

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

О природе ультраярких рентгеновских источников

С.Н. Фабрика, К.Е. Атапин, А.С. Винокуров

Ультраяркие рентгеновские источники (ultraluminous X-ray sources, ULXs) находятся во внешних галактиках, их рентгеновские светимости превышают светимости самых ярких чёрных дыр Млечного Пути, а также галактик Местной группы в несколько сотен и тысяч раз. Открыт новый класс объектов — ультраяркие рентгеновские пульсары (ULXP) и обнаружены высокоскоростные истечения, со скоростью 0,2 скорости света в рентгеновском диапазоне. ULX и ULXP полностью соответствуют представлениям о сверхкритической аккреции. Пять ULXs в рентгеновских спектрах мощности показывают квазипериодические осцилляции и шум с плоской вершиной. Оптические спектры ULX очень похожи на спектры SS 433, поздних азотных звёзд (WNL/WR) или ярких голубых переменных. Результаты исследований позволяют предположить, что ULXs — это системы со сверхкритическими аккреционными дисками.

Ключевые слова: ультраяркие рентгеновские источники, оптическая спектроскопия, рентгеновские данные, квазипериодические осцилляции

PACS numbers: 97.60.Gb, 97.80.Jp, 98.70.Qy

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2019.04.038595>

Содержание

1. Введение (1240).
 2. Рентгеновские спектры: континуум и невязки (1241).
 3. Спектры мощности: плоский участок и квазипериодические осцилляции (1243).
 4. Оптические спектры (1246).
- Список литературы (1248).

1. Введение

Ультраяркие рентгеновские источники (UltraLuminous X-ray sources, ULXs) находятся во внешних галактиках; их рентгеновские светимости достигают величины $\gtrsim 2 \times 10^{39}$ эрг с^{-1} , что больше светимости большинства других чёрных дыр. Хотя ультраяркие рентгеновские источники могут содержать и более массивные чёрные дыры, чем двойные системы в нашей Галактике и Местной группе (массой от 5 до $100 M_{\odot}$ в ULXs против $5 - 15 M_{\odot}$ в Галактике), их светимость неизбежно должна превышать эддингтоновский предел, линейно зависящий от массы: $L_{\text{Edd}} \sim 1,5 \times 10^{39} m_{10}$ эрг с^{-1} , где m_{10} — масса

объекта, делённая на $10 M_{\odot}$ [1, 2]. Природа этих объектов до конца не раскрыта, однако можно уверенно утверждать, что ULXs являются тесными двойными системами, в которых звезда-донор целиком заполняет полость Роша и происходит аккреция в сверхкритическом (сверхэддингтоновском) режиме [3].

Как только ультраяркие источники были открыты, была высказана идея, что эти объекты могут содержать гораздо более массивные чёрные дыры, с массами $10^3 - 10^5 M_{\odot}$ (Intermediate Mass Black Holes, IMBH) [4, 5], занимающие промежуточное положение между чёрными дырами звёздных масс в двойных системах и сверхмассивными чёрными дырами в ядрах галактик. Однако по мере накопления наблюдательных данных становилось понятно, что свойства ULXs по многим параметрам (оптические и рентгеновские спектры, переменность) не вписываются в представления о IMBH. Другой идеей, которая в итоге стала доминировать, было предположение о сходстве ULXs со сверхаккретором SS 433, расположенным в Галактике [6]. SS 433 знаменит своими постоянно действующими струями, выбрасываемыми из внутренних частей аккреционного диска со скоростью 0,26c. В оптических спектрах SS 433 наблюдаются яркие эмиссионные линии He II, He I, Fe II [7, 8]. Однако система ориентирована в пространстве таким образом, что наблюдателю никогда не видны самые внутренние области сверхкритического диска — они перекрыты мощным, оптически толстым ветром, который формирует ветровой канал. Рентгеновские струи SS 433 также видны не от самой чёрной дыры, а только начиная с радиуса основания струй $\sim 10^{11}$ см и до $\sim 10^{13}$ см [9–12]. Тем не менее если можно было бы заглянуть в канал SS 433 непосредственно, то SS 433, вероятно, выглядел бы как ULX [6].

В недавно опубликованном каталоге рентгеновских источников во внешних галактиках [13] содержится

С.Н. Фабрика^(1,2,a), К.Е. Атапин⁽³⁾, А.С. Винокуров⁽¹⁾

⁽¹⁾ Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Зеленчукский район, Карачаево-Черкесская Республика, Российская Федерация

⁽²⁾ Казанский федеральный университет, ул. Кремлёвская 18, 420008 Казань, Российская Федерация

⁽³⁾ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Университетский просп. 13, 119234 Москва, Российская Федерация
E-mail: ^(a) fabrika@sao.ru

Статья поступила 3 апреля 2019 г.

1314 объектов, из которых 384 являются кандидатами в ULXs. Однако оптические двойники (optical counterparts) найдены только примерно у 30 объектов, поскольку для надёжного отождествления в тесных звёздных полях требуется высокое разрешение как в оптическом, так и в рентгеновском диапазонах, что могут обеспечить только Космический телескоп им. Хаббла (Hubble Space Telescope, HST) и рентгеновская обсерватория "Чандра". Другие рентгеновские обсерватории, обладающие или более высокой чувствительностью (XMM-Newton) (XMM — X-ray Multi-Mirror mission), или более широким диапазоном доступных энергий (NuSTAR (Nuclear Spectroscopic Telescope ARray), до 30 кэВ), также вносят существенный вклад.

Несколько лет назад был открыт новый класс объектов, а именно ультраяркие рентгеновские пульсары (Ultraluminous X-ray Pulsars, ULXPs). Первым таким объектом стал пульсар M 82 X-2 [14]. Затем пульсации были обнаружены у NGC 7793 P13 [15], NGC 5907 X-1 [16] и NGC 300 X-1 [17]. Все ULXPs имеют жёсткие рентгеновские спектры. Самым ярким рентгеновским пульсаром является NGC 5907 X-1, его рентгеновская светимость в максимуме достигает величины до $\sim 2 \times 10^{41}$ эрг с^{-1} , которая почти на три порядка превосходит эддингтоновский предел для нейтронной звезды. В отдельные моменты светимость NGC 7793 P13 может уменьшаться примерно в 100 раз, до $\sim 10^{38}$ эрг с^{-1} , и затем возвращаться на прежний уровень. Похожее поведение демонстрируют и другие ультраяркие пульсары. Возможно, такая огромная переменность связана с прецессионным движением [18].

Для объяснения феномена ультраярких пульсаров предложено множество моделей, учитывающих наличие магнитных полей различной силы. Однако лучшей, на наш взгляд, является модель геометрической коллимации (geometrical beaming) излучения, испускаемого с поверхности нейтронной звезды [19].

Большинство других ULXs, в которых пульсации пока не обнаружены, также демонстрирует переменность рентгеновского излучения, но не настолько сильную — всего в несколько раз. Их рентгеновские спектры мягче. По форме континуума спектры можно разделить на три типа. К первому типу относятся мягкие ультраяркие источники (Soft UltraLuminous, SUL), ко второму — спектры с изгибом и широким одиночным пиком, которые хорошо аппроксимируются моделью расширенного диска (broadened disk, BD); третий тип — это жёсткие ультраяркие источники (Hard UltraLuminous, HUL) [20].

Другое важное открытие было сделано с помощью рентгеновского спектрографа высокого разрешения, находящегося на борту обсерватории XMM-Newton, — прибора RGS (Reflection Grating Spectrometer). У трёх ультраярких рентгеновских источников, NGC 1313 X-1, NGC 5408 X-1 и NGC 6946 X-1, были обнаружены высокоскоростные истечения (UltraFast Outflows, UFO) [21]. В их спектрах были найдены сдвинутые в голубую сторону линии поглощения на $0,2c$, возникающие в высокоионизованном газе. Позднее UFO были обнаружены у ультраяркого пульсара NGC 300 ULX-1 [22] и ультраяркого мягкого источника (UltraLuminous Supersoft source, ULS) NGC 55 ULX [23]. В последнем случае в рентгеновском диапазоне появляются мощные эмиссионные линии со скоростями $0,01c$ и абсорбционные линии со скоростями $(0,06–0,20)c$, сдвинутые в голубую сторону. Обнаруже-

ние UFO является очень сильным аргументом в пользу сверхкритической аккреции в ULXs, доказывающим наличие мощных ветров.

Самые яркие ULXs находятся в галактиках с активным звездообразованием. Эти объекты, как правило, окружены туманностями сложной формы [24–26], на которые оказывает мощное воздействие сверхкритический диск посредством ветра и жёсткого излучения [27]. Показано, что в галактиках Антенны (Antennae galaxies) имеет место активное звездообразование, все ярчайшие рентгеновские источники формируются в центрах или вблизи центров молодых скоплений, возрастом менее 5 млн лет, а затем выбрасываются в процессе их эволюции и динамического слияния на расстояния до 200 пк [28]. Во всех случаях ULXs находятся в тесных двойных системах со звездой-донором. Средняя скорость выброшенной системы относительно скопления порядка 80 км с^{-1} . Следовательно, прародителями ULXs должны быть звёзды массой более $50 M_{\odot}$. Прямое свидетельство того, что ULX был выброшен из родительского скопления, предоставлено также для объекта Holmberg II X-1 [29].

В разделах 2–4 мы обсудим соответственно рентгеновские спектры, быструю рентгеновскую переменность, а также оптические спектральные данные, полученные на телескопах БТА (Большой телескоп азимутальный) Специальной астрофизической обсерватории (CAO) РАН, "Субару" (Гавайи) и VLT (Very Large Telescope).

2. Рентгеновские спектры: континуум и невязки

Структура сверхкритического аккреционного диска впервые была описана Шакурой и Сюняевым [1]. Если темп поступления материи на внешней границе диска $\dot{M}_0$ превышает критический (эддингтоновский) уровень $\dot{M}_{\text{Edd}} = 48\pi GM/(\kappa c)$, где κ — томсоновская непрозрачность [2], то во внутренней части диска возникает область, в которой сила давления излучения становится равна силе гравитации. Размер этой области, ограниченной *радиусом сферизации*, прямо пропорционален темпу аккреции: $R_{\text{sp}} = (5/3)R_{\text{in}}\dot{m}_0$ [2], где $\dot{m}_0 = \dot{M}_0/\dot{M}_{\text{Edd}}$ — безразмерный темп аккреции, R_{in} — внутренний радиус диска, обычно принимаемый равным трём радиусам Шварцшильда, $R_{\text{in}} = 3R_{\text{Sh}} = 6GM/c^2$.

Внутри области, ограниченной радиусом сферизации, проявляются сверхкритические свойства диска: под давлением излучения материя истекает в виде мощного ветра и диск становится геометрически толстым с $H/R \sim 1$, где R — расстояние от чёрной дыры, H — полутолщина диска. Вследствие оттока вещества в область с $R < R_{\text{sp}}$ по мере приближения к чёрной дыре количество материи, проходящей через диск, линейно уменьшается: $\dot{m}(R) = \dot{m}_0 R/R_{\text{sp}}$. В итоге в виде ветра выбрасывается практически весь "излишек" газа, и лишь небольшая его часть благодаря адвекции достигает чёрной дыры. Адвекция, возникающая вследствие запутывания фотонов в толще диска, уменьшает эффективность переноса излучения и тем самым снижает давление излучения на поверхности диска. Ветер обладает угловым моментом, поэтому предполагается, что он должен формировать канал в виде полого конуса.

Нами разработана модель многоцветного канала (MultiColor Funnel, MCF), в которой ожидаемый спектр

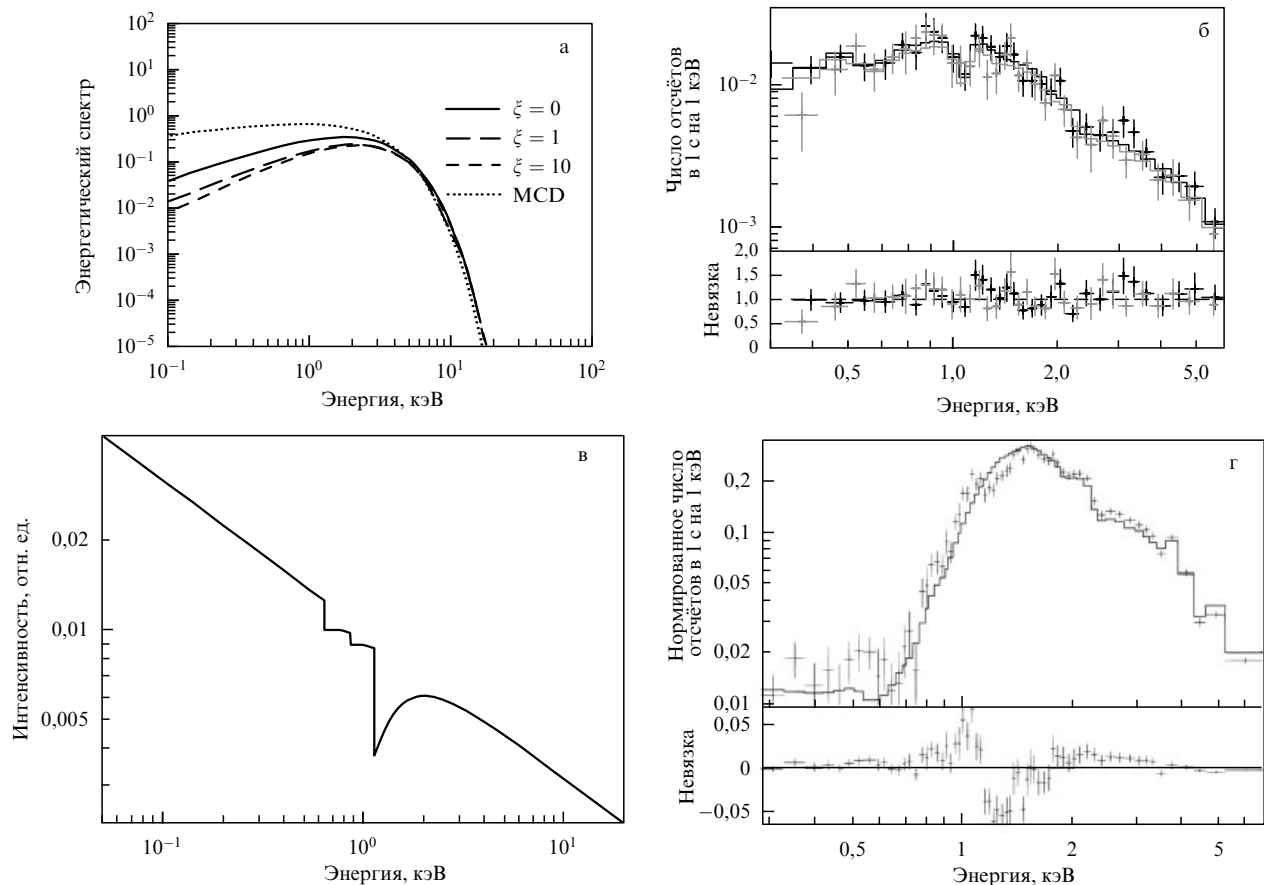


Рис. 1. (а) Континуальные спектры многоцветного канала (MCF) в сравнении со спектром многоцветного диска (MCD), рассчитанные для различных отношений давления излучения к давлению газа $\xi = aT_0^3/(3k_b n_0)$ в наиболее глубоких частях канала (показаны кривыми разного типа) и угла раскрытия канала $\theta \approx 40^\circ$. (б) Аппроксимация наблюдаемого спектра ультраяркого рентгеновского источника NGC 4736 X-1 моделью MCF. (в) Модель эмиссионных/абсорбционных особенностей, которые могут наблюдаться в ULXs и SS 433. Приведён степенной спектр с показателем $\Gamma = 2,5$ с наложенными на него абсорбционными скачками (L_c -edges) ионов C VI, N VII и O VIII, смещёнными в голубую сторону на 0,26c. (г) Показано, как выглядел бы данный спектр на приборе XMM-Newton/MOS при большом накоплении ($> 10^5$ фотонов). Приведены также аппроксимация этого спектра степенным законом и невязки, которые получаются в этом случае. Невязки имеют специфическую форму с подъёмом в области энергии 1 кэВ и следующим сразу за ним провалом [32]. Впоследствии невязки такого рода были обнаружены в спектрах ULXs (рис. 2).

рассчитывался исходя из соотношения между давлением излучения и давлением газа в наиболее глубоких частях стенок канала [30, 31] (рис. 1а). За основу мы брали свои представления о структуре канала SS 433 и пытались применить их к спектрам ULXs (в частности, к объекту NGC 4736 X-1) (рис. 1б). Хотя в SS 433 канал перекрыт ветром [32] и его внутренние наиболее горячие области не видны наблюдателю непосредственно, моделирование позволяет "заглянуть" в канал, как это, вероятно, происходит в случае с ULXs.

Модель MCF представляет собой сложный абсорбционный спектр, содержащий линии наиболее обильных элементов. Огромные температуры ($\sim 10^7$ K) во внутренних частях канала говорят о высокой степени ионизации элементов. Основной вклад в форму спектра вносят абсорбционные особенности и скачки, обусловленные водородо- и гелиеподобными ионами O, Ne, Mg, Si, S и Fe. В пользу наличия огромных температур свидетельствует высокая скорость струй SS 433 (0,26c), а также удивительная стабильность этой скорости, поскольку важную роль в формировании и ускорении струй играет эффект запираания линий (line-locking mechanism), подобно тому как это имеет место в квазарах [33].

На рисунке 1в приведён модельный спектр, а на рис. 1г показано, как он мог бы выглядеть при достаточном накоплении на приборе XMM-Newton/MOS (Metal Oxide Semiconductor). Из рисунка видно, что после аппроксимации континуума степенным законом остаются невязки характерной формы: с подъёмом в окрестности энергии 1 кэВ и следующей сразу за ним абсорбционной особенностью. Модель предсказала, что в случае наблюдения внутренних частей канала SS 433 непосредственно должен проявляться достаточно мощный "горб" на энергии около 1 кэВ совместно с мелкими, очень широкими, (0,1–0,3)c, абсорбционными особенностями, сдвинутыми в голубую сторону. При появлении хорошо накопленных спектров ULXs такие горбы действительно были обнаружены [34]. На рисунке 2 показаны невязки для спектров (величины отношения наблюдаемого спектра к модельному) шести наиболее хорошо изученных ультраярких рентгеновских источников. Видно, что все эти невязки имеют приблизительно одинаковую форму, свидетельствующую о том, что они носят не случайный характер, а являются следствием поглощения в канале, которое не учитывается в простых моделях континуума. Тем не менее форма невязок может немного

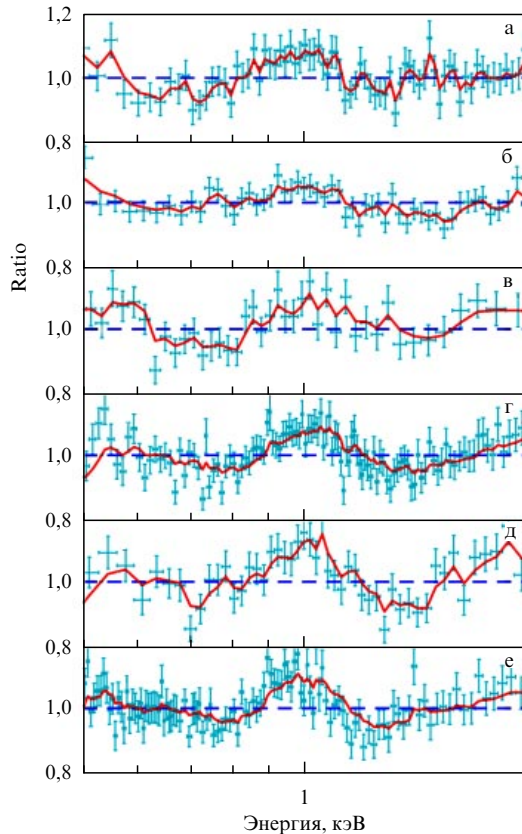


Рис. 2. Ratio — величина, полученная в результате деления наблюдаемого рентгеновского спектра на модельный спектр $\text{tbabs}^* (\text{diskbb} + \text{nthcomp})$ [34] для объектов: (а) NGC 1313 X-1, (б) Ho IX X-1, (в) Ho II X-1, (г) NGC 55 ULX-1, (д) NGC 6946 X-1, (е) NGC 5408 X-1. Все кривые на рис. а–е имеют схожую форму с горбом в области энергии 1 кэВ, что говорит о их единой природе. Невязки такого рода свидетельствуют о наличии в спектре абсорбционных особенностей, не учитываемых моделью континуума.

изменяться в зависимости от типа спектра (SUL или HUL) и наклона сверхкритического диска [35].

3. Спектры мощности: плоский участок и квазипериодические осцилляции

В статье [36] мы проанализировали быструю рентгеновскую переменность пяти ультраярких рентгеновских источников: NGC 5408 X-1, NGC 6946 X-1, M 82 X-1, NGC 1313 X-1 и IC 342 X-1, используя архив наблюдений телескопа XMM-Newton. Указанные пять объектов известны тем, что это единственные ULXs, в спектрах мощности (Power Density Spectra, PDS) которых обнаружены квазипериодические осцилляции (Quasi-Periodic Oscillation, QPO). Эти объекты демонстрируют также значительную переменность в области частот $\sim 10^{-2}$ –1 Гц — так называемый шум с плоской вершиной (Flat-Topped Noise, FTN), в то время как в других ULXs (их исследовано около 15) какая-либо значимая переменность проявляется только на самых низких частотах ($< 10^{-3}$ Гц) [37].

Мы обнаружили, что во всех пяти ULXs общий уровень переменности убывает с возрастанием частоты QPO. На рисунке 3 приведены по два спектра мощности для каждого из этих объектов, при самой низкой (рис. 3а, в, д, ж) и самой высокой (б, г, е, з) частоте QPO. Все

данные наблюдений полностью обработаны. Видно, что в наблюдениях с низкой частотой QPO уровень шума FTN значительно выше. Кроме того, видно, что с изменением частоты QPO f_q изменяется также частота "слома" f_b , на которой плоский участок (белый шум, $P \propto f^0$) сменяется степенным. При этом отношение f_q/f_b остаётся приблизительно постоянным, $f_q/f_b \approx 3$, для всех наблюдений, т.е. FTN и пик QPO перемещаются синхронно.

Для того чтобы количественно оценить уровень переменности, для каждого ряда мы измерили характеристику F_{rms} (fractional rms (root mean square) variability), равную квадратному корню из спектра мощности, проинтегрированного по частотам, за вычетом мощности, вносимой ошибками измерений (пуассоновский шум). На рисунке 4 показана зависимость F_{rms} от частоты QPO. Для объектов NGC 5408 X-1, NGC 6946 X-1 и NGC 1313 X-1 данные наблюдений хорошо согласуются со степенным законом $F_{\text{rms}} \propto f_q^{-\gamma}$ с одинаковым показателем $\gamma \approx 0,3$, но в случае NGC 1313 X-1 переменность оказалась заметно ниже. M 82 X-1 показал более пологий наклон: $\gamma \approx 0,17$, однако это может быть вызвано тем, что рядом с ним находится другой ULX — ультраяркий пульсар M 82 X-2, имеющий сходную светимость, — XMM-Newton не может разрешить эти два объекта.

Переменность рентгеновских источников обычно интерпретируется в терминах случайных колебаний темпа аккреции, которые возникают из-за флуктуаций вязкости на различных радиусах диска. Данный механизм был предложен Ю. Любарским [38] для объяснения степенных спектров мощности рентгеновских двойных. Предполагается, что вязкость изменяется на всех временных и пространственных масштабах, однако ввиду диффузионного характера аккреции внутрь диска могут распространяться только те флуктуации, временной масштаб которых больше вязкостного времени $t_{\text{visc}}(R) = [\alpha(H/R)^2 \Omega_K(R)]^{-1}$, где α — параметр вязкости [1], Ω_K — кеплеровская частота. Вязкостное время уменьшается при приближении к чёрной дыре, поэтому по мере прохождения вещества через диск на медленные крупномасштабные флуктуации, возникшие в периферийных областях диска, накладываются всё более быстрые. В итоге, когда вещество достигает самых внутренних частей диска, где испускается большая часть энергии, оно несёт в себе информацию о всех флуктуациях, возникших на всех радиусах диска. Показано, что в этом случае спектр мощности должен быть степенным [38].

Мы полагаем, что в сверхкритическом диске должен действовать тот же механизм. Однако там имеются особенности, которые и определяют наблюдаемую форму спектров мощности. В отличие от стандартного диска, который является геометрически тонким, $H/R \sim 0,03$ –0,1, сверхкритический диск при $R < R_{\text{sp}}$ характеризуется отношением $H/R \sim 1$ (более точные оценки, учитывающие адвекцию, дают 0,7 [39]). Вследствие этого в сверхкритической области диска вязкостное время должно резко уменьшаться. После прохождения радиуса сферизации вещество быстро — практически за время свободного падения — падает на чёрную дыру. Мы полагаем, что в этом случае радиус сферизации играет роль триггера, который управляет поступлением вещества в сверхкритическую область диска, и если вязкость на нём изменяется случайным образом (белый шум), как это предполагалось для всех остальных ра-

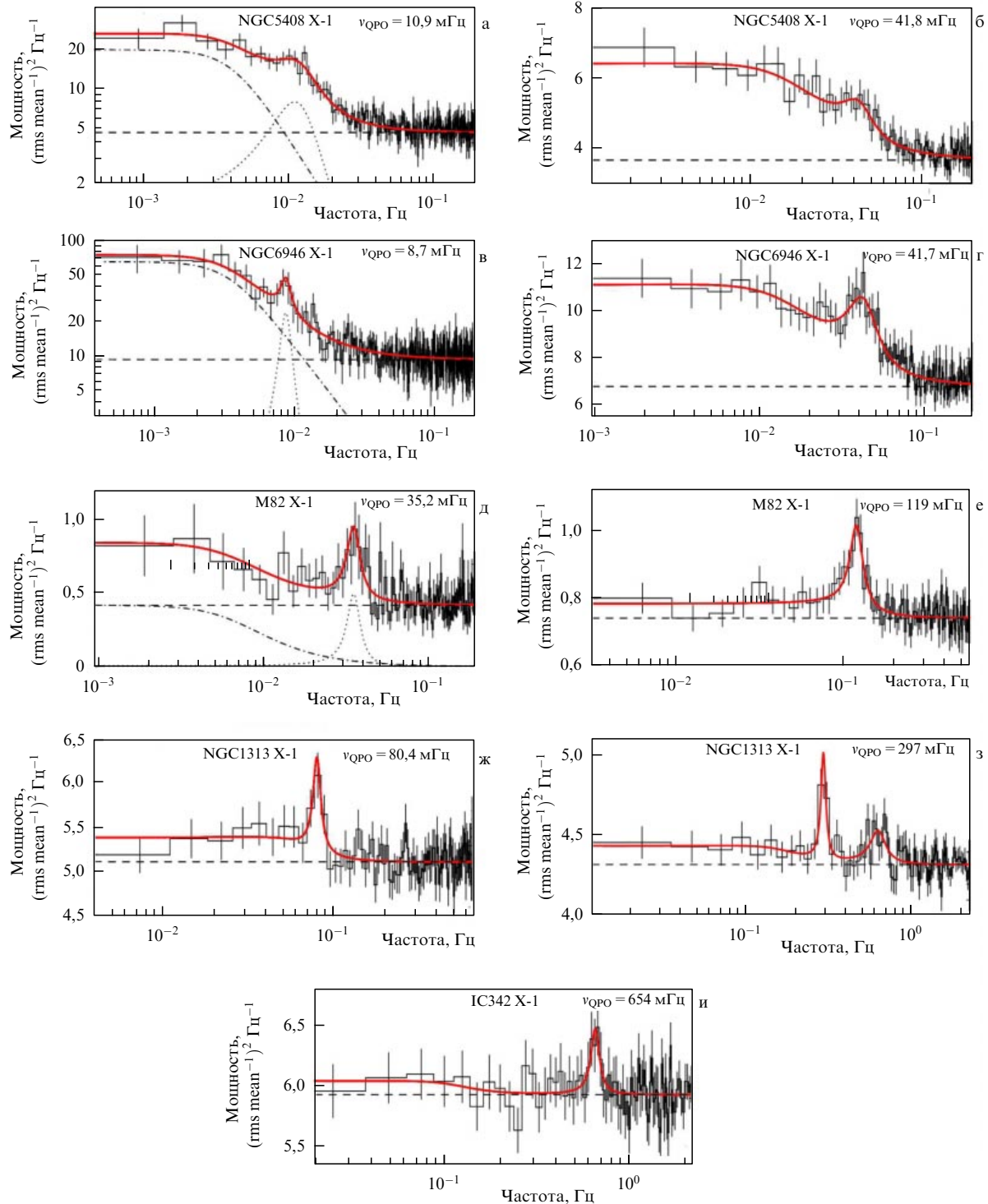


Рис. 3. Спектры мощности пяти ULXs (диапазон энергий 1–10 кэВ). Для четырёх ULXs (а–з) приведены спектры с самой низкой (а, в, д, ж) и с самой высокой (б, г, е, з) частотой ν_{QPO} . Для IC 342 X-1 (и) приведён спектр только для одной частоты, $\nu_{\text{QPO}} = 654$ мГц. Сплошная кривая — результат наилучшей подгонки модели; пунктирными и штрихпунктирными кривыми показаны её компоненты: лоренциан для аппроксимации пика QPO и степенной закон со сломом (broken power law) для описания шума с плоской вершиной (FTN). Штриховой линией отмечен уровень пуассоновского шума. Видно, что в спектрах мощности с более низкой частотой ν_{QPO} уровень FTN выше.

диусов диска, то в спектре мощности должен возникать плоский участок.

На рисунке 5 схематично показан предполагаемый вид спектра мощности в широком диапазоне частот. Плоский участок спектра связан с флуктуациями непосредственно на радиусе сферизации R_{sp} , причём частота слома f_b определяется вязкостным временем на R_{sp} .

Степенной участок на частотах, превышающих частоту слома, формируется в сверхкритической области диска, где вязкостное время убывает от $t_{\text{visc}}(R_{\text{sp}})$ до $t_{\text{visc}}(R_{\text{in}})$. Область частот, много меньших частоты слома, должна соответствовать периферийным областям диска. Мы предполагаем, что на низких частотах спектр мощности снова должен стать степенным, поскольку в области

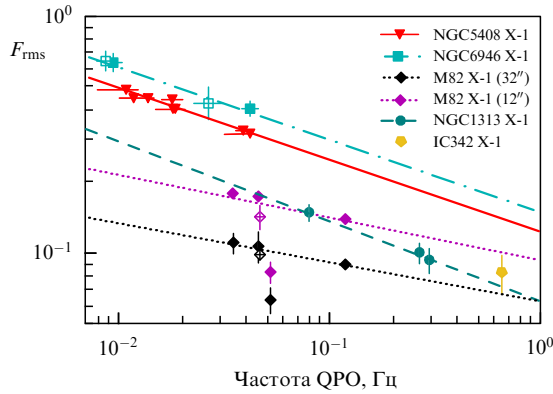


Рис. 4. Относительная переменность F_{rms} в области частот 10^3 – 1 Гц и диапазоне энергии 1–10 кэВ как функция частоты QPO. Для объекта M 82 X-1 F_{rms} измерена в двух апертурах: 32'' и 12'', поскольку рядом с ним находится ультраяркий пульсар (M 82 X-2). Линиями разного типа показаны аппроксимации степенным законом для объектов, указанных на рисунке. Светлыми символами отмечены результаты наблюдений, для которых QPO имеют недостаточную значимость ($< 3\sigma$).

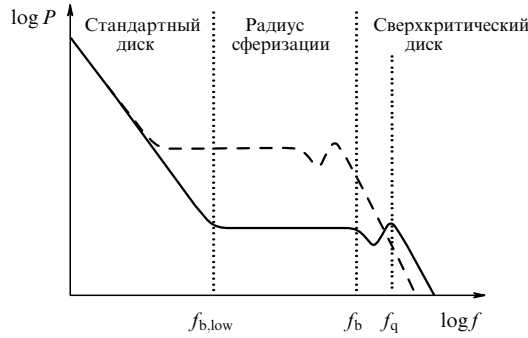


Рис. 5. Предполагаемый вид спектра мощности сверхкритического аккреционного диска (сплошная кривая) в широком диапазоне частот, f_q и f_b обозначают соответственно положения частоты QPO и частоты "слома", при котором плоский участок сменяется степенным (см. рис. 3), $f_{b,\text{low}}$ обозначает положение частоты гипотетического низкочастотного слома, находящегося за границами наблюдаемого диапазона. Мы полагаем, что все три характерные частоты зависят от размера сверхкритической области аккреционного диска R_{sp} , задаваемого темпом аккреции. При увеличении темпа аккреции $f_{b,\text{low}}$, f_b и f_q смещаются вниз и уровни FTN и QPO становятся выше (соответствующий вид спектра показан штриховой кривой).

$R \gg R_{\text{sp}}$ структура диска должна быть аналогична структуре стандартного диска. Здесь должен наблюдаться второй, низкочастотный, слом $f_{b,\text{low}}$ (см. рис. 5). Для ULXs пока нет достаточного количества длительных наблюдений, позволяющих надёжно выявить этот слом. Однако слом в области частоты 10^{-5} Гц был нами обнаружен в спектрах мощности SS 433, построенных по данным мониторинговых миссий RXTE/ASM (All Sky Monitor) и MAXI (Monitor of All-sky X-ray Image) [40]. Имеются также намёки на наличие степенного участка на частотах ниже 10^{-4} Гц в спектрах мощности NGC 5408 X-1 и NGC 6946 X-1 [41].

Учитывая, что радиус сферизации пропорционален начальному темпу аккреции, частоту слома можно выразить как $f_b \sim t_{\text{visc}}^{-1}(R_{\text{sp}}) \approx 6,0 \times 10^{-3} \alpha_{0,1} \dot{m}_{300}^{-3/2} m_{10}^{-1}$ [Гц], где $\alpha_{0,1} = \alpha/0,1$, $\dot{m}_{300}$ — темп аккреции в единицах $300\dot{M}_{\text{Edd}}$, а также принято $H/R = 0,7$ [39]. Для параметров $M = 300\dot{M}_{\text{Edd}}$ и $M = 10M_{\odot}$, типичных для SS 433,

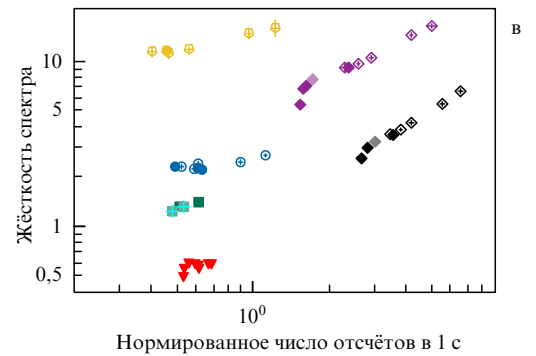
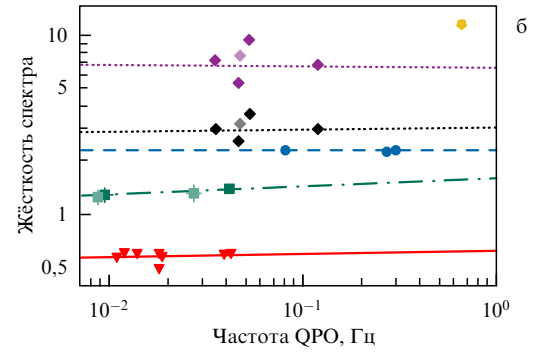
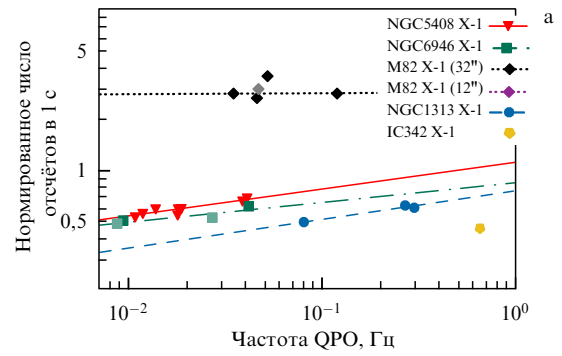


Рис. 6. Скорость счёта в диапазоне 1–10 кэВ (а) и жёсткость спектра — отношение потока в диапазоне 1–10 кэВ к потоку в диапазоне 0,3–1 кэВ (б) как функция частоты QPO. (в) Жёсткость в зависимости от скорости счёта. Чтобы иметь возможность сравнивать светимости объектов, находящихся в разных галактиках, все скорости счёта пересчитаны на расстояние до NGC 5408. Результаты наблюдения NGC 6946 X-1 и M 82 X-1 с низкой значимостью QPO показаны более светлыми символами. Наблюдения, в которых мы не обнаружили QPO, показаны полыми символами.

частота слома соответствует 6 мГц. Приблизительно на такой частоте наблюдается слом в NGC 5408 X-1 и NGC 6946 X-1 (см. рис. 3).

QPO в данной модели могут возникать из-за неустойчивости аккреционного потока в сверхкритической зоне диска. В области $R < R_{\text{sp}}$ гравитация доминирует над давлением излучения. Материя поддерживается радиационным полем, иначе она достигла бы чёрной дыры на временах порядка времени свободного падения. Мы полагаем, что QPO в этом случае могут быть связаны с кеплеровским временем на радиусе сферизации: $f_q \approx P_K^{-1}(R_{\text{sp}}) \approx 2,0 \times 10^{-2} \dot{m}_{300}^{-3/2} m_{10}^{-1}$ [Гц]. Для типичных параметров $\dot{M} = 300\dot{M}_{\text{Edd}}$ и $M = 10M_{\odot}$ получаются частоты около 20 мГц. QPO на подобных частотах, возникающие вследствие неустойчивости в сверхкрити-

ческом диске, были предсказаны на основе радиационно-гидродинамических расчётов [42].

Итак, согласно предложенной модели вариации частоты QPO в наблюдениях одного и того же объекта могут быть связаны с изменением темпа аккреции, а различие между частотами QPO разных объектов — с различием как темпов аккреции, так и масс чёрных дыр. При возрастании темпа аккреции радиус сферизации увеличивается, а частота QPO уменьшается; при этом FTN и пик QPO на рис. 5 смещаются влево и вверх. Уровень плоского участка повышается, относительная переменность (F_{rms}) возрастает. Этим объясняется отрицательная корреляция между F_{rms} и f_q на рис. 4.

Нами была также исследована связь частоты QPO со светимостью (рис. 6а) и жёсткостью спектра (рис. 6б). В качестве оценки светимости мы использовали скорости счёта. Для того чтобы иметь возможность сравнивать светимости объектов, находящихся в разных галактиках, все скорости счёта были приведены к единому расстоянию (до галактики NGC 5408). Для оценки жёсткости использовалось отношение скорости счёта в диапазоне энергии 1–10 кэВ к скорости счёта в диапазоне 0,3–1 кэВ. Из рисунка видно, что и светимость, и жёсткость убывают с уменьшением частоты. Такое поведение тоже может быть обусловлено изменением темпа аккреции. При возрастании темпа аккреции увеличивается и количество вещества, выбрасываемого ветром. Жёсткие кванты, выходящие из наиболее внутренних частей канала, рассеиваются ветром и не доходят до наблюдателя. В результате наблюдаемый поток от объекта убывает, а спектр становится мягче.

На рисунках 6в и 7 представлены жёсткость и F_{rms} как функции скорости счёта (приведённой к единому расстоянию). Полными символами отмечены наблюдения, в которых QPO не обнаружены. В целом, наблюдения как при наличии, так и при отсутствии QPO составляют единый тренд. Однако в моменты, когда QPO не наблюдалось, объекты показали себя более яркими, жёсткими и менее переменными. Данный факт может свидетельствовать о том, что в этих наблюдениях темп аккреции становился ещё ниже, чем в рядах наблюдений с самой высокой частотой QPO. Возможно, QPO исчезают, когда темп аккреции становится ниже некоторого порогового значения, индивидуального для каждого объекта.

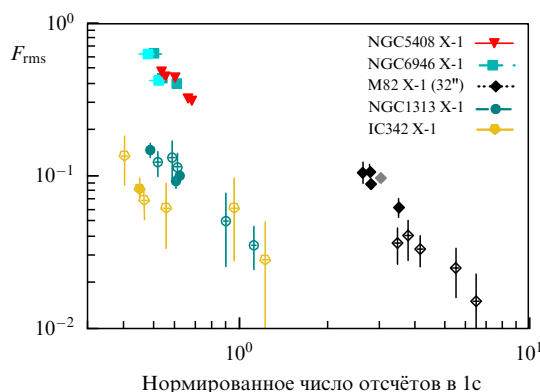


Рис. 7. F_{rms} в зависимости от скорости счёта. Наблюдения NGC 6946 X-1 и M 82 X-1 с низкой значимостью QPO показаны более светлыми символами. Полными символами обозначены наблюдения, в которых QPO не было обнаружено.

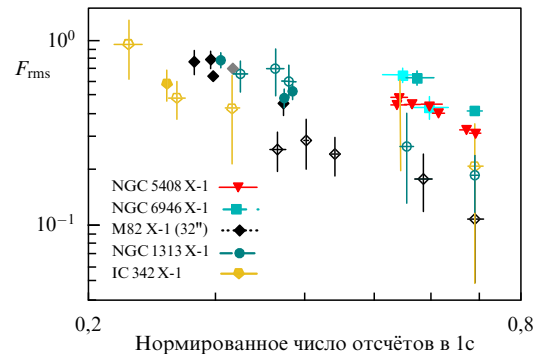


Рис. 8. То же, что на рис. 7, но компенсированы различия между источниками в темпах аккреции и массах чёрных дыр. Все расстояния, массы и темпы аккреции пересчитаны на объект NGC 5408 X-1.

На рисунке 8 показано, как выглядел бы рис. 7, если бы все объекты имели одинаковую массу. Для учёта масс мы сравнили максимальные наблюдаемые светимости объектов. Выражая массы всех объектов через массу NGC 5408 X-1, мы получили значения 0,9, 9,5, 1,6 и 1,8 для NGC 6946 X-1, M 82 X-1, NGC 1313 X-1 и IC 342 X-1 соответственно. Массы всех объектов оказались схожими, за исключением массы M 82 X-1, который является очень ярким — его светимость достигает $\sim 10^{41}$ эрг s^{-1} . Однако такая простая оценка не учитывает других важных параметров, таких как наклон диска, коллимация, спин и т. д.

4. Оптические спектры

Наиболее яркое доказательство того, что ULXs являются сверхкритическими аккреционными дисками, получено при исследовании оптических спектров. Все изученные ULXs являются нетранзистентными рентгеновскими источниками, их светимость находится в диапазоне от $L_X \sim 2 \times 10^{39}$ эрг s^{-1} до $L_X = 10^{41}$ эрг s^{-1} . Однако в оптическом диапазоне (в полосе V) они выглядят очень слабыми объектами, со звёздной величиной от 21 до 24. Сейчас имеются спектры только 11 объектов. Семь ULXs мы впервые наблюдали на телескопе "Субару" [43], спектр ещё одного объекта получен на БТА CAO РАН [44]. Оптические спектры NGC 5408 X-1, NGC 1313 X-2 и ультраяркого рентгеновского пульсара NGC 7793 P13 получены с использованием архивных данных VLT.

Оптические спектры показаны на рис. 9. Основными особенностями всех спектров являются линия He II $\lambda 4686$ и линия H β с широким эмиссионным основанием. Очевидно, что линии широкие, их ширины составляют от 500 до 1500 км s^{-1} .

Наблюдается явное различие между объектами с сильным истечением и объектами с нагретыми аккреционными дисками (рис. 10). В последнем случае эмиссионные линии производит самооблучаемый диск, который наблюдается в чёрных дырах звёздных масс в Галактике. Примерами могут служить транзистентные рентгеновские источники GX339-4 [45, 46], V404 Cyg [47, 48], GRO J1655-40 [49, 50], вспышки которых наблюдаются как в рентгеновском, так и в оптическом диапазонах из-за переизлучения. Наблюдаемая в спектрах таких объектов эмиссионная линия He II оказывается шире водородных линий. Эмиссионные линии формируются вблизи по-

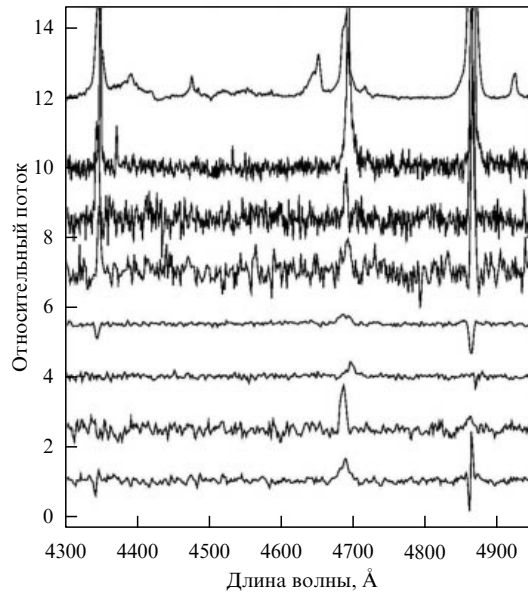


Рис. 9. Нормированные оптические спектры двойников ULX. Показаны (сверху вниз) данные для SS 433 (в спектре присутствуют эмиссионные линии оптических струй в окрестности длины волны 4400 Å), NGC 5408 X-1, NGC 4395 X-1, NGC 1313 X-2, NGC 5204 X-1, NGC 4559 X-7, Holmberg IX X-1 и Holmberg II X-1. Спектры этих объектов похожи на спектры WNLh (поздних водородных звезд Вольфа–Райе) и ярких голубых переменных LBV (Luminous Blue Variables) в горячем состоянии. Звезды этих типов, так же как и ULXs, обладают мощными ветрами, однако в случае ультраярких рентгеновских источников этот ветер истекает с поверхности сверхкритического диска. При вычитании узких линий областей H II в четырёх нижних спектрах их вклад был несколько переоценён для линий H γ и H β .

верхности диска, поэтому их ширина соответствует кеплеровской скорости вращения диска на данном расстоянии от чёрной дыры. Линия He II, в отличие от линии H α , излучается в более горячих и близких к чёрной дыре областях, где скорость вращения диска больше, чем и объясняется наблюдаемое отношение ширин этих двух линий в спектрах транзиентных источников.

В случае сверхкритических аккреционных дисков обнаружено, что линия He II уже линии H α . Это сложно объяснить с помощью модели стандартного аккреционного диска с переизлучением. Ветер с поверхности сверхкритического диска ускоряется по мере увеличения расстояния от чёрной дыры [43, 51]. Поэтому линия He II, формирующаяся в более горячих и близких к чёрной дыре областях ветра, имеет меньшую ширину, чем линия H α , излучаемая в более холодных областях с более высокими скоростями. Это наблюдается в SS 433, обладающем мощным ветром сверхкритического диска [52, 53]. В звездах LBV, имеющих мощные ветры, эмиссионная линия He II также уже линии H α . Примером может служить звезда V532 (или Romano star) в галактике M 33 [54]. Схожая картина наблюдается у трёх переходных звезд (transitional stars): WR22/WN7ha, WR24/WN6ha, WR25/WN6ha [55]. Таким образом, формирование более узкой линии He II связано с мощным истечением ветра. Это является наилучшим свидетельством в пользу существования сверхкритических дисков, для которых предсказывается истечение очень мощных ветров, подобных ветрам массивных звезд.

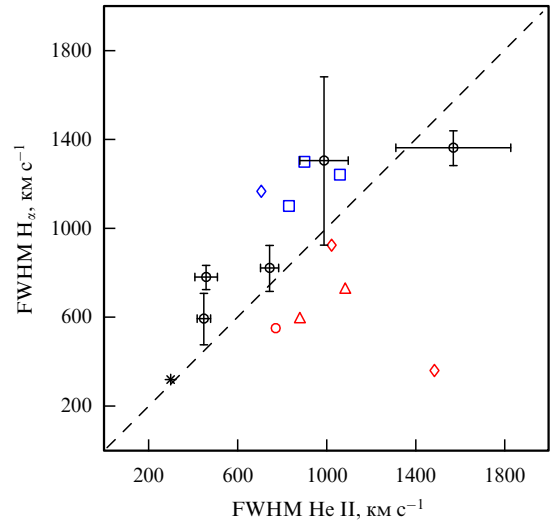


Рис. 10. (В цвете онлайн.) Значения ширины (FWHM — full width at half maximum) эмиссионных линий He II $\lambda 4686$ и H α $\lambda 6563$ для NGC 5204 X-1, Holmberg II X-1, NGC 5408 X-1 [51], NGC 4559 X-7, Holmberg IX X-1 (по оси абсцисс справа налево, по оси ординат сверху вниз). Данные для всех ULXs, кроме NGC 5408 X-1, получены на телескопе "Субару" [43]. Измерения проводились на одновременных спектрах. Для сравнения приведены отношения ширин этих линий для SS 433 (синие ромбы), измеренных в одинаковой прецессионной фазе [52, 53]; для LBV-звезды V532 в галактике M 33 [54], (звездочка); и для трёх переходных звезд: WR22/WN7ha, WR24/WN6ha, WR25/WN6ha [55] (синие квадраты). Оптические спектры рентгеновских транзиентов с чёрными дырами формируются в непосредственной близости от поверхности диска, нагретого излучением центральной машины. Красными символами показаны данные для трёх транзиентов: GX339-4 [45, 46] (кружки), V404 Cyg [47, 48] (треугольники) и GRO J1655-40 [49, 50] (ромбы). Линии He II в таких объектах заметно шире линии H α .

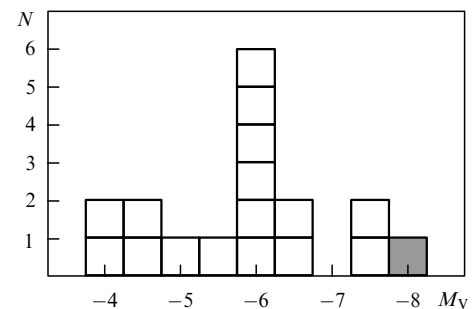


Рис. 11. Абсолютные звёздные величины хорошо изученных ULXs [44]. Тёмной заливкой на диаграмме показано положение объекта SS 433.

На рисунке 11 показаны абсолютные звёздные величины M_V хорошо изученных ULXs [44]. В порядке убывания оптической яркости представлены следующие объекты: SS 433 (отмечен на рис. 11 тёмной заливкой), NGC 6946 ULX-1, NGC 7793 P13, NGC 4559 X-7, NGC 5408 X-1, NGC 5204 X-1, NGC 4395 X-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, M 66 X-1 и M 81 X-6. Звёздные величины ULXs были уточнены с учётом поглощения как в нашей Галактике, так и во внешних галактиках. ULXs демонстрируют широкое распределение с явным максимумом $M_V \approx -6$. Все сверхкритические аккреционные диски выглядят как яркие оптические объекты со звёздными величинами от $M_V \approx -6$ до $M_V \approx -8$. Резкое убывание

числа объектов с уменьшением их оптической яркости не связано с наблюдательной селекцией. Основной вклад в излучение самых слабых в оптическом диапазоне объектов (со звёздными величинами от $M_V = -4$ до $M_V = -5,5$), вероятно, вносит звезда-донор.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Российским фондом фундаментальных исследований (гранты 19-02-00432 и 18-32-20214).

Список литературы

- Shakura N I, Sunyaev R A *Astron. Astrophys.* **24** 337 (1973)
- Poutanen Ju et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **377** 1187 (2007)
- Kaaret P, Feng H, Roberts T P *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **55** 303 (2017)
- Colbert E J M, Mushotzky R F *Astrophys. J.* **519** 89 (1999)
- Madau P, Rees M J *Astrophys. J.* **551** L27 (2001)
- Fabrika S, Mescheryakov A, in *Galaxies and their Constituents at the Highest Angular Resolutions, Proc. of International Astronomical Union Symp. No. 205, 15–18 August 2000, Manchester, United Kingdom* (Ed. R T Schilizzi) (New York: Cambridge Univ. Press, 2001) p. 268
- Fabrika S N *Astrophys. Space Sci.* **252** 439 (1997)
- Fabrika S *Astrophys. Space Phys. Rev.* **12** 1 (2004)
- Revnitsev M et al. *Astron. Astrophys.* **447** 545 (2006)
- Filippova E et al. *Astron. Astrophys.* **460** 125 (2006)
- Medvedev A, Fabrika S *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **402** 479 (2010)
- Khabibullin I, Sazonov S *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **457** 3963 (2016)
- Earnshaw H P et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **483** 5554 (2019)
- Bachetti M et al. *Nature* **514** 202 (2014)
- Israel G L et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **466** L48 (2017)
- Israel G L et al. *Science* **355** 817 (2017)
- Carpano S et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **476** L45 (2018)
- Fürst F et al. *Astrophys. J.* **834** 77 (2017)
- Kawashima T et al. *Publ. Astron. Soc. Jpn.* **68** 83 (2016)
- Sutton A D, Roberts T R, Middleton M J *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **435** 1758 (2013)
- Pinto C, Middleton M J, Fabian A C *Nature* **533** 64 (2016)
- Kosec P et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **479** 3978 (2018)
- Pinto C et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **468** 2865 (2017)
- Аболмасов П и др. *Астрофиз. бюл.* **62** 44 (2007); Abolmasov P et al. *Astrophys. Bull.* **62** 36 (2007)
- Grisé F et al. *Astrophys. J.* **745** 123 (2012)
- Cseh D et al. *Astrophys. J.* **749** 17 (2012)
- Lehmann I et al. *Astron. Astrophys.* **431** 847 (2005)
- Poutanen J et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **432** 506 (2013)
- Egorov O V, Lozinskaya T A, Moiseev A V *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **467** L1 (2017)
- Фабрика С Н и др. *УФН* **176** 339 (2006); Fabrika S N et al. *Phys. Usp.* **49** 324 (2006)
- Fabrika S et al., in *Populations of High Energy Sources in Galaxies, Proc. of the 230th Symp. of the International Astronomical Union, Dublin, Ireland 15–19 August 2005* (Eds E J A Meurs, G Fabbiano) (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2006) p. 278
- Fabrika S N, Abolmasov P K, Karpov S, in *Black Holes from Stars to Galaxies — Across the Range of Masses, Proc. of International Astronomical Union Symp. No. 238, 21–25 August, 2006, Prague, Czech Republic* (Eds V Karas, G Matt) (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2007) p. 225
- Shapiro P R, Milgrom M, Rees M J *Astrophys. J. Suppl.* **60** 393 (1986)
- Middleton M J et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **454** 3134 (2015)
- Pinto C, arXiv:1903.06174
- Atapin K, Fabrika S, Caballero-García M D *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **486** 2766 (2019)
- Heil L M, Vaughan S, Roberts T P *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **397** 1061 (2009)
- Lyubarskii Yu E *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **292** 679 (1997)
- Липунова Г В *Письма в Астрон. журн.* **25** 591 (1999); Lipunova G V *Astron. Lett.* **25** 508 (1999)
- Атапин К Е, Фабрика С Н *Письма в Астрон. журн.* **42** 571 (2016); Atapin K E, Fabrika S N *Astron. Lett.* **42** 517 (2016)
- Atapin K, Fabrika S *Stars: From Collapse to Collapse, Proc. of a Conf., Nizhny Arkhyz, Russia 3–7 October 2016* (Astronomical Society of the Pacific Conf. Ser., Vol. 510, Eds Yu Yu Balega et al.) (San Francisco, CA: Astronomical Society of the Pacific, 2017) p. 478
- Okuda T, Lipunova G V, Molteni D *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **398** 1668 (2009)
- Fabrika S et al. *Nature Phys.* **11** 551 (2015)
- Vinokurov A, Fabrika S, Atapin K *Astrophys. J.* **854** 176 (2018)
- Soria R, Wu K, Johnston H M *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **310** 71 (1999)
- Rahoui F, Coriat M, Lee J C *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **442** 1610 (2014)
- Casares J et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **250** 712 (1991)
- Gotthelf E et al. *Astron. J.* **103** 219 (1992)
- Hunstead R W, Wu K, Campbell-Wilson D, in *Accretion Phenomena and Related Outflows, IAU Colloquium 163* (ASP Conf. Ser., Vol. 121, Eds D T Wickramasinghe, G V Bicknell, L Ferrario) (San Francisco, CA: Astronomical Society of the Pacific, 1997) p. 63
- Soria R et al. *Astrophys. J.* **495** L95 (1998)
- Cseh D et al. *Astrophys. J. Lett.* **728** L5 (2011)
- Kubota K et al. *Astrophys. J.* **709** 1374 (2010)
- Grandi S A, Stone R P S *Publ. Astron. Soc. Pacific* **94** 80 (1982)
- Шолухова О Н и др. *Астрофиз. бюл.* **66** 135 (2011); Sholukhova O N et al. *Astrophys. Bull.* **66** 123 (2011)
- Walborn N R, Fitzpatrick E L *Publ. Astron. Soc. Pacific* **112** 50 (2000)

On the nature of ultraluminous X-ray sources

S.N. Fabrika^(1,2,a), K.E. Atapin⁽³⁾, A.S. Vinokurov⁽¹⁾

⁽¹⁾ Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Zelenchukskiy region, Karachai-Cherkessian Republic, Russian Federation

⁽²⁾ Kazan Federal University, ul. Kremlevskaya 18, 420008 Kazan, Russian Federation

⁽³⁾ Lomonosov Moscow State University, Sternberg State Astronomical Institute, Universitetskii prosp. 13, 119234 Moscow, Russian Federation
E-mail: ^(a) fabrika@sao.ru

Ultraluminous X-ray sources (ULXs) that are located in external galaxies exhibit X-ray luminosities exceeding hundreds or even thousands times those of the brightest black holes in Milky Way and Local Group galaxies. New classes of objects have been discovered: ultraluminous X-ray pulsars (ULXPs) and high-velocity outflows whose X-ray-range speed is up to $0.2c$. The ULXs and ULXPs fully correspond to concepts of the super-Eddington accretion. Five ULXs exhibit in the X-range power spectra quasi-periodical oscillations and a flat-topped noise. Optical spectra of the ULXs are very similar to those of SS433, late nitrogen stars (WNL/WR) or LBV stars (luminous blue variables). The results obtained suggest that the ULXs are the systems that contain supercritical accretion disks.

Keywords: ultraluminous X-ray sources, optical spectroscopy, X-ray data, quasi-periodical oscillations

PACS numbers: 97.60.Gb, 97.80.Jp, 98.70.Qy

Bibliography — 55 references

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **189** (11) 1240–1248 (2019)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFN.2019.04.038595>

Received 3 April 2019

Physics – Uspekhi **62** (11) (2019)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFN.2019.04.038595>