

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СПЕЦИАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ

На правах рукописи

УДК 524.3-121:524.[354+323+4]:524.7

АБОЛМАСОВ Павел Константинович

УЛЬТРАЯРКИЕ РЕНТГЕНОВСКИЕ ИСТОЧНИКИ И ИХ
ОПТИЧЕСКИЕ ПРОЯВЛЕНИЯ

(01.03.02 – астрофизика, радиоастрономия)

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Архыз – 2008

Работа выполнена в Специальной Астрофизической Обсерватории
Российской Академии Наук.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
С. Н. ФАБРИКА

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Ю. Н. ГНЕДИН

кандидат физико-математических наук
Г. М. БЕСКИН

Ведущая организация: Государственный Астрономический
институт им. П.К. Штернберга, Москва

Защита состоится " 22 " октября 2008 г. в 9 часов на
заседании Диссертационного совета Д 002.203.01 при Специ-
альной Астрофизической Обсерватории РАН по адресу: 369167,
КЧР, Зеленчукский район, пос. Нижний Архыз.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке САО РАН.

Автореферат разослан " ____ " сентября 2008 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета
кандидат физ.-мат. наук

МАЙОРОВА Е.К.

Актуальность проблемы

На сегодняшний день природа ультраярких рентгеновских источников (ультрамоощных, *ultraluminous X-ray sources*, ULX) в галактиках является одной из нерешенных проблем астрофизики. С одной стороны, эти объекты уверенно выделяются среди популяции рентгеновских двойных (имеющих меньшие светимости, ограниченные эддингтоновским пределом) и ярких в рентгене сверхновых и остатков сверхновых, от которых ультраяркие рентгеновские источники отличаются переменностью на разных временных масштабах (вплоть до минут и секунд, см. Casella et al. (2008)) и жестким спектром с мощной степенной компонентой и избытком на десятых долях кэВ (Roberts, 2007). С другой стороны, наблюдательные проявления объектов в рентгеновском диапазоне не позволяют сделать окончательных выводов относительно природы этих объектов. Наиболее популярными моделями, объясняющими свойства ультраярких рентгеновских источников, являются тесные двойные системы с черными дырами сравнительно больших (“промежуточных”, $M \simeq 100 \div 10^4 M_{\odot}$) масс (Colbert & Miller, 2005) и сверхкритическая аккреция в сочетании с эффектами геометрической коллимации излучения (Katz, 1986; Fabrika & Mescheryakov, 2001; Poutanen et al., 2007).

Свойства объектов в рентгеновском диапазоне примерно одинаково хорошо объясняются широким спектром моделей аккрецирующих черных дыр разных масс с разными темпами аккреции. По-видимому (подробнее см. главы 3 и 5 настоящей диссертации), требуется информация о свойствах объектов в оптическом и ультрафиолетовом диапазонах.

Экстремальный ультрафиолетовый диапазон, который можно изучать косвенно с использованием небулярной спектроскопии, особенно важен, так как многие ультраяркие рентгеновские источники связаны с яркими туманностями высокого возбуждения (Kaaret et al., 2004; Kuntz et al., 2005). Другая немаловажная деталь – существование вокруг многих объектов оболочечных туманностей (Pakull & Mirioni, 2003), свидетельствующее в пользу некоторого источника энергии (которым может быть единичный взрыв “гиперновой” или постоянная вет-

ровая/струйная активность объекта), динамически возмущающего межзвездную среду.

Таким образом, тема, сама по себе достаточно популярная, напрямую связана с такими фундаментальными проблемами как физика черных дыр, процессы аккреции на компактные объекты, эволюция массивных звезд, гипотетическое существование популяции черных дыр промежуточных масс. Последние, в свою очередь, являются возможными остатками звезд III населения (Madau & Rees, 2001), играющих важную роль в понимании эволюции Вселенной.

Сами ультраяркие рентгеновские источники остаются объектами непонятной природы. Яркие туманности, связанные с этими объектами, определенно позволяют глубже понять их свойства и сделать выбор между существующими моделями этих объектов. В настоящей работе рассматривается спектральный материал, позволяющий глубоко исследовать свойства туманностей, связанных с ULX, и порождающего их звездного населения. Используются принципиально новые для этих объектов методы исследования, такие как панорамная спектроскопия и фотоионизационное моделирование. Этим безусловно обеспечивается актуальность работы.

Цели и задачи исследования:

1. спектральное и спектрофотометрическое исследование выборки ярких туманностей, связанных с ультраяркими рентгеновскими источниками
2. фотоионизационное моделирование отдельных туманностей, предположительно возбуждаемых ультрафиолетовым источником
3. исследование звездного населения, связанного со скоплениями, содержащими ультраяркие рентгеновские источники
4. исследование кинематической структуры оболочек ультраярких рентгеновских источников с помощью панорамной спектроскопии высокого разрешения

5. теоретическое исследование структуры канала сверхкритического аккреционного диска

Научная новизна

1. впервые показано, что ULX могут возникать в очень молодом ($4 \div 5$ миллионов лет) звездном населении
2. показано, что в областях звездообразования, связанных с ультраяркими рентгеновскими источниками, может быть выделен избыток в эмиссионных линиях, который можно отнести на счет механической или ультрафиолетовой светимости источника
3. впервые показано, что внутренние части оболочечных туманностей ультраярких рентгеновских источников характеризуются небулярными спектрами высокого возбуждения
4. посредством панорамной спектроскопии высокого разрешения (Scorpio в режиме сканирующего интерферометра Фабри-Перо) туманность МН9/10/11 разделена на области с разными источниками возбуждения, оценена скорость расширения оболочки МН9/10
5. показано, что в туманностях ULX MF16 и МН11, а также III-области, связанной с НоII X-1, существуют области, возбуждаемые ЭУФ излучением центрального источника, необходимое число фотоионизирующих квантов $S \sim 10^{50}$ эрг с^{-1}
6. получено решение для диффузионного переноса излучения в ветре сверхкритического аккреционного диска, предсказывающее распределение энергии в спектрах ULX, согласующееся с данными рентгеновской спектроскопии и оценками темпов производства ионизирующих квантов для фотоионизированных туманностей ULX
7. показано, что диапазон наблюдательных свойств туманностей ультраярких рентгеновских источников может быть объяснен в рамках единой модели эволюции объекта типа

SS433 в межзвездной среде в течение времени около миллиона лет

Научная и практическая значимость работы

В работе приводится уникальный для данного класса объектов спектрофотометрический материал. Полученные светимости в линиях могут быть использованы для отработки и проверки различных гипотез относительно природы ультраярких рентгеновских источников. Автор предлагает спектральную модель, которая может использоваться для аппроксимации рентгеновских и ультрафиолетовых спектров и расчета свойств туманностей ультраярких рентгеновских источников. Полученные выводы могут иметь приложение в дальнейшем исследовании свойств ULX, физики процессов аккреции и межзвездной среды.

Основные положения, выносимые на защиту

1. результаты спектрофотометрии 8 туманностей, связанных с ультраяркими рентгеновскими источниками; вывод о наличии двух источников энергии, возбуждающих туманность, – излучения центрального источника и ударных волн;
2. глубокий анализ наблюдательных свойств туманности MF16, связанной с NGC6946 ULX1; вывод о высоких светимостях ультраярких рентгеновских источников в ультрафиолетовом диапазоне;
3. анализ звездного населения скопления, связанного с NGC7331 X-1; оценка параметров звездного населения и вывод о наличии избытка в эмиссионных линиях, связанного с ультраярким рентгеновским источником;
4. исследование кинематики комплекса туманностей MN9/10/11, связанного с NoIX X-1, по данным наблюдений со сканирующим интерферометром Фабри-Перо;

5. расчет распределения энергии в спектре канала сверхкритического аккреционного диска; сравнение с наблюдательными данными по ULX.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Abolmasov, P., Fabrika, S., Sholukhova, O. & Afanasiev, V. "Spectroscopy of optical counterparts of ultraluminous X-ray sources" 2007, *Astrophysical Bulletin*, 62, 36-51; astro-ph/0612765
2. Abolmasov, P. K., Swartz, D. A., Fabrika, S., Ghosh, Kajal K., Sholukhova, O. & Tennant, Allyn F. "Optical Spectroscopy of the Environment of a ULX in NGC 7331" 2007, *ApJ*, 668, 124-129; astro-ph/0707.2099
3. Abolmasov, P., Fabrika, S., Sholukhova, O. & Kotani, T. "Optical Spectroscopy of the ULX-Associated Nebula MF16" 2008, arXiv:0809.0409 (24 pages)
4. Abolmasov, P., Fabrika, S. & Sholukhova, O. 2006, in "Science Perspectives for 3D Spectroscopy", ESO Astrophysics Symposia European Southern Observatory, Volume . ISBN 978-3-540-73490-1. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007, p. 327-333 (astro-ph/0602369)
5. Abolmasov, P. & Moiseev, A., "Kinematics of the Nebular Complex MН9/10/11 Associated with HoIX X-1" 2008, *RevMexAA*, 44, 301-309; astro-ph/0806.4527
6. Фабрика С. Н., Аболмасов П. К., Карпов С. В., Шолухова О. Н. и Гош К. К. "Ультраяркие рентгеновские источники в галактиках микроквазары или черные дыры промежуточных масс" 2006, *Успехи Физических Наук*, 176, 339-344
7. Abolmasov, P., Karpov, S. & Kotani, T. "Structure and Observational Properties of Supercritical Accretion Discs with Optically-Thick Outflows" 2008, arXiv:0809.0917 (30 pages)
8. Abolmasov P. "Ultraluminous X-ray Sources and Their Nebulae" 2008, accepted for publication in proceedings of

“Cool Discs, Hot Flows: The Varying Faces of Accreting Compact Objects”, conference held in Funäsdalen, 23-29 March 2008, ed. M. Axelsson; astro-ph/0808.0898 (6 pages)

Личный вклад автора

Автор участвовал в большей части наблюдений. Вся обработка, за исключением данных ИФП, производилась автором. Автор также существенно доработал и переработал системы редукации MPFS и Scorpio, созданных В. Л. Афанасьевым и А. В. Моисеевым. Пакет MPFS дорабатывался совместно с А. В. Шипулиным. Пакет автоматической обработки длиннощелевых спектров Score, написанный в соавторстве с О. В. Марьевой (также использующего процедуры, написанные В. Л. Афанасьевым и А. В. Моисеевым), сейчас используется как в лаборатории Физики Звезд САО РАН, так и за ее пределами. Фотоионизационное моделирование и интерпретация результатов, а также разработка модели канала сверхкритического аккреционного диска в диффузионном приближении, расчет рентгеновских спектров ULX и сравнение с наблюдательными данными XMM-Newton принадлежат автору.

Апробация результатов

Все основные результаты опубликованы. Результаты работы были апробированы на трех конкурсах-конференциях САО (2006-2008, причем на конкурс 2008 года представлено две работы), на международных конференциях в Гархинге (Германия; октябрь 2005) и Фунесдалене (Швеция; март 2008), а также на Генеральной Ассамблее МАС в 2006 году. Делались доклады на астрофизическом семинаре САО, на семинарах в университете Оулу (Финляндия), Токийском Технологическом институте (ТокуоТех), институте RIKEN (Токио) и университете Киото.

Содержание работы

Диссертация состоит из Введения и 6-ти глав, содержит 34 рисунка, 9 таблиц. Список цитируемой литературы включает 196

наименований. Общий объем диссертации – 164 страницы.

Во Введении обсуждается актуальность работы, цели и задачи исследования, научная новизна, формулируются основные результаты, выносимые на защиту, приводится список работ, в которых опубликованы результаты диссертации.

В первой главе описывается использованный спектральный материал низкого разрешения (данные MPFS и Scorpio в режиме длинноцелевой спектроскопии), методы, использованные при обработке, и основные результаты, полученные для восьми туманностей северного полушария. Приводятся интегральные потоки и светимости в линиях, оценки поглощения и физических условий по диагностическим линиям. Рассматривается распределение объектов на ионизационных диаграммах. Рассматривается вопрос об источниках возбуждения и ионизации туманностей ультраярких рентгеновских источников (ULX). В рамках обзора получен ряд новых результатов: зарегистрированы узкие линии He II λ 4686 в центральных частях оболочечных туманностей, показана связь объекта M51 X-7 со скоплением из каталога Larsen (2001). Делаются выводы относительно природы туманностей, которые условно можно разделить на НП-области высокого возбуждения и оболочки. Делается вывод о наличии в общем случае двух источников ионизации и возбуждения: фотоионизации и ударных волн.

Вторая глава посвящена исследованию звездного населения, связанного с ULX, в первую очередь анализу и моделированию спектра скопления и НП-области P98, связанной с NGC7331 X-1. Использовались спектры звездного населения, рассчитанные с помощью программы популяционного синтеза Starburst99 и фотоионизационное моделирование с помощью Cloudy. Оценены возраст ($4 \div 4.5$ миллиона лет) и масса ($\sim 10^5 M_{\odot}$) скопления. Показано, что металличность скопления близка к солнечной. НП-область демонстрирует избыток в линиях низкого возбуждения, который только частично может быть объяснен остатками сверхновых или общей сверхоболочкой скопления. Избыток в линиях низкого возбуждения интерпретируется как следствие дополнительного возмущения межзвездной среды, вызываемого ULX.

Раздел 2.2 посвящен другому характерному примеру – скоплению n5194-839, отождествленному с ULX M51 X-7. Свойства звездного населения сложно объяснить единичной вспышкой звездообразования, скорее всего, в окрестности источника существуют звезды с возрастaми от $\lesssim 10$ до сотен миллионов лет.

Третья глава посвящена исследованию туманности MF16, для которой получены глубокие спектры (отождествлено более тридцати эмиссионных линий, отношение сигнал-шум более сотни для нескольких ярчайших линий). Дискутируется вопрос об источниках энергии, показано, что основной вклад должна давать фотоионизация. Ударные волны требуются для объяснения морфологии туманности и ярких линий [Fe III]. Делается вывод о недостаточности наблюдаемого рентгеновского источника для объяснения наблюдательных свойств туманности. Проводится фотоионизационное моделирование с помощью Cloudy. Восстановлено распределение энергии в спектре ULX в труднодоступном для прямых наблюдений экстремальном ультрафиолетовом (ЭУФ) диапазоне. Обсуждается вопрос о возможности наблюдения объектов в ультрафиолетовом диапазоне.

В разделе 3.5 фотоионизационное моделирование проводится для другой туманности, имеющей черты HII-области высокого возбуждения и связанной с H α X-1. Показано, что и в этом случае можно сделать вывод относительно существования яркого экстремального ультрафиолетового источника, светимость которого, впрочем, приблизительно на порядок меньше, чем требуемая светимость NGC6946 ULX-1 в том же диапазоне. Показано, что свойства оптических туманностей ULX не позволяют сделать существенных выводов относительно их реальных рентгеновских светимостей – основную роль играет светимость в экстремальном ультрафиолете, рентгеновская светимость может отличаться от изотропного значения на один-два порядка. В то же время, высокие ЭУФ светимости согласуются с наблюдаемыми спектрами туманностей.

Глава четвертая посвящена кинематическому исследованию небулярного комплекса MН9/10/11 при помощи сканирующего интерферометра Фабри-Перо. Измерена скорость расширения

оболочки МН9/10 (от 30 до 70 км с⁻¹, расширение анизотропно). Показано, что туманность МН11 динамически не возмущена и возбуждается, по-видимому, жестким экстремальным ультрафиолетовым / мягким рентгеновским источником, ионизирующим очень разреженную межзвездную среду (концентрация ~ 0.2 см⁻³). При помощи фотоионизационного моделирования оценены параметры источника, делается вывод о возможной высокой (приблизительно солнечной) металличности ионизируемого газа.

На примере МН9/10/11 показано, что ультраяркие рентгеновские источники являются как источниками фотоионизирующего излучения, так и динамического возмущения межзвездной среды. Оба источника энергии одного порядка, $\sim 10^{39}$ эрг с⁻¹. Динамический возраст для МН9/10 порядка миллиона лет. В разделе 4.5.2 обсуждаются возможности наблюдения оболочек ультраярких рентгеновских источников в рентгеновском диапазоне.

В пятой главе автор представляет модель канала сверхкритического аккреционного диска, успешно примененную для анализа рентгеновских спектров ультраярких источников. Показано, что различие в темпах аккреции и прочих параметрах течения будет проявляться в первую очередь в ультрафиолетовом и экстремальном ультрафиолетовом диапазонах, в то время как в рентгеновском диапазоне спектр близок к спектру адвекционного “слим-диска” (Abramowicz et al., 1980; Mineshige et al., 1994) и вполне подходит для описания спектров. Важную роль играет эффект самопрогрева диска, за счет которого наблюдаемый поток возрастает в несколько раз, а температура – примерно на 20-30%. Наблюдательные данные неплохо объясняются, если считать, что канал внутри прозрачен – в нем отсутствует внутренняя фотосфера (дно канала). Согласие лучше, если предположить, что существуют процессы, повышающие энергию чернотельных фотонов в 2÷3 раза, что близко к аналогичной величине, наблюдаемой в спектрах рентгеновских двойных.

В рамках рассматриваемой модели делается ряд предсказаний: высокая экстремальная ультрафиолетовая светимость объектов, наличие мощного ветра с мощностью $\sim 10^{39}$ эрг с⁻¹, коллимация рентгеновского излучения. Коллимация излучения

позволяет предсказать класс туманностей, видимо не связанных с феноменом ультраяркого источника, связанных со сверхкритическими аккреторами, наблюдаемыми на больших наклонах.

В шестой главе свойства туманностей ULX объясняются в рамках единой модели эволюции источника и возмущенной им межзвездной среды. Показано, что на начальной стадии наблюдается фотоионизованная HII-область высокого возбуждения, на поздних стадиях основной вклад дает излучение радиативной оболочки, выдутой ветром и струями. Морфология оболочки зависит от плотности межзвездной среды. Показано, что крупнейшие оболочки ULX имеют динамические возрасты порядка миллиона лет, что дает представление о времени существования ULX. Приводятся независимые аргументы (распределение оболочек на диаграмме размер – скорость расширения) в пользу того, что оболочки ULX возникают вследствие непрерывной активности центральных источников, а не в результате единовременных катастрофических выбросов вещества и энергии (модель “гиперновой”).

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

Список литературы

- Abramowicz, M. A., Calvani, M. & Nobili, L. 1980, ApJ, 242, 772-788
- Begelman, M. C. 2002, ApJ, 568, L97
- Blair, W. P. & Fesen, R. A. 1994 ApJL, 424, 103
- Casella, P., Ponti, G., Patruno, A., Belloni, T., Miniutti, G. & Zampieri, L. 2008, MNRAS, 387, 1707-1711
- Colbert, E. J. M. & Miller, E. C., 2005, in The Tenth Marcel Grossmann Meeting Eds.: Mário Novello; Santiago Perez Bergliaffa; Remo Ruffini. p.530; astro-ph/0402677

- Fabrika, S. Supercritical disk and jets of SS433 2004, ASPR, vol. 12
- Fabrika, S., Mescheryakov A. 2001. In: Galaxies and their Constituents at the Highest Angular Resolution, IAU Symp. N205, ed. R.T. Schilizzi, p. 268
- Kaaret, P., Ward, M. J., & Zezas, A. 2004, MNRAS, 351, 83
- Katz, J. 1986, Comments Astrophys., 11, 201
- Kuntz, K. D., Gruendl, R. A. & Chu, Y.-H. et al. 2005 ApJ, 620, 31
- Larsen, S. S. 2001, in Extragalactic Star Clusters, IAU Symposium 207, ed. D. Geisler, E. K. Grebel & D. Minniti (Astronomical Society of the Pacific, San Francisco), 421
- Madau, P. & Rees, M. J. 2001, ApJL, 551, 27
- Mineshige, S., Hirano, A., Kitamoto, S., Yamada, T. & Fukue, J. 1994, ApJ, 426, 308
- Pakull, M.W. & Mirioni, L. 2003, in Winds, Bubbles, and Explosions: a conference to honor John Dyson, RevMexAA (Serie de Conferencias) 15, 197, ed. J. Arthur & W. J. Henney
- Poutanen, J., Lipunova, G., Fabrika, S., Butkevich, A. & Abolmasov, P. 2007, MNRAS, 377, 1187
- Ramsey, C. J., Williams, R. M., Gruendl, R. A., Chen, C.-H. R., Chu, Y.-H. & Wang, Q. D. 2006, ApJ, 641, 241
- Roberts, T. P. 2007, ApJSS, 311, 203

Бесплатно

Павел Константинович Аболмасов

Ультраяркие рентгеновские источники и их оптические
проявления