположили, что и другие ULX являются очень яркими ультрафиолетовыми источниками. Дальнейшие исследования показали, что по крайней мере некоторые из ULX действительно очень яркие УФ-источники [77, 152]. Кроме того, в результате систематического исследования спектральных распределений энергии ULX в оптическом и ближнем ультрафиолетовом диапазонах [151] было

показано, что общим свойством ярких (с абсолютными величинами $M_V \lesssim -6^m$) оптических двойников этих объектов являются их голубые степенные спектры ($F_\nu \propto \nu^\alpha$ с α в диапазоне 1–2), что также указывает на большие светимости ULX в УФ-диапазоне.

Выше представлены лишь некоторые результаты исследований ультраярких рентгеновских источников в оптическом диапазоне. Сейчас публикуется все больше работ, посвященных открытию и всестороннему исследованию оптических двойников ULX. Тем не менее, активное изучение объектов в этом диапазоне только начинается, в частности, в данной работе основной акцент делается именно на оптическом исследовании ультраярких рентгеновских источников.

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 α , что свидетельствует в пользу формирования этих линий в плотных ветрах сверхкритических аккреционных дисков. Такая ситуация наблюдается в SS 433, LBV, WR-звездах, а также в горячих сверхгигантах. Обладающая большей оптической толщиной линия H α 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 име-

ют 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 Multi-messenger 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 харак-

теристика 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 [80] телескопа Subaru и SCORPIO [7] телескопа БТА САО РАН в режиме длиннощелевой спектроскопии, а также архивные данные телескопа VLT (спектрограф FORS [11]) 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 λ 4686, He I λ 5876, H β и H α . Кроме того, в спектре Holmberg IX X-1 обнаружены эмиссии He I λ 6678, 7065, а в спектре Holmberg II X-1 – линия He II λ 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 λ 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 λ 4686 и H α 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) рассчитано среднее для пяти объектов отношение ширин линий He II λ 4686 и H α $FWHM(He II)/FWHM(H\alpha) \approx 0.8$.

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 [30], 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 сверх-аккретором 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 α 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 приближения Шакуры-Сюняева [138] 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 аккре-

ции 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.

Глава 1

Наблюдения и обработка данных

В этой главе представлено описание используемых в работе спектральных и фотометрических данных, в том числе архивных. Приводятся основные сведения об исследованных ультраярких рентгеновских источниках: NGC 4559 X-7, NGC 5204 X-1, Holmberg IX X-1, Holmberg II X-1, NGC 6946 ULX-1, NGC 1313 X-1,2, NGC 5408 X-1, NGC 7793 P13, NGC 4395 ULX-1, NGC 5474 X-1, M66 X-1 и NGC 4559 X-10. Описание обнаружения оптических отождествлений четырех последних объектов и их исследование приводятся в главе 3; полученные в процессе обработки и анализа наблюдательных и архивных данных, либо полученные из анализа литературных данных результаты для остальных объектов детально обсуждаются в главах 2 и 4.

1.1. Объекты исследования

Исследования, результаты которых представлены в настоящей работе, основаны на наблюдательном материале, полученном на 8,2-метровом телескопе Subaru Национальной Астрономической Обсерватории Японии и 6-метровом телескопе БТА САО РАН (Большой Телескоп Азимутальный), а также архивных данных телескопа VLT¹, космического телескопа им. Хаббла и данных из работ других авторов. Были изучены 13 ультраярких рентгеновских источников, находящихся в близких (до 11 Мпк) галактиках.

В табл. 1.1 представлены общие сведения об объектах нашей выборки. Даны общепринятые названия объектов, координаты рентгеновских источников

¹ Very Large Telescope (Очень большой телескоп) представляет собой комплекс из четырёх отдельных 8,2-метровых оптических телескопов, способных работать как независимо друг от друга, так и в режиме интерферометра. Принадлежит Европейской Южной Обсерватории (European Southern Observatory, ESO).

по данным Chandra, расстояния до их родительских галактик, исправленные за поглощение рентгеновские светимости объектов и их наблюдаемые звездные величины. Указанные расстояния D для всех галактик были получены в разных работах (ссылки в таблице) методом TRGB (Tip of the Red Giant Branch), исключая NGC 4559, для которого такие измерения отсутствуют. Для NGC 4559 дается расстояние, определенное по методу Талли-Фишера. Величины полного межзвездного поглощения вдоль луча зрения A_V , измеренные по бальмеровскому декременту в окружающих ультраяркие источники туманностях, и поглощение в нашей Галактике в направлении на изучаемые объекты A_{V_G} приведены в третьем столбце. Сведения о величине A_V необходимы для исправления наклонов спектральных распределений энергии ULX в оптическом диапазоне, а также для получения их абсолютных звездных величин. Звездные величины NGC 6946 ULX-1 и Holmberg II X-1, NGC 5474 X-1 и M66 X-1, а также величины полного поглощения для NGC 4559 X-7, NGC 5204 X-1, NGC 4395 ULX-1, NGC 5474 X-1 и Holmberg II X-1, являются результатами наших собственных измерений (подробнее см. главы 3, 4). Рентгеновские светимости L_X в диапазоне 0.3–10 кэВ NGC 5474 X-1 и M66 X-1 являются средними величинами по двум наблюдениям Chandra для каждого объекта (обработка рентгеновских данных выполнена К. Е. Атапиным). Светимости объектов NGC 7793 P13 и NGC 4395 ULX-1 (анализ переменности этого объекта в рентгеновском диапазоне подробно описан в нашей работе [162]) приведены для яркого состояния объектов. Приведенные светимости в рентгеновском диапазоне остальных объектов получены усреднением значений светимостей по нескольким наблюдениям из работ [28, 121, 147]. Все рентгеновские светимости пересчитаны на указанные в таблице расстояния.

Таблица 1.1. Наблюдательные параметры исследованных ультраярких рентгеновских источников. RA., Dec. - координаты рентгеновского источника по данным Chandra, D – расстояние до родительской галактики в Мпк; A_V – полное поглощение, найденное из спектроскопии туманностей, в скобках дано поглощение в Галактике A_{V_G} ; L_X – исправленная за поглощение рентгеновская светимость в диапазоне 0.3–10 кэВ в единицах 10^{39} эрг/с; m_V – видимая звездная величина объекта в фильтре V (не исправлена за поглощение). Ссылки на литературу, из которой была получена информация об объектах, указаны внизу таблицы.

ULX	RA., Dec. (J2000.0)	D	A_V (A_{V_G}) ¹⁶	L_X	m_V
Holmberg IX X-1	09 57 54.1, +69 03 47 ¹	3.77 ⁶	0.81 ¹¹ (0.24)	21.1 ¹⁷	22.8 ²
Holmberg II X-1	08 19 30.2, +70 42 18 ¹	3.27 ⁶	0.22 ¹² (0.10)	8.5 ¹⁷	21.6 ¹²
NGC 4559 X-7	12 35 51.7, +27 56 04 ²	7.3 ⁶	0.30 ⁴ (0.05)	7.2 ¹⁸	23.0 ²
NGC 5204 X-1	13 29 38.6, +58 25 06 ¹	4.76 ⁶	0.34 ⁴ (0.04)	7.2 ¹⁷	22.5 ²
NGC 6946 ULX-1	20 35 00.7, +60 11 30 ³	6.72 ⁷	1.34 ¹² (1.06)	9.7 ¹⁸	22.8 ¹²
NGC 1313 X-1	03 18 20.0, –66 29 11 ¹	4.25 ⁶	– (0.34)	10.1 ¹⁸	24.2 ²¹
NGC 1313 X-2	03 18 22.3, –66 36 04 ¹	4.25 ⁶	0.40 ¹³ (0.27)	6.5 ¹⁸	23.6 ²
NGC 5408 X-1	14 03 19.6, –41 22 59 ¹	5.32 ⁶	0.25 ¹⁴ (0.21)	11.3 ¹⁷	22.4 ²
NGC 4395 ULX-1	12 26 01.4, +33 31 31 ⁴	4.76 ⁶	0.7 ⁴ (0.05)	3.5 ⁴	22.9 ⁴
NGC 4559 X-10	12 35 58.6, +27 57 42 ⁴	7.3 ⁶	0.8 ⁴ (0.05)	6.0 ¹⁹	24.8 ⁴
NGC 5474 X-1	14 04 59.7, +53 38 09 ⁴	6.82 ⁸	< 0.1 ¹⁵ (0.03)	10.0 ¹⁵	24.7 ¹⁵
M66 X-1	11 20 20.9, +12 58 47 ⁴	10.6 ⁹	– (0.10)	13.6 ¹⁵	25.9 ¹⁵
NGC 7793 P13	23 57 51.0, –32 37 27 ⁵	3.7 ¹⁰	– (0.06)	4.8 ²⁰	20.5 ²⁰

Источники: ¹Gladstone et al., 2013 [50]; ²Tao et al., 2011 [151]; ³Kaaret et al., 2010 [77]; ⁴Vinokurov et al., 2016 [162]; ⁵Motch et al., 2011 [110]; ⁶Tully et al., 2013 [159]; ⁷Tikhonov, 2014 [153]; ⁸Tikhonov et al., 2015 [154]; ⁹Lee & Jang, 2013 [88]; ¹⁰Radburn-Smith et al., 2011 [126]; ¹¹Grise et al., 2011 [61]; ¹²Vinokurov et al., 2013 [161]; ¹³Grise et al., 2008 [63]; ¹⁴Cseh et al., 2011 [32]; ¹⁵Avdan et al., 2015 [13]; ¹⁶ величины поглощения в Галактике даны согласно Schlegel et al., 1998 [137] (вычислены с использованием калькулятора "Galactic Dust Reddening and Extinction", доступного по адресу <http://irsa.ipac.caltech.edu/applications/DUST/>); ^{17,18} средние значения светимости по данным Pintore et al., 2014 [121] и Sutton et al., 2013 [147] соответственно, значения для светимостей NGC 5474 X-1 и M66 X-1 усреднены по данным Chandra [13]; ¹⁹Cropper et al., 2004 [28]; ²⁰Motch et al., 2014 [111]; ²¹Yang et al., 2011 [171].

1.2. Наблюдения на телескопах Subaru и БТА. Архивные данные телескопа VLT

Спектры оптических двойников четырех ультраярких рентгеновских источников: NGC 4559 X-7, NGC 5204 X-1, Holmberg IX X-1 и Holmberg II X-1, получены в рамках наблюдений по программе С. Н. Фабрики и Ё. Уеда на телескопе Subaru с 25 по 28 февраля 2011 года. Программа наблюдений была составлена при непосредственном участии автора настоящей работы.

Для наблюдений выбирались ультраяркие источники северного неба с рентгеновскими светимостями (в диапазоне 0.3–10 кэВ) $> 3 \times 10^{39}$ эрг/с. Все объекты на момент проведения наблюдений имели достаточно надежные оптические отождествления с относительно яркими (в сравнении с другими ULX) звездобразными источниками. Отождествление источников дается в работах [127] (Holmberg IX X-1), [99] (NGC 5204 X-1, источник U1), [78] Holmberg II X-1) и [142] (NGC 4559 X-7). В случае NGC 4559 X-7 из 8 кандидатов, находящихся внутри кружка ошибок рентгеновских координат радиусом $1''$, был выбран самый яркий голубой объект под номером 1 (см. [142]), являвшийся также мощным H α -источником. Видимые звездные величины оптических двойников выбранных ULX находятся в диапазоне от 21.6^m до 23.0^m (табл. 1.1).

Спектральные наблюдения проводились в длиннощелевой моде с использованием спектрографа FOCAS (Faint Object Camera and Spectrograph [80]), установленным в Кассегреновском фокусе телескопа Subaru. FOCAS оснащен двумя $2K \times 4K$ ПЗС-матрицами НРК, каждая из которых имеет 4 канала считывания размером по 512×4176 пикселей. Поле зрения прибора составляет $6' \times 6'$. При наблюдениях использовалась гризма 300В, обеспечивающая хорошее пропускание (с максимумом около 80% на длине волны $\sim 6500 \text{ \AA}$) в диапазоне $3650\text{--}8300 \text{ \AA}$. В стандартных режимах данная гризма используется совместно с фильтрами, которые позволяют убрать следующие порядки спек-

тров, что критично для ярких объектов. Поскольку объекты нашего интереса являются крайне слабыми в оптическом диапазоне, наблюдения проводились в режиме без фильтров, что позволило получить максимальное пропускание и покрыть область 3800–7000 Å, содержащую линии He II λ 4686 и H α λ 6563. Спектральный диапазон ограничивался только наличием значительного количества рассеянного света в приборе на длинах волн < 3800 Å и наложением спектра следующего порядка при > 7000 Å. При наблюдениях применялось аппаратное бинирование 1×2 пикселя, что соответствует дисперсии 1.34 Å/пиксель и масштабу изображения 0.208"/пиксель.

В зависимости от размера изображений звезд использовались щели с ширинами 0.4" – 0.8", обеспечивающие разрешение в диапазоне $\sim 1000 - 500$ соответственно. 25-го февраля средний за ночь размер изображений составлял $\beta \sim 1.2''$. В последующие ночи качество изображений постепенно улучшалось, достигнув 28 февраля 0.4" – 0.6" (см. табл. 1.2). Для всех объектов положение щели не менялось в течение всего ряда наблюдений (Рис. 1.2), исключением являлся Holmberg IX X-1: 26-го и 27-го февраля позиционный угол (отсчитывается к востоку от направления на север) PA = 80°, 28-го февраля PA = – 52°.

Так как целью наблюдений являлся поиск возможной спектральной переменности ультраярких рентгеновских источников, все четыре объекта должны были наблюдаться последовательно в течение каждой ночи. Географическое расположение Subaru² и время проведения наблюдений (февраль) давало такую возможность. Тем не менее, погодные условия в первую ночь (25 февраля) позволили провести только спектроскопию объекта Holmberg II X-1. 26-го февраля наблюдения Holmberg II X-1 не проводились. Последние две ночи наблюдались все четыре объекта. Суммарное время экспозиции за все ночи составило 280, 260, 300 и 320 минут для ультраярких источников в галактиках Holmberg II, Holmberg IX, NGC 4559 и NGC 5204 соответственно.

² телескоп расположен на горе Мауна-Кеа, Гавайи, $\sim 20^\circ$ с. ш.

Таблица 1.2. Журнал спектральных наблюдений на Subaru/FOCAS. Приводятся даты наблюдений, количество экспозиций и их продолжительность t_{exp} , ширина щели и соответствующее ей спектральное разрешение, размер изображений звезд β .

Объект	дата	t_{exp}	щель	разрешение	β
Holmberg II X-1	2011.02.25	4×1200^s	$0.8''$	9.7 \AA	$1.1''-1.2''$
	2011.02.27	5×1200^s	$0.6''$	8.2 \AA	$0.6''-1.5''$
	2011.02.28	5×1200^s	$0.4''$	4.3 \AA	$0.5''-0.7''$
Holmberg IX X-1	2011.02.26	4×1200^s	$0.8''$	9.7 \AA	$1.1''$
	2011.02.27	4×1200^s	$0.6''$	8.2 \AA	$0.5''-0.9''$
	2011.02.28	5×1200^s	$0.4''$	4.3 \AA	$0.5''-0.6''$
NGC 4559 X-7	2011.02.26	4×1200^s	$0.8''$	9.7 \AA	$0.6''-0.7''$
	2011.02.27	5×1200^s	$0.6''$	8.2 \AA	$0.6''-0.7''$
	2011.02.28	6×1200^s	$0.4''$	4.3 \AA	$0.4''-0.5''$
NGC 5204 X-1	2011.02.26	6×1200^s	$0.8''$	9.7 \AA	$0.6''-0.9''$
	2011.02.27	4×1200^s	$0.6''$	8.2 \AA	$0.6''-0.8''$
	2011.02.28	6×1200^s	$0.4''$	4.3 \AA	$0.5''-0.7''$

В табл. 1.2 приведен журнал наблюдений. Для каждого ультраяркого источника указаны дата наблюдений, количество экспозиций и их продолжительность, ширина щели и соответствующее ей спектральное разрешение, размер изображений звезд.

На рис. 1.1 приведены карты отождествления для каждого объекта по данным космического телескопа им. Хаббла (HST) в фильтре F555W (полоса V), полученным на камерах ACS/WFC (Holmberg II X-1 и Holmberg IX X-1) и WFPC2/PC (NGC 4559 X-7 и NGC 5204 X-1). Подробное описание указанных камер приводится в разделе 1.4. Размер поля изображения составляет $8''$. Оптические двойники ультраярких источников отмечены стрелками. Карты отожд-

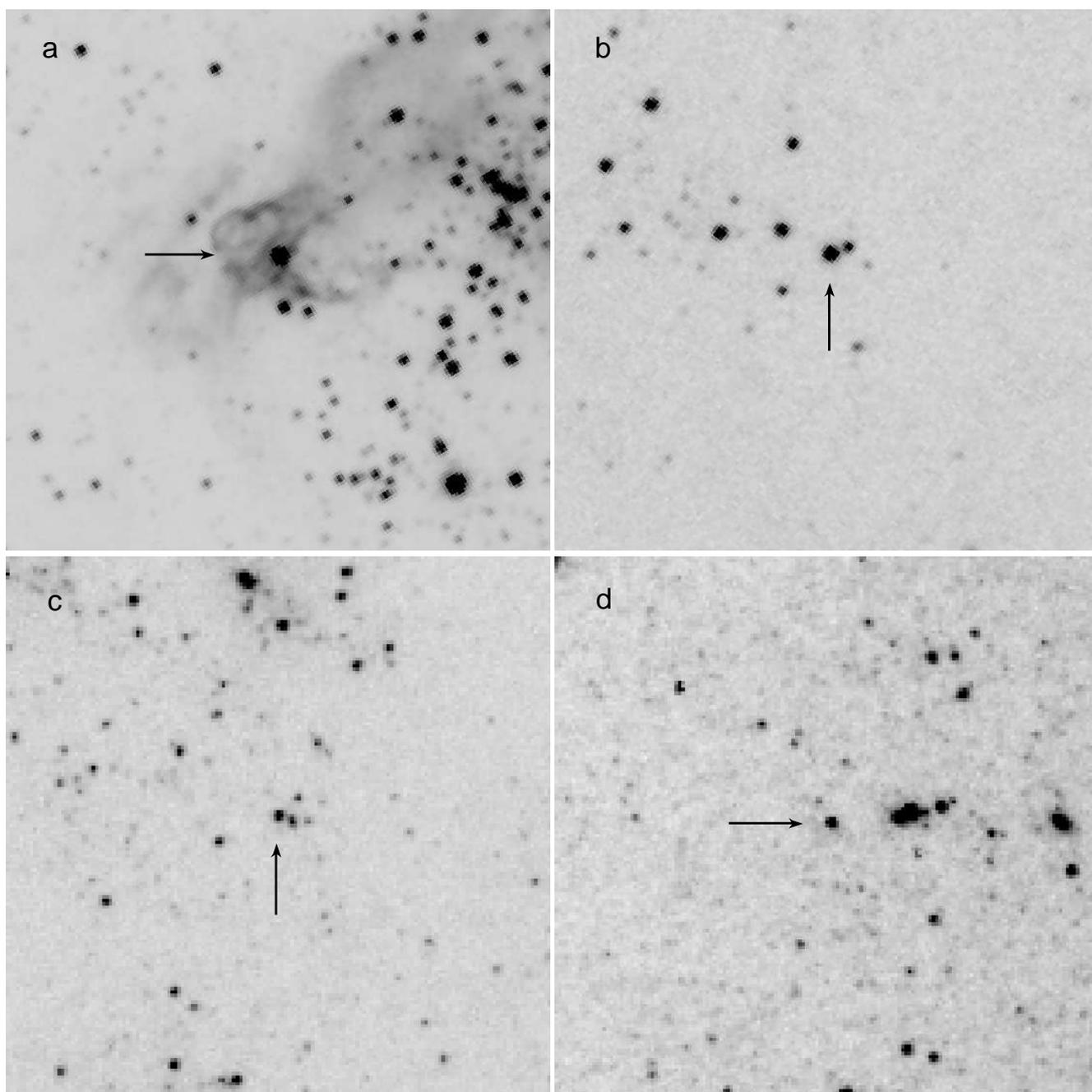


Рис. 1.1. Изображения областей вокруг оптических двойников ультраярких рентгеновских источников Holmberg II X-1 (a), Holmberg IX X-1 (b), NGC 4559 X-7 (c) и NGC 5204 X-1 (d) по данным космического телескопа им. Хаббла. Изображения ориентированы таким образом, что север располагается сверху, восток – слева. Размер каждой области равен $8''$. Положения объектов указаны стрелками.

дествлений ULX при наблюдениях на Subaru, полученные в режиме без фильтра, даются на рис. 1.2. Показана ориентация щели при спектральных наблюдениях, стрелкой отмечены объекты, квадратами отмечены 8''-ные области неба, показанные на картах HST на предыдущем рисунке. На всех изображениях север расположен сверху, восток – слева.

Исследования оптических двойников ULX были продолжены на 6-метровом телескопе CAO РАН. Наблюдения проводились с помощью универсального редуктора светосилы SCORPIO [7], установленного в первичном фокусе БТА. Прибор оснащен ПЗС-матрицей EEV CCD42-40 с размерами 2048×2048 пикселей. Поле зрения составляет $6' \times 6'$, масштаб изображения – $0.36''/\text{пиксель}$ при аппаратном биннировании 2×2 .

В 2014–2015 гг. со спектрографом SCORPIO были проведены наблюдения оптического двойника NGC 4395 ULX-1³, а также окружения NGC 5474 X-1 и NGC 4559 X-10. Поскольку последние два объекта отождествлены с очень слабыми в оптическом диапазоне источниками (см. главу 3), были получены только спектры окружающих объекты туманностей. Видимые звездные величины объектов в фильтре V равны 22.9^m (NGC 4395 ULX-1), 24.7^m (NGC 5474 X-1) и 24.8^m (NGC 4559 X-10). Оптический двойник NGC 4395 ULX-1 выгодно отличается от многих отождествленных ультраярких источников своей изолированностью от других сравнимых или превосходящих по яркости объектов (угловое расстояние до ближайшей звезды $\sim 22.5^m$ составляет $2.0''$).

Результаты ранее проведенной спектроскопии ультраярких источников и наших наблюдений четырех ULX на Subaru (см. главу 2) показывают, что общей особенностью оптических спектров ULX является наличие широкой эмиссионной линии He II $\lambda 4686$. Наличие вокруг многих ULX туманностей, которые излучают в линии He II (например, [2]), требует разрешения не менее $5\text{--}6 \text{ \AA}$ для

³ NGC 4395 ULX-1 был отождествлен в оптическом диапазоне в работе [50] и независимо нами (см. главу 3)

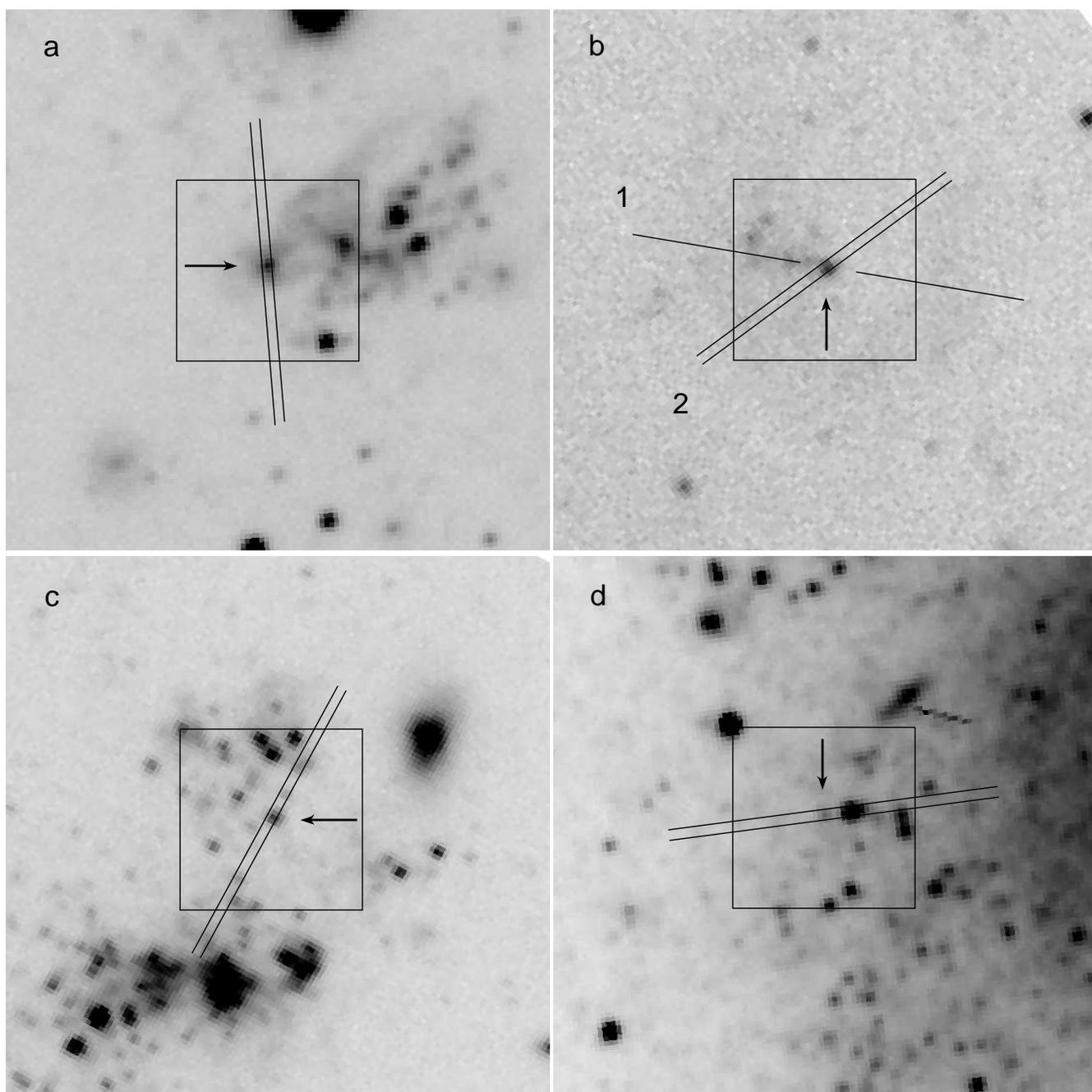


Рис. 1.2. Изображения областей вокруг оптических двойников ультраярких рентгеновских источников Holmberg II X-1 (a), Holmberg IX X-1 (b), NGC 4559 X-7 (c) и NGC 5204 X-1 (d) по данным Subaru. Размеры областей составляют $24''$. Ориентация изображений такая же, как на рис. 1.1. Показаны ориентации щели при спектроскопии (ширина щели при наблюдениях 28 февраля равна $0.4''$). Для Holmberg IX X-1 (b) цифрами 1 отмечено положение щели при наблюдениях 26–27 февраля, 2 - 28 февраля. Стрелками указаны положения объектов. Квадратами отмечены области вокруг объектов по данным космического телескопа им. Хаббла, показанные на рис. 1.1.

Таблица 1.3. Журнал спектральных наблюдений на БТА/SCORPIO. Приводятся даты наблюдений, наименование гризмы, количество экспозиций и их продолжительность t_{exp} , размер изображений звезд β .

Объект	дата	гризма	t_{exp}	β
NGC 4395 ULX-1	2014.01.01	VPHG1200G	4×1200^s	$0.8''-1.0''$
	2015.01.17	VPHG1200G	5×1200^s	$\sim 1.4''$
	2015.02.21	VPHG1200B	4×1200^s	$\sim 1.0''$
NGC 4559 X-10	2015.12.17	VPHG550G	2×1200^s	$\sim 1.5''$
NGC 5474 X-1	2014.01.02	VPHG1200G	$4 \times 1200^s + 720^s$	$0.8''-1.0''$

разделения широкой компоненты линии, принадлежащей объекту, и узкой компоненты, принадлежащей туманности. Поэтому при спектроскопии оптического двойника NGC 4395 ULX-1 использовались гризмы VPHG1200B и VPHG1200G, имеющие разрешение 5.5 \AA и 5 \AA и покрывающие диапазон $3600-5400 \text{ \AA}$ и $4000-5700 \text{ \AA}$ соответственно. Кроме того, указанные спектральные диапазоны включают линии бальмеровской серии $H\delta$, $H\gamma$ и $H\beta$, позволяющие по отношению их потоков надежно определять величину межзвездного поглощения (подробнее см. главу 3). При спектроскопии NGC 4559 X-10, где ставилось целью только определение величины поглощения, использовалась гризма VPHG550G, чувствительная в диапазоне $3500-7200 \text{ \AA}$ и имеющая спектральное разрешение $\approx 10 \text{ \AA}$.

Спектроскопия всех объектов проводилась с длинной щелью шириной $1''$. Аппаратное бинирование составляло 2 пикселя вдоль пространственной оси изображений (бинирование вдоль оси дисперсии не применялось). В табл. 1.3 приведен журнал наблюдений, где даны даты наблюдений объектов, название используемой гризмы, продолжительность и количество экспозиций, размер изображений звезд. На рис. 1.3 представлены карты отождествления для каж-

дого из объектов по данным БТА, показана ориентация щели при наблюдениях. Размер карт составляет $1'$.

Помимо результатов нашей спектроскопии, проведенной на телескопах БТА и Subaru, в работе использованы данные из работы [111] для NGC 7793 P13 и архивные данные⁴ наблюдений на VLT ультраярких источников NGC 5408 X-1 и NGC 1313 X-2.

Наблюдения оптического двойника NGC 1313 X-2 проводились по программе "Ультраяркие рентгеновские источники: черные дыры промежуточных масс или массивные рентгеновские двойные?" (основной заявитель Ф. Гризе). Использовался спектрограф FORS1 (FOcal Reducer and low dispersion Spectrograph [11]), установленный в кассегреневском фокусе телескопа. Спектрограф был оснащен двумя $2K \times 4K$ ПЗС-матрицами E2V, с общим полем зрения $6.8' \times 6.8'$.

Всего по программе было выполнено 12 наблюдений объекта NGC 1313 X-2 в период с 21 октября 2007 г. по 8 марта 2008 г. Среди полученного наблюдательного материала для исследования были выбраны спектральные данные за 2 марта 2008 г., когда качество изображений было наилучшим (размер изображений звезд $\beta \sim 0.7''$). Спектроскопия проводилась с гризмой GRIS_600B, чувствительной в диапазоне $\sim 3300 - 6200 \text{ \AA}$. Спектральное разрешение составляет $\lambda/\Delta\lambda = 780$, что соответствует $\sim 6 \text{ \AA}$ на центральной длине волны 4650 \AA . При наблюдениях использовалась щель шириной $1''$. Было получено три спектра с экспозициями 940 секунд каждый с биннированием 2×2 пикселя, что соответствует пространственному масштабу $0.25''/\text{пиксель}$ и дисперсии $1.5 \text{ \AA}/\text{пиксель}$.

NGC 5408 X-1 наблюдался в течение одной ночи 12 апреля 2010 г. в красном и голубом диапазонах спектра по программе "Спектроскопия ультраяркого рентгеновского источника в NGC 5408" (основной заявитель S. Corbel). Хотя существует целый ряд спектральных наблюдений этого объекта на телескопе

⁴ архив ESO: http://archive.eso.org/eso/eso_archive_main.html

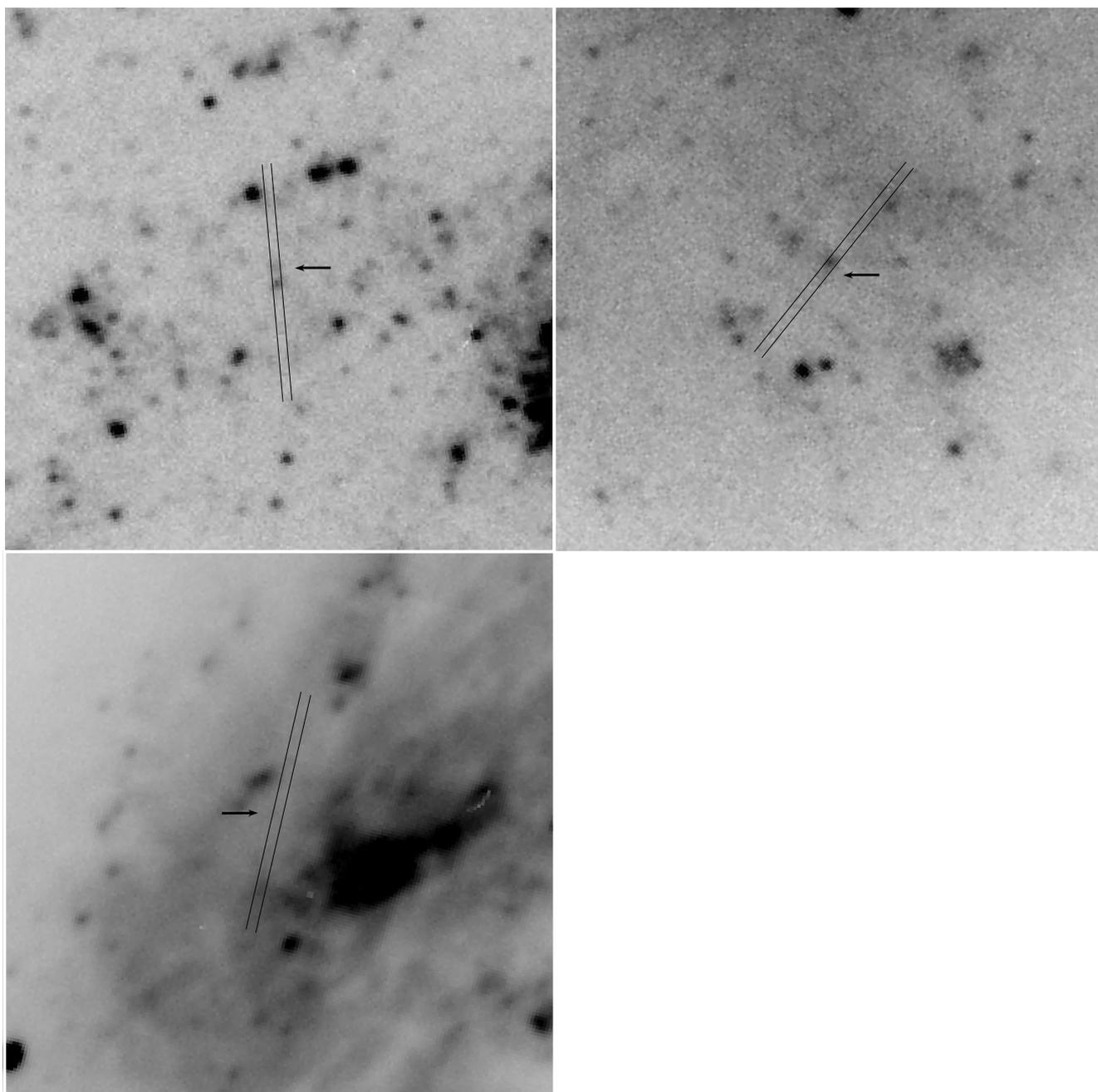


Рис. 1.3. Области галактик NGC 4395 (слева), NGC 5474 (справа) и NGC 4559 (внизу) размером $1'$ вокруг оптических двойников ультраярких рентгеновских источников NGC 4395 ULX-1, NGC 5474 X-1 и NGC 4559 X-10, положение которых отмечено стрелками. Показаны ориентации щелей при спектроскопии (ширины щелей равны $1.0''$). Изображения ориентированы таким образом, что север располагается сверху, восток – слева.

VLT, именно в эту ночь был покрыт весь оптический диапазон. Ввиду сильной переменности объекта в линиях He II $\lambda 4686$ и H α $\lambda 6563$ от ночи к ночи, важно иметь одновременные измерения этих двух линий (см. главу 2).

Наблюдения NGC 5408 X-1 проводились с помощью спектрографа FORS2, являющегося усовершенствованной версией предыдущего инструмента FORS1. Приемником спектрографа служит мозаика из двух ПЗС-матриц MIT размером $2K \times 4K$ (4096×2048 пикселей), максимум чувствительности которых по сравнению с матрицами E2V сдвинут в красную область спектра. Поле зрения прибора, аналогично FORS1 составляет $6.8' \times 6.8'$.

В ходе наблюдений было получено по три спектра NGC 5408 X-1 с экспозицией 850 секунд на гризмах GRIS_1200R (красный диапазон, $5750 - 7310 \text{ \AA}$) и GRIS_1200B (голубой диапазон, $3660 - 5110 \text{ \AA}$). Спектральное разрешение для красной решетки составляет $\lambda/\Delta\lambda = 2140$, голубой – $\lambda/\Delta\lambda = 1420$. Используемая при спектроскопии щель имела ширину $1''$. Применялось аппаратное бинирование 2×2 пикселя ($0.25''/\text{пиксель}$, дисперсия $0.75 \text{ \AA}/\text{пиксель}$ для GRIS_1200R и $0.72 \text{ \AA}/\text{пиксель}$ для GRIS_1200B). Размер изображений звезд в течение ночи колебался от $0.5''$ до $0.7''$.

1.3. Обработка длиннощелевых спектров ULX

Обработка спектральных данных проводилась в пакете программ MIDAS и была выполнена стандартным образом. Исключениями являлись вырезание одномерного спектра (экстракция) на двумерном спектре и отдельные процедуры редукции данных телескопа Subaru, которые проводились в среде IDL и IRAF.

Для удаления следов космических частиц на отдельных спектрах использовалась стандартная команда MIDAS FILTER/COSMIC, алгоритм которой основан на медианной фильтрации одного изображения с последующей заменой

отсчетов "дефектных" областей локальным медианным значением. В случае данных с телескопов VLT и БТА, где количество следов частиц относительно мало, указанный способ позволяет получать хорошие результаты. Тем не менее, работа с отдельными изображениями с телескопа Subaru оказалась неэффективной. В данном случае использовался реализованный нами совместно с К. Е. Атапиным алгоритм на языке IDL, в основу которого положено попарное сравнение изображений. Первым шагом является совмещение двух изображений друг с другом, так как каждый следующий спектр снимался со сдвижкой поперек оси дисперсии для нивелирования эффектов неоднородности чувствительности пикселей матрицы. Кроме того, данная операция позволяет устранить сдвиги спектров вдоль оси дисперсии, которые могут возникать из-за гнуптий конструкции прибора за счёт силы тяжести при разных положениях телескопа. Далее, второй спектр вычитается из первого и по результирующему изображению производится поиск отсчетов, превышающих на 3σ среднее значение в локальной области. Последним шагом является замена отсчетов найденных дефектных пикселей (космических частиц) одного спектра на отсчеты в этих же пикселях второго спектра. Оставшиеся после описанной процедуры следы космических частиц, приходящиеся на одни и те же пиксели двух спектров, устранялись стандартным образом в MIDAS.

После удаления следов космических частиц были выполнены стандартные процедуры редукции: вычитание уровня электронного нуля (bias) и деление на нормированное плоское поле (flat). Для данных, полученных на телескопе Subaru, следом за вычитанием bias производилось вычитание области overscan, представляющей собой неэкспонируемые во время наблюдений области матрицы и предназначенные для контроля за вариациями уровня bias в каждом из четырех каналов считывания. Кроме того, для построения двумерной дисперсионной кривой с точностью не хуже 10 км/с для данных Subaru требовалось исправить геометрическую дисторсию. Обе процедуры выполнялись с помощью

специализированных программ в среде IRAF. После проведения указанных процедур полученные за ночь индивидуальные экспозиции складывались с получением суммарного спектра каждого объекта.

Калибровка двумерных спектров по длинам волн производится с использованием спектров калибровочных ламп (спектр сравнения). На БТА/SCORPIO используется лампа с наполнением He-Ne-Ar, на Subaru/FOCAS – с Th-Ar. Особенностью используемой в спектрографе FOCAS торий-аргоновой лампы является наличие существенно более ярких линий в красной области спектра, поэтому для получения спектра сравнения в диапазоне от $\sim 4000 \text{ \AA}$ до $\sim 8000 \text{ \AA}$ снимаются два изображения спектра сравнения с различной экспозицией. В ходе проведения редукции эти спектры комбинировались в одно общее изображение. На VLT/FORS набор ламп и время накопления для спектра каждой из них варьируется в зависимости от используемой гризмы. При наблюдениях с GRIS_600B (NGC 1313 X-2) применяются лампы с гелиевым и ртуть-кадмиевым (Hg-Cd) наполнением, с гризмой GRIS_1200R – He-Ne-Ar, с GRIS_1200B – He и Hg-Cd (последние две гризмы использовались для спектроскопии NGC 5408 X-1). Изображение спектра лампы дает положение каждой линии в пиксельных координатах и в длинах волн (длина волны каждой линии хорошо известна), что позволяет решить уравнение перехода от пиксельных координат к равномерной шкале длин волн в \AA . Необходимо отметить, что для получения корректного решения перехода от одних координат к другим спектры сравнения при наблюдениях снимались при той же конфигурации приборов и том же положении телескопов, что были при спектроскопии объектов. Изменения конфигурации прибора, такие как ввод/вывод диспергирующего элемента из пучка из-за возможных люфтов в приборе, также как и изменение положения телескопа из-за возникающих в приборе гнутий, могут сильно влиять на точность привязки шкалы длин волн.

Анализ данных Subaru показывает, что гнутия прибора приводят к сме-

щениям положения спектров на изображении на 2-3 пикселя вдоль оси дисперсии. Поэтому, после линеаризации спектров проводился дополнительный контроль точности построения дисперсионной кривой по линиям неба. Для этого на каждом суммарном спектре объекта с помощью одно- или многокомпонентной гаусс-аппроксимации измерялось положение линий [O I] $\lambda\lambda 5577, 6300$ и OH $\lambda\lambda 7316, 7341, 7369$ (точные длины волн линий OH взяты из работы [117]). К сожалению, в голубой области спектра на спектрах, полученных на Subaru, нет каких-либо ярких, пригодных для измерения линий неба. Полученные отклонения положения линий неба от табличных значений усреднялись с весом, пропорциональным ошибке измерения длины волны линии, после чего весь спектр как целое сдвигался вдоль оси дисперсии. Итоговая погрешность калибровки по длинам волн составила не более 10 км/с.

Как уже отмечалось выше, большинство наблюдавшихся ультраярких источников находится в очень плотных звездных полях. Кроме того, на спектры объектов накладываются спектры туманностей, часть из которых являются физически связанными с объектами [2], а часть, по видимому, являются фоновыми. Все это создает определенные сложности при экстрагировании спектров объектов. Специально для таких случаев А. Н. Саркисяном при участии автора настоящей работы (на базе разработанного ранее в среде IDL П. К. Аболмасовым и О. В. Марьевой пакета ScoRe) была написана интерактивная программа экстракции спектров.

Первым этапом работы интерактивной программы является выбор двух областей на двумерном спектре, по которым будет определяться фон неба, и степень аппроксимирующего фон неба полинома. Области, по которым будет происходить аппроксимация фона неба, должны располагаться по разные стороны от экстрагируемого объекта. Далее задаются количество и начальные параметры функций Гаусса, описывающих распределение яркости в исследуемом объекте и окружающих его звездах вдоль щели. Наиболее яркая и одиночная

звезда выбирается как опорная для построения следов спектров. Все параметры подбираются визуально. Контроль осуществляется по результату аппроксимации (выводится на экран) двух разрезов поперек щели, полученных усреднением разрезов на каждой длине волны в красной и синей области спектра. После подбора начальных параметров, вырезание спектров объекта и окружающих его звезд, а также вычитание фона неба происходит в автоматическом режиме. Аппроксимация двумерного спектра вдоль щели набором функций Гаусса и полиномом, описывающим распределение яркости в фоне, происходит на каждой длине волны. Находится точный центр следа спектра каждой звезды и его полуширина как математическое ожидание и дисперсия (σ) функции Гаусса, вписанной в разрез вдоль щели на данной длине волны ($\text{FWHM}=2\sigma\sqrt{2\ln 2}$). Полученные значения центра и FWHM от длины волны при обработке спектров интерполировались полиномами третьей степени (степени полиномов также является задаваемыми параметрами, однако как показывает практика, оптимальным значением является 3). Экстракция спектров производится вдоль построенных следов на каждой длине волны, при этом подбирается только интенсивность функции Гаусса при фиксированном положении ее центра и ширины на данной длине волны. Таким образом, даже в случае очень плотных звездных полей, удастся выделить спектр исследуемого объекта.

Важно отметить, что при обработке спектров, полученных на Subaru, проводилась экстракция объекта с выбором широких ($4''$ – $10''$) и обычно далеко расположенных от объекта областей фона и узких ($\sim 1''$) областей фона в непосредственной близости от объекта. Первые позволяли получить спектры с высоким отношением сигнал/шум (но с определенным вкладом туманности), вторые позволяли свести к минимуму вклад в эмиссионные линии бальмеровской серии узких компонент, принадлежащих туманностям, оставляя только широкие компоненты, принадлежащие спектрам объектов. Однако, в случае Holmberg II X-1 компактность окружающей его туманности (ее размер составляет около $2''$) не

позволяет получить "чистый" профиль эмиссионных линий ультраяркого источника даже при выборе фона в малой области рядом с объектом.

Финальными шагами редукции спектров являлись учет атмосферного поглощения (экстинкции) и переход от инструментальных единиц плотности потока к энергетическим. Коррекция за атмосферную экстинкцию проводилась с помощью стандартной процедуры MIDAS согласно соотношению $F_{\lambda\text{испр.}} = F_{\lambda\text{набл.}} \cdot 2.512^{-X(\lambda)\cdot\text{airmass}}$, где $X(\lambda)$ – коэффициент поглощения в атмосфере в зависимости от длины волны, airmass – воздушная масса. Для данных БТА и VLT использовались табличные данные для коэффициента атмосферной экстинкции, доступные на сайте ESO⁵, для данных Subaru – таблицы, предоставленные вместе с данными наблюдений. Переход к энергетическим единицам плотности потока производился с помощью спектров звезд-стандартов, которые наблюдались в вечерние или утренние сумерки в том же спектральном диапазоне и, по возможности, на тех же зенитных расстояниях, что и объект. Спектры звезд-стандартов обрабатывались аналогичным образом. Имея для звезды-стандарта табулированные значения потоков в энергетических единицах и одномерный спектр в инструментальных единицах, вычислялись кривые спектральной чувствительности для ПЗС-матрицы каждого спектрографа, которые переводят наблюдаемые одномерные спектры объектов в энергетические единицы.

1.4. Обработка фотометрических наблюдений ULX по данным космического телескопа им. Хаббла

Архивные данные наблюдений на космическом телескопе им. Хаббла (Hubble Space Telescope, HST) использовались для решения двух основных задач: проверка разработанной нами модели сверхкритических аккреционных дисков, при-

⁵ <https://www.eso.org/sci/observing/tools/Extinction.html>

званной объяснить наблюдаемые распределения энергии в спектрах ULX от рентгеновского до УФ-оптического диапазона (глава 4), и поиска новых оптических отождествлений ультраярких источников (глава 3).

Для решения первой задачи были выбраны пять ULX с рентгеновскими светимостями больше 3×10^{39} эрг/с, находящихся в близких галактиках и имеющих оптические двойники с разными абсолютными величинами в фильтре V и различными спектральными индексами в УФ-оптическом диапазоне. В выборку вошли Holmberg II X-1, отождествленный в работе [78], NGC 6946 ULX-1 [77], NGC 1313 X-1 [171], NGC 1313 X-2 [94] и NGC 5408 X-1 [87]. Для объектов NGC 1313 X-1, NGC 1313 X-2 и NGC 5408 X-1 были использованы результаты фотометрии из работ [60, 151, 171]. Фотометрические измерения NGC 6946 ULX-1 и Holmberg II X-1 были выполнены автором, результаты опубликованы в работе [161].

При поиске новых оптических отождествлений ULX использовался каталог Swartz et al. [149], составленный по данным Chandra, и он-лайн ресурс "Hubble Legacy Archive"⁶, предоставляющий в удобном для визуального просмотра виде карты HST-изображений с нанесенной сеткой координат. Были обнаружены оптические двойники трех ультраярких источников NGC 5474 X-1, M66 X-1 и NGC 4559 X-10, для которых по данным HST были выполнены фотометрические измерения. Результаты исследований опубликованы в работах [13, 162].

Была проведена фотометрия недавно отождествленного в оптическом диапазоне со звездообразным объектом ультраяркого источника NGC 4395 ULX-1 [50, 162]. Для этого были обработаны новые наблюдательные данные этого объекта, полученные на HST в 2014 г. в ультрафиолетовых и голубых фильтрах, и получена оценка звездной величины источника в фильтре V (табл. 1.1).

Изображения были взяты из архива MAST⁷. Наблюдения проводились с

⁶ <http://hla.stsci.edu/>

⁷ <https://archive.stsci.edu/index.html>

помощью камер ACS (Advanced Camera for Surveys⁸), WFPC2 (Wide Field and Planetary Camera 2⁹) и WFC3 (Wide Field Camera 3¹⁰).

ACS включает в себя три оптических канала: Wide Field Channel(WFC), High Resolution Channel (HRC) и канал Solar Blind Channel (SBC). Поскольку часть данных была получена с помощью WFC и SBC, ниже приводится краткое описание характеристик этих приборов. WFC представляет собой оптическую систему с высокой пропускающей способностью и достаточно широким полем зрения ($202'' \times 202''$) и предназначен для получения глубоких обзоров в оптическом и ближнем инфракрасном диапазонах. Граница диапазона чувствительности WFC со стороны коротковолнового излучения проходит приблизительно на 3000 \AA . Детектор WFC состоит из двух одинаковых ПЗС-матриц, каждая из которых имеет размеры 2048×4095 пикселей. Масштаб изображения WFC равен $0.05''/\text{пиксель}$, что близко к разрешающей способности телескопа в полосе I.

SBC предназначен для проведения наблюдений в далеком ультрафиолетовом диапазоне. Максимум пропускания прибора находится на длине волны 1216 \AA . SBC имеет относительно небольшое поле зрения размером $30.8'' \times 34.6''$ и масштаб изображения $0,032''/\text{пиксель}$. В качестве приемника используется детектор МАМА (Multi Anode Microchannel plate Array), установленный на спектрографе STIS и представляющий собой матрицу из счетчиков фотонов с непрозрачным CsI фотокатодом.

WFPC2, установленная на борту космического телескопа в рамках первой сервисной миссии, работала до 2009 года, когда ее сменила новая широкоугольная камера WFC3. Приемник камеры представлял собой двухмерный фотометр, расположенный в центре фокальной плоскости главного зеркала HST. Диапа-

⁸ <http://www.stsci.edu/hst/acs>

⁹ <http://www.stsci.edu/hst/wfpc2>

¹⁰ <http://www.stsci.edu/hst/wfc3>

зон чувствительности составлял 1150–10500 Å. Поле зрения было разделено между 4-мя камерами. Общее поле зрения трех широкоугольных камер (WF1, WF2 и WF3) имело L-образную форму и составляло 150'' × 150'' при масштабе изображения 0.1''/пиксель. Планетарная камера (PC1) была предназначена для получения изображений 34'' × 34'' с масштабом 0.046''/пиксель. ПЗС каждой из камер имел размеры 800 × 800 пикселей.

Основной особенностью WFC3 является возможность наблюдений с этой камерой в диапазоне от 2000 до 17000 Å. Камера имеет два приемника излучения и соответствующие им два оптических канала: УФ-оптическую ПЗС-матрицу из двух чипов (UV/Visible channel, UVIS) и массив из HgCdTe-детекторов (near-infrared channel, IR). Каждый чип приемника UVIS имеет размер 4096 × 2051 пикселей и представляет собой тонкий e2v Ltd ПЗС-детектор с обратной засветкой, чувствительный в диапазоне 2000–10000 Å. Детектор канала IR имеет размер 1024 × 1024 пикселя, из которых для получения изображений используются центральные 1014 × 1014 пикселей. Диапазон чувствительности приемника покрывает длины волн от 8000 Å до 17000 Å. Поле зрения и масштаб изображений равны соответственно 162'' × 162'' и 0.04''/пиксель для UVIS и 123'' × 136'' и 0.13''/пиксель для IR.

В табл. 1.4 приводятся даты наблюдений исследуемых ULX, продолжительность экспозиции t_{exp} , используемые фильтры, их приведенные длины волн λ_{pivot} и ширины. Приведенная длина волны для данного фильтра рассчитывается согласно формуле $\lambda_{\text{pivot}} = \sqrt{\int P_{\lambda} \lambda d\lambda / \int P_{\lambda} d\lambda / \lambda}$, где P_{λ} - кривая спектральной чувствительности всей оптической системы с фильтром. В качестве ширины фильтра указывается ширина эквивалентного по площади под кривой чувствительности фильтра прямоугольника $rectw = \int P_{\lambda} d\lambda / \max(P_{\lambda})$

Для наблюдений, полученных с камерой ACS, в архиве MAST были выбраны суммарные и исправленные за дисторсию изображения в формате drz (drizzled). Стандартная первичная обработка данных с ACS включает в себя

Таблица 1.4. Журнал наблюдений на космическом телескопе им. Хаббла. Приводятся даты наблюдений, время экспозиции t_{exp} , наименование используемой камеры и фильтра, ширина и приведенная длина волны λ_{pivot} фильтра (см. текст).

Объект	дата	t_{exp}	камера/фильтр	ширина	λ_{pivot}
NGC 6946 ULX-1	2008.05.01	2760 ^s	ACS/SBC/F140LP	253 Å	1527 Å
	2001.06.08	2000 ^s	WFPC2/PC1/F450W	873 Å	4557 Å
	2001.06.08	2000 ^s	WFPC2/PC1/F555W	1455 Å	5443 Å
	2001.06.08	2000 ^s	WFPC2/PC1/F814W	1473 Å	7996 Å
Holmberg II X-1	2006.11.27	600 ^s	ACS/SBC/F165LP	201 Å	1758 Å
	2009.02.09	2100 ^s	WFPC2/WF2/F336W	471 Å	3359 Å
	2007.10.03	1000 ^s	WFPC2/PC1/F450W	873 Å	4557 Å
	2007.10.05	1000 ^s	WFPC2/PC1/F450W	873 Å	4557 Å
	2007.10.09	1000 ^s	WFPC2/PC1/F450W	873 Å	4557 Å
	2007.10.03	1000 ^s	WFPC2/PC1/F555W	1455 Å	5443 Å
	2007.10.05	1000 ^s	WFPC2/PC1/F555W	1455 Å	5443 Å
	2007.10.09	1000 ^s	WFPC2/PC1/F555W	1455 Å	5443 Å
	2006.12.30	4660 ^s	ACS/WFC/F814W	1741 Å	8060 Å
	NGC 5474 X-1	2012.02.26	900 ^s	ACS/WFC/F606W	2005 Å
2012.02.26		900 ^s	ACS/WFC/F814W	1741 Å	8060 Å
M66 X-1	2004.12.31	1000 ^s	ACS/WFC/F435W	849 Å	4317 Å
	2009.12.14	520 ^s	ACS/WFC/F555W	1127 Å	5360 Å
	2009.12.14	520 ^s	ACS/WFC/F814W	1741 Å	8060 Å
NGC 4395 ULX-1	2014.03.31	2349 ^s	WFC3/UVIS/F275W	398 Å	2710 Å
	2014.03.31	1101 ^s	WFC3/UVIS/F336W	511 Å	3355 Å
	2014.03.31	2349 ^s	WFC3/UVIS/F438W	618 Å	4326 Å
NGC 4559 X-10	2005.03.09	2400 ^s	ACS/HRC/F435W	837 Å	4311 Å
	2005.03.09	2400 ^s	ACS/HRC/F555W	1127 Å	5356 Å
	2005.03.09	2400 ^s	ACS/HRC/F814W	1772 Å	8115 Å

процедуры вычитания bias и темновых кадров, коррекцию за плоское поле, учет наличия дефектных столбцов и "горячих" пикселей, удаление следов космических частиц, калибровку по потокам и нормирование на время экспозиции (единицы потока - e^- /сек). Необходимо отметить, что при сложении изображения, полученные с ACS/SBC, пересчитываются к масштабу $0.025''$ /пиксель. Фотометрия WFPC2-данных проводилась на изображениях в формате c0f, которым соответствуют калибровочные кадры в формате c1f, представляющие собой данные о положении дефектных пикселей для каждого из четырех чипов камеры. Маскирование дефектных пикселей, вычитание фона неба и удаление космических частиц были выполнены в специализированном пакете программ NSTPHOT 1.1 [36].

Поток от рентгеновских источников в оптическом диапазоне измерялся методами апертурой фотометрии с использованием пакета программ APPHOT, разработанного на базе IRAF. Фотометрия проводилась в системе звездных величин VEGAMAG.

Измерения потоков оптических двойников Holmberg II X-1 и NGC 6546 ULX-1 проводились в апертурах с радиусами $0.15'' - 0.20''$. Учет апертурных поправок для данных, полученных на ACS/SBC, проводился с использованием пакета программ SYNPHOT¹¹. Для WFPC2 и ACS/WFC поправки определялись путем фотометрических измерений от трех до пяти одиночных звезд в апертурах $0.15'' - 0.20''$ и $0.5''$. Для данных, полученных с WFPC2, фотометрические нуль-пункты рассчитаны для бесконечной апертуры, переход к которой с апертуры $0.5''$ осуществляется прибавлением к средней величине апертурной поправки в каждом фильтре величины, равной 0.10^m [169]. Ошибки определения апертурных поправок не превышают 0.05^m . Значительное влияние на результат измерений для данных WFPC2 может оказать так называемый CTE-эффект (charge transfer efficiency), обусловленный тем, что при считывании матрицы эффек-

¹¹ http://www.stsci.edu/institute/software_hardware/stsdas/synphot

тивность переноса зарядового пакета от пикселя к пикселю не равна 100%. При расчете СТЕ-поправок использовался интернет-ресурс СТЕ Tool #1¹², а также алгоритм, описанный в главе 5.1.5 ACS Data Handbook [53]. По результатам расчетов оказалось, что для измеренных значений яркостей объектов и окружающего фона СТЕ-поправки не превышают 0.11^m .

Фон от окружающих объекты туманностей оценивался в кольце с внутренним радиусом $0.2''$ и внешним радиусом $0.4''$. Так как собственные ошибки фотометрии источников достаточно малы (на уровне 1–3%), то в случае NGC 6946 ULX-1, где туманность является наиболее яркой, основные ошибки потоков объекта связаны именно с неопределенностью определения вклада туманности в апертуре объекта. В качестве оценки этих ошибок использовалось среднее значения между фоном туманности и фоном неба за пределами туманности. Подобный метод был предложен в работе [77]. Измерения показали, что вычитание фона неба вместо фона туманности приводит к изменениям величины потока от точечного объекта в УФ-фильтрах в среднем на 12% для NGC 6946 ULX-1 и на 7% для Holmberg II X-1. В ближнем инфракрасном и оптических фильтрах в случае NGC 6946 ULX-1 разница может достигать 30%.

Поскольку структура оптических двойников NGC 5474 X-1 и M66 X-1 является протяженной (см. главу 3), при проведении апертурной фотометрии обоих объектов апертурные поправки не применялись. Фотометрия NGC 5474 X-1 была выполнена в апертуре радиусом $0.175''$ (3.5 пикселя), для M66 X-1 использовались две апертуры с радиусами $0.1''$ и $0.2''$ (первая – для оценки цвета объекта, вторая – для оценки полного потока). Выбор малого размера апертур обусловлен расположением обоих объектов в тесных звездных полях. При этом окружающих объекты туманностей обнаружено не было. Фон оценен по измерениям в кольцевых апертурах вокруг объектов: внутренний радиус составлял $0.5''$, внешний – $0.8''$. Фотометрические нуль-пункты для каждого из использу-

¹² http://www.stsci.edu/hst/wfpc2/software//wfpc2_cte_calc.html

емых фильтров рассчитывались на дату наблюдений с помощью специализированного он-лайн калькулятора¹³.

Оптический двойник другого отождествленного нами ультраяркого рентгеновского NGC 4559 X-10 вероятнее всего представляет собой звездообразный источник, окруженный более слабыми звездами (3). Чтобы уменьшить вклад в поток двойника X-10 окружающих его слабых звезд, мы выбрали малую апертуру радиусом 2 пикселя (0.05"). Фон, состоящий из этих слабых звезд, оценивался в малой кольцевой апертуре вокруг объекта с внутренним радиусом 4 пикселя и внешним 6 пикселей. На анализируемых нами изображениях ACS/HRC NGC 4559 X-10 не оказалось ни одной достаточно яркой одиночной звезды, которая могла бы быть использована для определения апертурных поправок. Поэтому, апертурные поправки были рассчитаны с помощью процедуры CALSPHOT пакета SYNPHOT.

Фотометрия оптического двойника NGC 4395 ULX-1 проводилась в апертурах радиусом 0.12" (3 пикселя) и 0.4" (10 пикселей). Апертурные поправки с радиуса апертуры 0.12" до 0.4", для которой рассчитаны нуль-пункты фильтров камеры WFC3¹⁴, измерены по четырем звездам для фильтров F275W и F336W, и по трем звездам для F438W. Ошибки измерения апертурных поправок находятся в пределах 0.01^m – 0.02^m. Так как фон в области объекта достаточно неоднороден, оценка его уровня проводилась в трех разных кольцевых апертурах вокруг объекта: 0.4" – 0.8", 0.6" – 1.0" и 1.0" – 1.6", где первое значение соответствует внутреннему радиусу, а второе внешнему радиусу апертуры. Измерения показали, что неопределенность звездной величины объекта в апертуре 0.12" в зависимости от разных оценок фона не превышает 0.01^m во всех фильтрах. В то же время, влияние изменения уровня фона при его оценках в разных кольцах на измерения потоков объекта в апертуре радиусом 0.4" значительно больше и

¹³ <http://www.stsci.edu/hst/acs/analysis/zeropoints/zpt.py>

¹⁴ фотометрические нуль-пункты доступны по адресу http://www.stsci.edu/hst/wfc3/phot_zp_lbn

превышает 2σ величины измеренного потока. Поэтому в работе используются величины потока оптического двойника NGC 4395 ULX-1, измеренные в малой апертуре с дальнейшей их коррекцией за величину апертуры (см. главу 3).

Результаты фотометрии отождествленных автором данной работы оптических двойников NGC 5474 X-1, M66 X-1, NGC 4559 X-10 и оптического двойника NGC 4395 ULX-1 представлены в табл. 3.2 в главе 3. Полученные в результате фотометрии оптических двойников Holmberg II X-1 и NGC 6546 ULX-1 спектральные распределения энергии в оптическом диапазоне и их интерпретация в рамках модели сверхкритического диска представлены в табл. 4.1 главы 4.

Выводы

В этой главе представлено описание используемых в работе наблюдательных данных оптических двойников семи ULX. Данные были получены при участии автора на телескопах Subaru (Holmberg II X-1, Holmberg IX X-1, NGC 4559 X-7 и NGC 5204 X-1) и БТА (NGC 4395 ULX-1, NGC 5474 X-1 и NGC 4559 X-10). Для пяти ULX: Holmberg II X-1, Holmberg IX X-1, NGC 4559 X-7, NGC 5204 X-1 и NGC 4395 ULX-1 – были получены спектры звездообразных источников, с которыми отождествлены эти объекты. Для NGC 5474 X-1 и NGC 4559 X-10 были получены спектры окружающих эти ULX туманностей. Приводятся журналы наблюдений и карты отождествления для всех исследуемых объектов. Выборка объектов, для которых получены спектры их оптических двойников, была дополнена тремя ультраяркими рентгеновскими источниками NGC 5408 X-1, NGC 1313 X-2 и NGC 7793 P13. Спектральные данные NGC 5408 X-1 и NGC 1313 X-2 были взяты из архива телескопа VLT и обработаны, данные для NGC 7793 P13 взяты из работы [111].

Дано подробное описание основных этапов обработки полученных с использованием Subaru/FOCAS, БТА/SCORPIO и VLT/FORS спектральных данных,

анализ которых проводится в следующих главах. Указываются особенности выполненной обработки данных с каждого инструмента, детально описаны проблемы экстракции и учета фона, возникающие при обработке спектров слабых объектов в тесных звездных полях, представлены методы решения этих проблем.

Дано описание и представлены методы фотометрии архивных данных наблюдений космического телескопа им. Хаббла шести оптических двойников ULX: NGC 6946 ULX-1, Holmberg II X-1, NGC 5474 X-1, M66 X-1, NGC 4395 ULX-1 и NGC 4559 X-10. Данные были получены на трех различных камерах: ACS, WFPC2 и WFC3. Для каждой из камер описываются особенности обработки полученных с их помощью данных.

Для всех исследованных 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. Информация получена как на основе опубликованных данных, так и с использованием собственных измерений, описанных в этой и следующих главах.

Глава 2

Анализ спектров ULX

Все отождествления ультраярких рентгеновских источников со звездобразными источниками в оптике представляют собой крайне слабые объекты, самые яркие из которых имеют видимую звездную величину $m_V \gtrsim 20.5^m$ [111]. Звездные величины большинства оптических двойников ULX (для которых сейчас имеются такие отождествления) находятся в диапазоне $m_V = 21^m - 23^m$ [151]. Столь слабые в оптическом диапазоне объекты доступны для спектральных наблюдений только на самых крупных телескопах мира. При этом, даже на таких инструментах для получения спектров с отношением сигнал/шум, пригодным для проведения исследований ($S/N \sim 5 - 10$), требуются экспозиции от десятков минут (для самых ярких ULX) до нескольких часов. Ввиду крайней сложности получения большого количества наблюдательного времени на крупных телескопах, количество работ, посвященных оптической спектроскопии ультраярких источников, собственно, очень мало.

В данной главе представлены результаты спектроскопии оптических двойников четырех ультраярких рентгеновских источников в галактиках NGC 5204, NGC 4559, Holmberg II и Holmberg IX, проведенной на телескопах Subaru в 2011 г. Кроме того, приведены результаты анализа недавно полученного на 6-м телескопе БТА спектра объекта NGC 4395 ULX-1, а также спектров NGC 1313 X-2 и NGC 5408 X-1, полученных нами по архивным данным телескопа VLT (ESO). Изложенные ниже результаты были опубликованы в работах [42–44, 162].

2.1. Результаты предыдущей спектроскопии

звездообразных оптических двойников ULX

Спектральные наблюдения в оптическом диапазоне ультраярких рентгеновских источников как таковых, а не связанных с ними скоплений или туманностей (например, [2–4, 89, 119, 120]), начались вскоре после открытия первых звездных двойников этих объектов.

Вероятно, первой работой, в которой был представлен спектр оптического двойника ULX, является работа Пакулля и др. [118], опубликованная в 2006 г. по результатам спектроскопии NGC 1313 X-2 на телескопах VLT и Subaru в 2003-2004 гг. Было проведено всего два наблюдения. Авторы обнаружили широкую эмиссионную линию He II $\lambda 4686$. После исправления за аппаратный контур ее ширина составила $FWHM \approx 600$ км/с. Было зарегистрировано изменение эквивалентной ширины этой линии между двумя наблюдениями с 10 \AA до 18 \AA а лучевой скорости на ≈ 300 км/с. В коротком сообщении [62] 2009 г. для NGC 1313 X-2 были представлены новые данные, полученные на VLT в 2007-2008 гг., а также анализ данных 2003-2004 гг. Было показано, что эмиссия He II в новых спектрах резко ослабла и стала значительно уже ($EW \sim 3 \text{ \AA}$, $FWHM < 300$ км/с).

Исследования NGC 1313 X-2 были продолжены в работе [131], в которой представлены изменения профиля и лучевой скорости He II по десяти спектроскопическим наблюдениям с длинной щелью на телескопе Gemini-S. Для получения спектров с приемлемым отношением сигнал/шум (видимая величина объекта в фильтре $V \sim 23.5^m$ mag) суммарная экспозиция в каждом наблюдении составляла 2.5 часа. Авторы работы отмечали, что, хотя были четко зарегистрированы изменения лучевой скорости эмиссии с амплитудой до ~ 200 км/с, они, по-видимому, имеют непериодический характер. Такая же картина вариаций лучевой скорости He II с амплитудой ± 100 км/с наблюдалась в Holmberg IX X-1.

Измерения были получены по 10 наблюдениям на телескопе Gemini-N и опубликованы в той же работе [131]. В объекте NGC 1313 X-2 были зафиксированы значительные изменения ширины линии He II в диапазоне от инструментального разрешения (< 290 км/с) до максимального значения ≈ 900 км/с. На основе этих измерений авторы сделали вывод, что если излучение в He II связано со стандартным аккреционным диском, то диск должен наблюдаться под малыми углами к его оси. В обоих объектах временной масштаб переменности эмиссии He II составляет менее 1 дня.

Кроме указанных двух детально исследуемых в [131] объектов, был также представлен спектр NGC 5204 X-1, в котором авторам не удалось обнаружить линию He II. Однако, как показывают результаты спектроскопии NGC 5204 X-1, проведенной нами на Subaru в 2011 году (см. ниже), эта линия явно присутствует в спектре объекта.

Одним из наиболее хорошо изученных ULX является NGC 5408 X-1. Первые спектры (всего 6) источника были получены в 2008 г. на VLT/FORS1 [76]. Объект окружает компактная ($\approx 2''$) туманность высокого возбуждения с яркой эмиссией He II, и в результате исследования спектров в этой работе не удалось явно выявить наличие широкой компоненты линии.

В результате более детального анализа данных 2008 г. в работе [32] в трех из шести наблюдений NGC 5408 X-1 была обнаружена широкая компонента линии He II. Новые данные, полученные в 2010 г. на VLT/FORS2 с гораздо лучшим разрешением, чем предыдущие шесть спектров, позволили надежно разделить узкую и широкую компоненты в линиях He II и H β . Ширины обеих линий, принадлежащих объекту, в пределах ошибок измерений оказались одинаковы и равны ≈ 750 км/с. В работе также сообщалось об обнаружении широкой компоненты линии H α , однако для нее удалось получить только приблизительную оценку ширины $\text{FWHM} \approx 19 \text{ \AA}$. Кроме того, было обнаружено изменение лучевой скорости широкой компоненты He II на 252 ± 47 км/с.

Беспрецедентный по количеству наблюдений (более 20) массив данных для этого объекта был получен в 2011-2012 гг. [33]. Совместный анализ нового и полученного в 2008–2010 гг. спектрального материала позволил более надежно определить ширину принадлежащей NGC 5408 X-1 компоненты He II FWHM = 780 ± 64 км/с и диапазон ее изменения $\approx 13\%$ за все четыре года наблюдений объекта. Используя наиболее накопленный спектр NGC 5408 X-1, авторам [33] не удалось выявить каких-либо абсорбционных линий, которые могли бы принадлежать звезде-донору. Определение полуамплитуды вариаций лучевой скорости He II 132 ± 42 км/с дало ограничение сверху (точнее, предположение) на массу черной дыры в системе $\sim 510M_{\odot}$. При получении этой оценки авторы предполагали, что линия He II излучается в аккреционном диске. Поиск периода изменений лучевой скорости в диапазоне 1–300 дней не привел к каким-либо статистически значимым результатам. Однако, авторы не исключили возможность наличия периода в диапазоне нескольких часов до нескольких дней, что подразумевает наличие в системе черной дыры звездной массы и донора субгиганта [33].

Известный транзиентный источник M 101 ULX-1 часто относят к ультраярким, хотя характерных для ULX светимостей он достигает только во вспышках, тогда как вне вспышек его светимость составляет $L_X \sim 10^{37}$ эрг/с [82, 83, 96, 112]. Во вспышках источник имеет очень мягкий рентгеновский спектр, неплохо описываемый тепловым компонентом (диском) с температурой 90–180 эВ [96, 112]. В первых работах (например, [83]) регистрировалась только виновская часть чернотельного распределения, что с учетом неопределенности величины межзвездного поглощения, оказывающей наибольшее влияние именно в мягкой области спектра, приводило к завышенным оценкам рентгеновской ($\sim 3 \times 10^{40}$ эрг/с) и болометрической (до 10^{41} эрг/с) светимости объекта при аппроксимации спектра простой моделью черного тела. В дальнейшем оценки светимости уточнялись, и уже в работе [112] было показано, что спектр объекта гораздо

лучше может быть описан моделью BB+diskline (черное тело в сочетании с эмиссионной компонентой аккреционного диска), а рентгеновская светимость M 101 ULX-1 в этом случае не превышает $\sim 3 \times 10^{39}$ эрг/с, что соответствует Эддингтоновской светимости черной дыры массой 20–40 M_{\odot} .

Первый оптический спектр M 101 ULX-1 был представлен в работе [85]. В той же работе было показано, что спектр объекта подобен спектрам звезд Вольфа-Райе. В результате спектроскопического мониторинга M 101 ULX-1, проведенного в период низкой рентгеновской светимости с февраля по май 2010 г., было подтверждено, что эта система содержит звезду Вольфа-Райе [96]. В спектре объекта обнаружены яркие широкие эмиссионные линии He II $\lambda 4686$, 5411, He I $\lambda 4471$, 4922, 5876, 6679, N III $\lambda 4634$; линии бальмеровской серии отсутствуют. Определен период орбитальной системы $P = 8.2$ дня. Авторы дали ограничения на массу черной дыры снизу $5M_{\odot}$, отмечая, что более вероятное значение составляет 20–30 M_{\odot} , поэтому маловероятно присутствие в системе IMBH.

Особого внимания заслуживает NGC 7793 P13, являющийся первым ультраярким рентгеновским источником, оптический спектр которого практически целиком определяется донором [111]. NGC 7793 P13 - это транзиентный ULX с жестким рентгеновским спектром ($\Gamma \sim 1$), рентгеновская светимость которого меняется в диапазоне от $\sim 5 \times 10^{37}$ эрг/с до $\sim 5 \times 10^{39}$ эрг/с. Исследование объекта по данным VLT/FORS2, полученным в период с 2009 по 2011 гг., показало составной характер спектра, в котором присутствуют эмиссии He II $\lambda 4686$ и линии бальмеровской серии (от $H\alpha$ до $H\gamma$), бленда Боуэна C III/N III, а также множество абсорбционных линий, которые в совокупности с распределением энергии в оптическом спектре в целом позволили соотнести его со звездой B9Ia с температурой $T \approx 11000$ К. Очевидно, что эмиссии He II и C III/N III не могут возникнуть на такой звезде. Наличие эмиссионных линий, по предположению авторов, связано с прогревом звезды-донора рентгеновским излучением аккреционного диска или, что более вероятно, с излучением самого аккреционного

диска. По кривой блеска в фильтре V был определен период системы около 64 дней. Сходный период обнаружен и по кривой лучевых скоростей линии He II . Моделирование кривых блеска позволило найти ограничение на массу черной дыры $< 15M_{\odot}$. На основе совместного анализа рентгеновских и оптических данных авторы делают вывод, что в системе P13 аккреция идет в сверхкритическом режиме, а изменения рентгеновского и оптического блеска объекта связаны с прецессией диска.

В работах Хейда и др. [69, 70] представлены результаты спектроскопии шести вероятных двойников ультраярких рентгеновских источников в ближнем инфракрасном диапазоне (полоса H). Наблюдения NGC 253 X-1 были проведены на VLT/X-shooter [70]; спектры двух ULX (J022721+333500 и J022727+333443) в галактике NGC 925, двух (J120922+295551 и 120922+295559) – в NGC 4136, и Holmberg II X-1 получены на Keck/MOSFIRE [69]. Авторы показали, что три (NGC 253 X-1, J022721+333500 и J120922+295559) из шести источников обладают абсорбционными спектрами типа M-сверхгигантов, которые, наиболее вероятно, формируются на звезде-доноре. Остальные объекты имеют эмиссионные спектры, которые, по-видимому, принадлежат окружающим объектам туманностям [69]. Дальнейшие наблюдения отождествленных с красными сверхгигантами ULX, вполне вероятно, позволят построить кривую лучевых скоростей звезды-донора и, таким образом, получить ограничения на массы аккрецирующих черных дыр.

Спектроскопия ULX проводилась не только на наземных инструментах, но и на космическом телескопе им. Хаббла. В работе [20] были представлены спектры в далеком УФ-диапазоне (1230–1850 Å) четырех оптических двойников ULX: NGC 1313 X-2, Holmberg II X-1, NGC 5204 X-1 и M 81 X-6. Анализ данных показал схожесть спектров трех ультраярких источников (в галактиках NGC 1313, Holmberg II и NGC 5204): в их спектрах присутствует яркая эмиссионная линия $N V \lambda 1240$ с приблизительно одинаковой эквивалентной шириной,

предсказывавшаяся для аккреционных дисков еще в работе [129]. В спектрах объектов нет особенностей типа P-Cyg, что сильно отличает их от массивных рентгеновских двойных (high mass X-ray binaries) с аккрецией из ветра О-звезд (типа Cyg X-1). Авторы указали, что объекты вероятно содержат доноры типа В-звезд, а перенос массы происходит через полость Роша. Особенности спектра четвертого объекта (M 81) соответствуют звезде позднего Вольфа-Райе типа.

2.2. Исследование спектров четырех оптических двойников ULX по данным телескопа Subaru

На телескопе Subaru в феврале 2011 года были получены спектры с очень высоким отношением сигнал/шум $\gtrsim 10$ четырех оптических двойников ультра-ярких рентгеновских источников. Объектами исследования являлись Holmberg II X-1, Holmberg IX X-1, NGC 4559 X-7 и NGC 5204 X-1. Во всех случаях оптическое отождествление представляет собой одиночный звездообразный источник по данным космического телескопа имени Хаббла. Подробное описание наблюдательных данных и их обработки можно найти в главе 1.

На рис. 2.1 показаны фрагменты нормированных спектров всех четырех ULX в двух диапазонах длин волн. Широкая эмиссионная линия He II $\lambda 4686$ присутствует в спектрах всех объектов: минимальная ширина линии (Holmberg IX X-1) составляет $\text{FWHM} \approx 450$ км/с, максимальная (NGC 5204 X-1) $\text{FWHM} \approx 1570$ км/с, все ширины линий исправлены за инструментальный профиль. Следует отметить, что относительно узкая линия He II в Holmberg IX X-1 тем не менее заметно шире линий туманности: в этой линии отсутствует сколько-нибудь значительный вклад от туманности.

Кроме линии He II в спектрах всех наблюдавшихся на Subaru ULX (рис. 2.2) также надежно детектируются широкие компоненты в линиях $\text{H}\alpha$, $\text{H}\beta$, He I $\lambda 5876$ и присутствует намек на бленду Боуэна C III/N III $\lambda\lambda 4640 - 4650$ Å. В

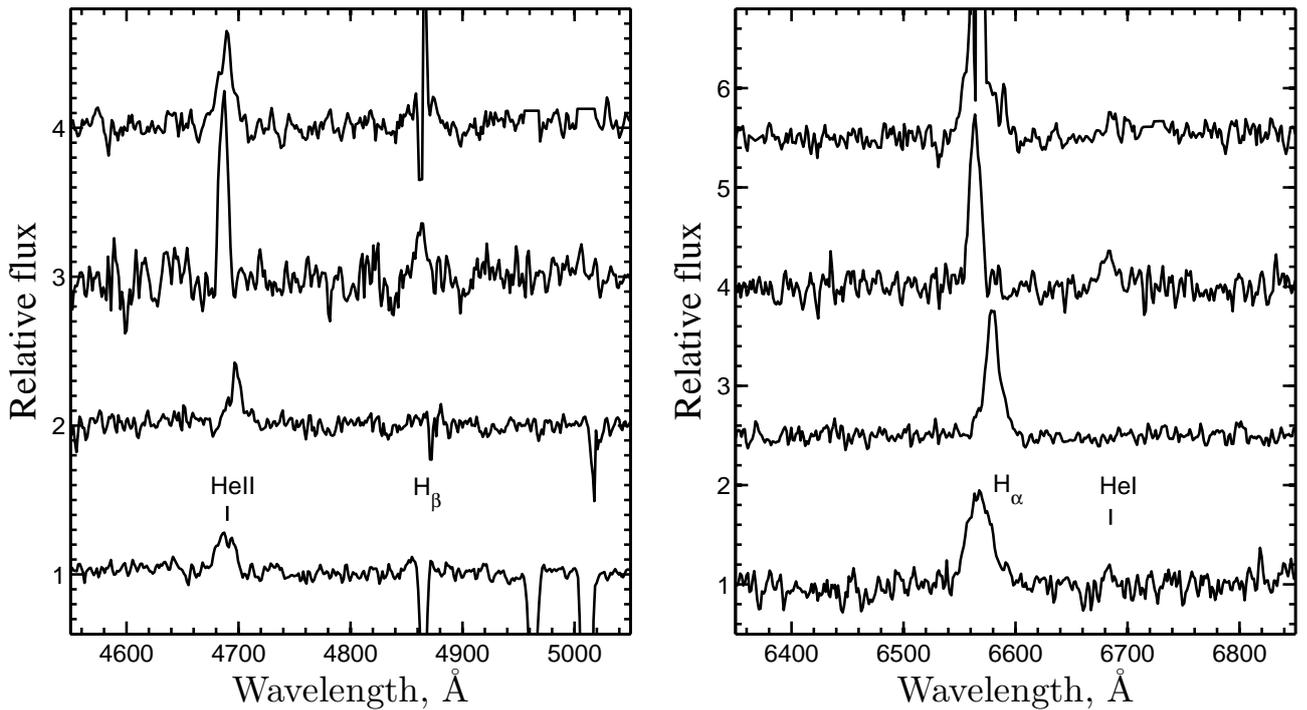


Рис. 2.1. Нормированные спектры оптических двойников Holmberg II X-1, Holmberg IX X-1, NGC 4559 X-7 и NGC 5204 X-1 (сверху вниз) в голубом (левая панель) и красном (правая панель) спектральных диапазонах, полученные 28 февраля 2011 г. Спектры не приведены на нулевую лучевую скорость. Наиболее яркими эмиссионными линиями являются He II λ 4686, H β λ 4861 и H α λ 6563. В спектрах Holmberg IX X-1 и NGC 5204 X-1 обнаружена линия He I λ 6678. Узкие эмиссионные линии туманностей H β [O III] $\lambda\lambda$ 4959, 5007 в случаях NGC 4559 X-7 и NGC 5204 X-1 были перевычтены в процессе экстракции спектров объектов, тем не менее, широкие крылья линии H β явно видны в обоих объектах.

спектре Holmberg IX X-1, наряду с вышеперечисленными эмиссиями, отчетливо видны широкие линии He I $\lambda\lambda$ 4471, 6678, 7065 и очень слабая линия He II λ 5411. В спектре NGC 5204 X-1 также видна слабая линия He I λ 6678. В Holmberg II X-1 помимо линий He II, H α и H β присутствует эмиссия He II λ 5411. В профили линии H β в наших объектах значительные искажения вносит гораздо более яркая линия H β , принадлежащая окружающим туманностям. Вклад туманностей не представляется возможным аккуратно учесть даже при экстракции спектров с аппроксимацией фона в непосредственной близости от объекта (подробнее см.

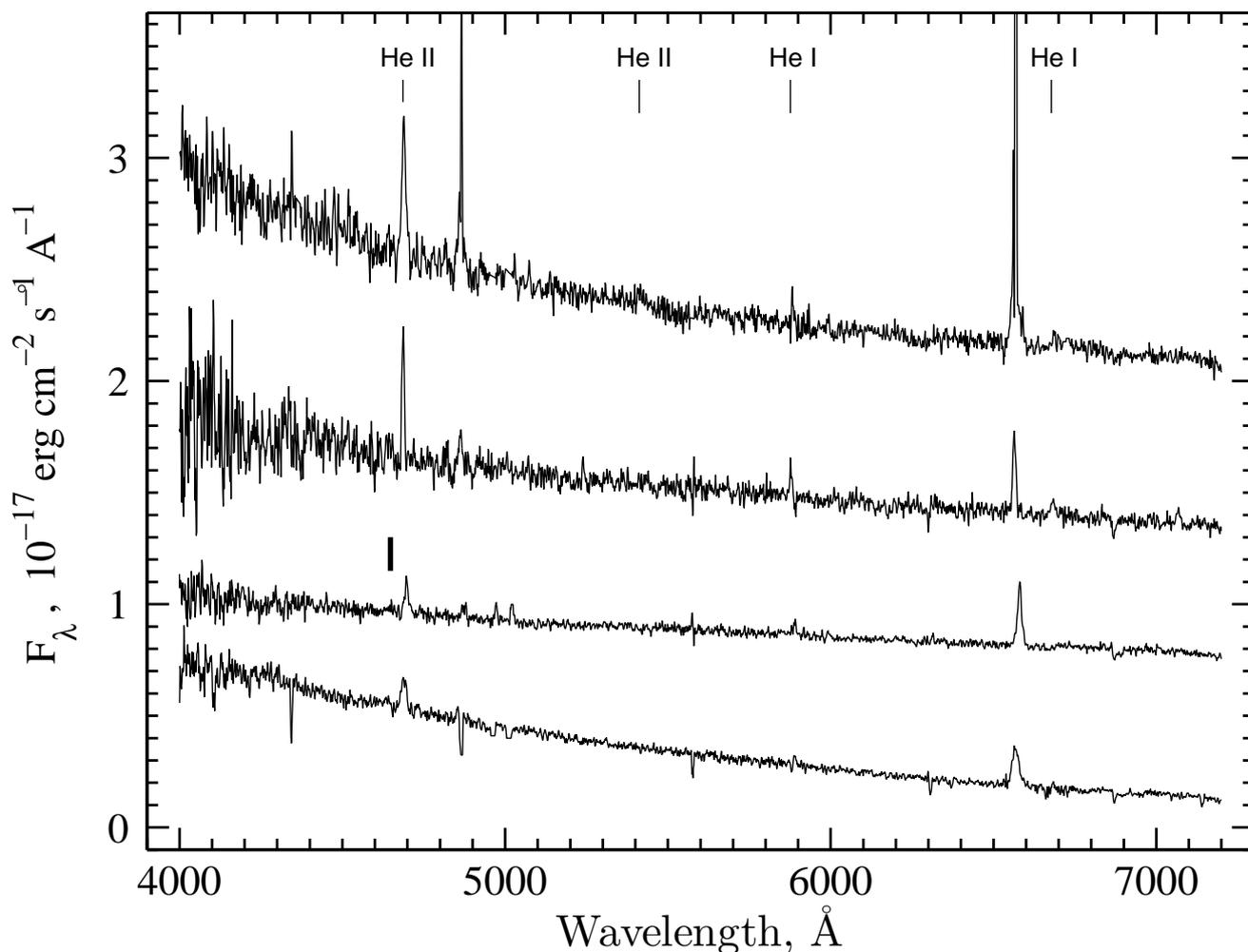


Рис. 2.2. Калиброванные спектры Holmberg II X-1, Holmberg IX X-1, NGC 4559 X-7 и NGC 5204 X-1 (сверху вниз). Два верхних спектра получены 28 февраля 2011 г., два нижних представляют собой сумму за три даты наблюдений (26–28 февраля 2011 г.). В целях более наглядного представления данных спектры Holmberg II X-1, Holmberg IX X-1 и NGC 4559 X-7 смещены вверх на 1.8, 1.2 и 0.6 (10^{-17} эрг/см² с Å) соответственно. В спектрах присутствуют эмиссионные линии H α и H β . В спектре Holmberg II X-1 видны не полностью вычтенные узкие компоненты линий, принадлежащие окружающей этот объект туманности. Линии He I $\lambda\lambda$ 5876, 6678 и He II $\lambda\lambda$ 4686, 5411 отмечены тонкими штрихами, широким штрихом отмечено положение бленды Боуэна C III/N III $\lambda\lambda$ 4640 – 4650.

раздел 1.3). В случае Holmberg II X-1 вклад окружающей его туманности во все линии значительно выше, чем в остальных объектах, что опять же связано с очень высокой яркостью туманности и ее малым пространственным размером ($\approx 2''$), не позволяющем корректно учесть вклад ее линий в спектре ULX. Однако, линии туманности узкие, поэтому несмотря на значительный вклад туманности в линии Бальмеровской серии, во всех объектах надежно обнаруживаются широкие крылья указанных линий, по-видимому, формирующиеся в ветрах звезды-донора или ветрах аккреционных дисков ULX.

В табл. 2.1 приведены результаты измерения лучевой скорости (V_r), ширины (FWHM) и эквивалентной ширины (EW) широких компонент эмиссионных линий по данным наблюдений за 28 февраля 2011 г., проведенных с щелью $0.4''$. При данной ширине щели были получены данные с наилучшим за время наших наблюдений спектральным разрешением $\sim 4.3 \text{ \AA}$. Параметры линий измерялись с помощью одно- или многокомпонентной гаусс-аппроксимации профилей как узких компонент линий, связанных с туманностями, так и широких компонент самих объектов. В случае слабых линий делались только оценки их эквивалентной ширины с помощью команды INTEGR/LINE пакета MIDAS. Бариецентрические поправки к величинам лучевых скоростей рассчитывались с помощью он-лайн инструмента, доступного на сайте ESO¹, позволяющего рассчитывать также воздушные массы и другие характеристики для заданных экваториальных координат объектов и даты наблюдений. Величины поправок составляют +8 км/с для NGC 4559 X-7, +1 км/с для NGC 5204 X-1, -15 км/с для Holmberg II X-1, -12 км/с для Holmberg IX X-1; точность рассчитываемых для каждого объекта поправок составляет ~ 1 км/с при точности калибровки по длинам волн ~ 10 км/с (раздел 1.3). Наблюдаемые ширины исправлялись за инструментальный профиль согласно соотношению $\text{FWHM}_{\text{испр.}} =$

¹ <https://www.eso.org/sci/observing/tools/calendar/airmass.html>

Таблица 2.1. Приведенные к барицентру лучевые скорости (V_r), исправленные за инструментальный контур ширины (FWHM) и эквивалентные ширины (EW) или их оценки сверху линий в спектрах ULX по данным Subaru/FOCAS за 28 февраля 2011. Указанные в скобках ошибки параметров линий соответствуют 1σ .

Объект	Линия	V_r , км/с	FWHM, км/с	EW, Å
Holmberg IX X-1	He II λ 4686	76 (13)	450 (30)	10.6 (0.5)
	H α	38 (27)	590 (110)	14 (3)
	H β	79 (26)	620 (90)	3.5 (0.6)
	He I λ 4471	–	–	<1.5
	He I λ 5876	14 (26)	410 (80)	4.1 (1.0)
	He I λ 6678	30 (30)	440 (60)	3.2 (0.9)
	He I λ 7065	30 (50)	570 (110)	3.6 (0.8)
	He II λ 5411	120 (40)	400 (110)	1.3 (0.2)
Holmberg II X-1	He II λ 4686	164 (26)	990 (110)	8.7 (1.8)
	H α	–	1300 (400)	24 (7)
	H β	–	1390 (190)	7.5 (1.5)
	He I λ 5876	–	–	<1.8
	He II λ 5411	–	–	1.7 (1.2)
NGC 5204 X-1	He II λ 4686	-50 (60)	1570 (260)	7.5 (1.5)
	H α	210 (30)	1360 (80)	30 (4)
	H β	–	–	1.6 (2.0)
	He I λ 5876	–	–	<1.0
	He I λ 6678	–	–	2.6 (1.8)
	He II λ 5411	–	–	<0.4
NGC 4559 X-7	He II λ 4686	900 (40)	460 (50)	9.1 (1.2)
	H α	800 (20)	780 (50)	31.7 (1.5)
	H β	–	–	3.8 (1.1)
	He I λ 5876	–	–	3.2 (0.9)
	He II λ 5411	64	–	<1.0

$\sqrt{\text{FWHM}_{\text{набл.}}^2 - \text{FWHM}_{\text{инстр.}}^2}$. Измерения параметров линий проводились по спектрам, экстрагированным с сохранением вклада линий туманности (с использованием линий туманности при Гаусс-анализе). Линия He I $\lambda 5876$ в ряде случаев искажена атмосферным дублетом натрия D1, D2, следствием чего является довольно большая ошибка определения ее параметров. Все ошибки измерений соответствуют величине дисперсии 1σ , оценки которой получены по результатам гаусс-анализа, или, в случае слабых линий, на основе отношения сигнал/шум в континууме вокруг линии.

Дополнительно, с целью контроля величин ошибок параметров линий, проводились измерения каждой линии по синтетическим спектрам. В каждой итерации на основе полученных при аппроксимации профилем Гаусса параметров строился синтетический спектр длиной 200 \AA , содержащий моделируемую линию. В этот спектр вносились шумы, имеющие нормальное распределение с оцененной из наблюдательных данных величиной дисперсии. Полученный спектр аппроксимировался моделью, включающей полином, описывающий континуум, и Гауссиану, описывающую профиль линии. Всего было проведено 1000 моделирований профиля каждой линии. Далее строилось распределение измеренных параметров модельных линий, ширина которого и принималась за искомую оценку ошибки. Полученные таким образом оценки ошибок параметров линий оказались в хорошем согласии с величинами ошибок, измеренных при аппроксимации наблюдательных данных.

Ввиду схожести спектров всех ULX между собой, имеет смысл рассматривать усредненные параметры спектральных линий для всех четырех объектов. Усреднение значений ширины линий по наблюдениям 28 февраля 2011 показывает, что H α имеет большую ширину, чем линия He II, $\text{FWHM}(\text{He II})/\text{FWHM}(\text{H}\alpha) \approx 0.8$. Кроме того, наблюдается линейная корреляция между ширинами этих линий в объектах. Распределение наблюдаемых ширин линий H α и He II для

Holmberg IX X-1, NGC 4559 X-7, Holmberg II X-1, NGC 5204 X-1, а также NGC 5408 X-1 (были обработаны архивные данные телескопа VLT; подробнее см. главу 1) показано на рис. 2.3. Стоит отметить, что надежные одновременные (спектр NGC 5408 X-1 был снят в голубой и красной области в течение нескольких часов) измерения ширины линии He II и линий бальмеровской серии имеются только для этих пяти ULX. Для остальных ультраярких источников пока нет данных о ширинах линий водорода. Исключением является NGC 7793 P13 [111], однако на эмиссионные линии бальмеровской серии накладываются абсорбции звезды-донора B9Ia, что не позволяет получить надежные оценки ширины эмиссий в данном объекте.

В спектрах исследуемых четырех ULX мы нашли следующие соотношения усредненных эквивалентных ширины линий: $EW(\text{He II } \lambda 4686) / EW(\text{H}\beta) \approx 2.2$, $EW(\text{He II } \lambda 4686) / EW(\text{H}\alpha) \approx 0.36$ и $EW(\text{He II } \lambda 4686) / EW(\text{He I } \lambda 5876) \gtrsim 3.6$ (см. табл. 2.2). В объекте SS 433 эти соотношения примерно в пять раз ниже: $EW(\text{He II } \lambda 4686) / EW(\text{H}\beta) \approx 0.40$, $EW(\text{He II } \lambda 4686) / EW(\text{H}\alpha) \approx 0.06$ и $EW(\text{He II } \lambda 4686) / EW(\text{He I } \lambda 5876) \approx 0.82$ (см. табл. 2.2 и ссылки в ней), то есть линия He II в спектрах оптических двойников ULX оказалась в 5 раз ярче, чем в SS 433. Более высокое отношение линий He II/H I может объясняться как повышенным содержанием гелия по отношению к водороду в поставляемом звездой-донором газе, так и более высокой температурой и степенью ионизации ветров ULX. Чтобы обеспечить наблюдаемое соотношение достаточно уменьшить долю водорода в два раза по отношению к солнечному значению [42], в таком случае содержание гелия возрастет примерно в пять раз. Однако, это противоречит достаточно слабым линиям He I, наблюдаемым в спектрах ULX. Кроме того, если бы вместо водородных линий в спектрах ULX наблюдались бы линии He II серии Пикеринга, то интенсивности линий этой серии монотонно уменьшались с возрастанием их номера. Такое монотонное уменьшение интенсивности и эквивалентной ширины линий гелия серии Пикеринга

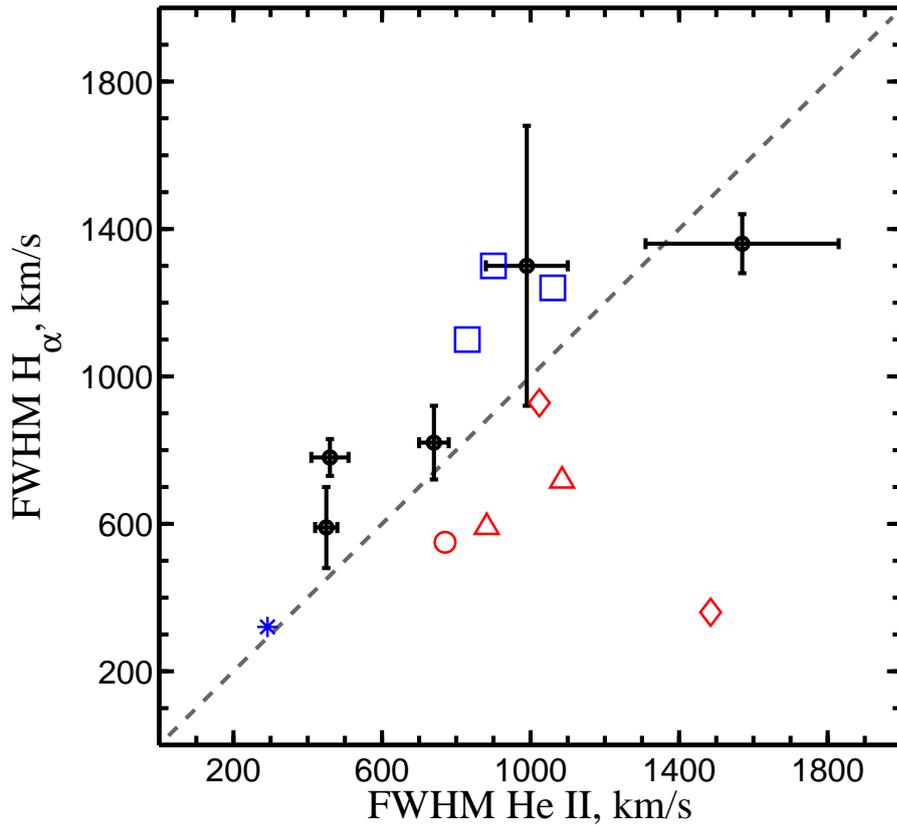


Рис. 2.3. Ширины эмиссионных линий $H\alpha$ и $He\ II\ \lambda 4686$ для Holmberg IX X-1, NGC 4559 X-7, NGC 5408 X-1, Holmberg II X-1, NGC 5204 X-1 (обозначены точками с барами ошибок измерений и располагаются слева направо в указанном порядке). Измерения получены по одновременным спектрам. Ширины линий NGC 5408 X-1 получены по архивным данным. Систематическая ошибка, связанная с неопределенностью вычитания вклада туманности, учтена в барах ошибок линии $H\alpha$ в объекте Holmberg II X-1. Большая ошибка ширины линии $He\ II$ в NGC 5204 X-1 связана с малой яркостью объекта и низкой интенсивностью линии. Для сравнения приведены отношения ширин этих линий для звезд типа WNLh WR 22, WR 24 и WR 25 (квадраты), LBV V 532 (обозначена звездой) и рентгеновских транзиентов GX 339–4 (кружок), GRO J1655–40 (ромбы) и V404 Cyg (треугольники). Для последних двух объектов представлены по два измерения (см. текст раздела 2.4). Из рисунка видно, что у четырех из пяти ULX ширины линии $He\ II$ больше, чем ширина линии $H\alpha$. Такая же картина наблюдается для обладающих мощными ветрами звезд WNLh и V 532, находящейся в горячем состоянии. В противоположность этим объектам, все транзиенты располагаются ниже штриховой линии, отмечающей место равных ширин линий $H\alpha$ и $He\ II$.

Таблица 2.2. Средние эквивалентные ширины эмиссионных линий (\AA) и их отношения для четырех ULX нашей выборки и SS 433. Данные для SS 433 взяты из литературы [58, 84]. В последнем столбце приведены отношения эквивалентных ширин ULX к таковым в SS 433.

	EW_{ULX}	$EW_{\text{SS 433}}$	ULX / SS 433
He II $\lambda 4686$	9.0 ± 0.6	20	0.45 ± 0.03
He II $\lambda 5411$	$\lesssim 1.1 \pm 0.3$	2.5	$\lesssim 0.44 \pm 0.12$
He I $\lambda 5876$	$\lesssim 2.5 \pm 0.7$	24.5	$\lesssim 0.10 \pm 0.03$
H β	4.1 ± 1.2	50	0.082 ± 0.024
H α	25 ± 4	320 ± 20	0.078 ± 0.012
H β /H α	0.16 ± 0.06	0.16	1.0 ± 0.4
He II $\lambda 4686$ /H α	0.36 ± 0.06	0.06	6.0 ± 1.0
He I $\lambda 5876$ /H α	$\lesssim 0.10 \pm 0.03$	0.08	$\lesssim 1.3 \pm 0.4$

демонстрируют спектры звезд Вольфа-Райе (см., например, [66]). В случае же ULX наблюдаемое отношение эквивалентных ширин линий H β и H α к линии серии Пикеринга He II $\lambda 5411$ составляет соответственно 3.7 и 23 (табл. 2.2), что свидетельствует в пользу отождествления этих линий именно с линиями балмеровской серии водорода. Таким образом, соотношение содержания водорода к гелию в ветрах ULX, по-видимому, близко к нормальному. Итак, наблюдаемое соотношение эквивалентных ширин линий объясняется более высокими температурами ветров ULX, чем в SS 433, температура фотосферы ветра в котором достигает значений 50000 К или более [25]. В дальнейшем планируется проведение более детального анализа оптических спектров ультраярких источников с помощью разработанной В.-Р. Хамманом с соавторами программы расчета звездных атмосфер с учетом истекающего ветра PoWR [57, 65] (см. также <http://www.astro.physik.uni-potsdam.de/PoWR.html>).

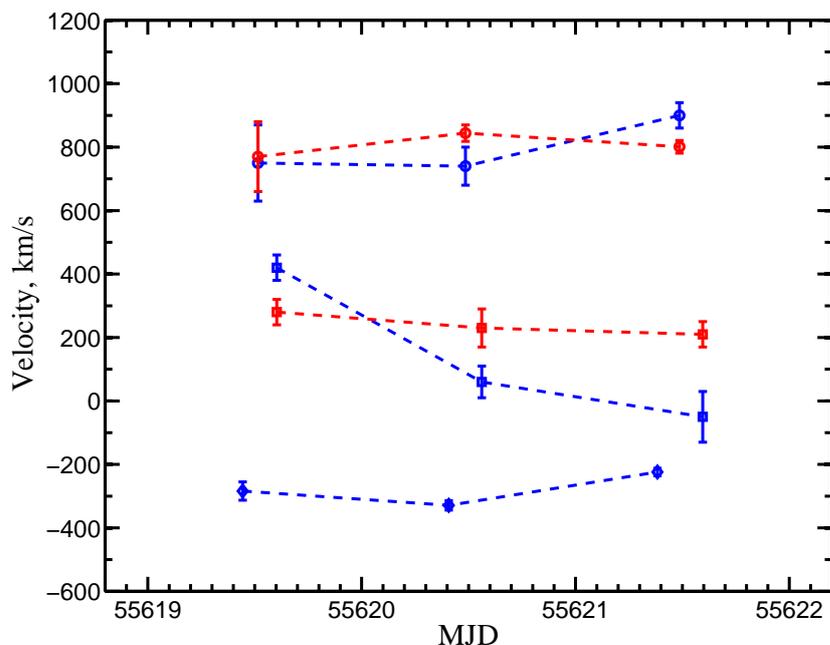


Рис. 2.4. Изменение лучевых скоростей линий He II (синим) и H α (красным) за три последовательные ночи (26–28 февраля 2011). Сверху вниз: NGC 4559 X-7, NGC 5204 X-1, Holmberg IX X-1. В случае Holmberg IX X-1 лучевые скорости определены только для линии He II (данные смещены на -300 км/с от своих реальных значений). Бары ошибок соответствуют 1σ .

По результатам наблюдений в период с 26 по 28 февраля 2011 г. в объектах NGC 4559 X-7, NGC 5204 X-1 и Holmberg IX X-1 была обнаружена значительная переменность лучевой скорости линии He II $\lambda 4686$ от ночи к ночи (до 460 км/с в случае NGC 5204 X-1, рис. 2.4). Точность измерения лучевой скорости линии H α не позволила значимо детектировать ее изменения. Тем не менее, этих данных недостаточно для изучения орбитальной переменности, более того, более длительные ряды наблюдений других ULX [33, 93, 131] также не дали ответа на вопрос о массах черных дыр в системах: кривые лучевых скоростей имеют непериодический характер [131]. Поскольку только в Holmberg II X-1 линия He II имеет значительный вклад излучения туманности, в остальных трех объектах этот вклад пренебрежим и был полностью учтен в процессе обработки, полученные нами кривые лучевых скоростей являются надежными. Обнаружены не только изменения положения линии He II, но и изменение ее эквивалентной ши-

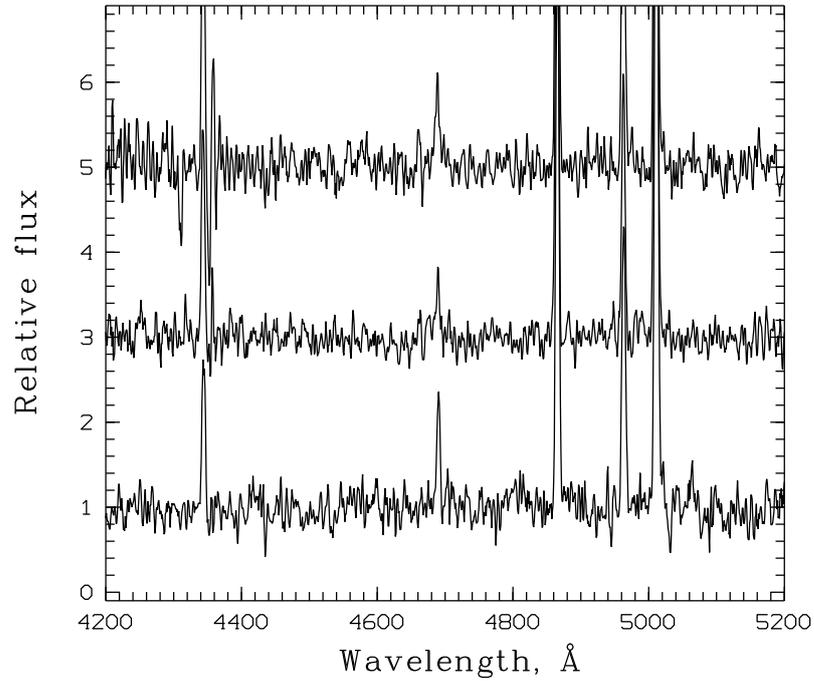


Рис. 2.5. Нормированные спектры оптического двойника NGC 4395 ULX-1, полученные 1 января 2014 г., 17 января 2015 г. и 21 февраля 2015 г. (сверху вниз). Наиболее яркими линиями являются He II λ 4686, линии бальмеровской серии H γ и H β и линии кислорода [OIII] λ λ 4959, 5007. В двух верхних спектрах обнаружена широкая компонента линии He II.

рины и ширины (FWHM). На рис. 2.6 прямыми линиями показано изменение параметров EW и FWHM линии от ночи к ночи. Точность измерений сильно зависит от ширины профиля линии и меняется от 0.5 Å (EW) и 30 км/с (FWHM) в случае Holmberg IX X-1 до 1.5 Å и 250 км/с для NGC 5204 X-1 (рис. 2.1).

Сильная переменность профиля линии He II заподозрена и в случае NGC 4395 ULX-1, спектроскопия которого проводилась на 6-метровом телескопе САО РАН в 2014-2015 гг. Журнал наблюдений и описание обработки данных приводится в главе 1. Нормированные спектры объекта представлены на рис. 2.5. Узкие спектральные линии водорода H β , H γ и линии кислорода [OIII] λ λ 4959, 5007 принадлежат компактной туманности вокруг источника. В спектрах, полученных в январе 2014 и 2015 гг., была обнаружена широкая компонента линии He II. Узкая компонента линии видна во всех трех спектрах. В данных, полученных

в феврале 2015 г., присутствует только узкая компонента этой линии, ширина которой $\text{FWHM} = 310 \pm 40$ км/с соответствует спектральному разрешению. К сожалению, так как объект является крайне слабым источником в оптическом диапазоне ($V \approx 23^m$), качество полученных спектров не позволяет надежным образом измерить ширину широкой компоненты линии He II. Нами получены только оценки ее ширины ~ 700 км/с, которые согласуются со значениями ширины этой линии в спектрах других ULX.

2.3. Сходство со спектрами LBV звезд в горячем состоянии и SS 433

Настолько яркие линии He II $\lambda 4686$, как наблюдается в ультраярких рентгеновских источниках, можно найти только в спектрах O2–3.5If*/WN5–7² звезд [31] (далее индекс *, обозначающий высокую степень ионизации газа ветров звезд, следующую из отношения линий N IV/N V, будет опускаться). Они представляют собой наиболее горячие "переходные звезды" (transition stars), классификация которых основана на профиле линии H β , отслеживающей увеличение плотности ветра (то есть, темпа потери массы) от O2–3.5If к O2–3.5If/WN5–7 и к WN5–7 звездам. Это новая уточненная классификация Краутера и Валборна [31].

На рис. 2.6 показана классификационная диаграмма Краутера и Смита WN-звезд [30] для объектов в Большом Магелановом Облаке (LMC) и нашей Галактики. Диаграмма дополнена недавно классифицированными звездами из работы [31]. Звезды на диаграмме расположены в соответствии с их скоростью ветра (FWHM линии He II) и температурой фотосферы совместно с величиной темпа потери массы. Как температура фотосферы и ветра, так и темп потери

² Of - звезды, у которых линии N III $\lambda\lambda 4634, 4640, 4642$ Å и He II $\lambda 4686$ наблюдаются в эмиссии; WN – звезды типа Вольфа-Райе с сильными азотными линиями в спектре

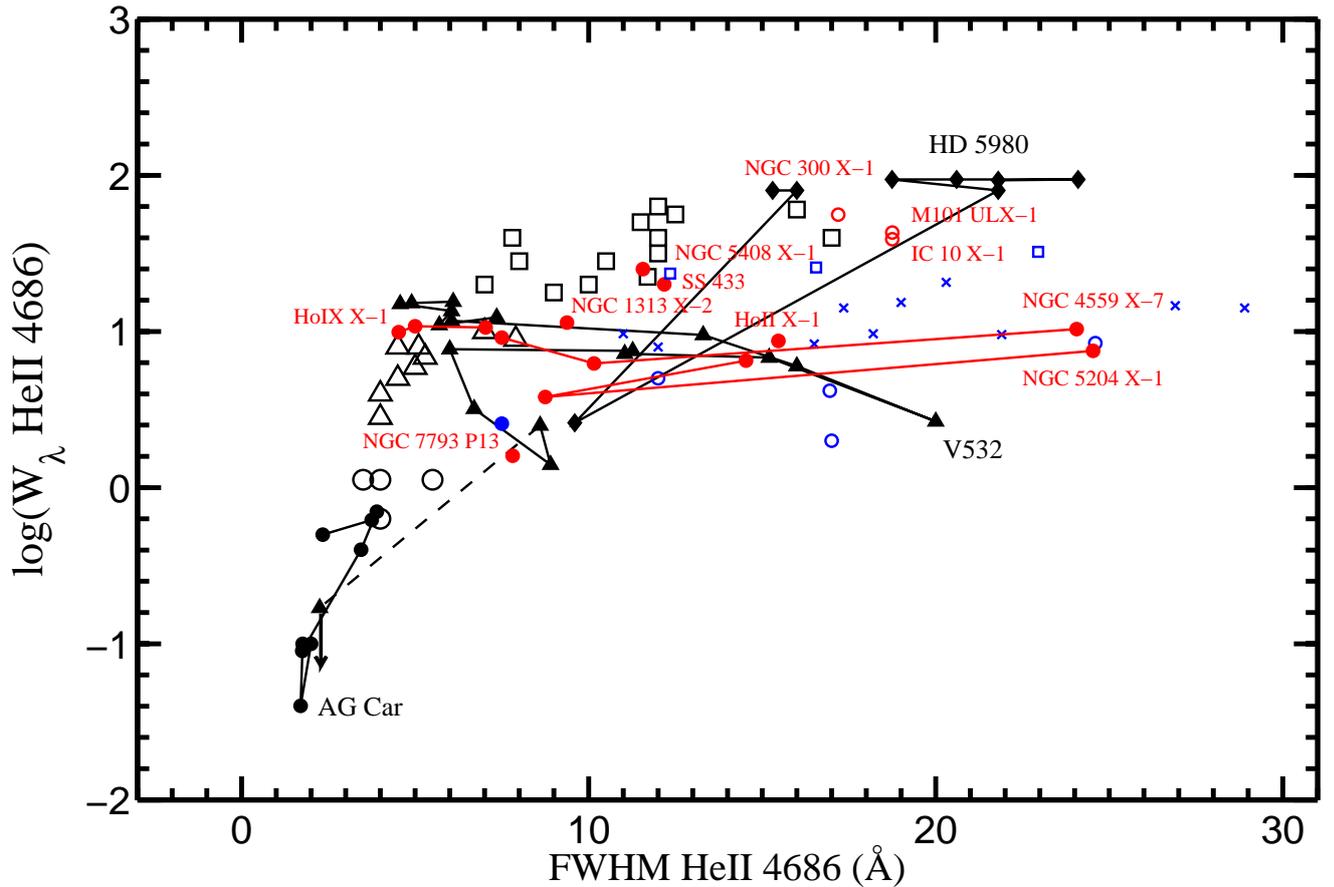


Рис. 2.6. Классификационная диаграмма WNL-звезд в LMC и нашей Галактике [30]. Черные открытые квадраты, треугольники и кружки показывают положение на диаграмме соответственно звезд WN6–8, WN9–10 и WN11. Синий заполненный кружок соответствует ζ Pup. Остальные объекты в LMC и нашей Галактике [31] являются звездами O2If и O3If (открытые синие кружки), O2If/WN5, O2.5If/WN6, O3If/WN6 и O3.5If/WN7 (синие кресты), и WN6ha и WN7ha (открытые синие квадраты). На диаграмме также показаны три известные LBV (AG Car, V 532 и HD 5980) с их переходами между горячим и холодным состояниями [140] (последовательные переходы соединены линиями). Красным показаны положения четырех наблюдавшихся на Subaru ULX (соединенные линиями точки демонстрируют изменение параметров He II в объектах от ночи к ночи), а также SS 433, NGC 7793 P13, NGC 5408 X-1, NGC 1313 X-2. Параметры линии He II NGC 5408 X-1 и NGC 1313 X-2 получены в результате выполненного нами анализа архивных данных VLT, для SS 433 и NGC 7793 P13 данные взяты из литературы [84, 111]. Три известные рентгеновские системы: M101 ULX-1, NGC 300 X-1 и IC10 X-1 [29, 96, 141]., доноры в которых являются звездами WN, показаны открытыми красными кружками.

массы определяют эквивалентную ширину (EW) линии He II. На диаграмме также представлены переходы (LBV – WNL) трех LBV-звезд³ (AG Car, V 532 в М 33 и HD 5980 в SMC) между их "горячим" и "холодным" состояниями [140]. Так называемое "горячее" состояние LBV наблюдается при минимуме оптического блеска этого класса звезд, когда максимум излучения смещается в ультрафиолетовую область; "холодное" состояние, наоборот, соответствует максимуму визуального блеска с максимумом излучения в видимом голубом диапазоне, при этом наблюдается уменьшение скорости ветра и увеличение темпов потери массы. Переходы между состояниями LBV хорошо отслеживает линия He II: в горячем состоянии эта линия становится более яркой и широкой, в холодном состоянии она не наблюдается. Считается, что LBV в горячем состоянии подобны звездам типа WNLh⁴ [140].

Семь ULX (Holmberg II X-1, Holmberg IX X-1, NGC 4559 X-7, NGC 5204 X-1, NGC 7793 P13, NGC 5408 X-1 и NGC 1313 X-2), для которых надежно измерены параметры линии He II, на диаграмме занимают область между звездами O2–3.5If и WN5–7 (рис. 2.6). Эту же область пересекают V 532 и HD 5980 при переходах между разными состояниями. Переменность линии He II от ночи к ночи в спектрах оптических двойников NGC 5204 X-1, NGC 4559 X-7 и Holmberg IX X-1 показана красными точками, соединенными линиями. Однако, поведение ULX резко отличается от того, что наблюдается у звезд, прежде всего масштабами и временами переменности линии He II – в LBV столь значительные изменения параметров линии происходят на временных интервалах месяцы-годы. Кроме того, если предположить, что оптические спектры ULX представляют собой спектры звезды-донора, то подобные значительные изменения ширины линии He II при относительно малых изменениях ее эквивалентной ширины потребует большой переменности силы тяжести на поверхности звез-

³ Яркие Голубые Переменные

⁴ поздние Вольфа-Райе звезды азотной последовательности с линиями водорода

ды при практически постоянной температуре фотосферы. С другой стороны, предположение, что линия He II формируется в ветре, истекающем с поверхности сверхкритического аккреционного диска, вполне согласуется с отсутствием каких-либо закономерностей в изменении EW, FWHM и лучевой скорости He II [42].

В целях сравнения ULX с другими двойными системами с черными дырами (ВНВ), на диаграмме показано положение NGC 300 X-1 [29] и IC10 X-1 [141], а также транзиентного ULX с мягким рентгеновским спектром M101 ULX-1 [96]. Первые два объекта являются ВНВ со звездой-донором типа Вольфа-Райе и имеют светимости $L_X \sim 3 \times 10^{38}$ эрг/с, сравнимые со светимостью хорошо известного источника Cyg X-3, донор которого также представляет собой звезду WN-типа [160]. Все три объекта (M101 ULX-1, NGC 300 X-1 и IC10 X-1) располагаются в области звезд WN6–8 (рис. 2.6), при этом у этих объектов практически отсутствует водород в их ветрах.

Недавние исследования оптических спектров M101 ULX-1 [96] показали, что эта система содержит звезду-донор WN8-типа. Тем не менее, M101 ULX-1 довольно сильно отличается от указанных выше трех объектов по величине орбитального периода, который в ~ 40 раз больше, чем у Cyg X-3, и ~ 6 раз больше, чем в остальных двух системах. Лиу с соавторами [96] указывают, что значительно бóльший орбитальный период может быть причиной рентгеновских вспышек M101 ULX-1, что отличает этот источник от остальных двойных с Вольфа-Райе донором. Вследствие больших размеров полости Роша компактной звезды, аккреционный диск M101 ULX-1, по-видимому, имеет достаточно большие размеры, чтобы во внешних областях этого диска формировалась зона частичной ионизации гелия. Эта зона может являться причиной нестабильности диска и вспышек объекта [96]. Авторы отмечают, что в противоположность M101 ULX-1, в системах NGC 300 X-1 и IC10 X-1, имеющих периоды 32.3 и 34.9 часа и малое расстояние между компонентами ($\sim 20R_\odot$) и, соответственно,

маленькие и горячие аккреционные диски, зоны частичной ионизации гелия отсутствуют. Это объясняет, почему в этих объектах не наблюдаются вспышки, связанные с нестабильностью диска. В стационарном состоянии M 101 ULX-1 имеет светимость на порядок величины ниже, чем у объектов типа Cyg X-3, однако в пике вспышки значение светимости достигает 3×10^{39} эрг/с, что ряду авторов позволяет относить этот объект к классу ULX.

Детальный анализ оптических спектров рентгеновских двойных с Вольфа-Райе донорами [29, 96, 141], сравнимые с Cyg X-3 рентгеновские светимости этих объектов (но на порядок величины меньшие, чем нижний предел для ULX), которые находятся в соответствии с возможным энерговыделением при аккреции из ветра донора при коротких орбитальных периодах, а также положение таких систем на He II-диаграмме в области WN6–8-звезд подтверждает выводы, что основной вклад в их оптическое излучение вносит звезда-донор.

Единственный известный в Галактике сверх-аккректор SS 433 располагается наиболее близко к области ультраярких рентгеновских источников на диаграмме. Как уже отмечалось, SS 433 имеет низкую наблюдаемую светимость в рентгеновском диапазоне $\sim 10^{36}$ эрг/с. Этот объект наблюдается близко к орбитальной плоскости (и плоскости аккреционного диска), и оптически толстый ветер, истекающий с поверхности диска, закрывает от наблюдателя излучение центрального источника. Реальная светимость SS 433 может достигать $\sim 10^{40}$ эрг/с, при этом почти все изначальное энерговыделение в SS 433 реализуется в аккреционном диске в рентгеновском диапазоне. Однако, из-за термализации рентгеновского излучения в плотном ветре сверхкритического диска, большая его часть излучается в экстремальном УФ-диапазоне ($\sim 50 - 1000 \text{ \AA}$) [40]. Для наблюдателя, который смотрит вдоль оси канала диска (ветра), объект выглядел бы ярким рентгеновским и ультрафиолетовым источником. При этом ожидается, что его наблюдаемая изотропная рентгеновская светимость превышала бы его болометрическую светимость вследствие наличия геометрической кол-

лимации излучения на фактор $B = 2\pi/\Omega_f \sim 3 - 5$, где Ω_f – угол раскрытия ветрового канала. Существование такого объекта как SS 433 предполагает существование подобных объектов с рентгеновскими светимостями порядка нескольких единиц $\times 10^{40}$ эрг/с.

Несмотря на близкое положение SS 433 к ультраярким источникам на He II-диаграмме (рис. 2.6), ULX, по-видимому, обладают более горячими ветрами. Сравнение спектров ULX со спектрами SS 433 (полученными на Subaru/FOCAS, [84]) показывает, что средние эквивалентные ширины линий H α , H β и He I λ 5876 ультраярких рентгеновских источников в ≈ 12 раз меньше, чем в SS 433, тогда как обе линии He II λ 4686, 5411 только примерно в 2.2 раза ниже величин, наблюдаемых в SS 433 (табл. 2.2). Более низкие значения эквивалентных ширин линий ULX, а также различие в соотношениях линий He II, He I и водорода в ULX и SS 433, может являться результатом более высоких температур газа их ветров при меньших темпах истечения. В этом смысле, SS 433 до сих пор остается уникальным объектом. Наличие струй в SS 433 также может объясняться более высоким, чем у ULX, темпом аккреции вещества.

На рис. 2.7 представлены спектры семи ULX и SS 433 в диапазоне 4300–4950 Å. Кроме четырех источников, наблюдавшихся на Subaru, показаны спектры NGC 5408 X-1, NGC 1313 X-2 (использовались архивные данные) и NGC 4395 ULX-1 (по данным БТА, полученным 21 февраля 2015 г.). Информация об объектах, используемые литературные источники, наблюдательные данные и обработка спектров подробно описаны в главе 1. Как уже отмечалось, характерной особенностью спектров всех объектов является широкая эмиссионная линия He II, а также линии водорода. Все спектры сходны между собой и со спектром SS 433. Не приведенный на рисунке спектр NGC 7793 P13 также демонстрирует яркую и широкую эмиссию He II [111]. Также не показан спектр M101 ULX-1, который, видимо, является спектром донора WN8 [96].

Таким образом, исходя из результатов оптической спектроскопии восьми

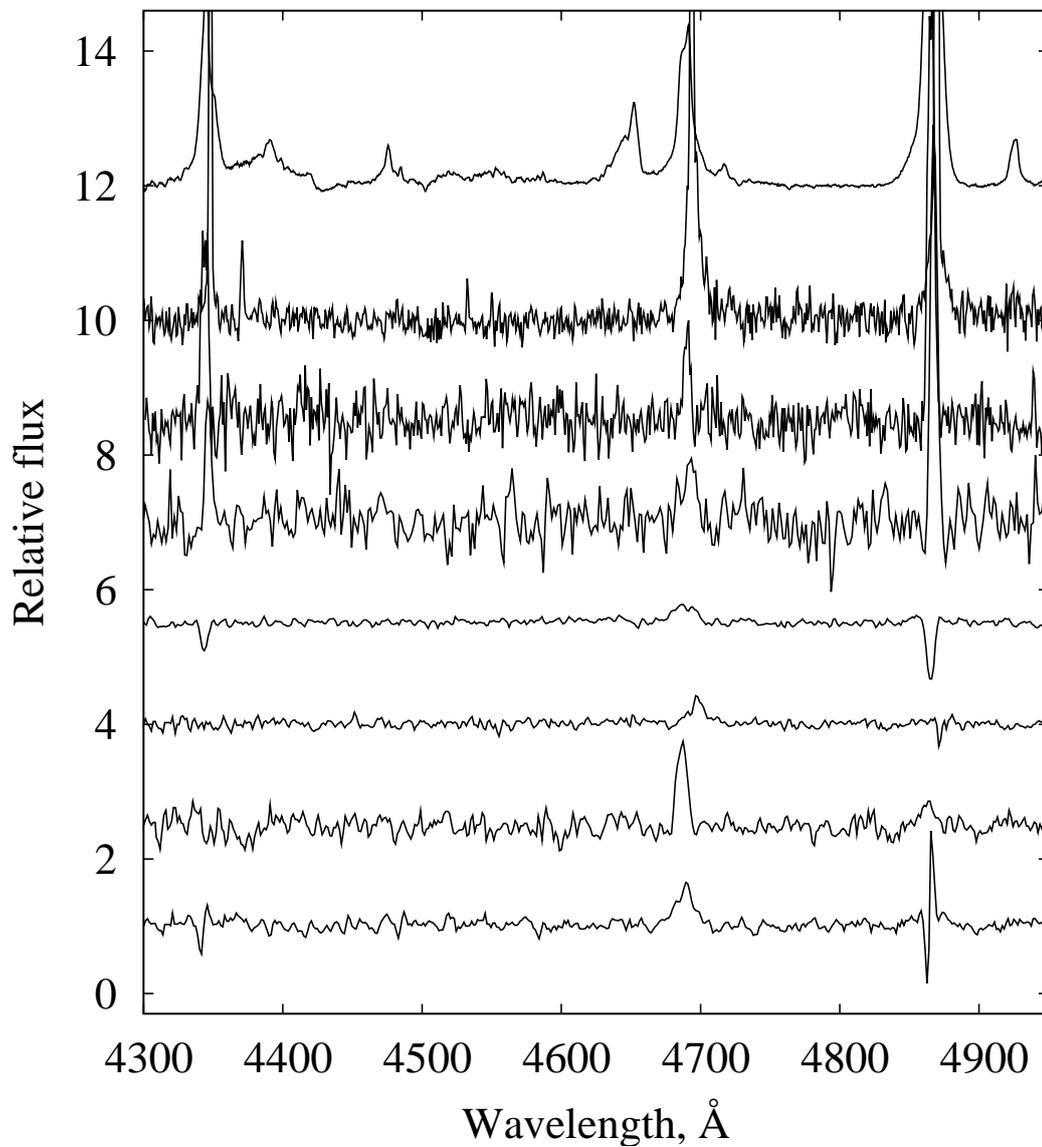


Рис. 2.7. Нормированные спектры в голубом диапазоне семи ULX в сравнении со спектром SS 433. Спектры приведены в следующем порядке (сверху вниз): SS 433 (1), NGC 5408 X-1 (2), NGC 4395 ULX-1 (3), NGC 1313 X-2 (2), NGC 5204 X-1, NGC 4559 X-7, Holmberg IX X-1 и Holmberg II X-1 (1). Номера в скобках соответствуют телескопам, на которых проведены наблюдения: 1 - Subaru, 2 - VLT, 3 - БТА. Правее линии $H\gamma$ в спектре SS 433 видна релятивистская линия $H\beta^-$.

оптических двойников ультраярких рентгеновских источников (это все объекты, для которых когда-либо была проведена глубокая оптическая спектроскопия) следует, что объекты обладают одним и тем же типом спектров, подобным спектрам звезд LBV в горячем состоянии или звезд WNLh, а также спектру сверхкритического аккреционного диска SS 433. Можно сделать вывод, что исследуемые ультраяркие рентгеновские источники являются объектами одной природы, то есть представляют собой однородный класс объектов. Недавно открытый ультраяркий рентгеновский пульсар (ultraluminous X-ray pulsar) M82 X-2 [14], рентгеновская светимость которого достигает 1.8×10^{40} эрг/с, является, пожалуй, единственным надежно подтвержденным ультраярким источником другой природы (анализ рентгеновских данных других ULX не выявил пульсаций этих объектов [37]). Получение оптических спектров этого объекта является приоритетной задачей.

В следующем разделе обсуждаются 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.

2.4. Область формирования спектров ULX

Возможны несколько вариантов областей формирования оптических спектров ультраярких рентгеновских источников. Если предположить, что наблюдаемые спектры являются спектрами звезд-доноров WNL-типа, то ширина линии He II в этом случае может служить индикатором скорости звездного ветра. Принимая скорость ветра приблизительно равной среднему значению для четырех наблюдавшихся на Subaru ULX, можно ввести обозначение $V_W = 900 v_{900}$ км/с, где v_{900} - скорость ветра, выраженная в единицах 900 км/с. Темпы истечения вещества в виде ветра должны обеспечивать необходимые темпы аккреции \dot{M}_0

для достижения наблюдаемых рентгеновских светимостей $L_X \sim 10^{40}$ эрг/с. Если принять эффективность аккреции $\eta = L_X/\dot{M}_0 c^2 = 0.1$, необходимые величины темпов аккреции на черную дыру составят $\dot{M}_0 \sim 1.8 \times 10^{-6} M_\odot/\text{год}$. Такие темпы аккреции будут превышать Эддингтовский предел для черных дыр с массами меньше, чем $60 M_\odot$. Необходимо отметить, что как оценка темпа аккреции, так и массы черных дыр должны рассматриваться как нижний предел, так как здесь не учитывались адвекция излучения и тепла [113, 161].

В тесных двойных с аккрецией газа на черную дыру из ветра звезды-донора (типа WN) темп потери массы донором должны составлять $\dot{M}_{WN} = \dot{M}_0 4\pi a^2 / \pi R_{cap}^2$, где a - расстояние между компонентами двойной системы, $R_{cap} \approx GM_{BH} / (V_W^2 + V_{orb}^2)$ - радиус захвата вещества ветра (радиус Бонди), V_{orb} - относительная скорость черной дыры и донора. Принимая отношение масс в системе равным $q = M_{WN}/M_{BH} = 2$, считая $V_W \gg V_{orb}$ и используя третий закон Кеплера, можно прийти к соотношению $\dot{M}_{WN} \approx 300 \dot{M}_X (p_1/m_{10})^{4/3} v_{900}^4 \approx 5 \times 10^{-4} M_\odot/\text{год}$, где p_1 и m_{10} - соответственно орбитальный период в днях и масса черной дыры в единицах $10 M_\odot$. Даже для таких коротких периодов, как 1 день, потери массы донора являются слишком большими для WNL-звезд [56]. Причина этого заключается в неэффективности аккреции из ветра, так как основная часть газа не попадает на черную дыру. Орбитальная скорость звезды-донора при этих параметрах в системе должна быть примерно ~ 220 км/с. Более короткие орбитальные периоды или большие массы черных дыр приводят к большим, чем наблюдаются (рис. 2.4), орбитальным скоростям.

В экзотическом случае двойной системы IMBH + WN-донор ($M_{BH} \gg 10 M_\odot$, $V_{orb} \gg V_W$, $q \ll 1$), где практически все вещество ветра может быть перехвачено черной дырой и следовательно $\dot{M}_{WN}/\dot{M}_0 = 4(1+q)^2$. В таком случае темп аккреции может обеспечить светимости $\sim 10^{40}$ эрг/с. Однако, орбитальная скорость донора в таком случае уже значительно превышает наблюдаемую у ULX переменность лучевой скорости и равна $V_{orb} \sim 2100(m_{1000}/p_1)^{1/3}$ км/с. Если учесть

ориентацию системы, то для NGC 5204 X-1, который обладает максимальной среди наблюдавшихся ULX переменностью лучевой скорости линии He II ≈ 500 км/с (рис. 2.4), при нормировке 2100 км/с угол наклона орбиты не должен превосходить 7° (чтобы наблюдатель не заметил большую амплитуду лучевой скорости донора). При оценке принято, что разброс лучевых скоростей приблизительно соответствует удвоенному значению орбитальной скорости в проекции на луч зрения. Для остальных объектов величина угла наклона орбиты оказывается еще меньше (поскольку амплитуда лучевой скорости линии He II в этих объектах не превышает 200 км/с, рис. 2.4), что выглядит неправдоподобным.

Кроме того, обнаруженная значительная пересменность ширины (до ≈ 3 раз) и эквивалентной ширины (до ≈ 2 раз) линии He II в спектрах ULX от ночи к ночи (см. рис. 2.6), которая не соответствует тому, что может наблюдаться в звездах, также свидетельствует против идеи формирования этой линии в ветрах доноров.

Таким образом, можно сделать вывод, что звезда-донор WN-типа в паре с черной дырой любой массы не может обеспечить наблюдаемые светимости ULX при наблюдающихся в них изменениях лучевых скоростей. Напротив, три не являющихся ULX известных примера короткопериодичных двойных с WN-донором: Cyg X-3, IC 10 X-1 и NGC 300 X-1 – имеют светимости примерно в 30 раз меньше рентгеновских светимостей ультраярких источников. Такие сравнительно низкие светимости вполне могут быть обеспечены звездой типа WNL.

Дополнительный очень сильный аргумент в пользу того, что линия He II не может формироваться на звезде-доноре, получен при изучении оптических спектров NGC 7793 P13 с очень высоким отношением сигнал/шум $\sim 20 - 30$ [111]. Донор в этой системе представляет собой V9 сверхгигант с эффективной температурой 11000 ± 1000 К [111]. Такая температура является слишком низкой для формирования эмиссионной линии He II. Авторы [111] предположили,

что эмиссия He II формируется прогретой рентгеновским излучением стороной донора. Против такого предположения свидетельствует отсутствие какой-либо явной зависимости как эквивалентной ширины линии He II, так и абсорбционного спектра сверхгиганта от наблюдаемой рентгеновской светимости и орбитальной фазы системы. Вероятно, NGC 7793 P13 несколько отличается от других ULX, необходимы дополнительные исследования, чтобы полностью понять его природу. Следует отметить, что рентгеновская светимость P13 меняется более чем в 100 раз, что может быть связано с затмениями центрального источника краем диска (прецессия диска). Весьма вероятно, что эмиссия He II формируется в ветре сверхкритического аккреционного диска. Авторы [111] также не исключают такой возможности.

Следующей рассмотрим возможность формирования оптических спектров ULX в стандартных аккреционных дисках. Стандартный диск означает, что темпы аккреции не превышают критическое значение, то есть массы черных дыр должны быть $M_{BH} > 60 M_{\odot}$. Эмиссионные линии He II и водорода могут продуцироваться при самопрогреве стандартного диска, когда внешние области диска нагреваются жестким излучением его центральных частей. В этом случае, ширина эмиссионных линий будет примерно соответствовать скорости вращения газа в диске в области формирования линии, то есть кеплеровской скорости. В линии He II будут излучать более горячие области диска, чем в линиях бальмеровской серии. Порог ионизации иона He II в четыре раза выше, чем порог ионизации водорода. Как в ветрах горячих звезд, здесь мы рассматриваем ситуацию, когда сначала происходит ионизация, далее рекомбинация, чтобы появились соответствующие линии He II $\lambda 4686$, и, например, H α . Кроме того, исходя из спектральной классификации звезд (например, И. М. Копылов, частное сообщение), максимум эмиссии при соответствующих плотностях в случае He II $\lambda 4686$ достигается при температурах 40–50 кК, в случае водорода (H α) – при температурах около 10 кК. Зависимость температуры от радиуса в

стандартном диске можно описать соотношением $T \propto r^{-3/4}$. В случае прогрева тонкого (стандартного) диска центральным источником температура в первом приближении так же падает с радиусом как $T \propto r^{-3/4}$ [161]. С другой стороны, кеплеровская скорость вращения зависит от расстояния до черной дыры как $V_K \propto r^{-1/2}$. Комбинируя эти два выражения и учитывая указанное выше примерное отношение температур, можно прийти к следующему отношению скоростей вращения областей формирования излучения в соответствующих линиях $V_{HeII}/V_{HI} = (T_{HeII}/T_{HI})^{2/3} \sim 2.5$. Таким образом, ширина линии He II ожидается значительно большей, чем ширина линий водорода, например, линии H α .

В самом деле, такие эмиссионные линии в самопрогревающихся дисках наблюдаются в галактических двойных с черными дырами звездных масс во время их вспышек, например, в объектах V404 Cyg [24, 55], GRO J1655–40 [72, 144] и GX 339–4 [145]. Во всех трех объектах ширины линий He II и водорода (H α и H β) были измерены нами по спектрам из этих статей и представлены на рис. 2.3. Как и ожидается, эмиссия He II во всех трех объектах значительно шире водородных линий. Такая же тенденция наблюдается и в случае немагнитных катаклизмических переменных во вспышках. Все эти объекты являются подкритическими, даже светимость V404 Cyg во время его знаменитой вспышки 1989 г. согласно наиболее надежным оценкам расстояния, основанным на астрометрии VLBI [108], не превышала эддингтоновский предел. Большая ширина линии He II по сравнению с линиями водорода, вероятно, означает, что поверхность самопрогреваемого диска не перекрывается полностью ветром с диска, и следовательно, мы наблюдаем ветер от диска, формирующийся в разных частях диска. В отличие от указанных объектов, линия He II в ультраярких источниках уже линии H α (см. табл. 2.1 и рис. 2.3), что невозможно объяснить свойствами прогреваемого диска не прибегая к каким-либо экзотическим моделям. В то же время, эмиссии He II более узкие в ULX, SS 433 и LBV-звездах (см. ниже). Та-

ким образом, стандартные диски вокруг черных дыр промежуточных масс не подходят на роль области формирования оптического спектра ULX.

Рассмотрим возможность формирования оптических спектров ULX в ветрах сверхкритических аккреционных дисков (СКАД) с черными дырами звездных масс. Как было показано выше (2.3), есть очевидное сходство между спектром SS 433, который образуется в ветре его сверхкритического диска [40], и спектрами ULX. Отметим, что для такого сильно переменного объекта, как SS 433, важно иметь измерения ширин линий по одновременным данным. К сожалению, мы не располагаем одновременными спектрами для SS 433, покрывающими области He II и H α ⁵. Однако, многочисленные измерения этих двух линий по данным [58, 84] показывает, что в SS 433 линия He II всегда уже линии H α . Такая же картина наблюдается в звездах WNLh и в звездах LBV в их горячем состоянии [31, 163] (см. рис. 2.3). Это означает, что линии He II и H α в ULX формируются в разных областях ускоряемого излучением ветра, где более ионизованный газ находится ближе к черной дыре и имеет более низкие скорости истечения. Более холодный газ, где в основном излучаются линии водорода, находится в более далеких областях ветра и имеет более высокую скорость. Такая же картина наблюдается во всех эмиссионных сверхгигантах, так называемый "Бальмеровский ход".

На рис. 2.3 для сравнения с наблюдаемым в ULX представлены измерения ширин линий He II $\lambda 4686$ и H α известной LBV-звезды V 532 в галактике M33, находящейся в горячем состоянии, и трех "переходных" (transitional) звезд WN6-7ha-типа⁶ (WR 22, WR 24 и WR 25). Данные для V 532 были получены из работы [140]. Несмотря на то, что эта звезда на графике располагается близко к штриховой линии равных ширин He II и H α , высокая точность измерений

⁵ В районе линии H α объект SS 433 имеет звездную величину $\sim 9^m$, в области линии He II (полоса B) его звездная величина около 16^m .

⁶ звезды с эмиссионными и абсорбционными линиями водорода

позволяет надежно регистрировать большую ширину линии $\text{H}\alpha$ по сравнению с He II . Ширины линий звезд Вольфа-Райе были измерены нами по спектрам из атласа III/143 [158]. Из рисунка видно, что четыре из пяти ультраярких источников, LBV и переходные звезды расположены в одной области диаграммы, которая соответствует более широкой линии $\text{H}\alpha$ по сравнению с He II . В этой же области должен располагаться SS 433. Это говорит в пользу идеи формирования эмиссионных линий ULX в ветрах, подобным ветрам LBV, WNLh или ветру сверхкритического диска в SS 433. В противоположность этим объектам, рентгеновские транзиенты, как и следует из представленных выше простых оценок, имеют соотношение ширин $\text{FWHM}(\text{He II } \lambda 4686)/\text{FWHM}(\text{H}\alpha) > 1$.

В случае ветров сверхкритических дисков (СКАД) принципиальное значение имеет вопрос о величине скорости газа ветра. В теории СКАД, описанной Шакурой и Сюняевым [138], истечение газа происходит с радиуса сферизации R_{sp} с вириальной скоростью. Величина радиуса сферизации может быть оценена как $R_{sp} \sim \kappa \dot{M}_0 / 8\pi c$, где $\kappa = 0.34 \text{ см}^2/\text{г}$ - томсоновский коэффициент непрозрачности. Для SS 433, у которого темп потери массы соответствует примерно $10^{-4} M_\odot/\text{год}$ [139], полученная оценка дает $R_{sp} \sim 3 \times 10^9 \text{ см}$, и соответствующую вириальную скорость $V \sim 9400 \text{ км/с}$ при массе черной дыры $10 M_\odot$. Эта скорость на порядок величины больше тех, что наблюдаются в SS 433 и ULX. Вероятно, что реальная ситуация гораздо сложнее описанной простой картины, в которой газ истекает без всяких взаимодействий в ветре. Чтобы учесть расхождение между предсказанной простой теорией величиной скорости ветра в SS 433 и наблюдениями в работе [105] была предложена идея эффективного перемешивания вещества ветра во внутренних областях канала. Кроме того, из гидродинамических расчетов (например, [114]) известно, что некоторая часть газа выбрасывается со скоростями меньше, чем вириальная и возвращается обратно в диск, при этом избыток газа все равно в конечном итоге покидает диск.

Отметим, что выбрасываемый в ветре с радиуса сферизации газ является

оптически толстым в континууме. В СКАД значительная часть аккрецируемого вещества выбрасывается в ветре [114, 124, 138], поэтому при больших сверхкритических темпах аккреции ($\dot{M}_0 \gg \dot{M}_{Edd}$) формируется очень протяженная фотосфера ветра, радиус которой R_{ph} может достигать нескольких тысяч радиусов сферизации (подробнее см. главу 4). На расстояниях, больших радиуса фотосферы ветра газ все еще остается оптически толстым в линиях. Таким образом, принципиальное различие ветров сверхкритических дисков и звезд WNLh/LBV заключается в том, что газ в СКАД выбрасывается в самых внутренних областях, размеры которых на несколько порядков величины меньше размеров фотосферы ветра СКАД. При этом размер фотосферы ветров звезд типа WNLh/LBV и размер фотосферы ветра в SS 433 примерно равны. Таким образом, поведение ветров над фотосферой в этих объектах может быть весьма сходным.

Как будет показано в главе 3, оптическая светимость и температура фотосферы ветра сверхкритических дисков сильно зависят от темпа аккреции: чем больше темпы аккреции, тем ярче объект в оптическом диапазоне и тем ниже температура фотосферы ветра. В полосе V SS 433 в 2–60 раз более яркий объект, чем оптические двойники ULX (рис. 3.4), что указывает на более низкие темпы аккреции в ультраярких источниках (в 1.5–6 раз, см. главу 3) при более высоких (в 1.4–4 раз) температурах ветров ULX. Наблюдаемая температура ветра SS 433 составляет ~ 50 кК [25] в фазе прецессии, когда диск максимально открыт для наблюдателя. Таким образом, температуры ветров ULX должны находиться в диапазоне 70–200 кК. В самом деле, отношения эквивалентных ширин эмиссионных линий SS 433 к линиям ULX (табл. 2.2 и описание в пункте 2.2) свидетельствуют в пользу более высоких температур ветров последних, а меньшие эквивалентные ширины всех линий в спектрах ULX по сравнению с SS 433 говорит о пониженных темпах аккреции в этих системах.

Таким образом, простая модель сверхкритического аккреционного диска

способна объяснить как соотношение ширин линий He II к линиям бальмеровской серии в спектрах оптических двойников ULX, так и в целом более слабые по сравнению с SS 433 эмиссионные линии ULX. Следовательно, наиболее вероятной областью образования оптического излучения ультраярких источников являются внешние части ветров СКАД, которые находятся на значительных расстояниях от областей истекания ветра, то есть существенно бóльших, чем радиус сферизации, где температуры и оптические толщи слишком высоки для формирования оптических линий.

Таким образом, учитывая всю совокупность изложенных выше фактов, можно сделать вывод, что исследованные ультраяркие рентгеновские источники наиболее вероятно представляют собой сверхкритические аккреционные диски с черными дырами звездных масс, а их оптические спектры формируются в ветрах, истекающих с поверхности этих дисков.

Выводы

В результате детального анализа полученных на телескопе Subaru в 2011 г. спектральных данных для ультраярких рентгеновских источников NGC 5204 X-1, NGC 4559 X-7, Holmberg II X-1 и Holmberg IX X-1, в спектрах всех четырех объектов были обнаружены широкие эмиссионные линии He II $\lambda 4686$, He I $\lambda 5876$, H β и H α . Кроме того, в Holmberg IX X-1 надежно детектированы эмиссии He I $\lambda \lambda 6678, 7065$, а в Holmberg II X-1 – эмиссия He II $\lambda 5411$. Для всех обнаруженных 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.

Получено среднее для объектов Holmberg II X-1, Holmberg IX X-1, NGC 4559

X-7, NGC 5204 X-1 и NGC 5408 X-1 отношение ширин линий He II $\lambda 4686$ и H α $FWHM(He II)/FWHM(H\alpha) \approx 0.8$. Измерения ширины линий He II и H α NGC 5408 X-1 были получены в результате обработки архивных данных телескопа VLT. Исследование спектров NGC 5204 X-1, NGC 4559 X-7 и Holmberg IX X-1 за три даты наблюдений показало, что амплитуда переменности лучевой скорости линии He II не превышает значение 500 км/с и имеет среднее значение $\sim 200 - 250$ км/с. Кроме того, обнаружена значительная переменность ширины (до ≈ 3 раз) и эквивалентной ширины (до ≈ 2 раз) линии He II в спектрах ULX от ночи к ночи.

Проведен анализ спектров 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 сделан вывод о принципиальной схожести спектров исследуемых ULX между собой. Эти источники являются объектами одной природы, то есть представляют собой однородный класс объектов. Сравнение спектров ULX со спектрами объектов других классов показывает, что ультраяркие источники по типу своих спектров имеют сильное сходство со звездами WNLh или LBV в горячей фазе, а также с единственным известным в Галактике сверх-аккретором SS 433.

На основе сравнения теоретических оценок скоростей доноров вокруг IMBH и наблюдаемой амплитуды лучевой скорости линии He II, оценок темпов истечения газа в ветрах звезд-доноров, необходимых для обеспечения наблюдаемых рентгеновских светимостей ULX, сравнения наблюдаемого отношения ширин линий He II и H α в спектрах ULX и транзиентных рентгеновских двойных с

самопрогревающимися дисками во время их вспышек, а также из анализа положения и поведения ULX на классификационной диаграмме Краутера и Смита [30], было показано, что наиболее вероятной областью формирования излучения в эмиссионных линиях является ветер сверхкритического аккреционного диска, а не звезда-донор или стандартный аккреционный диск с черной дырой промежуточных масс. 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. Таким образом, исследованные ультраяркие рентгеновские источники наиболее вероятно представляют собой сверхкритические аккреционные диски с черными дырами звездных масс.

Новые оптические отождествления ультраярких рентгеновских источников

В каталогах ультраярких рентгеновских источников (например, [92, 166]) приводятся данные для более чем 450 кандидатов в ULX, однако с оптическими источниками отождествлены менее 50 объектов [50, 125]. Причем, такие отождествления в большинстве случаев не являются однозначными: в круг ошибок координат рентгеновских объектов попадает несколько оптических источников. Существенно меньше детально изученных ультраярких источников, для которых известны спектральные распределения энергии в широком диапазоне длин волн (см., например, [151]). Количество отождествленных в оптике ULX, для которых были проведены спектральные наблюдения, составляет менее 10 объектов. В связи со столь ограниченным наблюдательным материалом появляется такой вопрос, как насколько однородный класс объектов представляют собой ультраяркие рентгеновские источники. Ответы на этот и другие подобные вопросы требуют поиска новых оптических отождествлений объектов.

В работах [13] и [162], результаты которых изложены в данной главе, нами были отождествлены в оптическом диапазоне три ультраярких рентгеновских источника NGC 5474 X-1, M66 X-1 (NGC 3627 X-1) и NGC 4559 X-10, а также уточнено положение NGC 4395 ULX-1. Все объекты были включены в качестве кандидатов в ULX в каталог Шварца и соавторов (2011) [149], описание которого приводится ниже.

Первый источник является транзиентным ULX и располагается рядом с областью звездообразования в галактике NGC 5474, являющейся карликовой спиральной галактикой позднего типа на расстоянии 6.8 Мпк [154]. Второй находится на границе диска M66 – галактики с баром Sab-типа, расположенной

на расстоянии 10.6 Мпк [88]. Оценки рентгеновских светимостей источников в диапазоне 0.3–10 кэВ по данным наблюдений Chandra с наибольшими экспозициями составили $L_X=1.6 \times 10^{40}$ эрг/с для NGC 5474 X-1 и $L_X=2.0 \times 10^{40}$ для M66 X-1. M66 X-1 демонстрирует переменность с амплитудой ~ 2.5 , что вполне типично для ультраярких источников (например, [46]), тогда как поток NGC 5474 X-1 меняется более чем в 100 раз (минимальная величина светимости $\lesssim 10^{38}$ эрг/с). NGC 4559 X-10, находящийся рядом с областью звездообразования в спиральной галактике позднего типа на расстоянии 7.3 Мпк [159], имеет рентгеновскую светимость $L_X \sim 6 \times 10^{39}$ эрг/с и показывает переменность с амплитудой ~ 2 [28]. Светимость NGC 4395 ULX-1 меняется от $\approx 5.6 \times 10^{38}$ эрг/с в слабом состоянии до $\approx 3.5 \times 10^{39}$ эрг/с в ярком; максимальная величина светимости по данным обсерватории Swift составила $\approx 4.0 \times 10^{39}$ эрг/с [162]. Этот источник расположен в близкой Сейфертовской галактике на расстоянии 4.76 Мпк [159]. Подробное описание анализа рентгеновских данных (включая анализ рентгеновских кривых блеска) приводится в наших статьях [13] и [162].

В оптическом диапазоне NGC 5474 X-1 и NGC 4559 X-10 ранее исследовались в работах [67] и [28, 125] соответственно, однако авторам этих работ не удалось найти однозначное отождествление этих объектов. В случае NGC 5474 X-1 авторы дают только верхний предел на абсолютную звездную величину объекта $U = -6.4$ по данным камеры WFPC2 космического телескопа им. Хаббла (HST). M66 X-1 в оптическом диапазоне исследуется впервые. Отождествление NGC 4395 ULX-1 с оптическим источником (с низкой точностью астрометрии и, соответственно, неоднозначное) приводится в работе Глэдстоун и соавторов [50]. Отметим, что этот объект был независимо отождествлен нами еще до публикации работы [50].

3.1. Отождествление в оптическом диапазоне NGC 5474 X-1, M66 X-1, NGC 4559 X-10 и NGC 4395 ULX-1

Ультраяркие рентгеновские источники NGC 5474 X-1, M66 X-1, NGC 4559 X-10 и NGC 4395 ULX-1 были отождествлены в рамках задачи обнаружения новых оптических двойников ULX, прежде всего, пригодных для дальнейших спектральных исследований. Поиск новых оптических отождествлений осуществлялся по данным каталога Шварца и соавторов (2011) [149] (в дальнейшем каталог Шварца). Данный каталог был выбран по следующим критериям: высокая точность координат большинства рентгеновских источников; расположение объектов в северном полушарии или в экваториальной области неба, что позволяет проводить их наблюдения на БТА. Из каталога выбирались объекты, светимости которых превышают 2×10^{39} эрг/с.

Каталог Шварца включает 107 ULX-кандидатов с рентгеновскими светимостями в диапазоне 0.3–10 кэВ больше 10^{39} эрг/с. Поиск объектов и определение их светимостей осуществлялись по данным обсерваторий Chandra, XMM-Newton и ROSAT в 127 галактиках в пределах изофот D_{25} . Для определения координат подавляющего большинства объектов использовались изображения, полученные на Chandra. Точность координат таких объектов составила $\sim 0.3''$. Выборка галактик, в которых производился поиск ULX, была составлена на основе кросс-корреляции объектов каталога UGC (Uppsala Galaxy Catalogue) и инфракрасного обзора IRAS (Infrared Astronomical Satellite survey). Критериями отбора галактик являлись расстояние до них, не превышающее 14.5 Мпк, и поток на 60 мкм, превышающий 1.5 Янских [149]. Первый критерий позволил авторам [149] снизить время требуемых дополнительных наблюдений на Chandra для завершения обзора выбранных галактик до 5000 секунд, когда на расстоянии 14.5 Мпк могут быть обнаружены источники со светимостями 10^{39} эрг/с на уровне 20 отсчетов ($> 3\sigma$ над уровнем фона). Второй критерий исключал

галактики с низкими темпами звездообразования, в которых ULX встречаются редко (например, [59, 128]).

Для NGC 5474 X-1, M66 X-1, NGC 4559 X-10 и NGC 4395 ULX-1 имеются по крайней мере по одному выполненному на обсерватории Chandra с помощью прибора ACIS (Advanced CCD Imaging Spectrometer) наблюдению, в результате которого получены изображения, пригодные для астрометрических измерений с достаточно высокой (лучше $0.3''$) точностью. Список используемых в нашей работе архивных рентгеновских данных приведен в табл. 3.1.

ACIS предназначен для построения изображений рентгеновских объектов с одновременным определением энергии каждого фотона, что позволяет получать спектры объектов. Прибор включает два набора ПЗС-матриц: ACIS-I – 4 чипа, ACIS-S – 6 чипов. Размер каждой матрицы равен 1024×1024 пикселя, масштаб изображения равен $0.49''/\text{пиксель}$, поле зрения каждого чипа составляет приблизительно $8' \times 8'$. Два чипа ACIS-S (S1 и S3) являются матрицами с обратной засветкой и имеют диапазон чувствительности 0.1–10 кэВ, все остальные чипы ACIS-I и ACIS-S представляют собой матрицы с фронтальной засветкой. Расположение S3 в фокальной плоскости является наилучшим по сравнению с остальными чипами (на этом чипе оптика телескопа строит практически безабберрационные изображения), поэтому S3 наиболее часто используется при получении изображений, которые в дальнейшем планируется использовать для астрометрических измерений. Размер изображения точечного источника, находящегося на изображении близко к оптической оси, равен $\text{FWHM} \simeq 0.8''$. Астрометрические измерения стандартно проводятся для объектов, смещенных относительно оптической оси не более чем на $3'$. Точность определения положения ярких источников (>100 отсчетов) в пределах этой области на чипе составляет $\leq 0.1''$. Отметим, что это не абсолютная, а "внутренняя" точность определения координат источника на детекторе.

В оптическом диапазоне для отождествления ULX были выбраны изобра-

Таблица 3.1. Данные обсерватории Chandra для NGC 5474 X-1, M66 X-1, NGC 4559 X-10 и NGC 4395 ULX-1, используемые для астрометрических измерений. Приводятся даты, идентификационный номер (ObsID) и продолжительность наблюдений.

Объект	дата	ObsID	t_{exp} , ks
NGC 5474 X-1	2007.12.03	9546	30
M66 X-1	2008.03.31	9548	50
NGC 4395 ULX-1	2000.04.17	402	1.2
NGC 4559 X-10	2001.01.14	2026	9

жения, полученные на космическом телескопе им. Хаббла на приборах ACS и WFC3. Эти данные имеют высокое угловое разрешение ($\lesssim 0.1''$), что принципиально для выполнения поставленной задачи. Подробное описание используемых данных можно найти в разделе 1.4 (см. также журнал наблюдений табл. 1.4).

Точность выполненной нами относительной астрометрии между изображениями Chandra и HST была значительно улучшена за счет использования так называемых "опорных" источников, видимых как на оптических, так и на рентгеновских изображениях. Такие источники используются для определения смещения между системами координат в разных диапазонах.

Для отождествления NGC 5474 X-1 и M66 X-1 в оптическом диапазоне были выбраны изображения с высоким угловым разрешением ($\approx 0.1''$), полученные на космическом телескопе им. Хаббла с помощью камеры ACS/WFC в фильтрах F606W для первого источника и F555W для второго. На этих изображениях были отождествлены по шесть рентгеновских источников, которые были использованы в качестве опорных объектов. На изображениях Chandra/ACIS эти объекты находятся на чипе S3, их смещение от оптической оси не превышает $3'$, что обеспечивает хорошую точность измерения координат объектов на изображении. Все отождествления являются надежными, имеющими един-

ственный оптический источник в кружках ошибок координат рентгеновских объектов. Положение как рентгеновских, так и оптических источников определялось посредством аппроксимации объектов двумерной функцией Гаусса в квадратной апертуре размером 7 пикселей ($\approx 3 \text{ FWHM}$ источника). Ошибка положения источников по каждой из координат оценивалась согласно соотношению $err = FWHM / \sqrt{Flux_{obj}}$, где $Flux_{obj}$ – накопление объекта в инструментальных единицах (вклад фона в апертуру объекта в большинстве случаев пренебрежим). Точность определения положения для наиболее слабых оптических источников составила $\approx 0.1''$. Для рентгеновского объекта с минимальным накоплением 38 отсчетов точность определения координат на изображении составила $\approx 0.2''$. Отметим, что это внутренние точности измерения координат объектов в оптическом и рентгеновском диапазонах. После учета сдвига между системами координат Chandra и HST, были получены "скорректированные" координаты NGC 5474 X-1 R.A. = $14^h 04^m 59^s.746$ Dec = $+ 53^\circ 38' 08''.86$ и M66 X-1 R.A. = $11^h 20^m 20^s.910$ Dec = $+ 12^\circ 58' 46''.57$ (J2000.0). Точности определения положения исследуемых источников на изображениях HST при использовании шести опорных источников составили $0.16''$ для NGC 5474 X-1 и $0.13''$ для M66 X-1.

В случае NGC 4559 X-10 опорным источником являлся другой отождествленный в оптическом диапазоне ультраяркий источник NGC 4559 X-7 [142, 151]. Оба объекта располагаются на чипе S3 ACIS и имеют смещение от оптической оси менее $1.9'$. В оптическом диапазоне нами было выбрано глубокое изображение содержащей X-10 области галактики, полученное на HST 9 марта 2005 г. с помощью прибора ACS/HRC, обладающего близким к дифракционному угловым разрешением (около $0.05''$). Поскольку X-10 и X-7 находятся на разных не перекрывающихся друг с другом изображениях во всех наблюдениях HST, для X-7 было выбрано полученное в ту же дату изображение ACS/WFC/F550M, на котором оптический двойник X-7 надежно детектируется как изолированный

звездообразный источник.

Чтобы устранить сдвиг координат между двумя выбранными изображениями HST, использовалось SDSS-изображение¹ галактики NGC 4559 в фильтре *g*. Положение всех опорных источников на рентгеновском и оптических изображениях определялось описанным ранее методом. Астрометрическая привязка HST к SDSS для X-7 была выполнена по четырем ярким изолированным звездам. В результате было определено точное положение оптического двойника X-7 на изображении SDSS. На основе полученных координат X-7 был определен сдвиг координат между SDSS и Chandra, что позволило нанести положение рентгеновского источника X-10 на изображение SDSS. Последним шагом стало определение смещения координат между SDSS и полученным на ACS/HRC изображением X-10 по двум звездам и яркому в оптическом диапазоне точечному источнику в ядерной области галактики. Скорректированные координаты NGC 4559 X-10 на изображении ACS/HRC/F555W равны R.A. = $12^h 35^m 58^s.512$, Dec = $+ 27^\circ 57' 42''.87$ (J2000.0). Точность составила $0.15''$ на уровне 1σ величины.

Астрометрия NGC 4395 ULX-1 проводилась на изображениях HST, полученных 31 марта 2014 г. на камере WFC3/UVIS в фильтре F438W. К сожалению, для NGC 4395 ULX-1 есть только одно изображение, полученное на обсерватории Chandra (см. табл. 3.1), где объект оказался смещен на $4.5'$ от оптической оси прибора. Вследствие этого форма PSF² объекта оказалась сильно искажена, что привело к относительно низкой точности ($\approx 0.25''$) измерения его координат на рентгеновском изображении. В качестве опорных источников при определении сдвига между SDSS и Chandra использовались три отождествленных на SDSS рентгеновских объекта. Привязка SDSS и HST осуществлялась по шести

¹ Sloan Digital Sky Survey; [9]. Изображения получены из архива SAS DR12 (<http://data.sdss3.org/mosaics>).

² функция рассеяния точки

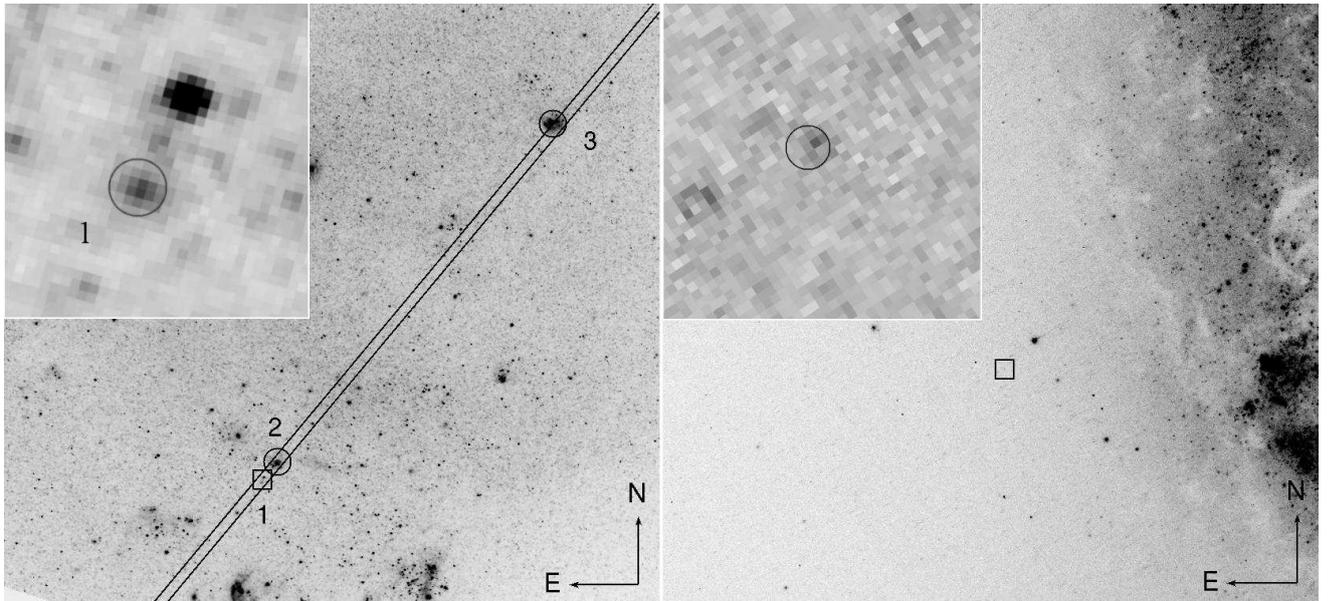


Рис. 3.1. Изображения областей вокруг NGC 5474 X-1 (слева) и M66 X-1 (справа), полученные на HST в фильтрах F606W и F555W соответственно. Квадратами на изображениях с большим полем отмечены содержащие исследуемые объекты области, показанные крупным планом на врезках. Кружками на врезках показано скорректированное положение обоих ULX. Радиусы кружков соответствуют итоговым ошибкам определения координат ULX на оптических изображениях и равны $0.16''$ для NGC 5474 X-1 и $0.13''$ для M66 X-1. Длины стрелок, указывающих направления Север-Восток, равны $6.5''$. На изображениях галактики NGC 5474 показана ориентация щели шириной $1''$ при спектральных наблюдениях на 6-метровом телескопе. Цифрами обозначены объекты на щели: 1 – область ультраяркого источника с близкой звездой 23.0 величины (самый яркий объект на врезке), 2 – галактика с эмиссионной линией [OII] $\lambda 3727$ (см. текст и рисунок 3.3), 3 – молодое звездное скопление.

опорным звездам. В итоге, были получены координаты ULX на изображении WFC3/UVIS R.A. = $12^h 26^m 01^s.435$, Dec = $+ 33^\circ 31' 30''.95$ с точностью $\approx 0.3''$ (1σ).

На рисунке 3.1 показаны полученные на HST изображения областей галактик вокруг NGC 5474 X-1 и M66 X-1 с нанесенными на них скорректированными положениями обоих ULX. Оптический двойник NGC 5474 X-1 оказался протяженным объектом в фильтре F606W с FWHM $\simeq 0.22'' \times 0.17''$, в то время как окружающие звезды имеют размер FWHM $\simeq 0.11''$. На изображении в филь-

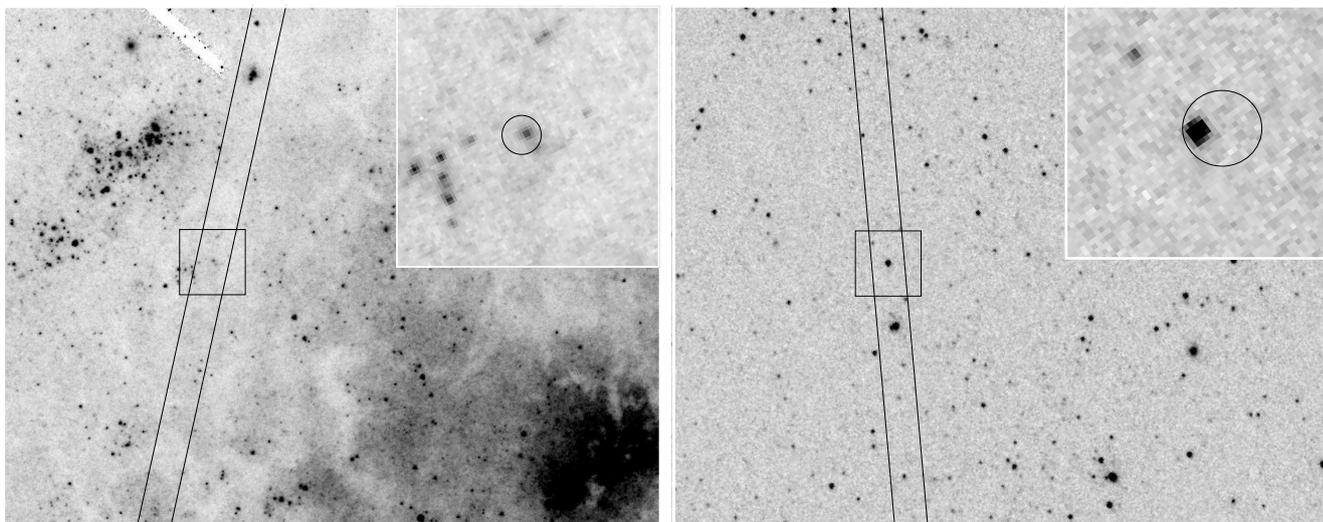


Рис. 3.2. Изображения областей галактик вокруг NGC 4559 X-10 (слева) по данным HST/ACS/HRC в фильтре F555W и NGC 4395 ULX-1 (справа) по данным HST/WFC3/UVIS в фильтре F438W. Размер квадратных областей, показанных крупным планом на врезках, составляет $2''$. Кружки указывают скорректированное положение X-10 и ULX-1, их радиусы соответствуют итоговым ошибкам определения координат ULX на оптических изображениях и равны $0.15''$ (слева) и $0.3''$ (справа). Север на изображениях располагается сверху, восток – слева. На обоих изображениях показано положение щели шириной $1''$ при спектральных наблюдениях на 6-метровом телескопе.

тре F814W объект имеет сходную морфологию. Оптический двойник M66 X-1, по видимому, также не является звездообразным источником. Хотя этот объект выглядит одиночной, слабой голубой звездой в фильтрах F435W и F555W, на изображении в F814W источник имеет вытянутую в направлении север-юг форму.

В пределах кружка ошибок координат NGC 4559 X-10 находится единственный яркий источник (рис. 3.2), гораздо более слабый объект находится рядом с границей кружка ошибок за его пределами. Яркий источник имеет диффузную структуру с резким возрастанием яркости к центру. При аппроксимации распределения яркости этого источника двумерной функцией Гаусса мы нашли, что угловой размер объекта равен $\text{FWHM} \simeq 0.09'' \times 0.08''$, что приблизительно

вдвое больше размера изображений окружающих звезд $\text{FWHM} \simeq 0.05''$. В то же время, аппроксимация объекта суммой двух Гауссиан с разными FWHM показывает, что размер изображения центральной яркой части источника близок к звездному. Поэтому мы полагаем, что этот объект представляет собой звездообразный источник, окруженный слабыми неразрешаемыми звездами. Единственный кандидат в оптические двойники NGC 4395 ULX-1, попадающий в кружок ошибок рентгеновских координат, является ярким звездообразным источником. Обнаруженный нами оптический двойник этого ULX совпадает с найденным в работе [50] отождествлением.

3.2. Фотометрия и спектроскопия

Оптические потоки всех четырех исследуемых объектов измерялись методами апертурной фотометрии по данным, полученным на космическом телескопе им. Хаббла. При проведении апертурной фотометрии оптических двойников NGC 5474 X-1 и M66 X-1 апертурные поправки не применялись, поскольку структура объектов является протяженной. Фотометрия M66 X-1 проводилась в двух апертурах с радиусами $0.1''$ и $0.2''^3$ (табл. 3.2). Малая апертура использовалась для определения цвета видимого на изображениях в фильтрах F435W и F555W голубого компонента объекта, измерения в большой апертуре использовались для оценки полного потока от источника. Фотометрия NGC 4559 X-10 и NGC 4395 ULX-1 была выполнена в малых апертурах с последующим добавлением апертурной поправки. Более подробное описание используемого наблюдательного материала и его обработки приведено в разделе 1.4.

Исправление полученных звездных величин объектов за межзвездное поглощение (покраснение) проводилось с помощью команды CALSPHOT пакета

³ что равно соответственно ≈ 1 и ≈ 2 FWHM изображения окружающих звезд

программ SYNPHOT⁴. Межзвездное поглощение A_V в нашей работе оценивалось по отношению потоков линий бальмеровской серии водорода в спектрах туманностей ($H\delta$, $H\gamma$, $H\beta$ и $H\alpha$), окружающих исследуемые объекты или находящиеся недалеко от них. На 6-метровом телескопе САО РАН были получены спектры окружения трех исследуемых ULX: NGC 5474 X-1, NGC 4559 X-10 и NGC 4395 ULX-1. Журнал наблюдений приведен в табл. 1.3.

Известно, что бальмеровский декремент для газовых туманностей (в случае фотоионизованной плазмы) должен составлять $H\alpha/H\beta=2.87$, $H\gamma/H\beta=0.47$, $H\delta/H\beta=0.26$ и сохраняться с точностью около 5% для широкого диапазона условий (при температурах плазмы 5000–20000 К и плотностях $10^2 - 10^4 \text{ см}^{-3}$) [116]. Наблюдаемые же в туманностях отношения линий бальмеровской серии зависят от величины межзвездного покраснения и могут быть теоретически рассчитаны при заданном законе межзвездного поглощения. Для этого мы использовали он-лайн инструмент "Doug's Excellent Absorption Law Calculator", доступный на сайте <http://dogwood.physics.mcmaster.ca/Acurve.html>, в основу которого положен закон межзвездного поглощения Карделли и соавторов [23] (параметр R_V был принят равным 3.1).

По наблюдаемому отношению линий $H\gamma/H\beta$ в спектре туманности, находящейся на расстоянии $\approx 5''$ от NGC 5474 X-1, была получена оценка $A_V = 0 \div 0.3$ ($E(B - V) = 0.0 \div 0.1$), что в пределах ошибки совпадает с величиной поглощения в Галактике в направлении данного объекта $A_V = 0.03^m$ (см. табл. 1.1). Точность измерений потоков в линиях оказалась невысокой (на уровне 4% для $H\gamma$) ввиду низкой яркости туманности, что и привело к большой неопределенности величины поглощения. Поэтому, для исправления звездных величин

⁴ Synphot [21] представляет собой интегрированный в IRAF специализированный пакет программ, одной из возможностей которого является пересчет потоков и звездных величин объектов из фотометрической системы телескопа им. Хаббла в общепринятые фотометрические системы (например, UBV Джонсона). Кроме того, SYNPHOT позволяет производить с полученными по данным HST результатами фотометрии различные вычисления, такие, как исправление наблюдаемых потоков за межзвездное поглощение.

оптического двойника NGC 5474 X-1 мы использовали величину поглощения в Галактике. Поскольку спектральные наблюдения M66 X-1 не проводились, для коррекции за поглощение звездных величин оптического двойника этого объекта мы также использовали величину поглощения в Галактике $A_V = 0.10^m$.

Оба объекта NGC 4559 X-10 и NGC 4395 ULX-1 окружены имеющими достаточно компактный размер ($\approx 2''$) туманностями. Отношения линий туманности вокруг NGC 4559 X-10 $H\alpha/H\beta$, $H\gamma/H\beta$ и $H\delta/H\beta$ дают согласующиеся друг с другом оценки, $A_V = 0.81 \pm 0.19$ ($E(B - V) = 0.26 \pm 0.06$). Измерение величины поглощения для NGC 4395 ULX-1 осложняется сильно неоднородным ярким фоном галактики с мощными линиями поглощения в линиях водорода при низкой яркости эмиссионных линий водорода окружающей объект туманности. Таким образом, по отношению линий $H\gamma/H\beta$ для NGC 4395 ULX-1 мы получили оценку $A_V = 0.7 \pm 0.4$ ($E(B - V) = 0.23 \pm 0.13$). Ошибки найденных значений соответствуют 1σ .

Исправленные за межзвездное покраснение звездные величины и потоки оптических двойников NGC 5474 X-1, M66 X-1, NGC 4395 ULX-1 и NGC 4559 X-10 представлены в таблице 3.2.

Используя команду CALSPHOT пакета программ SYNPHOT, мы получили оценки звездных величин оптических двойников ULX в фильтре V Джонсона и их абсолютных звездных величин M_V . Поскольку кривые реакции фильтров HST и фильтра V не совпадают, результат пересчета звездных величин объектов в фильтр V достаточно сильно зависит от принятой модели спектра. Мы использовали модель степенного спектра $F_\lambda \propto \lambda^\alpha$ (ключ pl команды CALSPHOT), степенной индекс определялся по исправленным за поглощение потокам объектов в двух соседних с V фильтрах. В результате, мы получили следующие значения: $V = 24.69 \pm 0.06$ для NGC 5474 X-1, $V = 25.89 \pm 0.12$ для M66 X-1 (в апертуре $0.2''$), $V = 22.15 \pm 0.02$ для NGC 4395 ULX-1 и $V = 24.01 \pm 0.05$ для NGC 4559 X-10. Абсолютные звездные величины объектов M_V

Таблица 3.2. Результаты фотометрических измерений оптических двойников ультраярких рентгеновских источников NGC 5474 X-1, M66 X-1, NGC 4559 X-10 и NGC 4395 ULX-1. Все звездные величины и потоки исправлены за поглощение. Звездные величины даны в системе Vega_{mag}. В скобках рядом со звездной величиной M66 X-1 указывается радиус апертуры, в которой были выполнены измерения. Потоки даны в единицах 10^{-18} эрг см⁻² с⁻¹ Å⁻¹. Ошибки звездных величин и потоков соответствуют 1σ .

ULX	камера/фильтр	звездная величина	F_λ
NGC 5474 X-1	ACS/WFC/F606W	24.58 ± 0.04	0.423 ± 0.016
	ACS/WFC/F814W	24.10 ± 0.05	0.260 ± 0.012
M66 X-1	ACS/WFC/F435W	27.12 ± 0.15 (0.1")	0.092 ± 0.013
	ACS/WFC/F555W	26.36 ± 0.12 (0.1")	0.109 ± 0.012
	ACS/WFC/F814W	25.49 ± 0.09 (0.1")	0.072 ± 0.006
	ACS/WFC/F435W	26.60 ± 0.18 (0.2")	0.148 ± 0.025
	ACS/WFC/F555W	25.94 ± 0.15 (0.2")	0.161 ± 0.022
	ACS/WFC/F814W	24.77 ± 0.09 (0.2")	0.140 ± 0.012
NGC 4395 ULX-1	WFC3/UVIS/F275W	19.971 ± 0.015	38.3 ± 0.5
	WFC3/UVIS/F336W	20.497 ± 0.016	20.6 ± 0.3
	WFC3/UVIS/F438W	22.075 ± 0.016	9.93 ± 0.15
NGC 4559 X-10	ACS/HRC/F435W	24.38 ± 0.07	1.13 ± 0.07
	ACS/HRC/F555W	24.04 ± 0.04	0.93 ± 0.03
	ACS/HRC/F814W	23.68 ± 0.04	0.377 ± 0.014

равны -4.48 ± 0.06 (NGC 5474 X-1), -4.24 ± 0.12 (M66 X-1), -6.24 ± 0.02 (NGC 4395 ULX-1) и -5.31 ± 0.05 (NGC 4559 X-10). При вычислении M_V использованы расстояния до родительских галактик, представленные в табл. 1.1. В величинах 1σ -ошибок V учтены неопределенности наклонов спектров, ошибки M_V не включают неопределенность, связанную с измерением расстояния.

Анализ исправленных за покраснение потоков показывает, что NGC 4395 ULX-1 имеет строго степенное $F_\lambda \propto \lambda^\alpha$ распределение энергии в спектре с $\alpha = -2.87 \pm 0.07$, подобное спектрам большинства других ярких ($M_V \lesssim -6^m$) в оптическом диапазоне ULX [151]. Напротив, оптические SED⁵ NGC 4559 X-10 и M66 X-1 не являются степенными и находятся в хорошем согласии со спектрами относительно холодных сверхгигантов спектральных классов F6–F8 (NGC 4559 X-10) и G0–G5 (M66 X-1). Рассчитанный в SYNPHOT цвет оптического двойника NGC 5474 X-1 $(R-I)_{0_{Cousins}} = 0.28 \pm 0.07$ и его абсолютная звездная величина $M_V \approx -4.5$ приблизительно соответствуют сверхгиганту спектрального класса F8–G2.

В архиве телескопа им. Хаббла имеется еще одно изображение NGC 4395 ULX-1, полученное 22 марта 2015 с помощью камеры WFC3/UVIS в фильтре F547M. Это изображение было использовано для поиска переменности объекта. Обработка была выполнена аналогично остальным данным, полученным с помощью камеры WFC3. После исправления наблюдаемой звездной величины источника за межзвездное поглощение была получена оценка $m_{F547M} = 22.26 \pm 0.03$. Чтобы сравнить эту величину с ранее полученной по данным марта 2014 г. $V = 22.15 \pm 0.02$, она была пересчитана в SYNPHOT в фильтр V описанным выше способом. Полученная звездная величина равна $V = 22.25 \pm 0.03$ (ошибка соответствует 1σ). При расчетах использовалась модель степенного спектра $F_\lambda \propto \lambda^\alpha$. Величина ошибки, связанная с неопределенностью наклона спектра, не превышает 0.01^m , при этом величина степенного индекса изменялась в преде-

⁵ спектральные распределения энергии

лах $\alpha = -4 \div 0$. Таким образом, надежно зафиксирована переменность объекта с амплитудой 0.10^m на временном интервале около 1 года.

Были также выполнены фотометрические измерения расположенных близко к NGC 5474 X-1 двух объектов, оказавшихся на щели спектрографа при наблюдениях на 6-метровом телескопе 2 января 2014 г. Звезда, являющаяся самым ярким источником на врезке левой панели рисунка 3.1 и находящаяся на расстоянии $0.5''$ от оптического двойника NGC 5474 X-1, имеет звездные величины $m_{F606W} = 23.01 \pm 0.03$ и $m_{F814W} = 23.09 \pm 0.02$. Величины были исправлены за конечный размер апертуры и межзвездное поглощение. Звездные величины галактики (обозначена цифрой 2 на том же рисунке) равны $m_{F606W} = 21.828 \pm 0.009$ и $m_{F814W} = 20.801 \pm 0.008$. Фотометрия галактики выполнена в апертуре радиусом $0.3''$.

На рисунке 3.3 показаны спектры оптического двойника NGC 5474 X-1 вместе со звездой 23.0^m , галактики с эмиссионными линиями, а также звездного скопления, обозначенных на левой панели рисунка 3.1 цифрами 1, 2 и 3 соответственно. Основной вклад в суммарный спектр NGC 5474 X-1 + звезда вносит эта звезда 23 -й величины, поскольку она примерно на 1.5^m ярче оптического двойника ультраяркого рентгеновского источника. Спектр звезды является голубым. Основной особенностью галактики (2) является наличие эмиссии [OII] $\lambda 3727$, а также бальмеровского скачка (около 4960 \AA) и абсорбционных линий водорода, железа и кальция (см. рисунок), положение которых соответствует красному смещению $z=0.359$. Красное смещение $z=0.00075$, измеренное по линиям туманности вокруг скопления (3), говорит в пользу принадлежности данного скопления галактике NGC 5474. В спектре скопления присутствуют широкие эмиссионные бленды C III/N III $\lambda\lambda 4640 - 4650$, эмиссии He II $\lambda 4686$ и C IV $\lambda 5808$, характерные для молодых скоплений [136]. Возраст скопления оценивается в 4–6 миллионов лет [90].

Было проведено три наблюдения оптического двойника NGC 4395 ULX-1

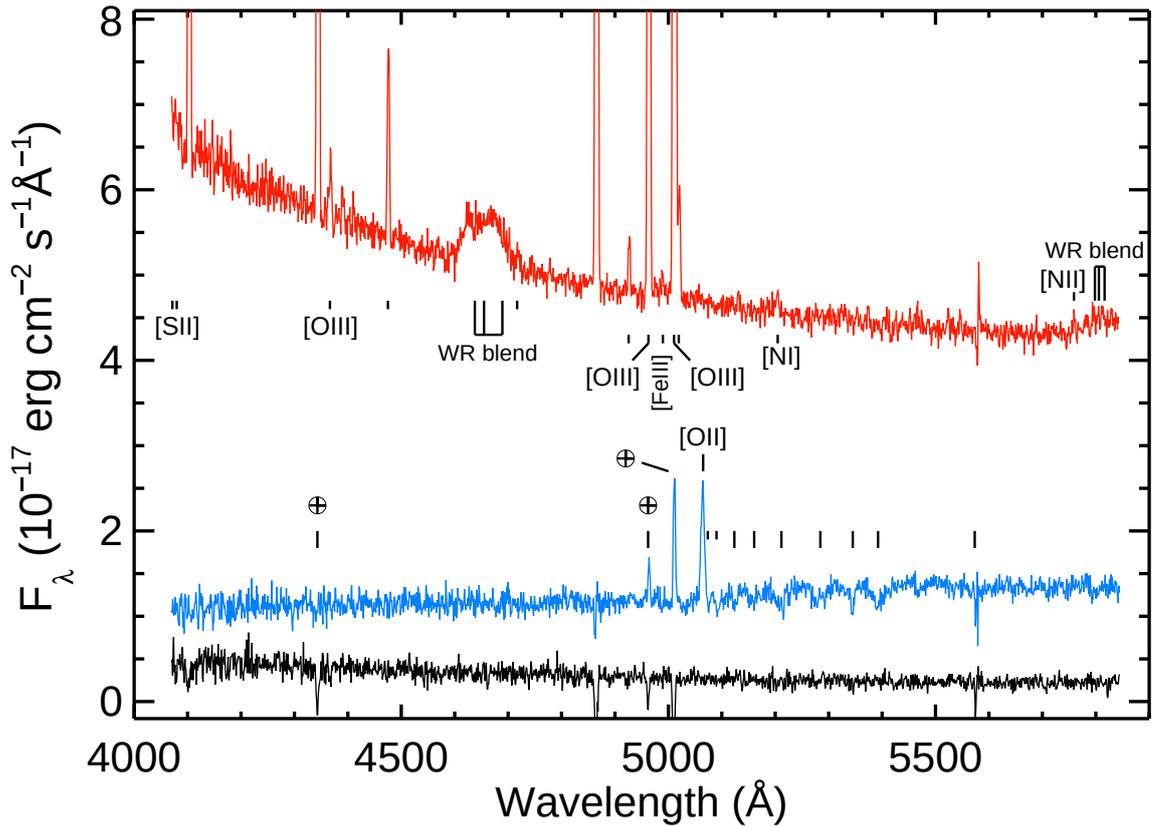


Рис. 3.3. Спектры объектов, полученные в ходе наблюдений NGC 5474 X-1 на БТА. Сверху вниз показаны спектры: звездного скопления, фоновой галактики и ULX вместе с ближайшей (в $0.5''$) звездой, обозначенных на рисунке 3.1 цифрами 3, 2 и 1 соответственно. Для удобства спектры галактики с эмиссионными линиями и звездного скопления сдвинуты на $+0.5 \times 10^{-17}$ и $+3.5 \times 10^{-17}$ эрг/с соответственно. В суммарном спектре звезда + ULX (1) доминирует спектр звезды. Спектр является голубым. Абсорбции в водородных и запрещенных линиях $[O III] \lambda\lambda 4559, 5007$ являются следствием перевычитания вклада окружающей туманности. В спектре галактики (2) видны эмиссионная линия $[O II] \lambda 3727$, а также абсорбционные линии $Fe I \lambda\lambda 3734, 3746$ (отмечены короткими вертикальными штрихами), и линии $H_{11}, H_{10}, H_9, H_8, Ca II K, H_\epsilon, H_\delta$ (указаны длинными штрихами). Наблюдаемые длины волн всех линий соответствуют красному смещению $z=0.359$. Две эмиссионные линии $[O III]$ и линия $H\gamma$ (в двух нижних спектрах $H\gamma$ перевычтена), отмеченные символами \oplus , принадлежат линиям туманностей в самой галактике NGC 5474. Спектр нового звездного скопления (3) содержит хорошо известные Вольфа-Райе-бленды $C III/N III \lambda\lambda 4640 - 4650, He II \lambda 4686$ и $C IV \lambda 5808$, а также линии водорода, запрещенные линии кислорода и серы, и линии $He I$ (последние отмечены штрихами без подписей), в которых излучает окружающая это скопление туманность.

на БТА/SCORPIO на решетках со спектральным разрешением 5–5.5 Å (табл. 1.3). Во всех наблюдениях в спектрах NGC 4395 ULX-1 обнаружена яркая эмиссионная линия He II $\lambda 4686$. Гаусс-анализ этой линии показал, что в спектрах, полученных в январе 2014 и 2015 гг., эмиссия He II уширена по сравнению с линиями туманности H β и [OIII] $\lambda\lambda 4959, 5007$ и, по-видимому, имеет двухкомпонентную структуру с узкой (FWHM ~ 300 км/с) и широкой (FWHM ~ 700 км/с) компонентами. Более подробный анализ полученных спектров приведен в главе 2, посвященной анализу спектров оптических двойников ULX.

3.3. Отношения рентгеновской к оптической светимости NGC 5474 X-1 и M66 X-1

Для NGC 5474 X-1 и M66 X-1 в нашей работе [13] были рассчитаны отношения рентгеновской светимости в диапазоне 0.3–10 кэВ⁶ к оптической светимости в фильтре V: $L_X/L_V = 110 \pm 40$ для NGC 5474 X-1 (рентгеновский источник в ближайших по дате к оптическим наблюдениям находился в слабом состоянии) и $L_X/L_V = 8000 \pm 2000$ для M66 X-1. Светимости источников в фильтре V оценивались из соотношения $L_V = EQUVW_V \cdot 4\pi D^2 F_V$, где $EQUVW_V = 870\text{Å}$ – эквивалентная ширина фильтра V⁷, D – расстояние до объектов, F_V – плотность потока в фильтре V на его центральной длине волны. Рентгеновская светимость NGC 5474 X-1 была определена по данным обсерватории Swift, полученным в период с 20 июня по 21 ноября 2012 г. (подробнее об анализе рентгеновских данных см. нашу статью [13]). Эти рентгеновские наблюдения являются наи-

⁶ Стоит отметить, что в ряде работ (например, [151, 171]) при оценках отношения рентгеновского к оптическому потоков (светимостей) ULX часто используется соотношение $\log(f_X/f_V) = \log f_X + m_V/2.5 + 5.37$ [101], где m_V – видимая звездная величина объекта, f_X – наблюдаемый рентгеновский поток в диапазоне 0.3–3.5 кэВ.

⁷ определяется интегралом кривой пропускания фильтра по длинам волн $EQUVW = \int P(\lambda)d\lambda$ (SYNPHOT)

более близкими по дате к оптическим наблюдениям объекта, проведенным на телескопе им. Хаббла 26 февраля 2012 г. При определении L_X/L_V для M66 X-1 мы использовали плотность потока в фильтре V в апертуре $0.2''$ (рассчитана в SYNPHOT по данным HST 14 декабря 2009 г.) и среднюю рентгеновскую светимость объекта, определенную по данным двух ближайших к HST наблюдениям Swift (4 и 7 июля 2009 г.).

Такие же оценки отношения L_X/L_V были получены для других хорошо изученных ультраярких рентгеновских источников с рентгеновскими светимостями $> 3 \times 10^{39}$ эрг/с: NGC 6946 ULX-1, Holmberg II X-1, Holmberg IX X-1, NGC 5408 X-1, IC342 X-1, NGC 1313 X-1, NGC 1313 X-2, NGC 5204 X-1, NGC 4559 X-7 и M81 X-6. Источники, из которых были взяты данные о яркости объектов в оптическом и рентгеновском диапазонах, перечислены в таблице 1.1. Средняя величина отношения рентгеновской к оптической светимости для указанных 10 ULX равна $L_X/L_V \sim 1600$ при минимальном значении около ≈ 260 для NGC 6946 ULX-1 и максимальном ≈ 4200 для M81 X-6. Для сравнения, известный гиперяркий рентгеновский источник ESO243-49 HLX-1, являющийся одним из лучших кандидатов в ИМВН, имеет $L_X/L_V \sim 1000$ [143]. Отметим, что это отношение является средним значением для двух состояний HLX-1, когда рентгеновские светимости объекта различались примерно в 2 раза. В более ярком состоянии отношение L_X/L_V было приблизительно на 40% выше, чем в более слабом. При этом, рентгеновские светимости HLX-1 в этих двух состояниях были близки к максимальной величине светимости объекта $\sim 10^{42}$ эрг/с.

Найденные величины L_X/L_V для NGC 5474 X-1 и M66 X-1 оказались вне характерного для ULX диапазона: NGC 5474 X-1 имеет более низкое отношение светимостей, тогда как M66 X-1 – более высокое. Если сравнивать оба объекта с активными ядрами галактик (AGN), окажется, что подавляющее большинство последних имеют отношение рентгеновской к оптической светимости от 0.1 до 10 [8] и только в отдельных случаях AGN с очень высоким внутренним

поглощением это отношение достигает величины ~ 100 [35]. Таким образом, ультраяркие источники имеют в среднем значительно более высокие отношения рентгеновской к оптической светимости, чем галактики с активными ядрами.

Мы не располагаем данными о величине оптической светимости NGC 5474 X-1, когда рентгеновский источник находился в ярком состоянии. Если оптический двойник этого объекта не является сильно переменным источником (как наблюдается в случае других ULX⁸), в ярком рентгеновском состоянии отношение L_X/L_V будет около 7000. AGN не могут менять свою рентгеновскую светимость более чем на два порядка величины, как наблюдается у NGC 5474 X-1. Поэтому этот объект абсолютно точно принадлежит классу ULX.

Для двух других отождествленных ULX были также получены оценки отношения рентгеновской к оптической светимости. L_X/L_V этих объектов рассчитывались для среднего значения их рентгеновской светимости и равны ≈ 1200 для NGC 4559 X-10 и ~ 100 для NGC 4395 ULX-1.

Таким образом, критерием, по которому можно отличить ультраяркие рентгеновские источники от фоновых галактик с активными ядрами и любых других объектов, является высокое отношение рентгеновской к оптической светимости ULX. То есть, любой источник с отношением $L_X/L_V \gtrsim 100 \div 200$ является надежным кандидатом в ультраяркие рентгеновские источники. Этот вывод может помочь решить проблему, связанную с наличием значительной доли фоновых AGN в каталогах ULX.

Отождествленные нами в оптическом диапазоне объекты NGC 5474 X-1 и M66 X-1 являются ультраяркими источниками с наибольшими среди хорошо изученных ULX отношениями рентгеновской к оптической светимости. Оба объекта имеют хоть и достаточно высокие ($L_X \sim 2 \times 10^{40}$ эрг/с), но типичные для

⁸ Переменность ULX в фильтре V обычно не превышает 0.3^m [151]. Даже в случае транзитного ультраяркого источника NGC 7793 P-13, рентгеновская светимость которого меняется примерно в 100 раз, блеск объекта в фильтре V меняется менее чем в 2 раза (0.5^m) [111].

ULX рентгеновские светимости. Поэтому, большие величины отношения L_X/L_V NGC 5474 X-1 (в ярком состоянии) и M66 X-1 определяются прежде всего низкой светимостью источников в оптическом диапазоне. Оба объекта как по величине оптического потока, так и по высокому отношению рентгеновской к оптической светимости, можно сравнить с такими хорошо изученными ультраяркими источниками, как NGC 1313 X-1 ($M_V \simeq -4.4$, [171]) и M81 X-6 ($M_V \simeq -4.0$, [151]), имеющие $L_X/L_V \sim 4000$.

3.4. Зависимость оптической светимости от темпов аккреции в сверхкритических аккреционных дисках

Представленная на рис. 3.4 гистограмма показывает, что ультраяркие рентгеновские источники имеют широкое распределение по абсолютным звездным величинам M_V с явным максимумом на $M_V \approx -6$. На рисунке показаны следующие ULX в порядке уменьшения яркости их оптических двойников: NGC 6946 ULX-1, NGC 7793 P13, NGC 4559 X-7, NGC 5408 X-1, NGC 5204 X-1, NGC 4395 ULX-1, M81 ULS1, Holmberg II X-1, IC 342 X-1, Holmberg IX X-1, NGC 4559 X-10, ngc 1313 X-2, NGC 5474 X-1, NGC 1313 X-1, M66 X-1 и M81 X-6. Четыре отождествленных ультраярких источника имеют абсолютные звездные величины -4.5 (NGC 5474 X-1), -4.2 (M66 X-1), -6.2 (NGC 4395 ULX-1) и -5.3 (NGC 4559 X-10). Для остальных ULX использовались как результаты нашей фотометрии (NGC 6946 ULX-1 и Holmberg II X-1), опубликованные в работе [161], так и данные из работ [111, 151, 171]. Абсолютные величины всех объектов пересчитаны на расстояния, приведенные в таблице 1.1. Серым цветом отмечено положение SS 433.

Отметим, что абсолютные звездные величины NGC 4559 X-7 и NGC 5204 X-1 были исправлены за межзвездное покраснение, определенное по линиям водорода близких (в пределах $\approx 5''$) к объектам туманностей. Использовались

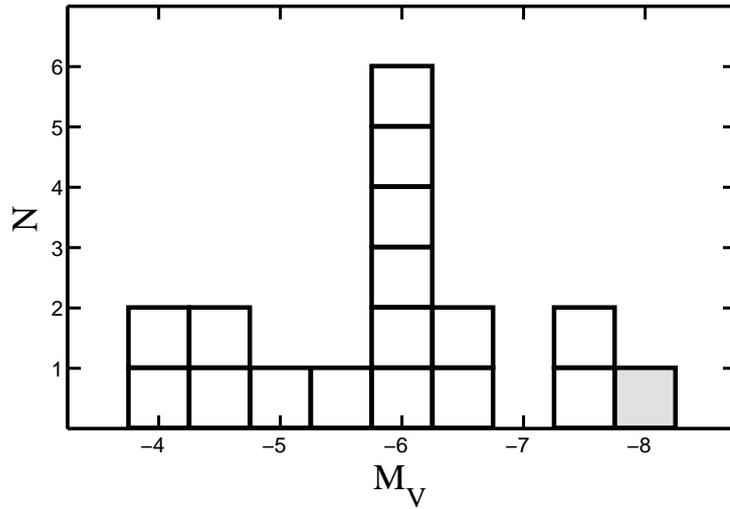


Рис. 3.4. Абсолютные звездные величины M_V оптических двойников ULX, включая NGC 5474 x-1 (-4.5), M66 X-1 (-4.2), NGC 4395 ULX-1 (-6.2) и NGC 4559 X-10 (-5.3). Серым показан объект SS433. Остальные ULX в порядке убывания яркости: NGC 6946 ULX-1, NGC 7793 P13, NGC 4559 X-7, NGC 5408 X-1, NGC 5204 X-1, M81 ULS1, Holmberg II X-1, IC 342 X-1, Holmberg IX X-1, ngc 1313 X-2, NGC 1313 X-1 и M81 X-6.

спектры, полученные на телескопе Subaru 28 февраля 2011 г. Измеренные отношения линий $H\alpha/H\beta$ и $H\gamma/H\beta$ дают оценки $E(B - V) = 0.10 \pm 0.05$ для NGC 4559 X-7 и $E(B - V) = 0.11 \pm 0.04$ для NGC 5204 X-1.

Из всех объектов на диаграмме холодными спектрами типа F-G сверхгигантов обладают три источника (NGC 4559 X-10, NGC 5474 X-1 and M66 X-1), причем все они имеют абсолютные величины $M_V > -5.3$. В противоположность им, большинство ярких ($M_V \sim -6$ и ярче) в оптическом диапазоне ULX имеют степенные спектры [151, 161].

Резкое уменьшение числа объектов с уменьшением M_V может быть связано как с эффектами наблюдательной селекции, так и с физикой самих объектов. Первая возможность объясняется низкими оптическими светимостями объектов, что затрудняет их обнаружение в галактиках дальше 10 Мпк. Вторая возможность может быть связана с уменьшением светимости ветра сверхкритического диска (СКАД) при уменьшении темпа аккреции.

В нашей работе [42] было найдено соотношение между величиной темпа аккреции и оптической светимостью сверхкритического диска.

Ожидаемая величина скорости ветра на радиусе сферизации сверхкритического диска близка к вириальной $V \propto M_{BH}^{1/2} R_{sp}^{-1/2}$ [113], где M_{BH} – масса черной дыры. Радиус фотосферы ветра, истекающего с поверхности сверхкритического диска, может быть оценен как $R_{ph} \propto \dot{M}_w V^{-1}$ [40], где \dot{M}_w является темпом истечения вещества в ветре. В работе Шакуры и Сюняева [138], где адвекция излучения и тепла не учитывалась, темпы истечения вещества \dot{M}_w практически равны начальному темпу аккреции \dot{M}_0 (более подробно см. главу 4). Как было показано в более поздних работах (например, [124]), учет адвекции принципиально не меняет картины в случае, если начальные темпы аккреции значительно превосходят эддингтоновскую величину $\dot{M}_0 \gg \dot{M}_{Edd}$. Таким образом, для радиуса фотосферы ветра может быть записано следующее соотношение: $R_{ph} \propto \dot{M}_0 V^{-1} \propto \dot{M}_0^{3/2} M_{BH}^{-1/2}$. Светимость сверхкритического диска определяется выражением $L \propto L_{Edd}(1 + a \ln(\dot{M}_0/\dot{M}_{Edd})) \propto M_{BH}$, где $a \sim 0.5 - 0.7$ является параметром, учитывающим адвекцию [124]. С другой стороны, в чернотельном приближении светимость может быть записана как $L \propto R_{ph}^2 T^4$, причем основная часть этой энергии излучается фотосферой ветра в УФ и оптическом диапазонах. Комбинируя полученные соотношения, можно найти зависимость для температуры фотосферы ветра $T \propto \dot{M}_0^{-3/4} M_{BH}^{1/2}$.

Фотосфера истекающего с поверхности сверхкритического диска ветра может иметь очень горячий, близкий к чернотельному спектр [40, 124]. Оптическое излучение СКАД должно приходиться на Релей-Джинсовскую область этого спектра. Тогда светимость источника в фильтре V может быть выражена как $L_V \propto R_{ph}^2 T \propto \dot{M}_0^{9/4} M_{BH}^{-1/2}$. Полученная зависимость показывает, что оптическая светимость сверхкритических аккреционных дисков, по видимому, должна сильно зависеть от изначального темпа аккреции газа.

Поскольку процессы ускорения газа в ветре не могут быть точно учтены

без детального моделирования структуры СКАД вплоть до фотосферы их ветров, скорость газа и ее изменения с расстоянием от черной дыры остаются неизвестными. Если предположить, что скорость ветра не меняется с расстоянием, $V = const$, то для радиуса фотосферы будет выполняться соотношение $R_{ph} \propto \dot{M}_0$. Тогда вместо полученных зависимостей для температуры фотосферы ветра и оптической светимости, можно прийти к новым соотношениям $T \propto \dot{M}_0^{-1/2} M_{BH}^{1/4}$ и $L_V \propto \dot{M}_0^{3/2} M_{BH}^{1/4}$. В самом деле, оценки данных величин должны основываться на величине скорости газа на расстояниях, близких к области фотосферы ветра, где эта скорость не может меняться очень быстро. Таким образом, и в этом случае оптическая светимость определяется главным образом величиной темпа аккреции.

Следовательно, наблюдаемая разница в 2–60 раз между оптическими светимостями (в фильтре V) SS 433 и ULX (рис. 3.4) может объясняться в 1.5–6 раз более низкими темпами аккреции в ультраярких источниках. С уменьшением светимости (темпов аккреции) сверхкритического аккреционного диска звезда-донор начинает доминировать в оптическом излучении двойной системы и определять вид ее спектра. Таким образом, в случае ULX с низкими оптическими светимостями вклад звезды-донора в оптическое излучение объектов может оказаться значительным. Это согласуется с тем, что слабые в оптическом диапазоне объекты с $M_V > -5.3$ имеют в среднем более холодные спектры, чем яркие в оптике ULX. Вполне вероятно, что большая часть оптического излучения отождествленных нами ULX NGC 5474 X-1, M66 X-1 и NGC 4559 X-10 формируется на звездах-донорах, являющихся сверхгигантами спектрального класса F-G.

Выводы

В главе представлено отождествление в оптическом диапазоне ультраярких рентгеновских источника в галактиках NGC 5474, M66, NGC 4559 и NGC 4395 по данным наблюдений космического телескопа им. Хаббла и обсерватории Chandra. Точность астрометрии составила $0.16''$ (NGC 5474 X-1), $0.13''$ (M66 X-1), $0.15''$ (NGC 4559 X-10) и $0.3''$ (NGC 4395 ULX-1), поэтому отождествления всех объектов являются надежными. NGC 5474 X-1, M66 X-1 и NGC 4559 X-10 в оптическом диапазоне отождествлены впервые.

Выполнена фотометрия отождествленных ULX по данным телескопа им. Хаббла. 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 исправленные за межзвездное поглощение абсолютные звездные величины в полосе V равны $M_V \approx -4.5$ для NGC 5474 X-1, $M_V \approx -4.2$ для M66 X-1 и $M_V \approx -5.3$ для NGC 4559 X-10 (точные величины с ошибками измерения приведены в тексте главы). По типу спектров все три объекта представляют собой холодные сверхгиганты спектрального класса F-G. Определена абсолютная звездная величина оптического двойника NGC 4395 ULX-1 $M_V \approx -6.2$. Спектральное распределение энергии этого объекта хорошо описывается степенным спектром $F_\lambda \propto \lambda^\alpha$ с $\alpha = -2.87$.

По отношению линий бальмеровской серии водорода в спектрах туманностей вокруг NGC 5474 X-1, NGC 4559 X-1 и NGC 4395 ULX-1, полученных на БТА/SCORPIO, определены величины межзвездного покраснения $A_V < 0.1$ для NGC 5474 X-1, ≈ 0.8 для NGC 4559 X-10 и ≈ 0.7 для NGC 4395 ULX-1. Спектроскопия оптического двойника NGC 4395 ULX-1 показала наличие в спектрах объекта яркой эмиссии He II $\lambda 4686$. В двух из трех наблюдениях NGC 4395 ULX-1 ширина линии He II оказалась больше ширины линий окружающей объект туманности: по-видимому, линия имеет двухкомпонентный профиль с узкой

(FWHM ~ 300 км/с)) и широкой (FWHM ~ 700 км/с) компонентами. Спектр оптического двойника NGC 5474 X-1 является голубым, однако, основной вклад в полученный спектр вносит ближайшая к источнику звезда 23.0 звездной величины. Сам же оптический двойник по данным HST имеет значительно более красный цвет. Кроме того, по результатам спектроскопии обнаружена галактика с эмиссионными линиями на $z=0.359$, а также молодое скопление со спектральными деталями, свойственными звездам Вольфа-Райе, принадлежащее галактике NGC 5474.

Показано, что NGC 5474 X-1 и M66 X-1 являются ультраяркими источниками с наибольшим среди хорошо изученных ULX отношением рентгеновской к оптической светимости: $L_X/L_V \sim 7000$ для NGC 5474 X-1 (в ярком состоянии объекта) и $L_X/L_V \sim 8000$ для M66 X-1. Показано, что любой источник с отношением рентгеновской к оптической светимости $\gtrsim 100 \div 200$ является надежным кандидатом в ультраяркие рентгеновские источники.

Построено распределение ULX по абсолютным звездным величинам. Показано, что оптическая яркость ультраярких рентгеновских источников в рамках модели сверхкритических аккреционных дисков сильно зависит от первоначального темпа аккреции: при снижении темпа аккреции оптическая светимость падает, температура ветра возрастает. Показано, что для ULX с очень низкой оптической светимостью возможен значительный вклад звезды-донора в оптический спектр объекта.

На защиту выносятся только результаты исследования NGC 5474 X-1 и M66 X-1, опубликованные в работе [13], результаты исследования остальных двух объектов не были опубликованы в рецензируемом журнале.

Модель сверхкритического аккреционного диска

В главах 2 и 3 на основе анализа эмиссионных линий в оптических спектрах ULX и распределения их абсолютных звездных величин M_V было показано, что оптическое излучение ярких в оптике ULX должно формироваться в горячих ветрах сверхкритических дисков, а не в стандартных аккреционных дисках с черными дырами промежуточных масс или на звездах-донорах. Исключением могут быть только объекты с низкими оптическими светимостями и холодными спектрами, в случае которых вклад донора, по-видимому, является значительным (см. главу 3).

Вопрос о том, где формируется оптическое излучение ULX, рассматривался еще в работах начала 2000-х гг. Как высокая УФ-оптическая светимость, так и голубой цвет объектов в работах [78, 98, 142] объяснялись наличием в этих системах доноров ранних спектральных классов (O-B). Однако, в более поздних работах [75, 118] была высказана идея, что вклад донора в оптический поток может быть сравним со вкладом аккреционного диска, прогреваемого рентгеновским излучением центрального источника, или даже быть меньше последнего [76]. Это было подтверждено в работе Тао и др. [151] в результате систематического анализа фотометрических данных 13-ти ULX. Авторы обнаружили, что оптические двойники большинства ULX имеют горячие степенные спектры, не соответствующие спектрам звезд. Кроме того, амплитуда переменности объектов достигает $\approx 0.3^m$, что также не наблюдается у звезд, имеющих сходные с ULX голубые цвета и соответствующие абсолютные звездные величины. Тао и др. отметили, что оба эти факта противоречат тому, что в оптическом излучении ULX доминирует донор, и сделали вывод, что основной вклад должен давать некий другой источник, на роль которого, по их мнению, подхо-

дит прогреваемый рентгеновским излучением аккреционный диск. Этот вывод позволил провести аналогию между ULX и маломассивными рентгеновскими двойными (LMXB) в состоянии транзиентной вспышки [60, 151]. Поэтому, в ряде работ [17, 60, 152] для описания распределения энергии в спектрах ULX от рентгеновского до оптического диапазона была применена модель Гиерлинского и др. DISKIR [48, 49], изначально разработанная для LMXB.

DISKIR базируется на стандартной модели многотемпературного диска (DISKBB), но учитывает эффекты комптонизации (в короне, покрывающей внутренние части диска) и облучения диска жесткими квантами. Чтобы получить большие ультрафиолетовые и оптические потоки от внешних частей диска, Гиерлинский и др. приняли более слабую зависимость температуры от расстояния до черной дыры $T \propto r^{-1/2}$, чем в многотемпературном диске ($T \propto r^{-3/4}$). В качестве возможного объяснения такой зависимости $T(r)$ авторы предложили идею, что по каким-то причинам диск является вогнутым.

Применение модели DISKIR к ULX [17, 60, 152] давало хорошее согласие с наблюдаемыми спектральными распределениями энергии этих объектов, однако приводило к нефизичным размерам короны ($\approx 1.1R_{in}$, где R_{in} – внутренний радиус диска) и очень большим значениям массы черной дыры $\sim 1000M_{\odot}$ ¹, что соответствует черным дырам промежуточных масс (IMBH).

В этой главе представлена модель сверхкритического аккреционного диска (далее модель SCAD) с истекающим с его поверхности ветром и результаты ее применения к наблюдаемым спектральным распределениям энергии ULX от рентгеновского до оптического диапазона. Модель SCAD разработана нами на основе приближения Шакуры-Сюняева [138], описание которого также приведено в данной главе. Основные изложенные ниже результаты опубликованы в работе [161].

¹ оценки массы черных дыр получены на основе зависимости температуры на внутреннем радиусе диска от черной дыры как $T_{in} \propto M_{BH}^{-1/4}$

4.1. Модель

4.1.1. Сверхкритический диск Шакуры и Сюняева

В качестве базовой мы принимаем концепцию сверхкритических дисков Шакуры-Сюняева [138], поскольку в рамках этой модели легко сделать оценки. Сверхкритический режим аккреции реализуется при темпах аккреции \dot{M}_0 больше эддингтоновского

$$\dot{M}_0 > \dot{M}_{Edd} = \frac{2L_{Edd}R_{in}}{GM_{BH}} = \frac{48\pi GM_{BH}}{c\kappa} \simeq 2 \cdot 10^{18} M_{BH} \text{ г/с}, \quad (4.1)$$

где $R_{in} = 3R_g$ — внутренний радиус аккреционного диска, $R_g = 2GM_{BH}/c^2$ — радиус Шварцшильда; $\kappa = 0.2(1 + X) = 0.34 \text{ см}^2/\text{г}$ ($X = 0.7$ — солнечное содержание водорода по массе) — томсоновская непрозрачность. При таких темпах аккреции светимость диска вокруг черной дыры массы M_{BH} достигает эддингтоновского предела $L_{Edd} \simeq 1.3 \cdot 10^{38} M_{BH}/M_\odot \text{ эрг/с}$. Для удобства введем безразмерный темп аккреции

$$\dot{m}_0 = \frac{\dot{M}_0}{\dot{M}_{Edd}}. \quad (4.2)$$

В случае сверхкритической аккреции ($\dot{m}_0 > 1$) светимость диска становится больше L_{Edd} , что приводит к оттоку части аккрецируемого вещества с поверхности диска в виде ветра.

Сверхкритические свойства диска проявляются ниже радиуса сферизации

$$R_{sp} \simeq \frac{\dot{M}_0 \kappa}{8\pi c}. \quad (4.3)$$

При сверхкритическом режиме аккреции ниже радиуса сферизации R_{sp} диск становится локально эддингтоновским [138], в каждой его точке сила гравитации уравнивается силой давления излучения. В результате диск становится геометрически толстым $H/R \sim 1$. Выше радиуса сферизации ($R > R_{sp}$), где давление излучения становится слабее гравитационного притяжения, структура диска описывается моделью стандартного диска. Во внутренней области

($R < R_{sp}$) аккрецируемое вещество под действием давления излучения начинает истекать с поверхности сверхкритического диска, что приводит к постепенному уменьшению темпа аккреции с радиусом [138]

$$\dot{M}(R) = \frac{R}{R_{sp}} \dot{M}_0. \quad (4.4)$$

Таким образом, в виде ветра истекает большая часть изначально аккрецируемого вещества $\dot{M}_0 - \dot{M}_{Edd}$, тогда как в черную дыру падает \dot{M}_{Edd} (несколько больше с учетом адвекции).

Светимость стандартного диска ($R > R_{sp}$) равна эддингтоновской. В сверхкритическом диске из-за уменьшения темпа аккреции с радиусом (формула 4.4) энерговыделение зависит логарифмически от величины темпа аккреции [124, 138]. Результирующая светимость L_{tot} всего диска (сверхкритического и стандартного) равна

$$L_{tot} = L_{Edd}(1 + a \ln \dot{m}_0), \quad (4.5)$$

где параметр $a \leq 1$ учитывает адвекцию излучения (например, [91, 124]). В работе Шакуры и Сюняева [138] $a = 1$. Далее мы также предполагаем $a = 1$, поскольку как структура ветра, так и энерговыделение в диске не меняются значительно [124] от величины не высвеченной диском тепловой энергии и, соответственно, от количества материи, адвектируемой в черную дыру, которое определяется параметром a (например, [124]). Учет адвекции в диске переопределяет радиус сферизации R_{sp} , что эквивалентно такому же изменению величины начального темпа аккреции \dot{M}_0 . Величина \dot{M}_0 точно неизвестна, она является параметром модели, поэтому в первом приближении мы можем принять $a = 1$.

4.1.2. Модель сверхкритического диска SCAD

Шакура и Сюняев [138] в своей работе указывали на ключевую роль истекающего с поверхности сверхкритического диска оптически толстого ветра в

формировании ультрафиолетового и оптического спектров. Эта идея получила дальнейшее развитие в работах многих авторов (см., например, [124]).

Мы полагаем, что истекающий ветер образует канал (далее ветровой канал), который имеет близкую к конической форму. Существование канала связано с наличием углового момента как у аккрецируемого, так и у истекающего газа, вследствие чего вблизи оси симметрии системы формируется область с пониженной плотностью вещества. Наличие ветрового канала подтверждается в прямых гидродинамических расчетах (например, [113–115, 135]). Величина угла полураствора ветрового канала θ_f зависит от многих факторов, в частности, от скорости газа в ветре и ее изменения с расстоянием. В разных расчетах получаются близкие значения этого угла, составляющие $\sim 25^\circ$ [113, 114, 135]. Как показали исследования SS 433, в этом объекте, по-видимому, наблюдается ветер с очень широким каналом $\sim 50^\circ$ [12]. Это единственная оценка величины угла полураствора канала ветра сверхкритического диска, которая получена непосредственно на основе анализа наблюдений. Однако, в работе [12] такой раствор был получен при моделировании рассеяния излучения во внешних частях ветрового канала SS 433. В расчетах [115], которые были сделаны на большой сетке по расстоянию специально для SS 433, внутренний раствор оказался примерно 25° , но внешний около 50° . С учетом этих результатов в нашей модели мы принимаем, что ветровой канал является достаточно широким и имеет угол полураствора $\theta_f = 45^\circ$.

Одним из основных наблюдательных проявлений ветрового канала является геометрическая коллимация излучения для наблюдателя, который может видеть канал. В случае конической формы канала фактор коллимации излучения без учета поглощения на стенках определяется выражением $B = 2\pi/\Omega_f$, где $\Omega_f = 2\pi(1 - \cos \theta_f)$ – телесный угол раствора сверхкритического диска [41]. Для значения угла $\theta_f \sim 45^\circ$ фактор $B \sim 3$, для более узкого канала с $\theta_f \approx 23^\circ$, получаемого в расчетах Охсуга и Минишиге [113], величина фактора коллима-

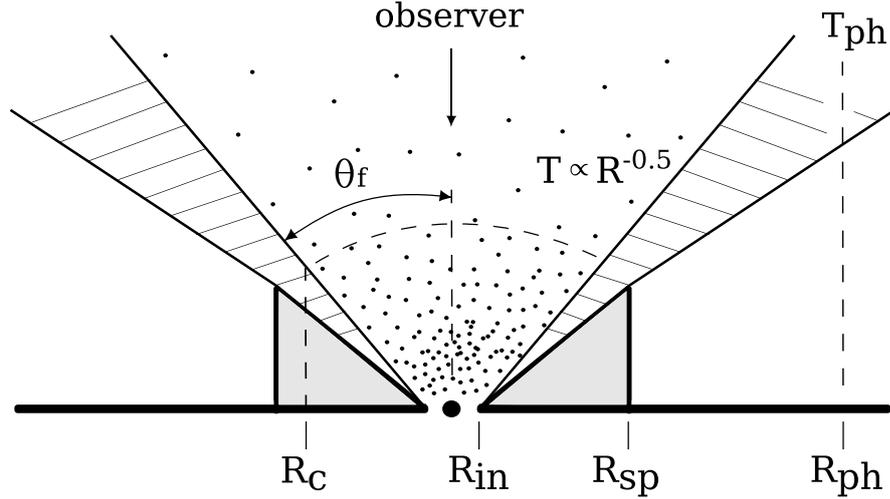


Рис. 4.1. Модель сверхкритического диска с ветровым каналом. Показаны тонкий диск ($R > R_{sp}$), сверхкритический диск ($R \leq R_{sp}$), ветровой канал, ограниченный радиусом фотосферы R_{ph} , и комptonизирующая корона размером R_c .

ции достигает ~ 10 . Таким образом, коллимация излучения ветровым каналом приводит к существенному увеличению яркости сверхкритического диска при $\theta < \theta_f$.

Схематически модель сверхкритического диска с ветровым каналом (SCAD) представлена на рис. 4.1. Показаны четыре основные составляющие: тонкий стандартный диск за радиусом сферизации ($R > R_{sp}$), сверхкритический диск ($R_{in} \leq R \leq R_{sp}$), горячая корона радиуса R_c , и ветровой канал, простирающийся до радиуса фотосферы R_{ph} . Радиус фотосферы R_{ph} ограничивает область оптически толстого ветра. Его величина определяется темпом истечения (и, соответственно, аккреции), геометрией, скоростью истекающего ветра и зависимостью коэффициента непрозрачности от температуры. Точный расчет R_{ph} является достаточно сложной задачей, поэтому в рамках данной работы мы считаем его параметром модели.

Характерные величины для Шварцшильдской черной дыры $10M_\odot$ и темпа аккреции $\dot{m}_0 = 300$ составляют: $R_{in} = 3R_g \sim 10^7$ см (R_g — гравитационный

радиус), $R_{sp} \sim 3 \times 10^9$ см (уравнение 4.3). Радиус фотосферы может быть грубо оценен из соотношения $R_{ph} \sim \dot{M}_w \kappa / 4\pi V_w \sim 2 \times 10^{12} \left(\frac{V_w}{1000 \text{ км/с}} \right)^{-1}$ см (см. [40]), где $\dot{M}_w \sim \dot{M}_0$ — темп истечения вещества в ветре, V_w — скорость ветра на уровне фотосферы, которую мы приняли постоянной и равной 1000 км/с.

Отметим, что в версии модели SCAD, опубликованной в нашей работе [161], не рассматривались процессы комптонизации и коллимация излучения, поскольку основной акцент был сделан на моделировании спектров ULX в ультрафиолетовом и оптическом диапазонах, а анализ рентгеновских данных носил больше иллюстративный характер. Тем не менее, в нашей работе [161] (и в разделе 4.2.3 этой главы) приводятся оценки того, как изменятся получаемые в модели величины масс черных дыр при учете коллимации. Комptonовское рассеяние играет важную роль в формировании рентгеновских спектров ULX на энергиях больше ~ 1 кэВ (см., например, [51]). Так как в статье [161] мы не рассматривали комптонизацию, рентгеновские спектры моделировались на энергиях < 1.5 кэВ, где влиянием эффектов комптонизации можно было пренебречь. В разделе 4.3 будут кратко рассмотрены результаты моделирования рентгеновских и оптических спектров ULX с учетом комптонизации и коллимации излучения. Однако заметим, что нет каких-либо значительных концептуальных отличий новой модели от опубликованной в работе [161], более того, даже значения основных параметров в обеих моделях оказываются сравнимыми. Ниже описывается версия модели из работы [161].

Сверхкритический диск будет наблюдаться как яркий рентгеновский источник только при условии, что угол между лучом зрения и осью диска не превышает раствора канала θ_f . В этом случае непосредственному наблюдению будет доступно как излучение сверхкритического диска, так и ветрового канала. При такой ориентации центральные области стандартного диска при $R \gtrsim R_{sp}$, дающие основной вклад в его светимость, могут быть не видны — они закрыты протяженным ветром сверхкритического диска. Тонкий диск греет этот ветер

снизу. Поэтому, мы принимаем, что излучение стандартного диска, имеющего светимость равную L_{Edd} , термализуется в ветре и тем самым увеличивает его энергетику.

При моделировании мы предполагаем, что аккреционный диск и канал излучают чернотельно. В сверхкритическом диске изменение эффективной температуры с радиусом определяется законом [124]

$$T \propto r^{-\frac{1}{2}}, \quad (4.6)$$

где $r = R/R_{in}$. Температура на внутреннем радиусе диска T_{in} может быть определена через светимость сверхкритического диска

$$\begin{aligned} L &= 2 \int_{R'_{in}}^{R'_{sp}} 2\pi R \sigma T^4(R') dR' \\ &= 4\pi R_{in}^2 \sigma T_{in}^4 \int_1^{r'_{sp}} \frac{dr'}{r' \sin \theta_f}. \end{aligned} \quad (4.7)$$

Ветровой канал имеет коническую форму, поэтому для удобства здесь и далее будут рассматриваться расстояния $R' = R/\sin \theta_f$, измеряемые вдоль общей для сверхкритического диска и ветрового канала образующей; соответствующий безразмерный радиус $r' = R'/R_{in} = r/\sin \theta_f$. Светимость сверхкритического диска ($R \leq R_{sp}$) связана с массой черной дыры и начальным темпом аккреции уравнением $L_{sd} = L_{Edd} \ln \dot{m}_0$. С учетом этого равенства, уравнение (4.7) совместно с (4.6) и (4.2) приводит к оценке

$$T_{in} = \left[\frac{L_{Edd}}{4\pi\sigma R_{in}^2} \sin \theta_f \right]^{\frac{1}{4}}. \quad (4.8)$$

Заметная часть излучения сверхкритического диска может перехватываться ветром и переизлучаться на более низких частотах (в ультрафиолетовом и оптическом диапазонах). Мы полагаем, что для эффективной температуры

ветрового канала выполняется соотношение $T \propto (r')^{-\frac{1}{2}}$ [48]. Такая зависимость может быть обусловлена геометрией ветра (искривленный ветер), наличием рассеивающего оптически прозрачного вещества, заполняющего канал, или переменным альбедо $A(T(r'))$ ветра.

Величина потока ультрафиолетового и оптического излучения может быть задана следующим образом:

$$F = \frac{f_{out} L_{tot}}{4\pi R'^2}, \quad (4.9)$$

где f_{out} — доля болометрического потока, перерабатываемая в ветре на радиусе R' , L_{tot} — болометрическая светимость (4.5). Параметр f_{out} является комбинацией многих геометрических и физических факторов, таких как доля перехватываемого ветром излучения аккреционного диска, альбедо и эффективность термализации поглощенного излучения.

Мы предполагаем, что сверхкритический диск со светимостью $L_{Edd} \ln \dot{m}_0$ прогревает ветер со стороны канала, в то время как стандартный диск при $R > R_{sp}$ прогревает тот же ветер снизу со светимостью L_{Edd} . В итоге, полный поток от сверхкритического диска с ветровым каналом будет описываться системой уравнений

$$F_{tot} = \sigma T_{in}^4 \begin{cases} (r' \sin \theta_f)^{-2}, & 1 \leq r' \leq r_{sp}' \\ \frac{f_{out}}{\sin \theta_f} (1 + \ln \dot{m}_0) (r')^{-2}, & r_{sp}' \leq r' \leq r_{ph}. \end{cases} \quad (4.10)$$

Итак, наша модель имеет семь параметров. Четыре параметра являются основными и полностью определяют форму модельного спектра: масса черной дыры M_{BH} ($L_{Edd} \propto M_{BH}$), начальный нормированный (безразмерный) темп аккреции \dot{m}_0 , доля перерабатываемого в ветре болометрического потока f_{out} и радиус фотосферы ветра R_{ph} . Два параметра — это углы раствора сверхкритического диска и ветрового канала. В настоящей работе они принимаются равными $\theta_f = 45^\circ$. Седьмой параметр a (4.5), учитывающий адвекцию тепла и излучения, мы принимаем равным единице (см. раздел 4.1.1).

На рис. 4.2 представлены модельные распределения энергии для различных значений параметров. Потоки рассчитывались для расстояния $D = 3$ Мпк. Два плоских участка в спектрах соответствуют степенному закону $F_\lambda \propto \lambda^{-1}$, являющегося следствием зависимости температуры от расстояния до черной дыры $T \propto (r')^{-\frac{1}{2}}$ как в сверхкритическом диске, так и в ветровом канале (результат интегрирования с данным ходом температуры по поверхности диска в предположении чернотельного излучения). В рентгеновском диапазоне (на длинах волн меньше $\approx 100 \text{ \AA}$) доминирует излучение сверхкритического диска, в ультрафиолетовой и оптической области основной вклад в наблюдаемый спектр вносит излучение прогретого ветра. В длинноволновой области поток определяется Релей-Джинсовским спектром ветрового канала, $F_\lambda \propto \lambda^{-4}$.

Рис. 4.2a демонстрирует изменение спектра в зависимости от массы черной дыры M_{BH} и темпов аккреции \dot{m}_0 . С ростом значения массы пропорционально увеличивается эддингтоновский предел L_{Edd} , а следовательно и болометрическая светимость аккреционного диска. Светимость ветрового канала при $f_{out} = const$ также линейно растет с M_{BH} . Поэтому спектр излучения в целом сдвигается в область более высоких потоков.

Увеличение темпов аккреции при постоянной массе черной дыры ведет к такому же изменению геометрических размеров сверхкритического диска и уменьшению температуры вещества и излучения его внешних областей. Для температуры на радиусе сферизации выполняется соотношение $T_{sp} \propto \dot{m}_0^{-\frac{1}{2}}$. Уменьшение температуры внешних областей диска на радиусе R_{sp} связано с увеличением площади излучающей поверхности ($S \sim 2\pi R_{sp}^2 \propto \dot{m}_0^2$). В результате плоский участок рентгеновского спектра продлевается в длинноволновую область (рис. 4.2a).

Изменение формы спектров в зависимости от f_{out} и R_{ph} при фиксированных значениях M_{BH} и \dot{m}_0 представлено на рис. 4.2b. Параметр f_{out} в основном выполняет роль масштабирующего фактора для ультрафиолетовой и оптической

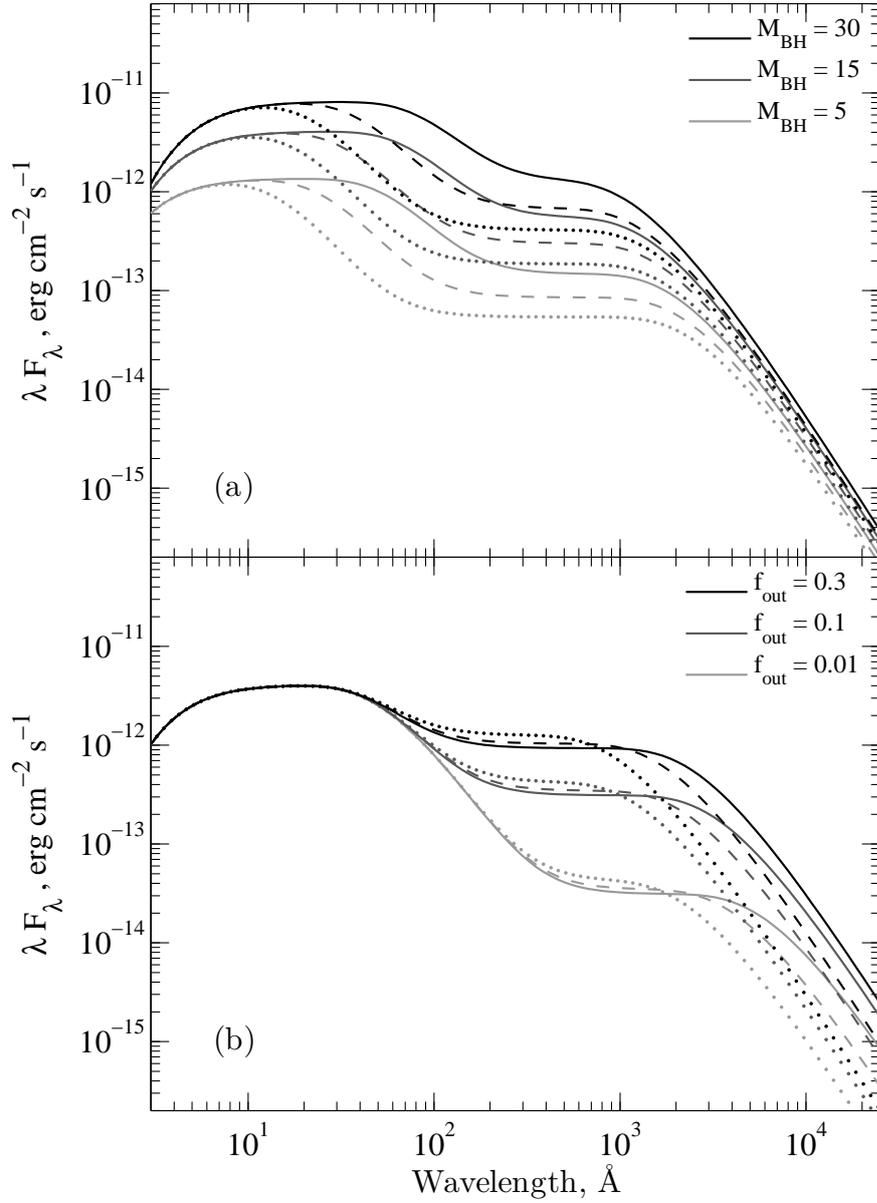


Рис. 4.2. Рассчитанные спектральные распределения энергии (SED) сверхкритического диска с ветровым каналом: (a) для различных масс черных дыр M_{BH} и темпов аккреции $\dot{m}_0 = 30$ (пунктир), 100 (штриховые линии) и 500 (сплошные линии); (b) для различных значений параметра f_{out} для радиусов фотосферы $R_{\text{ph}}/R_{\text{in}} 0.5 \cdot 10^5$ (пунктир), $1.5 \cdot 10^5$ (штриховые линии) и $3 \cdot 10^5$ (сплошные линии). Значения фиксированных параметров: $f_{\text{out}} = 0.1$ и $R_{\text{ph}} = 10^{12}$ см для (a), $M_{\text{BH}} = 15M_\odot$ и $\dot{m}_0 = 200$ для (b).

ской области спектра, так как величина потока в спектре линейно возрастает с долей поглощаемой и переизлучаемой энергии. В то же время, зависимость температуры излучения от количества перерабатываемой ветром энергии достаточно слабая и пропорциональна $f_{out}^{\frac{1}{4}}$. По этой причине при уменьшении f_{out} уменьшается температура ветра, и плоский участок УФ-оптического спектра незначительно смещается в длиноволновую область (рис. 4.2b).

Радиус фотосферы определяет внешнюю границу чернотельно излучающего ветра. Рост размеров ветрового канала при постоянной величине облучающего потока приводит к снижению интенсивности и температуры излучения ветра. Таким образом, увеличение радиуса фотосферы ветрового канала продлевает плоский участок ультрафиолетового спектра в оптическую область.

4.2. Сравнение с наблюдательными данными

С целью проверки разработанной нами модели были отобраны пять ULX с рентгеновскими светимостями $> 3 \times 10^{39}$ эрг/с: Holmberg II X-1, NGC 6946 ULX-1, NGC 1313 X-1, NGC 1313 X-2 и NGC 5408 X-1. В оптическом диапазоне объекты имеют разные абсолютные звездные величины M_V в диапазоне $-7.6^m \div -4.4^m$ и горячие степенные спектры [151, 171], вклад донора в их оптическое излучение, как ожидается, незначителен.

4.2.1. Оптические данные

Использовались архивные данные, полученные на космическом телескопе им. Хаббла. Для объектов NGC 1313 X-1, NGC 1313 X-2 и NGC 5408 X-1 были взяты результаты фотометрии из работ [60, 151, 171]. Для NGC 1313 X-1 мы выбрали измерения потоков в фильтрах F330W, F435W, F555W и F814W за 17 ноября 2003 г., для NGC 1313 X-2 были взяты фотометрические измерения в фильтрах F330W, F435W, F555W и F814W за 22 ноября 2003 г., для

NGC 5408 X-1 использовались результаты фотометрии в фильтрах F225W, F336W, F547M, F845M, F105W и F160W за 15 мая 2010 г. Фотометрия NGC 6946 ULX-1 и Holmberg II X-1 была выполнена автором (описание данных и обработки приводится в главе 1), результаты опубликованы в работе [161].

Наблюдаемые оптические потоки NGC 6946 ULX-1 и Holmberg II X-1 исправлялись за межзвездное поглощение в предположении, что спектры объектов описываются степенным законом $F_\lambda \propto \lambda^{-3}$. Данная процедура была выполнена с помощью команды CALCPHOT пакета программ SYNPHOT. Величина межзвездного покраснения определялась по наблюдаемому отношению линий бальмеровской серии водорода в спектрах окружающих NGC 6946 ULX-1 и Holmberg II X-1 туманностей, аналогично тому, как это было описано в главе 3.

Для оценки поглощения для Holmberg II X-1 мы использовали оптический спектр окружающей этот объект туманности, полученный на телескопе Subaru 28 февраля 2011 г. Спектр туманности был вырезан прямоугольной апертурой на расстоянии от 0.5'' до 1.5'' от центра объекта. В результате измерений потоков в линиях $H\gamma$, $H\beta$ и $H\alpha$ на полученном спектре мы нашли, что отношения линий $H\alpha/H\beta$ и $H\gamma/H\beta$ дают согласующиеся друг с другом величины $E(B - V) = 0.07 \pm 0.02$ (что соответствует величине поглощения $A_V \approx 0.23$). Полученная величина поглощения находится в согласии с результатами работы [4].

Для определения поглощения в направлении на NGC 6946 ULX-1 в работе [161] нами были заново проанализированы наблюдаемые потоки в линиях туманности, опубликованные в работах [3, 4]. Оказалось, что отношение $H\alpha/H\beta$ приводит к величине $E(B - V) \approx 0.50$ ($A_V \approx 1.55$), тогда как отношение $H\gamma/H\beta$ дает $E(B - V) \approx 0.43$ ($A_V \approx 1.34$). Точность определения A_V для каждого отношения линий лучше 0.1 звездной величины. Мы предполагаем, что причина отличия полученных значений A_V связаны с наличием мощных ударных волн в этой туманности. Действительно, на эшелле-спектрах туманности Дун и соавторы [38] обнаружили широкие компоненты эмиссионных линий с дисперсией

скоростей около 250 км/с. Моделирование показывает [10], что в случае наличия ударных волн отношение $H\alpha/H\beta$ при $A_V = 0$ может достигать значения 3.2, и тогда для более надежных оценок величины поглощения может быть использовано отношение к линии $H\beta$ линий бальмеровской серии водорода более высокого порядка. По-видимому, в случае туманности вокруг NGC 6946 ULX-1 ударные волны оказывают существенное влияние на наблюдаемые отношения линий. Поэтому для этого объекта мы принимаем значение $A_V \approx 1.34$, измеренное по отношению линий $H\gamma/H\beta$.

Исправленные за найденное межзвездное поглощение потоки представлены в табл. 4.1.

4.2.2. Рентгеновские данные

Как отмечалось выше, в работе [161] основной акцент был сделан на моделировании спектров ULX в ультрафиолетовом и оптическом диапазонах. Моделирование рентгеновских данных носило иллюстративный характер, поэтому мы сочли уместным использовать заимствованные из литературы результаты аппроксимации рентгеновских спектров простыми моделями. Отбирались опубликованные модели, аппроксимирующие наблюдаемые спектры исследуемых ULX наилучшим образом. Все эти спектры имеют достаточно большое суммарное накопление (> 10 кс). Так как версия модели SCAD, представленная в работе [161], не учитывала комптонизацию излучения сверхкритического диска в короне, указанные выше данные аппроксимировались нашей моделью в диапазоне ниже энергий 1.5 кэВ, поскольку на этих энергиях роль комптоновского рассеяния в формировании спектров объектов невелика.

Использование вместо наблюдаемых спектров ULX моделей, которыми были аппроксимированы эти спектры, было также обусловлено тем, что модель SCAD на момент написания статьи [161] не была реализована как программа

Таблица 4.1. Результаты фотометрии оптических двойников Holmberg II X-1 и NGC 6546 ULX-1. Потоки (даны в единицах 10^{-17} эрг см^{-2} с^{-1} \AA^{-1}) исправлены за межзвездное поглощение. Приведены полные ошибки с учетом неопределенности, связанной с вычитанием вклада туманности.

Объект	Дата	Камера / фильтр	F_λ
NGC 6946 ULX-1	2008.05.01	ACS/SBC/F140LP	32.0 ± 2.7
	2001.06.08	WFPC2/PC1/F450W	2.1 ± 0.6
	2001.06.08	WFPC2/PC1/F555W	1.03 ± 0.27
	2001.06.08	WFPC2/PC1/F814W	0.25 ± 0.05
Holmberg II X-1	2006.11.27	ACS/SBC/F165LP	33.0 ± 1.7
	2009.02.09	WFPC2/WF2/F336W	4.62 ± 0.18
	2007.10.03	WFPC2/PC1/F450W	1.98 ± 0.18
	2007.10.05	WFPC2/PC1/F450W	1.88 ± 0.17
	2007.10.09	WFPC2/PC1/F450W	1.96 ± 0.18
	2007.10.03	WFPC2/PC1/F555W	1.06 ± 0.07
	2007.10.05	WFPC2/PC1/F555W	1.07 ± 0.07
	2007.10.09	WFPC2/PC1/F555W	1.07 ± 0.07
	2006.12.30	ACS/WFC/F814W	0.301 ± 0.012

пакета XSPEC, наиболее часто используемого для аппроксимации различными моделями предобработанных данных рентгеновских обсерваторий. Поэтому по литературе выбирались простые модели, на основе которых могла быть воспроизведена форма реальных рентгеновских спектров объектов.

В случае Holmberg II X-1 была выбрана модель спектра BB+DISKPBW с $p = 0.5$ из работы [79], примененная авторами для описания наблюдений за 15 апреля 2004. Для NGC 6946 ULX-1 в литературе доступно существенно меньше данных, чем для остальных объектов. Мы взяли результаты аппроксимации мо-

делью DISKBB+POWERLAW спектра этого источника за 7 сентября 2001 из работы [18]. Для двух объектов в галактике NGC 1313 использовались результаты из статьи [45]. В случае NGC 1313 X-1 были взяты параметры моделей, описывающих рентгеновские спектры за 17 октября 2000, 17 января 2004 и 23 ноября 2004. Для NGC 1313 X-2 мы использовали результаты тех же авторов за 25 декабря 2003 и 23 августа 2004.

NGC 5408 X-1 является единственным объектом нашего списка, для которого в 2010-ом году были получены три ряда одновременных наблюдений в оптическом (HST) и рентгеновском диапазоне (Chandra). Результаты этих наблюдений опубликованы в статье [60]. Для нашей работы мы взяли данные за 15 мая 2010, описанные моделью DISKBB+POWERLAW.

4.2.3. Результаты и обсуждение

Выбранные по литературе модели включают в себя как модель спектра объекта (например, DISKBB+POWERLAW, которая была выбрана для NGC 5408 X-1), так и модель поглощения, основным параметром которой является число атомов водорода на луче зрения N_H . Разные модели спектров, которые применяются для описания рентгеновских данных, после исправления за поглощение имеют наибольшее различие между собой в мягком рентгеновском диапазоне ниже 1 кэВ. Связано это с тем, что кванты с энергиями меньше 1 кэВ эффективно поглощаются в межзвездной среде, а учитывая неопределенность величины поглощения, восстановить истинное распределение энергии в спектре объекта в этом диапазоне крайне трудно. При этом разные модели с учетом поглощения, но с разным значением N_H , могут одинаково хорошо воспроизводить наблюдательные данные. Поэтому практически во всех работах других авторов наблюдательные данные (поглощенные спектры), аппроксимированные моделью с учетом поглощения, приводятся в неисправленном за найденное поглоще-

ние виде, так как в мягком рентгеновском диапазоне "исправленные" спектры с большой долей вероятности не будут соответствовать реальным спектральным распределениям энергии объектов. По этой причине в нашей работе [161] в качестве наблюдательных данных использовались аппроксимирующие их модели рентгеновских спектров с учетом поглощения. Для краткости далее в этом разделе воспроизведенные на основе выбранных моделей поглощенные рентгеновские спектры ULX будут именоваться "рентгеновскими спектрами" или "рентгеновскими данными".

При аппроксимации поглощенных рентгеновских спектров моделью SCAD с моделью поглощения из работы [109] определялось новое значение N_H для всех пяти ULX. В оптическом диапазоне нашей моделью аппроксимировались исправленные за поглощение потоки. В отличие от рентгеновского диапазона, величина межзвездного поглощения в оптике как правило достаточно хорошо известна из спектроскопии окружающих объекты туманностей.

Используя соотношение $A_V = 4.5 \times 10^{-22} N_H$ [54], мы сравнили величины поглощения в оптическом и рентгеновском диапазоне (табл. 1.1 и 4.2). Во всех случаях величина A_V , полученная по оптическим данным и определяемая поглощением на пыли, меньше A_V , найденной по рентгеновским спектрам. Полный разброс разности $(A_V)_{X-ray} - (A_V)_{opt}$ составляет $\sim 0.^m2 \div 0.^m8$, среднее значение $\sim 0.^m5$. Такая разница на качественном уровне соответствует ожидаемому для сверхкритических дисков с мощным истечением вещества в ветрах. Действительно, рентгеновское излучение, которое в отличие от оптического излучения формируется в самых внутренних областях ветрового канала сверхкритического диска, может дополнительно поглощаться как газом "стенок" канала при отражении рентгеновского излучения от них, так и разреженным газом, который, как показывают расчеты (например, [113, 114]), должен заполнять ветровой канал.

В табл. 4.2 приведены результаты моделирования спектральных распреде-

Таблица 4.2. Модельные параметры ULX. $(N_H)_{lit}$ – число атомов водорода на луче зрения в единицах 10^{21} см^{-2} по опубликованным в работах [18, 45, 60, 79] данным, N_H – число атомов водорода на луче зрения в единицах 10^{21} см^{-2} , полученное при аппроксимации рентгеновских спектров нашей моделью; kT_{in} – температура на внутреннем радиусе диска R_{in} , выраженная в кэВ; M_{BH} – масса черной дыры в массах Солнца; \dot{m}_0 – начальный нормированный темп аккреции; f_{out} – доля болометрического потока, перерабатываемого в ветровом канале; R_{ph} – радиус фотосферы в единицах 10^{12} см .

ULX	$(N_H)_{lit}$	N_H	kT_{in}	M_{BH}	\dot{m}_0	f_{out}	R_{ph}
						$(\times 10^{-2})$	
Holmberg II X-1	0.87 ¹	0.94	0.81	17	270	4.1	2.3
NGC 6946 ULX-1	6.12 ²	4.3	0.77	20	180	4.2	3.5
NGC 1313 X-1	2.5 ³	2.5	0.82	16	150	0.18	1.6
NGC 1313 X-2	2.7 ³	2.5	0.99	8	200	1.8	1.3
NGC 5408 X-1	1.27 ⁴	0.97	0.85	14	250	3.8	2.6

¹Kajava et al. 2012 [79], ²Berghea et al. 2008 [18], ³Feng & Kaaret 2006 [45], ⁴Grise et al. 2012 [60].

лений энергии всех пяти объектов. Указаны полученные нами и опубликованные в литературе величины колонковой плотности N_H и $(N_H)_{lit}$ соответственно, массы черных дыр M_{BH} , темпы аккреции \dot{m}_0 , доли f_{out} переработанного в ветре болометрического потока аккреционного диска и радиусы фотосферы ветрового канала R_{ph} . Найденные значения M_{BH} соответствуют черным дырам звездных масс, а \dot{m}_0 сравнимы с темпом аккреции, реализуемом в системе SS 433². Средние по пяти исследуемым объектам значения параметров f_{out} и R_{ph} равны соответственно 2.8×10^{-2} и $2.3 \times 10^{12} \text{ см}$. Мы не приводим величины ошибок параметров, так как это только начальный этап нашего моделирования, в частности, при добавлении в нашу модель комптонизации параметры

² В случае SS 433 темпы аккреции составляют $\sim 10^{-4} M_{\odot}/\text{год}$ и соответствуют $\sim 300 M_{Edd}$ в предположении черной дыры $10 M_{\odot}$ ([40] и ссылки оттуда).

могут измениться. Тем не менее, как показывают предварительные результаты моделирования с учетом комптонизации (см. раздел 4.3), область значений параметров M_{BH} и \dot{m}_0 будет соответствовать сверхкритической аккреции на черные дыры звездных масс.

На рис. 4.3 представлены наблюдаемые спектральные распределения энергии ULX и их аппроксимация моделью SCAD. Исправленные за межзвездное поглощение оптические потоки (см. раздел 4.2.1) приведены вместе с барами ошибок. Черными крестами и серыми точками показаны поглощенные рентгеновские спектры, воспроизведенные по данным из литературы [18, 45, 60, 79] (модельные спектры). Моделью SCAD аппроксимировались только спектры, показанные черными крестами (эти данные подробно описаны в разделе 4.2.2). Чтобы не перегружать рисунки, спектры, демонстрирующие переменность объектов в рентгеновском диапазоне, показаны только для Holmberg II X-1, NGC 1313 X-1 и NGC 1313 X-2 (серые точки).

Линиями представлены модель и ее компоненты в различных спектральных диапазонах. Спектры излучения, формирующиеся в сверхкритическом аккреционном диске (зеленая штриховая линия) и ветровом канале (штрих-пунктир), дают в сумме интегральный спектр, показанный красным цветом. Синей линией показана аппроксимация рентгеновских данных нашей моделью. На нижних панелях даны невязки между наблюдениями (O) и моделью (C) в относительных единицах.

Holmberg II X – 1

Модель неплохо описывает распределение энергии Holmberg II X-1 (рис. 4.3 а). Единственной достаточно сильно выпадающей точкой является величина потока в фильтре F336W ($\lambda_{pivot} = 3359 \text{ \AA}$), приблизительно соответствующем фильтру U, что может быть связано с наличием бальмеровского скачка или переменностью объекта. Заметим, что при аппроксимации данных этого ULX использовались разновременные оптические наблюдения.

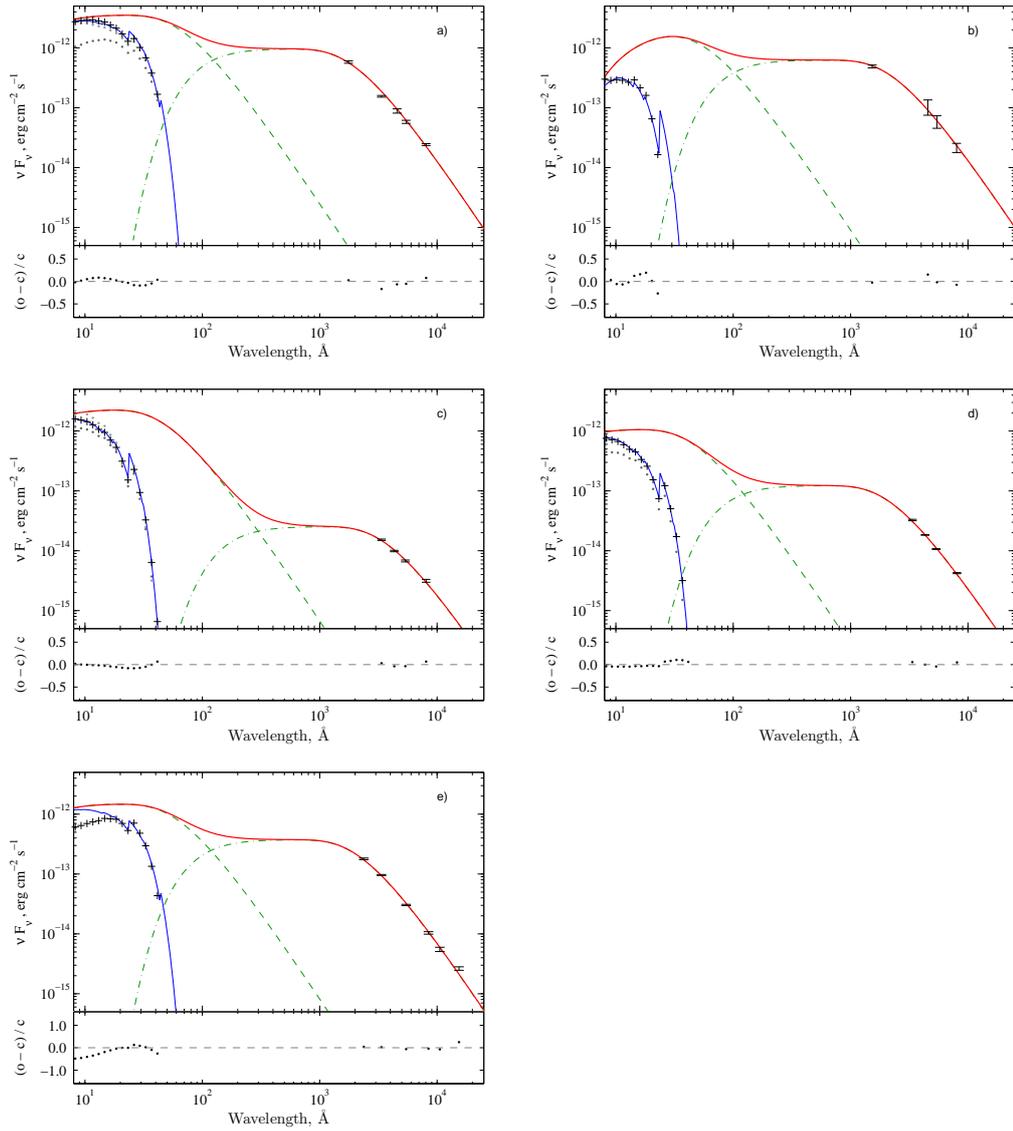


Рис. 4.3. Наблюдаемые распределения энергии ULX и их аппроксимация моделью сверхкритического диска с ветровым каналом для объектов Holmberg II X-1 (a), NGC 6946 ULX-1 (b), NGC 1313 X-1 (c), NGC 1313 X-2 (d), и NGC 5408 X-1 (e). Зеленой штриховой линией показан спектр, формирующийся в сверхкритическом аккреционном диске, зеленой штрих-пунктирной – в прогреваемом ветровом канале, красной сплошной линией – интегральный спектр. Черными крестами представлены не исправленные за поглощение модельные рентгеновские спектры, взятые из литературы. Синими сплошными кривыми показана аппроксимация рентгеновских спектров нашей моделью с учетом поглощения. Для Holmberg II X-1 и NGC 1313 X-1,2 на рисунке также представлены рентгеновские спектры (серые точки), демонстрирующие переменность этих ULX. Оптические данные (точки с барами ошибок) исправлены за поглощение. На нижних панелях приведены относительные отклонения наблюдаемых распределений энергии от модельных.

NGC 6946 ULX – 1

NGC 6946 ULX-1 (рис. 4.3b) демонстрирует очень низкий рентгеновский поток как в мягком, так и в жестком диапазоне в сравнении величинами ультрафиолетового и оптических потоков, что резко выделяет этот объект на фоне остальных ULX нашей выборки (рис. 4.3). Чтобы согласовать модель с рентгеновскими данными мы исключили из рассмотрения области $R \leq 5 R_{in}$. Мы предполагаем, что этот объект может быть виден под углом, незначительно превышающим раствор ветрового канала θ_f . В этом случае самые внутренние области канала сверхкритического диска могут закрываться внешними частями ветра и будут недоступны для непосредственного наблюдения³.

NGC 1313 X – 1, NGC 1313 X – 2

В случае объектов NGC 1313 X-1 и NGC 1313 X-2 модельные SED хорошо воспроизводят как оптические, так и рентгеновские данные (рис. 4.3c,d). Величины отклонений не превышают 10–15%. Отличительной особенностью NGC 1313 X-1 являются очень большие по сравнению с оптическими рентгеновские потоки (это объект с одним из самых больших среди ULX наблюдаемым отношением рентгеновской к оптической светимости ~ 4000 , см. главу 3). Значение f_{out} для этого объекта более чем на порядок величины ниже среднего значения, полученного по другим объектам.

NGC 5408 X – 1

³ Заметим, что после опубликования нашей работы [161], результаты которой описываются в данной главе диссертации, были получены новые оценки расстояния до галактики NGC 6946 (см. табл. 1.1). С учетом нового значения расстояния величина массы черной дыры в NGC 6946 ULX-1 (табл. 4.2) возрастет в примерно в 2.5 раза и составит $\sim 50M_{\odot}$, соответственно нормированный темп аккреции на внешний край диска уменьшится примерно в 1.6 раза ($\dot{m}_0 \propto M_{BH}^{-1/2}$) и будет равен $\sim 100M_{Edd}$. Такие массивные черные дыры звездных масс были подтверждены в недавнем открытии слияния двух черных дыр [1] гравитационного сигнала GW150914. Однако, окончательные и более корректные оценки величины массы и темпа аккреции NGC 6946 ULX-1 и других ULX планируется получить в рамках модели сверхкритического диска с учетом комптонизации, которая кратко описана в разделе 4.3. Поэтому в выводах этой главы мы приводим диапазон масс и темпов аккреции в соответствии с результатами нашей работы [161].

Для объекта NGC 5408 X-1 (рис. 4.3 e) не удалось получить хорошее согласие между моделью и рентгеновскими данными в области энергий выше ~ 0.8 кэВ (~ 16 Å), где модель SCAD дает потоки приблизительно в два раза больше полученных по данным из работы [60]. Как уже отмечалось выше, внутренние области диска могут быть покрыты короной, которая перехватывает и комптонизирует их излучение. Возможно, что в случае NGC 5408 X-1 корона перехватывает существенно больше излучения диска, чем в других объектах. С наличием короны мы связываем расхождение между моделью и рентгеновскими данными (для сравнения см. модель этого объекта с учетом комптонизации в разделе 4.3). В оптическом диапазоне наша модель неплохо воспроизводит наблюдаемые потоки. Небольшой избыток наблюдается только в инфракрасной области в фильтре F160W ($\lambda_{pivot} = 15369$ Å).

Итак, в целом модель сверхкритического диска с ветровым каналом дает хорошее согласие между наблюдаемым и расчетным распределениями энергии ULX от мягкого рентгеновского до оптического диапазона. При этом, получаемые оценки масс черных дыр и темпов аккреции соответствуют сверхкритической аккреции на черные дыры звездных масс.

В разделе 4.1.2, посвященном описанию модели, отмечалось, что величины некоторых параметров модели были приняты фиксированными, например, раствор канала сверхкритического диска θ_f и раствор ветрового канала, который сформирован ветром сверхкритического диска, мы приняли равными 45° . В рамках нашего простого подхода изменение раствора канала изменит наблюдаемую светимость, то есть в конечном итоге несколько переопределит массу черной дыры, $M_{BH} \propto \sin \theta_f^{-2}$. В работе [161] мы также не учитываем коллимацию излучения каналом в сверхкритическом диске и в ветре, которая может составлять величину $\sim 2-3$ при растворе канала $45 - 60^\circ$. Учет коллимации излучения каналом приведет к уменьшению оценки массы черной дыры примерно в два раза ($M_{BH} \propto 1 - \cos \theta_f$) и примерно во столько же раз изменит параметр

f_{out} .

В опубликованной в работе [161] версии модели мы не учитываем комптонизацию – важнейший компонент в формировании рентгеновских спектров ULX выше энергий $\sim 1 - 1.5$ кэВ. Мы полагаем, что внутренние части сверхкритического диска должны быть покрыты горячим газом, формирующим корону. Например, в полученных на XMM спектрах SS 433 Медведев и Фабрика [104] обнаружили компонент рентгеновского излучения с плоским спектром. Авторы предположили, что это комптонизированное излучение, сформированное во внутренних частях канала и отраженное внешними стенками канала. Аналогия с SS 433 дает нам основания предположить, что во внутренних частях сверхкритических дисков вполне может находиться горячий истекающий газ. Возможно, что в случае ULX этот газ представляет собой несколлимированные релятивистские струи или вещество, разогретое в процессе столкновения ветров [104]. Наличие такого газа будет приводить к комптонизации излучения покрытых им внутренних частей сверхкритического диска.

4.3. Модель SCAD с учетом комптонизации

В этом разделе мы кратко опишем только основные отличия версии модели сверхкритического аккреционного диска с учетом комптонизации (SCADc) от предыдущей версии модели, опубликованной в нашей работе [161], где комптонизация излучения не рассматривалась.

При учете эффектов комптонизации использовалась модель CompTT [155–157]. Корона покрывает внутренние области сверхкритического диска ($R < R_c$, см. рис. 4.1) и комптонизирует его излучение. Размер короны R_c , ее оптическая толщина τ и температура электронов kT_e являются параметрами модели. Кроме того, для большей гибкости модели мы вводим параметр f_c , который учитывает долю излучения сверхкритического диска, комптонизируемого в короне.

При этом в сверхкритическом диске над короной мы, как и прежде (см. выражение 4.6), используем зависимость температуры от радиуса $T \propto R^{-1/2}$. Такая же зависимость температуры принимается для газа в ветре сверхкритического диска.

В модели SCADc была также учтена коллимация излучения в ветровом канале. Для излучения областей сверхкритического диска, расположенных над короной, и для излучения короны фактор коллимации принимается равным $(1 - f_{out})/(1 - \cos \theta_f)$, где множитель $1 - f_{out}$ учитывает долю излучения, отраженную стенками ветрового канала, тогда как часть излучения диска, равная f_{out} , поглощается газом ветра и перерабатывается в оптическое излучение. Фактор коллимации для излучения ветрового канала равен $1/(1 - \cos \theta_f)$.

Модель SCADc имеет 8 основных параметров. Шесть из них определяют форму рентгеновского спектра: масса черной дыры M_{BH} , нормированный темп аккреции \dot{m}_0 , размер короны R_c , оптическая толщина короны τ , доля комптонизируемого излучения f_c и температура электронов kT_e . Остальные два параметра определяют форму спектра в ультрафиолетовом и оптическом диапазонах: доля перерабатываемого в ветре болометрического потока f_{out} и радиус фотосферы ветра R_{ph} . Таким образом, четыре из восьми основных параметров (M_{BH} , \dot{m}_0 , f_{out} и R_{ph}) совпадают с параметрами модели SCAD (см. 4.1.2).

На рис. 4.4 представлена аппроксимация моделью SCADc одновременных данных ультраяркого рентгеновского источника NGC 5408 X-1, полученных 15 мая 2010 г. на обсерватории Chandra и телескопе им. Хаббла (те же данные, что на рис. 4.3 e). Рентгеновские спектры объекта были предоставлены К. Е. Атапиным. Модельное распределение энергии находится в хорошем согласии с наблюдательными данными, нормированный $\chi^2 = 1.12$. В табл. 4.3 приводятся полученные для этого объекта параметры⁴. Температура электронов была

⁴ Модель SCADc была встроена К. Е. Атапиным в среду XSPEC, однако сейчас она недоступна для других пользователей. Ошибки значений параметров, представленные в табл. 4.2, были получены формальной

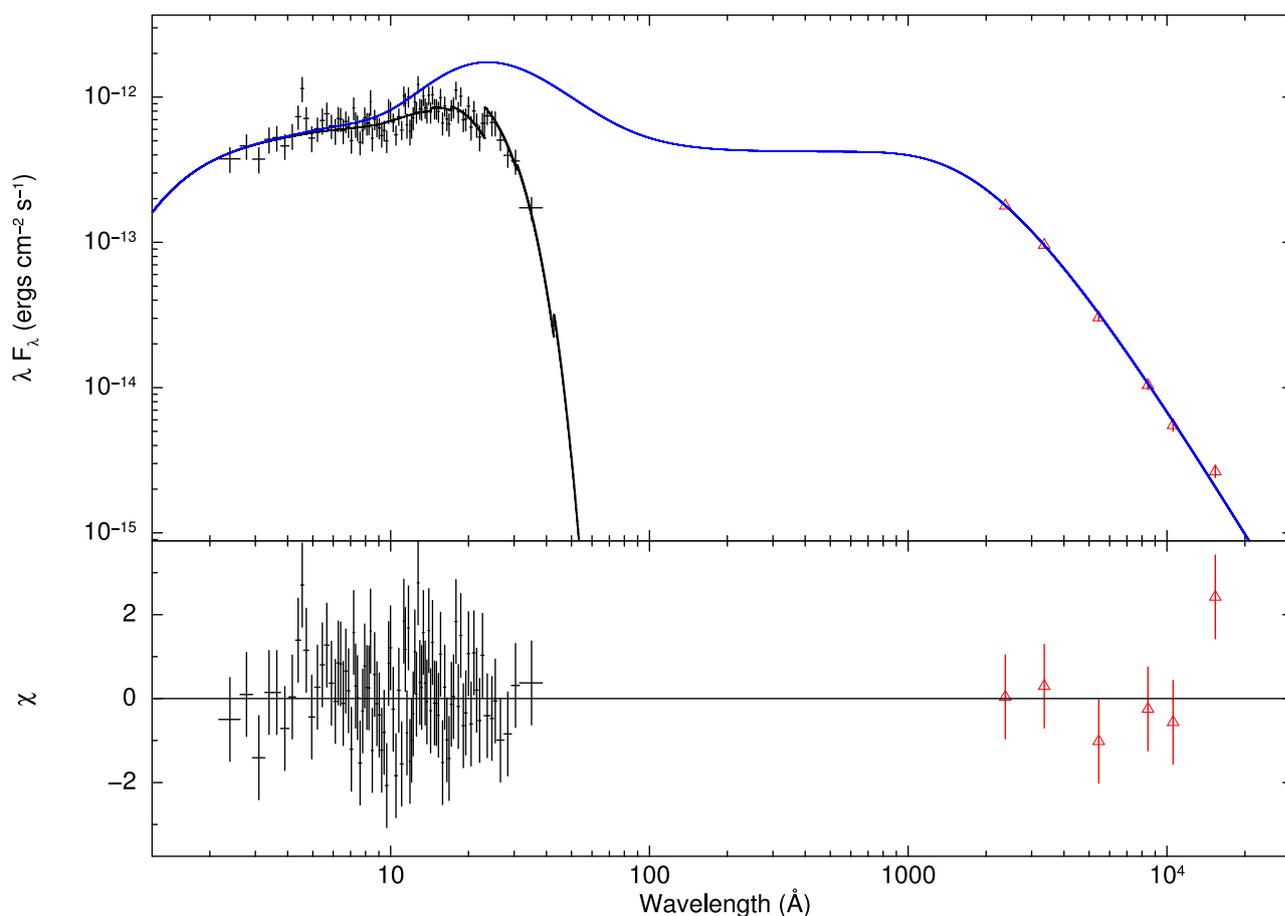


Рис. 4.4. Наблюдаемые и модельные распределения энергии для NGC 5408 X-1. Синим цветом показан интегральный модельный спектр, черными крестами (бары ошибок) представлен наблюдаемый поглощенный рентгеновский спектр. Черной кривой показана аппроксимация рентгеновского (поглощенного) спектра. Оптические и ультрафиолетовые данные (красным) исправлены за поглощение. На нижних панелях приведены невязки модели и наблюдений.

зафиксирована на значении 2 кэВ. Сравнивая значения основных параметров, полученные в рамках моделей SCAD (табл. 4.2) и SCADc, можно сделать вывод, что в целом обе модели приводят к близким результатам.

Выводы

В главе представлена модель сверхкритического аккреционного диска вокруг черной дыры звездной массы. В качестве базового приближения была аппроксимацией SCADc в XSPEC.

Таблица 4.3. Модельные параметры для NGC 5408 X-1. N_H – число атомов водорода на луче зрения в единицах 10^{21} см $^{-2}$; M_{BH} – масса черной дыры в массах Солнца; \dot{m}_0 – начальный нормированный темп аккреции; R_c – размер короны в единицах R_{in} ; τ – оптическая толщина короны; f_c – доля комптонизируемого излучения; f_{out} – доля болометрического потока, перерабатываемого в ветровом канале; R_{ph} – радиус фотосферы в единицах 10^{12} см.

N_H	M_{BH}	\dot{m}_0	R_c	τ	f_c	f_{out} ($\times 10^{-2}$)	R_{ph}
1.2 ± 0.4	11 ± 7	110 ± 50	42 ± 10	13 ± 9	0.22 ± 0.13	2.5 ± 1.5	1.6 ± 0.9

принята концепция сверхкритических дисков Шакуры-Сюняева. В версии модели SCAD, опубликованной в нашей работе [161], не рассматривались процессы комптонизации и коллимация излучения каналом ветра, поскольку основной акцент был сделан на моделировании спектров ULX в ультрафиолетовом и оптическом диапазонах. В рамках разработанной модели проведено моделирование пяти ультраярких рентгеновских источников: Holmberg II X-1, NGC 6946 ULX-1, NGC 1313 X-1, NGC 1313 X-2 и NGC 5408 X-1. Показано, что модельные спектральные распределения энергии находятся в хорошем согласии с наблюдаемыми распределениями энергии в спектрах ULX в оптическом диапазоне и мягком рентгеновском диапазоне ниже энергий 1.5 кэВ, где роль комптоновского рассеяния в формировании спектров ULX невелика. В рамках модели были получены оценки массы черных дыр исследуемых ULX от 8 до 20 масс Солнца и оценки начальных темпов аккреции от 150 до 270 эддингтоновских. Показано, что учет коллимации излучения приведет к уменьшению получаемых значений масс черных дыр в $M_{BH} \propto 1 - \cos \theta_f \sim 2 - 3$ раза при углах раствора ветрового канала $\theta_f \approx 45^\circ \div 60^\circ$; в то же время, уменьшение угла раствора канала приведет к возрастанию оценки масс обратно пропорционально $\sin^2 \theta_f$. Таким образом, получаемые оценки масс по-прежнему будут соответствовать черным

дырам звездных масс.

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 в УФ-оптическом и рентгеновском диапазоне 0.3–10 кэВ. 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.

В процессе подготовки наблюдательных данных для моделирования выполнена фотометрия Holmberg II X-1 и NGC 6946 ULX-1 по данным телескопа им. Хаббла, получены величины исправленных за межзвездное поглощение потоков обоих объектов. Величины поглощения A_V были определены по отношению линий бальмеровской серии водорода в спектрах туманностей вокруг Holmberg II X-1 ($A_V \approx 0.23^m$) и NGC 6946 ULX-1 ($A_V \approx 1.34^m$).

Заключение

Результаты и выводы диссертационной работы:

- Исследованы спектры оптических двойников ультраярких рентгеновских источников NGC 5204 X-1, NGC 4559 X-7, Holmberg II X-1 и Holmberg IX X-1, полученные на телескопе Subaru в феврале 2011 г. В спектрах всех четырех объектов были обнаружены широкие эмиссионные линии He II $\lambda 4686$, He I $\lambda 5876$, H β и H α . Помимо этих спектральных линий, в Holmberg IX X-1 надежно детектированы эмиссии He I $\lambda\lambda 6678, 7065$, а в Holmberg II X-1 – эмиссия He II $\lambda 5411$. 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. Получено среднее отношение ширин линий $FWHM(He II)/FWHM(H\alpha) \approx 0.8$. Обнаружено, что амплитуда переменности лучевой скорости линии He II не превышает 500 км/с и имеет среднее значение $\sim 200 - 250$ км/с. Найдена значительная переменность ширины (до ≈ 3 раз) и эквивалентной ширины (до ≈ 2 раз) линии He II в спектрах ULX от ночи к ночи.
- Проведен 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. Спектральные данные NGC 5408 X-1 и NGC 1313 X-2 были взяты из архива телескопа VLT и обработаны, данные для NGC 7793 P13 взяты из литературы. Эти ULX представляют собой полную выборку объектов, для которых когда-либо была проведена глубокая спектроскопия в оптическом диапазоне. На основе проведенного анализа показано, что исследуемые ULX обладают одним и тем же типом спектра и представляют собой однородный класс объектов. Показано, что ультраяркие источни-

ки по типу своих спектров имеют сильное сходство со звездами WNLh или LBV в горячей фазе, а также с единственным известным в Галактике сверх-аккретором SS 433.

- Представлен ряд аргументов в пользу того, 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 промежуточных масс. 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 результате проведенного анализа всей совокупности фактов сделан вывод, что исследованные ультраяркие рентгеновские источники наиболее вероятно представляют собой сверхкритические аккреционные диски с черными дырами звездных масс, а их оптические спектры формируются в ветрах, истекающих с поверхности этих дисков.
- По данным наблюдений космического телескопа им. Хаббла и обсерватории Chandra отождествлены в оптическом диапазоне ультраяркие рентгеновские источники NGC 5474 X-1, M66 X-1, NGC 4559 X-1 и NGC 4395 ULX-1. Оптические двойники первых трех источников обнаружены впервые. Показано, что NGC 5474 X-1, M66 X-1 и NGC 4559 X-10 являются одними из самых слабых ультраярких рентгеновских источников в оптическом диапазоне, по типу спектров все три объекта представляют собой холодные сверхгиганты спектрального класса F-G.
- В результате анализа отношения рентгеновской к оптической светимости ULX обнаружено, что NGC 5474 X-1 и M66 X-1 имеют наибольшее среди хорошо изученных ULX отношение рентгеновской к оптической светимости. Сделан вывод, что любой источник с отношением рентгеновской к

оптической светимости $\gtrsim 100 \div 200$ является надежным кандидатом в ультраяркие рентгеновские источники.

- 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.
- Разработана модель сверхкритических аккреционных дисков в рамках приближения Шакуры-Сюняева, способная объяснить спектральное распределение энергии ультраярких рентгеновских источников в оптическом, ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах. Модель позволяет получать оценки масс и начальных темпов аккреции.

В заключении хотелось бы выразить огромную благодарность С. Н. Фабрике за интересную тему и руководство работой, поблагодарить О. Н. Шолухову за всестороннюю помощь в работе, А. Ф. Валеева за обучение методике наблюдений на телескопе БТА и на приборе SCORPIO и за помощь при проведении наблюдений, сотрудников Лаборатории Физики Звезд за многочисленные обсуждения, друзей и родных за моральную поддержку на протяжении всей работы. Отдельно хотелось бы поблагодарить С. В. Карпова и А. Ф. Валеева за внимательное прочтение рукописи диссертации.

Список литературы

- [1] Abbott, B. P., et al. 2016, *Physical Review Letters*, 116, 061102
- [2] Abolmasov, P., Fabrika, S., Sholukhova, O., & Afanasiev, V. 2007, *Astrophysical Bulletin*, 62, 36
- [3] Abolmasov, P., Fabrika, S., Sholukhova, O., & Kotani, T. 2008, *ArXiv:0809.0409*
- [4] Abolmasov, P. K., Swartz, D. A., Fabrika, S., Ghosh, K. K., Sholukhova, O., & Tennant, A. F. 2007, *Astrophys. J.*, 668, 124
- [5] Abramowicz, M. A., Calvani, M., & Nobili, L. 1980, *Astrophys. J.*, 242, 772
- [6] Abramowicz, M. A., Czerny, B., Lasota, J. P., & Szuszkiewicz, E. 1988, *Astrophys. J.*, 332, 646
- [7] Afanasiev, V. L., & Moiseev, A. V. 2005, *Astronomy Letters*, 31, 194
- [8] Aird, J., et al. 2010, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.*, 401, 2531
- [9] Alam, S., et al. 2015, *Astrophys. J. Suppl.*, 219, 12
- [10] Allen, M. G., Groves, B. A., Dopita, M. A., Sutherland, R. S., & Kewley, L. J. 2008, *Astrophys. J. Suppl.*, 178, 20
- [11] Appenzeller, I., et al. 1998, *The Messenger*, 94, 1
- [12] Atapin, K., Fabrika, S., Medvedev, A., & Vinokurov, A. 2015, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.*, 446, 893
- [13] Avdan, S., et al. 2016, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.*, 455, L91

- [14] Bachetti, M., Harrison, F. A., Walton, D. J., Grefenstette, B. W., Chakrabarty, D., Fürst, F., & Barret, D. 2014, *Nature*, 514, 202
- [15] Bachetti, M., et al. 2013, *Astrophys. J.*, 778, 163
- [16] Baumgardt, H., Hopman, C., Portegies Zwart, S., & Makino, J. 2006, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.*, 372, 467
- [17] Berghea, C. T., & Dudik, R. P. 2012, *Astrophys. J.*, 751, 104
- [18] Berghea, C. T., Weaver, K. A., Colbert, E. J. M., & Roberts, T. P. 2008, *Astrophys. J.*, 687, 471
- [19] Bisnovatyi-Kogan, G. S., & Blinnikov, S. I. 1977, *Astronom. and Astrophys.*, 59, 111
- [20] Bregman, J. N., Felberg, J. N., Seitzer, P. J., Liu, J., & Kümmel, M. 2012, *ArXiv:1205.0424*
- [21] Bushouse, H., & Simon, B. 1994, in *Astronomical Society of the Pacific Conference Series, Vol. 61, Astronomical Data Analysis Software and Systems III*, ed. D. R. Crabtree, R. J. Hanisch, & J. Barnes, 339
- [22] Caballero-García, M. D., & Fabian, A. C. 2010, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.*, 402, 2559
- [23] Cardelli, J. A., Clayton, G. C., & Mathis, J. S. 1989, *Astrophys. J.*, 345, 245
- [24] Casares, J., Charles, P. A., Jones, D. H. P., Rutten, R. G. M., & Callanan, P. J. 1991, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.*, 250, 712
- [25] Cherepashchuk, A. M., Aslanov, A. A., & Kornilov, V. G. 1982, *Sov. Astronom.*, 26, 697

- [26] Colbert, E. J. M., & Mushotzky, R. F. 1999, *Astrophys. J.*, 519, 89
- [27] Colbert, E. J. M., & Ptak, A. F. 2002, *Astrophys. J. Suppl.*, 143, 25
- [28] Cropper, M., Soria, R., Mushotzky, R. F., Wu, K., Markwardt, C. B., & Pakull, M. 2004, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.*, 349, 39
- [29] Crowther, P. A., Barnard, R., Carpano, S., Clark, J. S., Dhillon, V. S., & Pollock, A. M. T. 2010, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.*, 403, L41
- [30] Crowther, P. A., & Smith, L. J. 1997, *Astronom. and Astrophys.*, 320, 500
- [31] Crowther, P. A., & Walborn, N. R. 2011, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.*, 416, 1311
- [32] Cseh, D., Gris e, F., Corbel, S., & Kaaret, P. 2011, *Astrophys. J.*, 728, L5
- [33] 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
- [34] de Vaucouleurs, G., de Vaucouleurs, A., Corwin, Jr., H. G., Buta, R. J., Paturel, G., & Fouqu e, P. 1991, *Third Reference Catalogue of Bright Galaxies*. Springer, New York
- [35] Della Ceca, R., et al. 2015, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.*, 447, 3227
- [36] Dolphin, A. E. 2000, *Publ. Astronom. Soc. Pacific*, 112, 1383
- [37] Doroshenko, V., Santangelo, A., & Ducci, L. 2015, *Astronom. and Astrophys.*, 579, A22
- [38] Dunne, B. C., Gruendl, R. A., & Chu, Y.-H. 2000, *Astronom. J.*, 119, 1172
- [39] Fabbiano, G. 1989, *Annu. Rev. Astronom. Astrophys.*, 27, 87

- [40] Fabrika, S. 2004, *Astrophysics and Space Physics Reviews*, 12, 1
- [41] Fabrika, S., & Mescheryakov, A. 2001, in *IAU Symposium, Vol. 205, Galaxies and their Constituents at the Highest Angular Resolutions*, ed. R. T. Schilizzi, 268
- [42] Fabrika, S., Ueda, Y., Vinokurov, A., Sholukhova, O., & Shidatsu, M. 2015, *Nature Physics*, 11, 551
- [43] Fabrika, S., Vinokurov, A., & Atapin, K. 2016, [ArXiv:1601.05971](https://arxiv.org/abs/1601.05971)
- [44] Fabrika, S., Vinokurov, A., Atapin, K., & Sholukhova, O. 2016, 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, 37–42
- [45] Feng, H., & Kaaret, P. 2006, *Astrophys. J.*, 650, L75
- [46] Feng, H., & Soria, R. 2011, *New Astronomy Rev.*, 55, 166
- [47] Freitag, M., Gürkan, M. A., & Rasio, F. A. 2006, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.*, 368, 141
- [48] Gierliński, M., Done, C., & Page, K. 2009, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.*, 392, 1106
- [49] Gierliński, M., Done, C., & Page, K. 2008, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.*, 388, 753
- [50] 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

- [51] Gladstone, J. C., Roberts, T. P., & Done, C. 2009, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.*, 397, 1836
- [52] Goad, M. R., Roberts, T. P., Reeves, J. N., & Uttley, P. 2006, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.*, 365, 191
- [53] Gonzaga, S., & et al. 2011, *ACS Data Handbook v.6.0*
- [54] Gorenstein, P. 1975, *Astrophys. J.*, 198, 95
- [55] Gotthelf, E., Halpern, J. P., Patterson, J., & Rich, R. M. 1992, *Astronom. J.*, 103, 219
- [56] Gräfener, G., & Hamann, W.-R. 2008, *Astronom. and Astrophys.*, 482, 945
- [57] Gräfener, G., Koesterke, L., & Hamann, W.-R. 2002, *Astronom. and Astrophys.*, 387, 244
- [58] Grandi, S. A., & Stone, R. P. S. 1982, *Publ. Astronom. Soc. Pacific*, 94, 80
- [59] Grimm, H.-J., Gilfanov, M., & Sunyaev, R. 2003, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.*, 339, 793
- [60] Grisé, F., Kaaret, P., Corbel, S., Feng, H., Cseh, D., & Tao, L. 2012, *Astrophys. J.*, 745, 123
- [61] Grisé, F., Kaaret, P., Pakull, M. W., & Motch, C. 2011, *Astrophys. J.*, 734, 23
- [62] Grisé, F., Pakull, M. W., Soria, R., & Motch, C. 2009, in *American Institute of Physics Conference Series*, Vol. 1126, American Institute of Physics Conference Series, ed. J. Rodriguez & P. Ferrando, 201–203
- [63] Grisé, F., Pakull, M. W., Soria, R., Motch, C., Smith, I. A., Ryder, S. D., & Böttcher, M. 2008, *Astronom. and Astrophys.*, 486, 151

- [64] Gutiérrez, C. M. 2013, *Astronom. and Astrophys.*, 549, A81
- [65] Hamann, W.-R., & Gräfener, G. 2003, *Astronom. and Astrophys.*, 410, 993
- [66] Hamann, W.-R., & Koesterke, L. 1998, *Astronom. and Astrophys.*, 333, 251
- [67] Heida, M., Jonker, P. G., Torres, M. A. P., & Mineo, S. 2012, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.*, 424, 1563
- [68] Heida, M., Jonker, P. G., Torres, M. A. P., Roberts, T. P., Miniutti, G., Fabian, A. C., & Ratti, E. M. 2013, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.*, 433, 681
- [69] Heida, M., Jonker, P. G., Torres, M. A. P., Roberts, T. P., Walton, D. J., Moon, D.-S., Stern, D., & Harrison, F. A. 2016, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.*, 459, 771
- [70] Heida, M., et al. 2015, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.*, 453, 3510
- [71] Helfand, D. J. 1984, *Publ. Astronom. Soc. Pacific*, 96, 913
- [72] Hunstead, R. W., Wu, K., & Campbell-Wilson, D. 1997, in *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, Vol. 121, IAU Colloq. 163: Accretion Phenomena and Related Outflows, ed. D. T. Wickramasinghe, G. V. Bicknell, & L. Ferrario, 63
- [73] Jaroszynski, M., Abramowicz, M. A., & Paczynski, B. 1980, *Acta Astronomica*, 30, 1
- [74] Jiang, Y.-F., Stone, J. M., & Davis, S. W. 2014, *Astrophys. J.*, 796, 106
- [75] Kaaret, P. 2005, *Astrophys. J.*, 629, 233
- [76] Kaaret, P., & Corbel, S. 2009, *Astrophys. J.*, 697, 950
- [77] Kaaret, P., Feng, H., Wong, D. S., & Tao, L. 2010, *Astrophys. J.*, 714, L167

- [78] Kaaret, P., Ward, M. J., & Zezas, A. 2004, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.*, 351, L83
- [79] Kajava, J. J. E., Poutanen, J., Farrell, S. A., Grisé, F., & Kaaret, P. 2012, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.*, 422, 990
- [80] 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
- [81] King, A. R., Davies, M. B., Ward, M. J., Fabbiano, G., & Elvis, M. 2001, *Astrophys. J.*, 552, L109
- [82] Kong, A. K. H., & Di Stefano, R. 2005, *Astrophys. J.*, 632, L107
- [83] Kong, A. K. H., Di Stefano, R., & Yuan, F. 2004, *Astrophys. J.*, 617, L49
- [84] Kubota, K., Ueda, Y., Fabrika, S., Medvedev, A., Barsukova, E. A., Sholukhova, O., & Goranskij, V. P. 2010, *Astrophys. J.*, 709, 1374
- [85] Kuntz, K. D., Gruendl, R. A., Chu, Y.-H., Chen, C.-H. R., Still, M., Mukai, K., & Mushotzky, R. F. 2005, *Astrophys. J.*, 620, L31
- [86] Kuranov, A. G., Popov, S. B., Postnov, K. A., Volonteri, M., & Perna, R. 2007, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.*, 377, 835
- [87] Lang, C. C., Kaaret, P., Corbel, S., & Mercer, A. 2007, *Astrophys. J.*, 666, 79
- [88] Lee, M. G., & Jang, I. S. 2013, *Astrophys. J.*, 773, 13
- [89] Lehmann, I., et al. 2005, *Astronom. and Astrophys.*, 431, 847
- [90] Leitherer, C., et al. 1999, *Astrophys. J. Suppl.*, 123, 3
- [91] Lipunova, G. V. 1999, *Astronomy Letters*, 25, 508

- [92] Liu, J. 2011, *Astrophys. J. Suppl.*, 192, 10
- [93] Liu, J., Orosz, J., & Bregman, J. N. 2012, *Astrophys. J.*, 745, 89
- [94] Liu, J.-F., Bregman, J., Miller, J., & Kaaret, P. 2007, *Astrophys. J.*, 661, 165
- [95] Liu, J.-F., & Bregman, J. N. 2005, *Astrophys. J. Suppl.*, 157, 59
- [96] Liu, J.-F., Bregman, J. N., Bai, Y., Justham, S., & Crowther, P. 2013, *Nature*, 503, 500
- [97] Liu, J.-F., Bregman, J. N., & Irwin, J. 2006, *Astrophys. J.*, 642, 171
- [98] Liu, J.-F., Bregman, J. N., & Seitzer, P. 2002, *Astrophys. J.*, 580, L31
- [99] Liu, J.-F., Bregman, J. N., & Seitzer, P. 2004, *Astrophys. J.*, 602, 249
- [100] Long, K. S., & van Speybroeck, L. P. 1983, in *Accretion-Driven Stellar X-ray Sources*, ed. W. H. G. Lewin & E. P. J. van den Heuvel (Cambridge: Cambridge University Press), 117–146
- [101] Maccacaro, T., et al. 1982, *Astrophys. J.*, 253, 504
- [102] Madau, P., & Rees, M. J. 2001, *Astrophys. J.*, 551, L27
- [103] Madhusudhan, N., Justham, S., Nelson, L., Paxton, B., Pfahl, E., Podsiadlowski, P., & Rappaport, S. 2006, *Astrophys. J.*, 640, 918
- [104] Medvedev, A., & Fabrika, S. 2010, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.*, 402, 479
- [105] Medvedev, P. S., Fabrika, S. N., Vasiliev, V. V., Goranskij, V. P., & Barsukova, E. A. 2013, *Astronomy Letters*, 39, 826
- [106] Miller, J. M., Fabbiano, G., Miller, M. C., & Fabian, A. C. 2003, *Astrophys. J.*, 585, L37

- [107] Miller, J. M., Fabian, A. C., & Miller, M. C. 2004, *Astrophys. J.*, 614, L117
- [108] Miller-Jones, J. C. A., Jonker, P. G., Dhawan, V., Brisken, W., Rupen, M. P., Nelemans, G., & Gallo, E. 2009, *Astrophys. J.*, 706, L230
- [109] Morrison, R., & McCammon, D. 1983, *Astrophys. J.*, 270, 119
- [110] Motch, C., Pakull, M. W., Gris e, F., & Soria, R. 2011, *Astronomische Nachrichten*, 332, 367
- [111] Motch, C., Pakull, M. W., Soria, R., Gris e, F., & Pietrzyński, G. 2014, *Nature*, 514, 198
- [112] Mukai, K., Still, M., Corbet, R. H. D., Kuntz, K. D., & Barnard, R. 2005, *Astrophys. J.*, 634, 1085
- [113] Ohsuga, K., & Mineshige, S. 2011, *Astrophys. J.*, 736, 2
- [114] Ohsuga, K., Mori, M., Nakamoto, T., & Mineshige, S. 2005, *Astrophys. J.*, 628, 368
- [115] Okuda, T., Lipunova, G. V., & Molteni, D. 2009, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.*, 398, 1668
- [116] Osterbrock, D. E., & Ferland, G. J. 2006, *Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei* (University Science Books)
- [117] Osterbrock, D. E., & Martel, A. 1992, *Publ. Astronom. Soc. Pacific*, 104, 76
- [118] Pakull, M. W., Gris e, F., & Motch, C. 2006, in *IAU Symposium*, Vol. 230, *Populations of High Energy Sources in Galaxies*, ed. E. J. A. Meurs & G. Fabbiano, 293–297
- [119] Pakull, M. W., & Mirioni, L. 2002, *ArXiv:astro-ph/0202488*

- [120] 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
- [121] Pintore, F., Zampieri, L., Wolter, A., & Belloni, T. 2014, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.*, 439, 3461
- [122] Portegies Zwart, S. F., Baumgardt, H., Hut, P., Makino, J., & McMillan, S. L. W. 2004, *Nature*, 428, 724
- [123] Poutanen, J., Fabrika, S., Valeev, A. F., Sholukhova, O., & Greiner, J. 2013, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.*, 432, 506
- [124] Poutanen, J., Lipunova, G., Fabrika, S., Butkevich, A. G., & Abolmasov, P. 2007, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.*, 377, 1187
- [125] Ptak, A., Colbert, E., van der Marel, R. P., Roye, E., Heckman, T., & Towne, B. 2006, *Astrophys. J. Suppl.*, 166, 154
- [126] Radburn-Smith, D. J., et al. 2011, *Astrophys. J. Suppl.*, 195, 18
- [127] Ramsey, C. J., Williams, R. M., Gruendl, R. A., Chen, C.-H. R., Chu, Y.-H., & Wang, Q. D. 2006, *Astrophys. J.*, 641, 241
- [128] Ranalli, P., Comastri, A., & Setti, G. 2003, *Astronom. and Astrophys.*, 399, 39
- [129] Raymond, J. C. 1993, *Astrophys. J.*, 412, 267
- [130] Roberts, T. P. 2007, *Astrophys. and Space Sci.*, 311, 203
- [131] 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

- [132] Roberts, T. P., Goad, M. R., Ward, M. J., Warwick, R. S., & Lira, P. 2002, ArXiv:astro-ph/0202017
- [133] Roberts, T. P., & Warwick, R. S. 2000, Monthly Notices Roy. Astronom. Soc., 315, 98
- [134] Roberts, T. P., Warwick, R. S., Ward, M. J., Goad, M. R., & Jenkins, L. P. 2005, Monthly Notices Roy. Astronom. Soc., 357, 1363
- [135] Sądowski, A., Narayan, R., Tchekhovskoy, A., Abarca, D., Zhu, Y., & McKinney, J. C. 2015, Monthly Notices Roy. Astronom. Soc., 447, 49
- [136] Schaerer, D., Contini, T., & Pindao, M. 1999, Astrophys. J. Suppl., 136, 35
- [137] Schlegel, D. J., Finkbeiner, D. P., & Davis, M. 1998, Astrophys. J., 500, 525
- [138] Shakura, N. I., & Sunyaev, R. A. 1973, Astronom. and Astrophys., 24, 337
- [139] Shklovskii, I. S. 1981, Sov. Astronom., 25, 315
- [140] Sholukhova, O. N., Fabrika, S. N., Zharova, A. V., Valeev, A. F., & Goranskij, V. P. 2011, Astrophysical Bulletin, 66, 123
- [141] Silverman, J. M., & Filippenko, A. V. 2008, Astrophys. J., 678, L17
- [142] Soria, R., Cropper, M., Pakull, M., Mushotzky, R., & Wu, K. 2005, Monthly Notices Roy. Astronom. Soc., 356, 12
- [143] Soria, R., Hakala, P. J., Hau, G. K. T., Gladstone, J. C., & Kong, A. K. H. 2012, Monthly Notices Roy. Astronom. Soc., 420, 3599
- [144] Soria, R., Wickramasinghe, D. T., Hunstead, R. W., & Wu, K. 1998, Astrophys. J., 495, L95

- [145] Soria, R., Wu, K., & Johnston, H. M. 1999, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.*, 310, 71
- [146] Stobbart, A.-M., Roberts, T. P., & Wilms, J. 2006, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.*, 368, 397
- [147] Sutton, A. D., Roberts, T. P., & Middleton, M. J. 2013, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.*, 435, 1758
- [148] Swartz, D. A., Ghosh, K. K., Tennant, A. F., & Wu, K. 2004, *Astrophys. J. Suppl.*, 154, 519
- [149] Swartz, D. A., Soria, R., Tennant, A. F., & Yukita, M. 2011, *Astrophys. J.*, 741, 49
- [150] Swartz, D. A., Tennant, A. F., & Soria, R. 2009, *Astrophys. J.*, 703, 159
- [151] Tao, L., Feng, H., Grisé, F., & Kaaret, P. 2011, *Astrophys. J.*, 737, 81
- [152] Tao, L., Kaaret, P., Feng, H., & Grisé, F. 2012, *Astrophys. J.*, 750, 110
- [153] Tikhonov, N. A. 2014, *Astronomy Letters*, 40, 537
- [154] Tikhonov, N. A., Lebedev, V. S., & Galazutdinova, O. A. 2015, *Astronomy Letters*, 41, 239
- [155] Titarchuk, L. 1994, *Astrophys. J.*, 434, 570
- [156] Titarchuk, L., & Hua, X.-M. 1995, *Astrophys. J.*, 452, 226
- [157] Titarchuk, L., & Lyubarskij, Y. 1995, *Astrophys. J.*, 450, 876
- [158] Torres-Dodgen, A. V., & Massey, P. 1988, *Astronom. J.*, 96, 1076
- [159] Tully, R. B., et al. 2013, *Astronom. J.*, 146, 86

- [160] van Kerkwijk, M. H., Geballe, T. R., King, D. L., van der Klis, M., & van Paradijs, J. 1996, *Astronom. and Astrophys.*, 314, 521
- [161] Vinokurov, A., Fabrika, S., & Atapin, K. 2013, *Astrophysical Bulletin*, 68, 139
- [162] Vinokurov, A., Fabrika, S., & Atapin, K. 2016, *ArXiv:1606.03024*
- [163] Walborn, N. R., & Fitzpatrick, E. L. 2000, *Publ. Astronom. Soc. Pacific*, 112, 50
- [164] Walton, D. J., et al. 2015, *Astrophys. J.*, 799, 122
- [165] Walton, D. J., Middleton, M. J., Rana, V., Miller, J. M., Harrison, F. A., Fabian, A. C., & Bachetti, M. 2015, *Astrophys. J.*, 806, 65
- [166] Walton, D. J., Roberts, T. P., Mateos, S., & Heard, V. 2011, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.*, 416, 1844
- [167] Walton, D. J., et al. 2013, *Astrophys. J.*, 779, 148
- [168] Watson, M. G., et al. 2009, *Astronom. and Astrophys.*, 493, 339
- [169] Whitmore, B. 1995, in *Calibrating Hubble Space Telescope. Post Servicing Mission*, ed. A. P. Koratkar & C. Leitherer, 269
- [170] Winter, L. M., Mushotzky, R. F., & Reynolds, C. S. 2006, *Astrophys. J.*, 649, 730
- [171] Yang, L., Feng, H., & Kaaret, P. 2011, *Astrophys. J.*, 733, 118