

Спектроскопия оптических объектов, отождествленных с ультраяркими рентгеновскими источниками

П.К.Аболмасов, С.Н.Фабрика, О.Н.Шолухова, В.Л.Афанасьев

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167, Россия

Поступила в редакцию 25 сентября 2006 г; принята к печати 4 октября 2006 г.

В настоящей работе представлены результаты выполненной на БТА панорамной и длиннощелевой спектроскопии восьми туманностей, связанных с ультраяркими рентгеновскими источниками (ULX). В двух туманностях впервые зарегистрировано большое отношение потоков в линиях $[O III]\lambda 5007$ и $H\beta$ (> 5). Два ULX отождествлены с массивными молодыми звездными скоплениями. В четырех из восьми туманностей доминируют линии высокого возбуждения, возникающие при фотоионизации газа ультрафиолетовым и рентгеновским излучением центрального источника. В других четырех туманностях газ возбуждается электронным ударом, что может быть в большинстве случаев объяснено наличием ударных волн со скоростями 20 – 100 км/с. Во всех изученных туманностях есть признаки ударного возбуждения, но даже в случаях, когда вклад ударных волн преобладает, для объяснения интенсивности наблюдаемых линий высокого возбуждения требуется дополнительный источник экстремального ультрафиолетового излучения со светимостью $\gtrsim 10^{38}$ эрг s^{-1} . Как ударные волны, так и фотоионизация возбуждает газ во всех изученных ULXNe, но можно грубо разделить эти туманности на две группы: с преобладанием ударных волн в возбуждении газа и с преобладанием фотоионизации. Важно, что ULX-объекты в туманностях должны генерировать сильные ветры или струи с мощностью $\sim 10^{39}$ эрг s^{-1} , достаточной для наблюдаемого возбуждения туманностей. Как ветровая/струйная активность, так и наличие яркого УФ-источника согласуется с предположением, что ULX — массивные рентгеновские двойные со сверхкритическими аккреционными дисками типа SS433.

Ключевые слова: ультраяркие рентгеновские источники, оптическая спектроскопия, туманности

SPECTROSCOPY OF OPTICAL COUNTERPARTS OF ULTRALUMINOUS X-RAY SOURCES, by Abolmasov P., Fabrika S., Sholukhova O., Afanasiev V.. Here we present the results of panoramic and long-slit observations of eight ULX nebular counterparts performed with the 6 m SAO telescope. In two ULX nebulae (ULXNe) we detected for the first time signatures of high excitation ($[O III]\lambda 5007 / H\beta > 5$). Two of the ULXs were identified with young ($T \sim 5 - 10 Myr$) massive star clusters. Four of the eight ULXNe show bright high-excitation lines. This requires existence of luminous ($\sim 10^{38} \div 10^{40}$ эрг s^{-1}) UV/EUV sources coinciding with the X-ray sources. The other 4 ULXNe require shock excitation of the gas with shock velocities of 20–100 км/с. However, all the studied ULXNe spectra show signatures of shock excitation, but even those ULXNe where the shocks are prevailing show presence of a hard ionizing source with a luminosity of at least $\sim 10^{38}$ эрг s^{-1} . Most likely shock waves, X-ray and EUV ionization act simultaneously in all the ULXNe, but they may be roughly separated in two groups: shock-dominated and photoionization-dominated ULXNe. The ULXs have to produce strong winds and/or jets ($\sim 10^{39}$ эрг s^{-1}) for powering their nebulae. Both the wind/jet activity and the existence of a bright UV source are consistent with the suggestion that ULXs are high-mass X-ray binaries with supercritical accretion disks of the SS433 type.

Key words: ultraluminous X-ray sources – optical spectroscopy – nebulae

1. Введение

1.1. Ультраяркие рентгеновские источники

Ультраярким рентгеновским источником (ULX) считается точечный источник вне ядра галактики, светимость которого превышает 10^{39} эрг с^{-1} . На настоящий момент известно более 150 ULX (Swartz et al., 2004), однако их природа еще неясна.

Светимость аккрецирующего компактного объекта ограничена эддингтоновской светимостью, близкой к 10^{39} эрг с^{-1} для черной дыры звездной массы ($\sim 10M_{\odot}$). Этот предел может быть превышен в несколько раз при сверхкритическом режиме аккреции (Shakura & Sunyaev, 1973; Abramowicz et al., 1980). Скорее всего, ULX — аккрецирующие черные дыры: их компактность доказывается быстрой переменностью некоторых из них (Krauss et al., 2005; Soria et al., 2006), а наблюдаемые светимости существенно превосходят эддингтоновский предел для $10M_{\odot}$.

Для объяснения природы ULX привлекаются различные модели, основанные на трех основных идеях:

- масса аккректора может быть существенно больше обычной для черных дыр звездного происхождения $\sim 10M_{\odot}$ (так называемые черные дыры промежуточных масс, IMBH) (Madau & Rees, 2001; Colbert & Miller, 2005);

- при сверхкритической аккреции полная светимость может быть существенно выше эддингтоновской (Shakura & Sunyaev, 1973; Begelman, 2002);

- рентгеновский источник может излучать анизотропно (Fabrika & Mescheryakov, 2001; King et al., 2001).

Первая из моделей, часто используемых для объяснения феномена ULX, — тесные двойные, содержащие IMBH. Аккреция из межзвездной среды не может иметь такие высокие темпы, чтобы обеспечить наблюдаемые светимости ULX, поэтому IMBH, вероятно, должны входить в двойные системы с массивной звездой-донором. Вероятные наблюдательные проявления тесных двойных систем с IMBH в роли аккректора рассматриваются в работах Norman et al. (2004) и Copperwheat et al. (2005)

Черные дыры промежуточных масс обычно считаются или компактными остатками звезд населения III (Madau & Rees, 2001), или результатом столкновений звезд в ядрах звездных скоплений или протоскоплений (Soria, 2006).

Вторая из наиболее популярных моделей для ULX — сверхкритические аккреционные диски в тесных двойных с черной дырой звездной массы и массивным донором. Предполагается, что их светимость превосходит эддингтоновскую в несколь-

ко раз, а излучение существенно анизотропно. Прототипом сверхкритических аккректоров можно считать уникальную двойную SS433 (Fabrika, 2004).

1.2. Отождествления в оптическом диапазоне

Большая часть хорошо изученных ULX отождествлена в оптике. В некоторых случаях рентгеновский источник идентифицирован со звездой — обычно OB-сверхгигантом (Liu et al., 2004; Terashima et al., 2006). Многие из объектов расположены в областях звездообразования и потому межзвездное поглощение может быть велико (Terashima et al., 2006).

Многие ULX расположены внутри туманностей (ULX Nebulae, ULXN), как правило оболочечной структуры, размерами более 100 пк (Pakull & Mirioni, 2003; Pakull et al., 2006). Спектры таких оболочек отличаются яркими линиями [S II] λ 6717, 6731, [N II] λ 6548, 6583, [O I] λ 6300, 6364, возбуждаемыми электронным ударом и характерными для остатков сверхновых (см., например, Braun & Walterbos, 1993). В некоторых случаях ULXN могут выглядеть совершенно иначе, например, туманность высокого возбуждения вокруг HoII X-1 (Lehmann et al., 2005) или компактная аномально яркая оболочка MF16 вокруг NGC6946 ULX1 (Abolmasov et al., 2006; Abolmasov et al., 2007a).

Интересной особенностью спектров некоторых ULXN является яркая эмиссионная линия He II λ 4686, типичная для туманностей, ионизованных рентгеном (XIN, X-ray Ionized Nebulae), что приводится в качестве аргумента в пользу больших рентгеновских светимостей ULX (Kaaret et al., 2004; Kuntz et al., 2005). Но так как экстремальное ультрафиолетовое излучение с длинами волн $\lambda \sim 100 - 200 \text{ \AA}$ намного эффективнее перерабатывается в линии He II, чем рентгеновское излучение, туманности вроде HoII X-1 и MF16 могут и не быть в действительности XIN. В некоторых случаях зарегистрировано уширение линии He II до скоростей ~ 1000 км/с (Grisé et al., 2006; Pakull et al., 2006). Широкая линия может возникать в атмосферах звезд Вольфа-Райе или в аккреционных дисках.

Многие ULX расположены вблизи молодых звездных скоплений, часто на расстояниях десятки-сотни парсек (Zezas et al., 2002). Имеются многочисленные указания на связь ULX с молодым (5-10 миллионов лет) звездным населением (Soria et al., 2005; Zezas et al., 2002; Abolmasov et al., 2007b). Для далеких ULX ($D \gtrsim 15$ Мпк) яркие звездные скопления становятся единственным оптическим отождествлением, пригодным для

изучения.

В следующем разделе мы описываем наши наблюдения ULXN на БТА. В разделе 3 изложены результаты спектроскопии и моделирования. В разделе 4 дискутируются следующие из полученных результатов выводы относительно природы ULX.

2. Наблюдения и обработка данных

Мы отбирали отождествленные в оптике рентгеновские источники в близких галактиках ($D \lesssim 10$ Мпк). Единственное исключение — NGC7331 X-1, но в этом случае объект совпадает с ярким ($V \approx 20^m$) звездным скоплением. Все галактики принадлежат к поздним типам по классификации Хаббла (S и Ir). В табл. 1 мы приводим информацию о наблюдавшихся объектах. Были использованы координаты, полученные на рентгеновской обсерватории *Chandra* с точностью не хуже $\pm 0.3''$. Данные взяты из работ Swartz et al. (2004), Roberts et al. (2003) в случае IC342 X-1, Terashima et al. (2006) в случае M51 X-7 и Mescheryakov (2004) для HoIX X-1.

Все наблюдения проводились на двух спектрографах: мультиспектральном волоконном спектрографе MPFS (Afanasyev et al., 2001) и фокальном редукторе SCORPIO (Афанасьев и др., 2005) в режиме длиннощелевой спектроскопии. Панорамная спектроскопия позволяет получить интегральные потоки без значительных систематических ошибок, свойственных наблюдениям с длинной щелью. С другой стороны, SCORPIO обладает в несколько раз большей квантовой эффективностью.

MPFS использовался с решеткой N4 (600 штрихов мм^{-1}), SCORPIO — с гризмами VPHG550G и VPHG1200G. Спектральные диапазоны и разрешения приведены в табл. 1. Размер изображений колебался от 1 до $2''$. Для источников, приведенных в табл. 1, хотя бы на одном из спектрографов были получены пригодные для анализа спектры.

Системы обработки данных были разработаны в среде IDL. Использовались процедуры, написанные В. Л. Афанасьевым, А. В. Моисеевым и П. К. Аболмасовым. Для длиннощелевой спектроскопии система обработки содержит все стандартные процедуры. Для панорамной спектроскопии использовались стандартные процедуры обработки данных MPFS (т. е. стандартные процедуры для редукции длиннощелевых спектров, экстракция отдельных спектров и калибровка чувствительности световодов). Для данных MPFS также учитывалась атмосферная дисперсия с точностью $\approx 0.1''$.

Параметры эмиссионных линий определялись с помощью гаусс-анализа. Аппроксимация дву-

мя гауссианами использовалась для дублета [SII] $\lambda\lambda 6717, 6731$ и бленда $\text{H}\gamma + [\text{OIII}]\lambda 4363$, $\text{HeII} \lambda 4686 + \text{FeIII} \lambda 4658$ и $\text{FeII} + \text{FeIII} \lambda 5262, 5270$. Сумма трех гауссиан использовалась для разрешения линии $\text{H}\alpha$ и дублета [NII] $\lambda\lambda 6548, 6583$ (для компонент которого были приняты фиксированные значения разности длин волн и отношения интенсивностей). Длины волн с точностью $\sim 0.1 \text{ \AA}$ взяты из работы Coluzzi (1996).

В спектрах всех объектов были обнаружены эмиссионные линии окружающих туманностей. А в некоторых случаях заметен также вклад от родительского скопления или ассоциации.

Среди изучаемых объектов — две крупномасштабные оболочечные туманности (HoIX X-1 и IC342 X-1) и четыре туманности высокого возбуждения (HoII X-1, NGC6946 ULX-1, M101 P098 и NGC5204 X-1). В двух случаях (M51 X-7 и NGC7331 X-1) получены спектры скоплений с относительно высоким отношением сигнал/шум.

3. Результаты и интерпретация

Полученные нами значения интегральных потоков и светимостей в эмиссионных линиях приведены в табл. 2. В последнем ряду делаются оценки полной мощности излучения туманности в предположении, что она возбуждается ударными волнами (см. раздел 3.1) или ультрафиолетовым излучением центрального источника (см. раздел 3.2).

3.1. Оболочечные туманности

Мы классифицируем туманности вокруг HoIX X-1 (MН9/10) и IC342 X-1 как ионизуемые и возбуждаемые ударными волнами (УВ) со скоростями 20–100 км/с, приблизительно известными по кинематическим данным. Светимость туманностей слишком велика, чтобы считать их фотоионизованными HII-областями — в противном случае пришлось бы предположить наличие центрального источника светимостью $L \gtrsim 10^{42}$ эрг с^{-1} . Их положение на ионизационных диаграммах (см. рис. 4) соответствует возбуждению ударными волнами умеренной мощности ($V_S \sim 100$ км/с). Полная мощность излучения туманности и средняя скорость ударной волны могут быть оценены, исходя из полной светимости в линии H β . Согласно Dopita & Sutherland (1996), полный поток энергии в ударной волне:

$$F_{tot} = 2.28 \times 10^{-3} V_2^3 n_0 \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}, \quad (1)$$

где V_2 — скорость ударной волны в единицах 100 км/с, n_0 — плотность водорода перед фронтом

Таблица 1: Свойства наблюдавшихся ULX. В колонках приведены: общепринятое обозначение объекта, координаты рентгеновского источника ($J2000$), расстояние D до родительской галактики, межзвездное поглощение в Галактике A_V в направлении на источник по Schlegel et al. (1998), угловое расстояние до центра родительской галактики в минутах дуги, содержание кислорода по Pilyugin et al. (2003) (даны значения для центров галактик, интерполированные значения на положение источника приведены в скобках), полное время экспозиции в секундах, спектральный диапазон и разрешение (для середины диапазона) в \AA для наблюдений на MPFS и SCORPIO

Объект ID	RA	Dec	D, Мпк	A_V	$R, '$	$12 + \lg(O/H)$	Проявления в оптике	MPFS		SCORPIO			
								t_{exp}	диапазон $\Delta\lambda$	t_{exp}	диапазон $\Delta\lambda$		
IC342 X-1	03 ^h 45 ^m 55 ^s .68	+68°04'54''9	3.28 ^a	1.51	14.86	8.85 (8.25)	туманность с ударным возбуждением (Roberts et al., 2003), $\sim 100pc$	6900	4000-6900	5	7200	3900-5700	5
HoII X-1	08 19 28.99	+70 42 19.4	3.39 ^b	0.105	13.74	7.92	НII-область с яркой эмиссией HeII λ 4686 (Lehmann et al., 2005)	1800	4000-6900	5	—	—	—
HoIX X-1	09 57 53.28	+69 03 48.4	3.7 ^b	0.261	16.06	[Fe/H]=-0.4 \div -0.7 ^c	оболочечная туманность MN9/10, 200 \times 400 пк (Miller, 1995)	4500	4000-6900	5	1200	3460-7460	10
NGC5204 X-1	13 29 38.62	+58 25 05.6	4.5 ^d	0.04	1.96	—	несколько голубых звезд область НII (Liu et al., 2004)	8400	4000-6900	5	2700	3900-5700	5
M51 X-7	13 30 00.99	+47 13 43.9	8.4 ^e	0.117	30.85	8.92 (6.72)	звездное скопление со смещенной НII-областью	3600	4000-6900	5	—	—	—
M101 P098	14 03 32.40	+54 21 03.1	7.2 ^f	0.029	2.54	8.8 (8.64)	туманность высокого возбуждения	4500	4000-6900	5	—	—	—
NGC6946 X-1	20 35 00.75	+60 11 30.9	5.5 ^g	1.141	33.31	8.7 (7.09)	пекулярная туманность MF16 (Blair et al., 2001)	5830	4000-6900	5	5400	3900-5700	5
NGC7331 X-1	22 37 06.75	+34 26 17.6	15.1 ^h	0.301	19.79	8.68 (7.02)	молодое звездное скопление + НII-область P98 (Petit, 1998)	—	—	—	2700	3460-7460	10

^a Saha et al.(2002)

^b Karachentsev et al.(2002)

^c Tully (1988)

^d Tully et al.(1992)

^e Feldmeier et al.(1997)

^f Stetson et al.(1998)

^g Hughes et al.(1998)

^h Makarova et al.(2002)

Таблица 2: Наблюдаемые потоки в $H\beta$, потоки в линиях в единицах потока в $H\beta$ и исправленные за межзвездное поглощение светимости ULXN. При исправлении за поглощение для NGC6946 X-1, HoII X-1, M101 P098 и NGC5204 X-1 использовался критерий $H\alpha/H\beta = 3$ и кривые покраснения Cardelli et al.(1998). Для NGC7331 X-1 использовалось оптимальное поглощение из модели звездного населения. Для других объектов использовалось поглощение в Галактике (ср. с табл. 1). Для NGC7331 X-1 в скобках даны остаточные светимости (подробности в тексте). Оценки полной мощности излучения для HoII X-1, NGC6946 X-1, M101 P098 и NGC5204 X-1 сделаны в предположении, что $H\beta$ – рекомбинационная линия (соответственно к ней применимы оценки числа ионизирующих квантов, см. раздел 3.2). Остальные рассматривались как туманности с ударным возбуждением, их полная мощность оценивалась при помощи уравнения (3)

	HoII X-1	NGC6946 X-1	HoIX X-1	IC342 X-1	NGC7331 X-1	M101 P098	NGC5204 X-1	M51 X-7
$F(H\beta)$, 10^{-15} эрг см^{-2} с^{-1}	11	4.66±0.13	12.6±0.6	4.3±0.08	1.52±0.07	0.5±0.2	1.0±0.3	0.67±0.13
A_V	0.19	1.34	0.26	1.51	1.40	0.41	1.22	0.12
H δ	–	0.16±0.13	0.40±0.15	–	0.05±0.07	–	–	–
H γ	0.45	0.381±0.015	0.31±0.10	0.28±0.02	0.34±0.02	–	–	–
[O III] λ 4363	0.08	0.174±0.019	0.133±0.15	–	0.03±0.01	–	–	–
He I λ 4471	0.08	0.06±0.06	–	0.051±0.015	–	3±1	–	0.6±0.5
He II λ 4686	0.14	0.170±0.015	0.06±0.02	0.036±0.015	–	–	–	–
He I λ 4713	0.01	–	–	–	–	–	–	–
He I λ 4922	0.01	–	–	–	–	–	–	–
[O III] λ 4959	1.00	2.25±0.05	0.537±0.06	0.219±0.015	0.35±0.04	1.7±0.3	2.0±0.2	0.47±0.14
[O III] λ 5007	3.00	7.06±0.06	1.47±0.04	0.837±0.016	1.15±0.05	5.6±0.3	5.8±0.3	0.92±0.16
[N I] λ 5200	–	0.15±0.05	0.07±0.03	0.302±0.014	0.08±0.04	0.3±0.1	–	–
He II λ 5412	0.02	0.14±0.05	–	–	–	–	–	–
[N II] λ 5755	–	0.118±0.15	0.04±0.02	–	0.02±0.03	–	–	–
He I λ 5876	0.07	0.11±0.02	0.17±0.04	2.6±0.4	0.13±0.04	–	–	–
([O I] λ 6300+ [S III] λ 6310)	0.11	1.42±0.08	0.92±0.14	2.3±0.4	0.15±0.04	–	–	–
[O I] λ 6364	0.03	0.48±0.03	0.34±0.06	0.50±0.15	0.02±0.02	–	–	–
H α	3.20	4.728±0.087	3.79±0.10	5.8±0.1	6.375±0.009	3.45±0.10	4.5±0.5	5.18±0.10
[N II] λ 6583	0.08	4.16±0.08	1.18±0.08	4.5±0.1	2.00±0.01	1.24±0.10	0.6±0.1	2.9±0.2
He I λ 6678	0.03	0.06±0.03	~1?	0.2±0.1	0.04±0.03	–	–	–
[S II] λ 6717	0.32	2.46±0.02	1.73±0.04	3.6±0.2	0.97±0.02	0.6±0.2	1.6±0.3	1.29±0.15
[S II] λ 6731	0.29	2.35±0.02	1.2±0.04	2.6±0.2	0.71±0.02	0.6±0.3	1.1±0.3	0.97±0.18
Светимости, 10^{37} эрг с^{-1} :								
He II λ 4686	0.22	1.31±0.10	0.07±0.02	0.1±0.02	$\lesssim 1$	$\lesssim 0.2$	$\lesssim 0.1$	
H β	1.67	7.2±0.3	2.73±0.13	3.3±0.6	21.45±0.19 (6.9)	0.3±0.1	0.9±0.1	0.6±0.1
[O III] λ 5007	5.01	48±3	3.97±0.12±	1.4±0.3	19.72±0.19 (12.7)	1.7±0.5	5±1	0.6±0.1
[S II] λ 6717,6731	1.02	35±1	7.3±0.4	10.5±0.5	18.2±0.5 (17.2)	0.4±0.2	1.6±0.5	1.4±0.2
Оценка полной мощности излучения	70	500	300	300	(700)	12	60	70

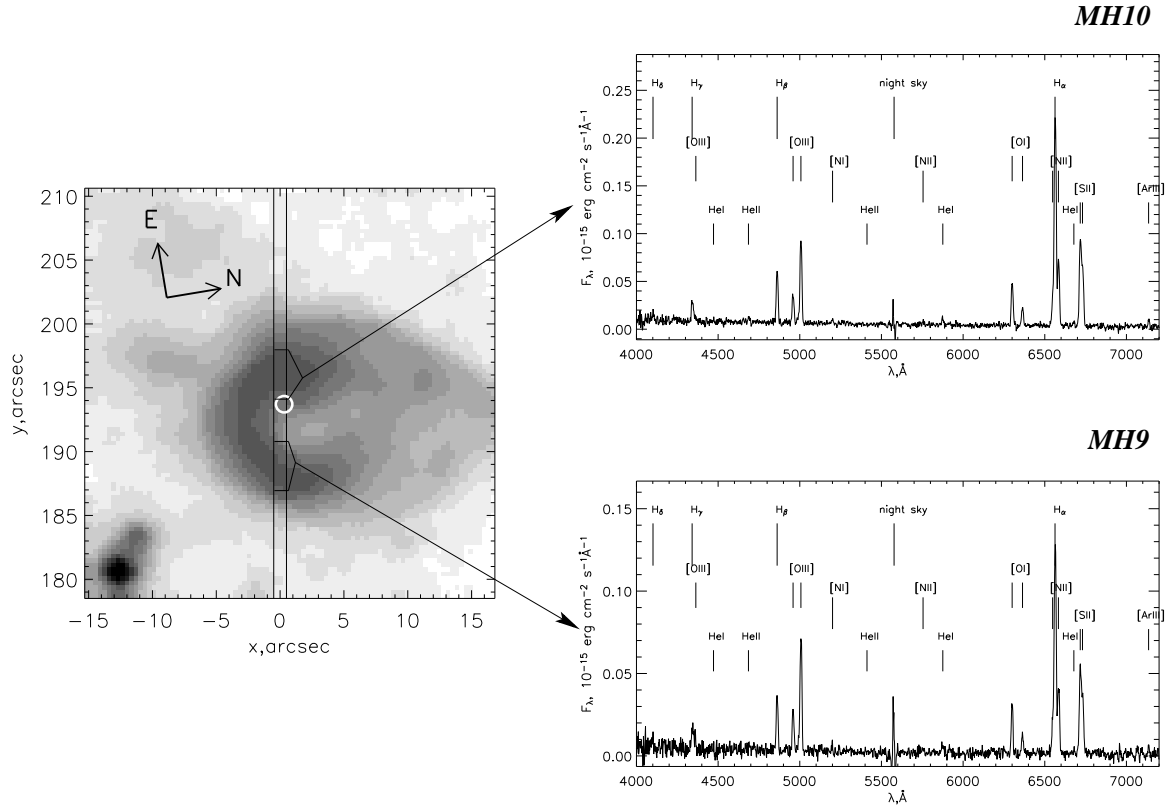


Рис. 1: Изображение MN9/10 (туманность, связанная с HoIX X-1) в линии H α (получено на SCORPIO) с указанием положения длинной щели шириной 1". Положение рентгеновского источника отмечено белым кружком. Справа показаны спектры двух частей туманности, известных как MN9 (внизу) и MN10 (вверху). В верхнем спектре заметна эмиссия He II $\lambda 4686$.

волны в cm^{-3} . Для полного потока в H β :

$$F_{H\beta} = F_{H\beta, shock} + F_{H\beta, precursor} = (7.44 \times 10^{-6} V_2^{2.41} + 9.86 \times 10^{-6} V_2^{2.28}) n_0 \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}. \quad (2)$$

Слагаемое, обозначенное как $F_{H\beta, shock}$, относится к излучению остывающего газа за фронтом волны и с известной точностью характеризует любые одномерные стационарные ударные волны в астрофизических условиях. Второе слагаемое ($F_{H\beta, precursor}$) соответствует излучению газа перед фронтом УВ, ионизованного ультрафиолетовым излучением остывающего вещества за фронтом УВ. Из (1) и (2) получаем зависимость между светимостью в H β , полной мощностью излучения туманности и скоростью УВ:

$$L_{H\beta} = (3.26 \times 10^{-3} V_2^{-0.59} + 4.32 \times 10^{-3} V_2^{-0.72} \Theta) L_{tot}, \quad (3)$$

где $\Theta = 1$, если $V_2 \gtrsim 1.5$ и $\Theta = 0$, если $V_2 \lesssim 1.5$. Отсюда полная мощность может быть оценена как $L_{tot} \sim (100 \div 300) L_{H\beta}$.

В длиннощелевых спектрах MN9/10, представленных на рис. 1, регистрируется эмиссионная ли-

ния He II $\lambda 4686$, излучаемая в области вблизи рентгеновского источника и центрального скопления (Grisé et al., 2006). На рис. 2 мы приводим одномерные карты (разрезы вдоль щели) окрестностей рентгеновского источника, показывающие, что линия He II излучается на краю скопления, расположенного внутри туманности. Мы оцениваем светимость в линии как $\approx (2 \div 4) \times 10^{36}$ эрг с^{-1} (с учетом потерь на щели — фактор 2-4). Наши результаты согласуются с результатами Grisé et al. (2006), которые также зарегистрировали линию He II $\lambda 4686$.

В спектрах туманности MN9/10 линия He II $\lambda 4686$ может иметь звездное происхождение. Возможные источники ярких линий He II — звезды Вольфа-Райе (Conti et al., 1983) и аккреционные диски. Для звезд WN эквивалентная ширина эмиссионной линии может достигать 400 \AA . Оптическая светимость ярких WN составляет $10^{37} \div 10^{38}$ эрг с^{-1} , таким образом, одной такой звезды достаточно, чтобы объяснить наблюдаемую светимость в линии He II $\lambda 4686$.

Ярчайшие эмиссионные линии в спектре туманности IC342 X-1 свидетельствуют об ударном

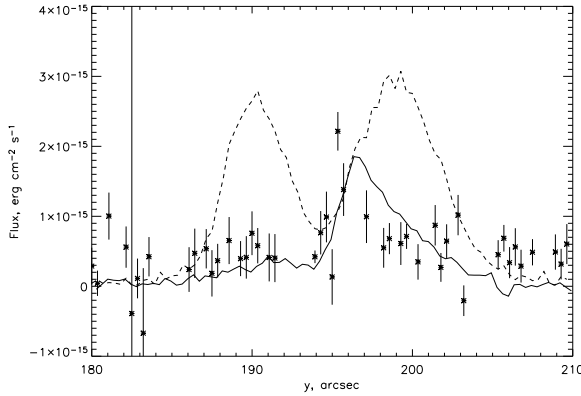


Рис. 2: Разрезы вдоль щели для туманности M9/10: континуум (сплошная линия); спектр с удаленными посредством медианного фильтра эмиссионными линиями проинтегрирован от 4000 до 7000 Å), H α (штриховая линия) и He II λ 4686 (звездочки с баррами ошибок).

возбуждении. В то же время ее интегральный спектр (рис. 3) содержит сравнительно слабые линии He II и [Fe III], излучаемые газом внутренних частей туманности. Набор линий высокого возбуждения напоминает таковой у MF16 (см. след. раздел).

3.2. NGC6946 X-1

Источник NGC6946 X-1 связан с пекулярной туманностью MF16, в течение долгого времени считавшейся ярким остатком сверхновой. Это наиболее компактная (20пк \times 34пк) и одна из ярчайших туманностей среди ULXN. Интегральный спектр характеризуется наибольшими среди рассматриваемых объектов отношениями [O III] λ 5007/H β \simeq 7 и [N II] λ 6583/H α \simeq 0.8.

Градиенты скоростей и профили эмиссионных линий в интегральных спектрах соответствуют скоростям расширения не более 200 км/с. В работе Dunne et al. (2000) линии H α , [N II] и [O III] были разрешены на узкую (FWHM \sim 20-40 км/с) и широкую (FWHM \sim 250 км/с) компоненты, связанные с динамически возмущенным и невозмущенным веществом соответственно. Основываясь на спектрах, полученных на MPFS и SCORPIO, мы провели тщательный анализ источников возбуждения и ионизации в туманности (Abolmasov et al., 2006; Abolmasov et al., 2007a), придя к заключению, что большая часть мощности ее излучения обусловлена не ударными волнами, а вкладом ионизирующего ультрафиолетового излучения, по мощности превосходящего излучение самого ULX. Фотоионизационное моделирование с использованием программ CLOUDY (Ferland et al., 1998) позволяет оценить параметры ультрафиолетового источника

в предположении, что распределение энергии в спектре соответствует абсолютно черному телу: $T = 10^{5.15 \pm 0.15} K$, $L = (7.5 \pm 0.5) \times 10^{39}$ эрг с $^{-1}$.

Независимые оценки ультрафиолетовой светимости могут быть сделаны по оценке числа квантов, ионизирующих водород и гелий. Если линии He II λ 4686 и H β — чисто рекомбинационные, можно применить соотношения из работы Osterbrock (1974):

$$L(\lambda < 228\text{\AA}) \geq \frac{4Ry}{E(\lambda 4686)} \frac{\alpha_B(\text{He}^{++})}{\alpha_{\text{HeII } \lambda 4686}^{\text{eff}}} \times L_{\text{HeII } \lambda 4686} \simeq \simeq 100 L_{\text{HeII } \lambda 4686}, \quad (4)$$

$$L(\lambda < 912\text{\AA}) \geq \frac{1Ry}{E(\text{H}\beta)} \frac{\alpha_B(\text{H}^+)}{\alpha_{\text{H}\beta}^{\text{eff}}} \times L_{\text{H}\beta} \simeq 65 L_{\text{H}\beta}. \quad (5)$$

Здесь α_B — полные коэффициенты рекомбинации (см 3 с $^{-1}$) в “случае В” (среда оптически толстая для квантов, ионизирующих водород и гелий), α^{eff} — эффективные коэффициенты рекомбинации для данных эмиссионных линий (учитывающие только процессы рекомбинации, приводящие к излучению соответствующего кванта). Отношения $\alpha_B(\text{He}^{++})/\alpha_{\text{HeII } \lambda 4686}^{\text{eff}}$ и $\alpha_B(\text{H}^+)/\alpha_{\text{H}\beta}^{\text{eff}}$ слабо зависят от параметров среды. Первое меняется примерно вдвое при изменении температуры в пределах $(0.3 \div 10) \times 10^4 K$, второе — примерно на 20%.

В табл. 2 для фотоионизованных туманностей мы приводим оценку полной мощности излучения, основанную на формуле (5). Светимость ионизирующего источника может быть переоценена, если существен вклад от ударных волн. В разделе 4.2 обсуждается вопрос о природе ультрафиолетового источника.

Спектр MF16, полученный на SCORPIO с большим отношением сигнал/шум, показывает многочисленные линии высокого возбуждения, в основном [Fe III]. Интегральный спектр показан на рис. 5.

3.3. Туманности высокого возбуждения

Рядом с двумя источниками (M101 P098 и NGC5204 X-1) мы обнаружили области с большим отношением интенсивностей линии [O III] λ 5007/H β $>$ 5. Они видны как яркие пятна на картах в линии [O III] λ 5007 на рис. 6. Отношения [O III] λ 5007/H β для них близки к таковому для MF16, но полные светимости на порядок меньше в случае NGC5204 X-1 и еще меньше для M101 P098.

Туманность M101 P098 при достаточном разрешении выглядит как яркая в линиях [O III] λ 5007, 4959 продолговатая область размером приблизительно $1'' \times 4''$, что при расстоянии 7.2 Мпк соответствует линейным размерам около $35\text{пк} \times 140\text{пк}$ (см. рис. 6a).

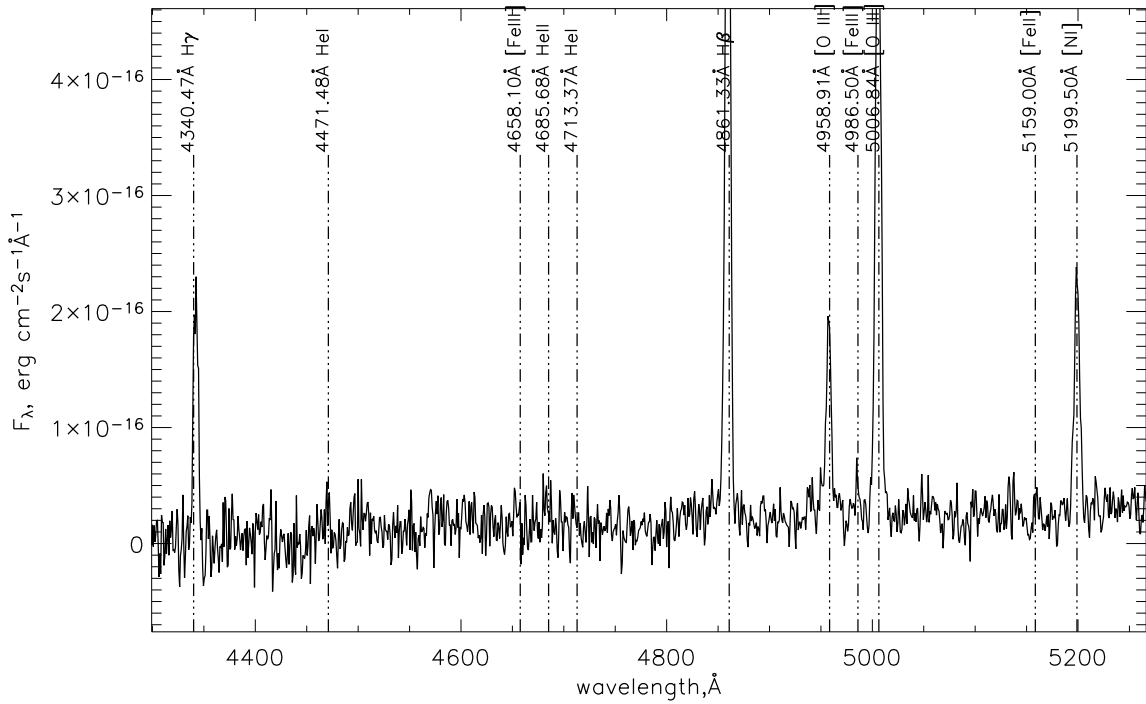


Рис. 3: Спектр туманности вокруг ULX IC342 X-1, полученный на спектрографе SCORPIO. Линия He II $\lambda 4686$ возникает в центральной части ULXN.

Яркие эмиссионные линии [O III] свидетельствуют или об ионизирующем источнике, способном обеспечить ионизационный параметр¹ $\gtrsim 10^{-3}$ на расстоянии ~ 50 пк, или об ударных волнах со скоростями $V_S \gtrsim 300$ км/с, распространяющихся на похожих масштабах (Evans et al., 1999; Dopita & Sutherland, 1996). Источник ионизации должен иметь светимость в ионизирующем водород диапазоне $\gtrsim 2 \times 10^{38}$ эрг с⁻¹, поэтому M101 P098 может считаться аналогом MF16 в более разреженной межзвездной среде. С другой стороны, ударные волны со скоростями $V_S \sim 300 - 500$ км/с должны иметь сходную мощность $(1.5 - 2) \times 10^{38}$ эрг с⁻¹, чтобы обеспечить наблюдаемую светимость в H β . Логично предположить, что по аналогии с MF16 эти туманности высокого возбуждения с большей вероятностью являются фотоионизованными III-областями.

Другой пример ULXN высокого возбуждения — туманность Ho II X-1. Отношение

¹ Мы определяем ионизационный параметр как (см., например, Evans et al. (1999)):

$$U = \frac{1}{cn} \int_{Ry}^{+\infty} \frac{F_E}{E} dE$$

где n — концентрация водорода.

[O III] $\lambda 5007$ /H $\beta \sim 3$, что существенно меньше значений, наблюдаемых для MF16, M101 P098 и NGC5204 X-1, однако Ho II имеет сравнительно низкое содержание кислорода, поэтому физические условия могут быть очень близкими. Эмиссия He II $\lambda 4686$ очень яркая по сравнению с H β ($F(\text{He II } \lambda 4686)/F(\text{H } \beta) \sim 0.2$), но полная светимость в линии He II на порядок меньше, чем у MF16. Наши результаты по спектроскопии туманности Ho II X-1 опубликованы в работе Lehmann et al. (2005). Спектр, полученный с длинной щелью на спектрографе UAGS, приведен на рис. 7.

3.4. Звездные скопления

Два наблюдавшихся ULX отождествляются с яркими изолированными звездными скоплениями: NGC7331 X-1 и M51 X-7. Среди других объектов, связанных со скоплениями, — Ho IX X-1 (скопление сравнительно слабое ($V \sim 20^m 5$), расположено в стороне от объекта) и NGC5204 X-1 (скопление является частью более сложной области звездообразования).

NGC7331 X-1 совпадает с практически точечным оптическим источником, не разрешаемым при наземных наблюдениях. При расстоянии 15 Мпк

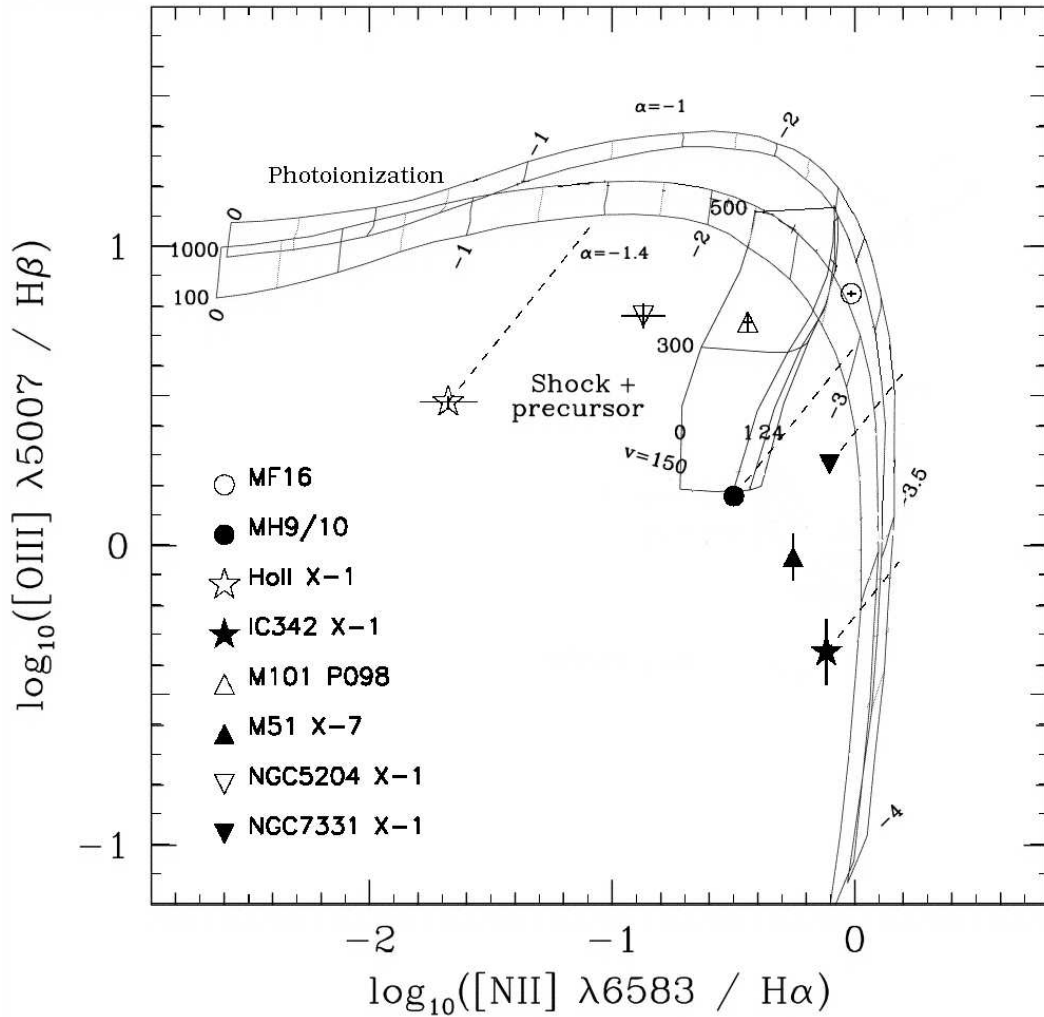


Рис. 4: Ионизационная диаграмма для наблюдавшихся ULXN. Штриховые линии отмечают вероятное смещение точек на диаграмме из-за отличных от солнечного содержания элементов при тех же физических условиях. Модельные сетки взяты из работы Evans et al. (1999). Кривые, простирающиеся от правого нижнего до левого верхнего угла диаграммы, — фотоионизационные модели, рассчитанные при помощи программы MAPPINGsII. Предполагается, что спектр источника степенной. Для моделей приведены логарифмы ионизационного параметра (меняется от -4 до 0) и плотности водорода (100 и 1000 см^{-3} , сверху слева). Для моделей спектров ударных волн, рассчитанных с помощью MAPPINGsII, приведены значения скорости УВ в км/с и магнитного параметра ($0, 1, 2, 4$), подробности изложены в работах Evans et al. (1999) и Allen et al. (1998).

его размер около 50 пк. На снимках *HST* источник разрешается на яркое молодое скопление и несколько близких объектов послабее. Со скоплением совпадает НП-область P98 (Petit, 1998). В отдельной статье (Abolmasov et al., 2007b) мы подробно рассматриваем свойства звездного населения и туманности, используя данные *HST* и SCORPIO. Спектр звездного населения аппроксимировался моделями StarBurst99 (Leitherer et al., 1999; Vázquez & Leitherer, 2005) с солнечной металличностью и металличностью, равной 0.4 солнеч-

ной. В результате получен оптимальный возраст $T = 4.25 \pm 0.5$ миллионов лет и масса скопления $M \sim 40000 M_{\odot}$. Интегральный спектр вместе с оптимальной моделью StarBurst99 и соответствующим спектром фотоионизованной НП-области приведен на рис. 8. Солнечная металличность дает несколько лучшее согласие с данными наблюдений. В спектре присутствуют детали, свидетельствующие о наличии нескольких звезд WC. Эмиссионный спектр не может быть целиком объяснен фотоионизацией за счет излучения централь-

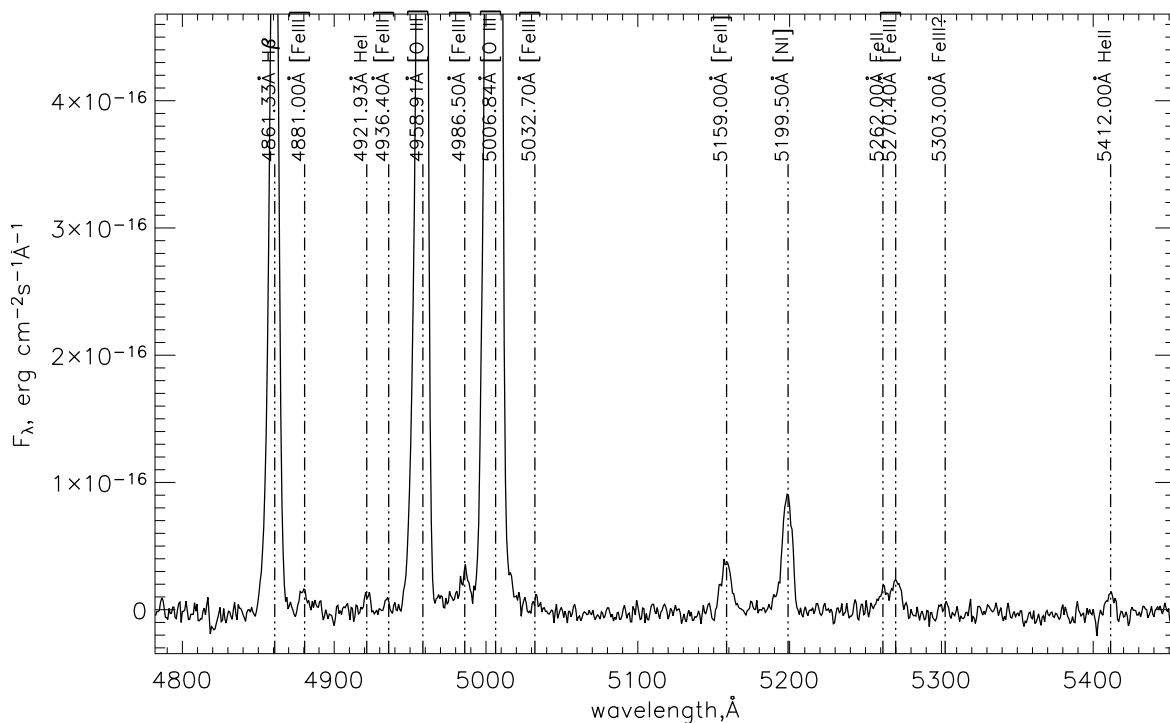
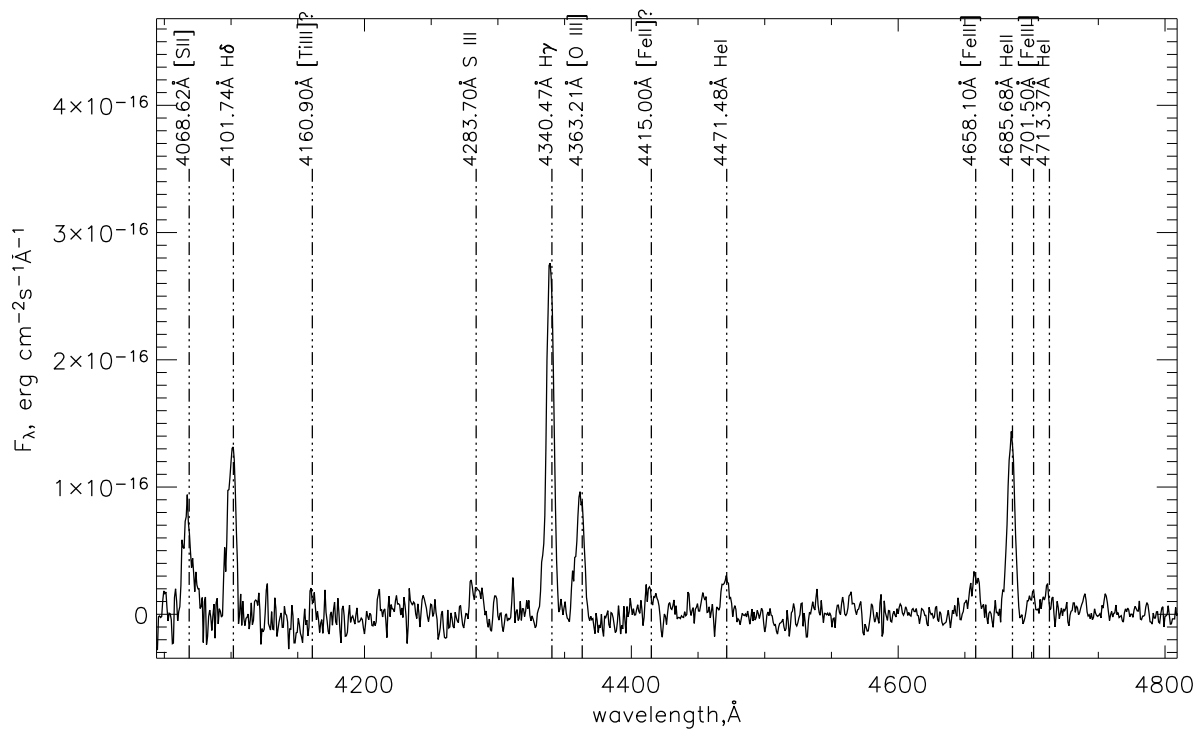


Рис. 5: Интегральный спектр MF16 (туманность, связанная с NGC6946 ULX-1), полученный на SCORPIO.

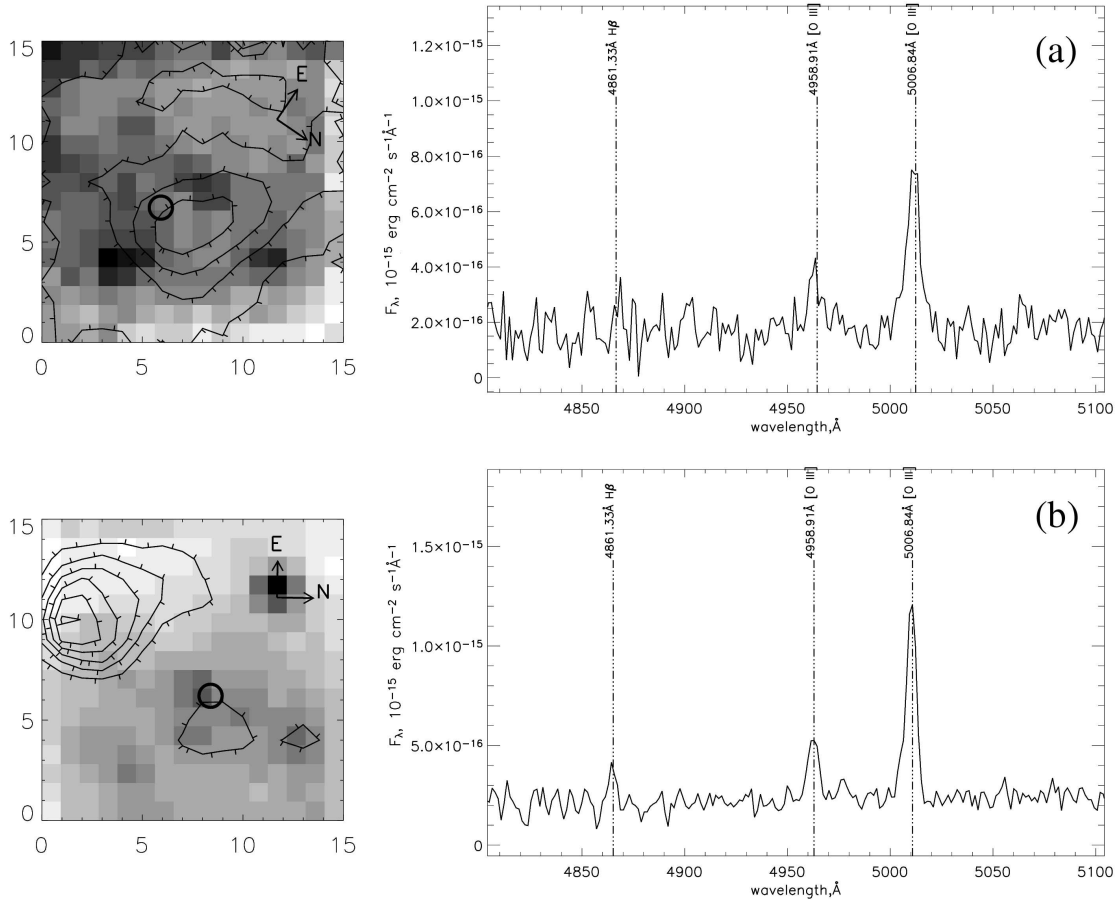


Рис. 6: *ULX* высокого возбуждения в *M101* (a) и *NGC5204* (b) в поле *MPFS* ($16'' \times 16''$). Слева показаны карты потоков в континууме с изофотами в дублете $[O\ III]\lambda 4959, 5007$. Здесь и далее штрихи на изофотах указывают направление уменьшения потока. Справа приведены спектры ярких в $[O\ III]$ областей. Положения рентгеновских источников отмечены кружками.

ного скопления. Линии вроде $[S\ II]\lambda 6717, 6731$ и $[N\ II]\lambda 6548, 6583$, возбуждаемые электронным ударом, существенно ярче, чем должны были быть в случае фотоионизации за счет центрального скопления. Учет вклада звездных ветров и остатков сверхновых в интегральный спектр также не может полностью объяснить избыточную светимость в линиях низкого возбуждения. Вероятно, в этом случае *ULX* может быть связан с дополнительным источником механической энергии с мощностью, близкой к полной светимости *MF16*. Остаточные светимости *III*-области, связанной с *NGC7331 X-1*, даны в скобках в табл. 2.

M51 X-7 расположен на окраине яркого звездного скопления (рис. 9), уверенно отождествленного нами как молодое массивное скопление *n5194-839* из списка *Larsen (2000)*, с абсолютной звездной величиной $M_V = -11^m.09$ и показателем цвета $U - B = -0^m.81$, что свидетельствует о мо-

лодости объекта (~ 12 миллионов лет). В то же время наше моделирование спектра скопления с помощью *StarBurst99*, указывает на существенно больший возраст — $T = 60 \pm 15$ миллионов лет, и $A_V = 0^m.5 \pm 0.1$. Скорее всего, звездное население различных возрастов присутствует в окрестностях рентгеновского источника. Локальный максимум эмиссионной линии $H\alpha$, сопровождаемой яркими линиями $[N\ II]\lambda 6583, 6548$ и $[S\ II]\lambda 6717, 6731$, совпадает с рентгеновским источником в пределах пространственного разрешения. Так как эмиссионный спектр содержит признаки ударного возбуждения, мы используем формулу (3) для оценки полной мощности излучения. Подробному исследованию объекта будет посвящена отдельная статья.

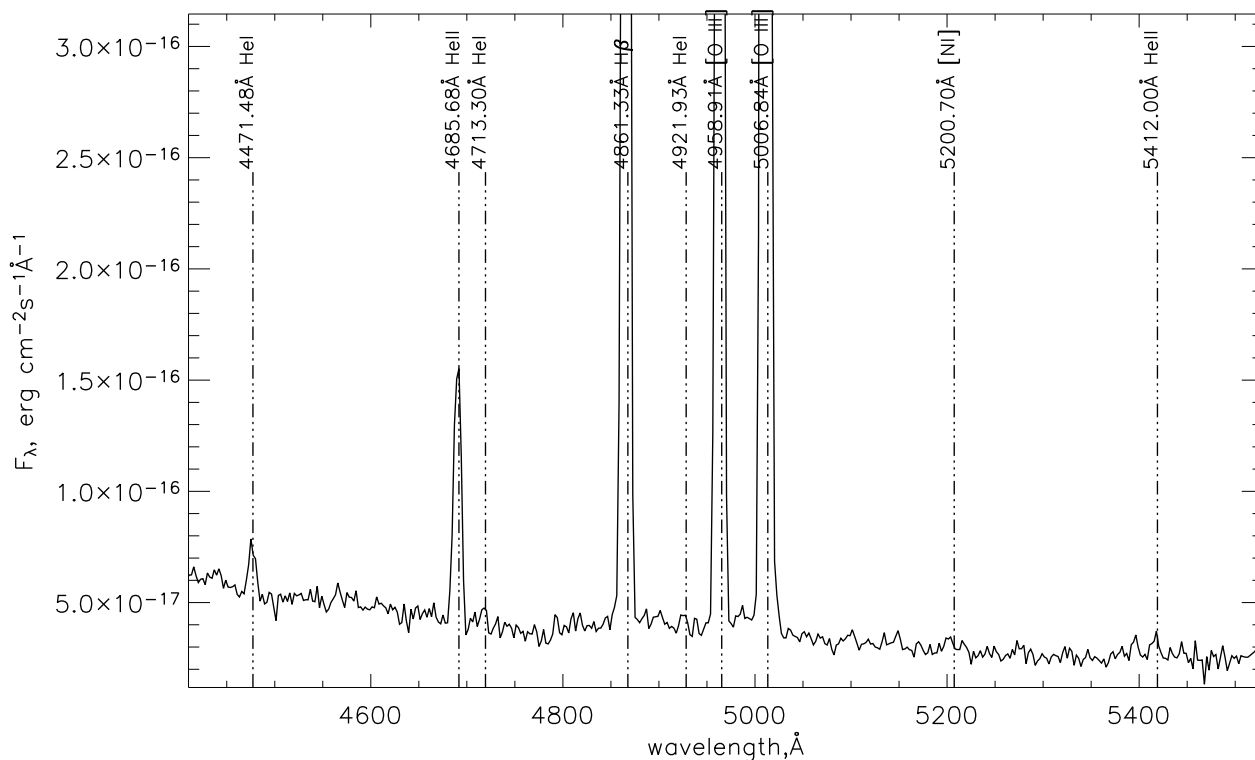


Рис. 7: Интегральный спектр туманности HoII X-1 (Lehmann et al., 2005). Показана часть диапазона между 4500 и 5500 Å.

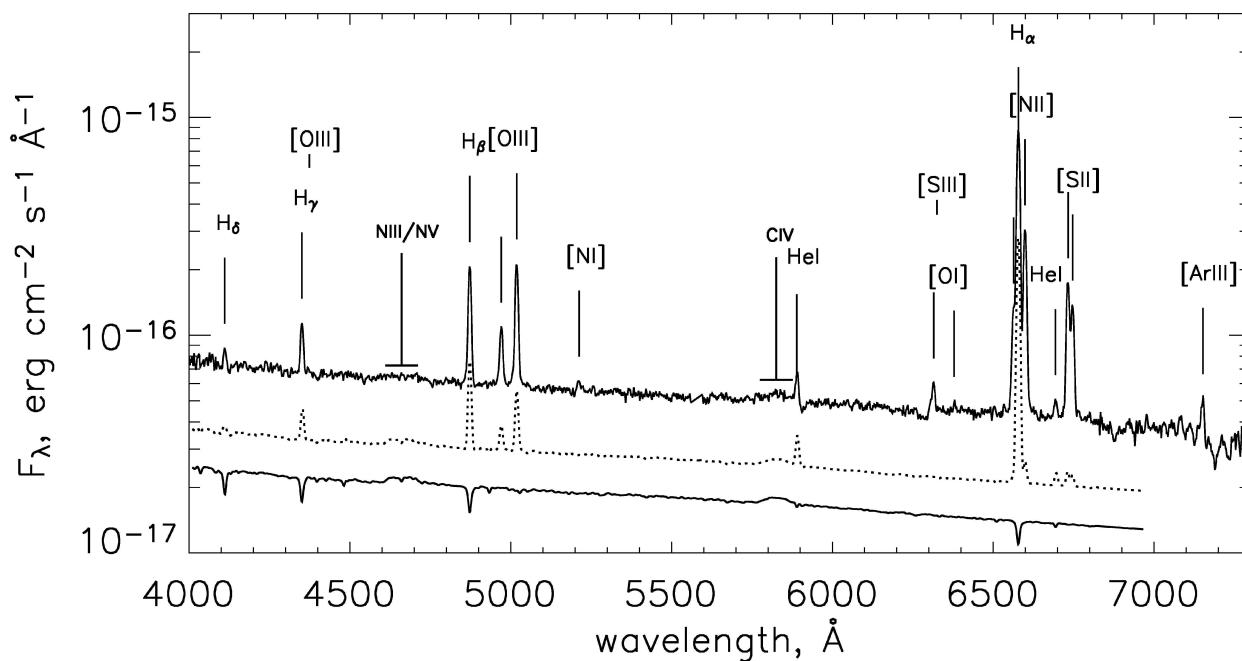


Рис. 8: Интегральный спектр скопления NGC7331 X-1 (верхняя сплошная линия), оптимальная модель StarBurst99 (нижняя сплошная) и оптимальная модель StarBurst99 + спектр фотоионизованной H II-области (в середине). Модельные спектры сдвинуты в вертикальном направлении.

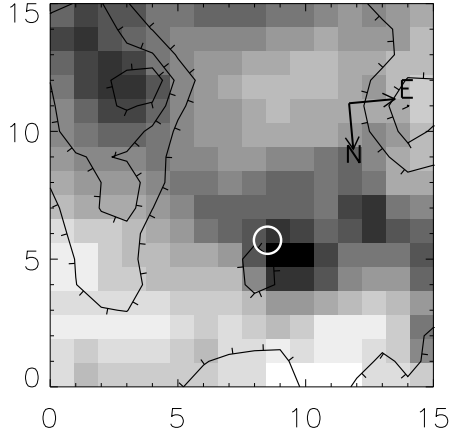


Рис. 9: Поле MPFS ($16'' \times 16''$), содержащее ULX M51 X-7. Показана карта потоков в континууме с наложенными изофотами в $H\alpha$. Положение рентгеновского источника отмечено белым кружком.

4. Обсуждение

4.1. Металличность и обилие кислорода

Содержание кислорода для родительских галактик ULX по Pilyugin et al. (2003) приведено в табл. 1. Soria (2006) предполагает, что низкие металличности могут быть существенны для понимания природы ULX. Многие из объектов действительно наблюдаются в галактиках с пониженной относительно солнечной металличностью, в основном на уровне 20-50% от солнечной. В то же время в нашей работе по NGC7331 X-1 (Abolmasov et al., 2007b) мы приходим к выводу, что модели с солнечной металличностью приводят к лучшему согласию с наблюдениями, чем с $[Fe/H] = -0.4$ и меньше.

Для HII-областей легче делать оценки содержания кислорода и азота, чем $[Fe/H]$. Для некоторых из наших объектов обилие кислорода может быть оценено по методу Pagel et al. (1992), основанному на близости ионизационных потенциалов кислорода и водорода. В методе используются модели McCall (1984) трехуровневых квантовых систем, позволяющие надежно прокалибровать относительное содержание ионов по отношениям интенсивностей запрещенных линий. Используются следующие соотношения для двух степеней ионизации кислорода:

$$12 + \lg \frac{O^+}{H^+} = \lg \frac{I_{[OII]\lambda 3726 + \lambda 3729}}{I_{H\beta}} + 6.174 + \frac{1.251}{t_3} - 0.55 \lg t_3,$$

$$12 + \lg \frac{O^{++}}{H^+} = \lg \frac{I_{[OIII]\lambda 4959 + \lambda 5007}}{I_{H\beta}} + 5.890 + \frac{1.676}{t_2} - 0.40 \lg t_2 + \lg \left(1 + 1.35 \times 10^{-4} n_e t_2^{-1/2} \right),$$

где n_e — электронная концентрация в см^{-3} , t_3 и t_2 — электронные температуры (в единицах $10^4 K$) газа, излучающего в [O II] и [O III] соответственно. Значение t_3 может быть получено из чувствительного к электронной температуре отношения интенсивностей линий $I_{[OIII]\lambda 4959 + \lambda 5007} / I_{[OIII]\lambda 4363}$. Из-за близости потенциалов ионизации OII и NII t_2 должна быть близкой к электронной температуре, определенной по другому отношению линий, $I_{[NII]\lambda 6583 + \lambda 6548} / I_{[NII]\lambda 5755}$. Обычно линии и [O II], и [O III] присутствуют в любой HII-области. Полное содержание кислорода может быть оценено как сумма содержаний [O II] и [O III] (более высокие степени ионизации не учитываются):

$$12 + \lg \frac{O}{H} \simeq 12 + \lg \left(\frac{O^+}{H^+} + \frac{O^{++}}{H^+} \right).$$

К сожалению, линия [O II] $\lambda 3727$ не была нами зарегистрирована из-за ограниченного спектрального диапазона MPFS и падения чувствительности SCORPIO в ближнем ультрафиолете. Для определения содержания кислорода исключительно по линиям [O III] потребуются дополнительные предположения.

Для MF16 нами были получены оценки температур $t_3 = 1.9 \pm 0.1$ и $t_2 \simeq t_n = 1.5 \pm 0.2$ и электронной плотности $n_e \simeq 500 \text{ см}^{-3}$ (по отношению компонента дублета [S II] $\lambda 6717, 6731$). Для MF16 содержание кислорода не может сильно отличаться от солнечного, так как в спектре присутствуют яркие эмиссионные линии как [O I], так и [O III]. Для достаточно широкого диапазона параметров модели CLOUDY, успешно предсказывающие большую часть отношений интенсивностей линий, дают $I_{[OII]\lambda 3726 + \lambda 3729} / I_{[OIII]\lambda 4959 + \lambda 5007} \sim 1$. Используя эту оценку вместе с наблюдаемым отношением $I_{[OIII]\lambda 4959 + \lambda 5007} / I_{H\beta} \simeq 9$, оценками температуры и плотности, получаем содержание кислорода $12 + \lg \frac{O}{H} \simeq 8.5$, то есть практически солнечное.

4.2. Ультрафиолетовые источники

В тех случаях, когда ULX отождествлен с точечным оптическим источником, этот источник обычно оказывается голубым сверхгигантом с $M_V \sim -5 \div -8^m$ (Terashima et al., 2006). С другой

стороны, существуют указания на то, что некоторые из ULX должны быть яркими источниками в экстремальном ультрафиолетовом диапазоне ($20\text{\AA} \lesssim \lambda \lesssim 1000\text{\AA}$), ответственном за ионизацию водорода и гелия. В рамках двух наиболее популярных моделей (IMBH в составе двойной системы и сверхкритическая аккреция на черную дыру звездной массы) мы можем ожидать следующие объяснения высокой светимости этих источников:

— Очень массивная черная дыра промежуточной массы ($M \gtrsim 10^4 M_\odot$), аккрецирующая на уровне нескольких процентов от критического темпа. Вклад звезды-донора в экстремальную ультрафиолетовую светимость почти наверняка пренебрежимо мал.

— Сверхкритический аккреционный диск (SCAD) с черной дырой звездной массы и излучающей в ультрафиолете псевдотермосферой диска, вроде той, что наблюдается у SS433 (Fabrika, 2004).

Предполагается, что тесные двойные с черными дырами промежуточных масс имеют практически стандартные аккреционные диски (потому что темп аккреции по отношению к критическому почти наверняка в пределах $0.01 - 1.0$) с низкими внешними температурами. Аккреционный диск должен подвергаться приливному обрешиванию со стороны донора, и его радиус будет составлять около 0.5 радиуса полости Роша (Blondin, 2000), практически совпадающего с размером системы, $a \sim R_* (M_{BH}/M_*)^{1/3}$. Отсюда оценка внешней температуры диска:

$$T_{out} \simeq 10^{-3} T_{in} \left(\frac{R_*}{10R_\odot} \right)^{-3/4} \left(\frac{M_{BH}}{10^3 M_\odot} \right)^{-1} \left(\frac{M_*}{10M_\odot} \right)^{-1}.$$

Таким образом, при внутренней температуре $T_{in} \sim 0.1-1$ кэВ внешняя температура соответствует ИК-диапазону. И в оптическом, и в ультрафиолетовом диапазонах аккреционные диски вокруг IMBH должны иметь приблизительно степенные спектры с $F_\nu \propto \nu^{1/3}$ (Shakura & Sunyaev, 1973).

Согласно Routanen et al. (2006), температура внешней фотосферы сверхкритического аккреционного диска может быть выражена как функция массы черной дыры m в массах Солнца и темпа аккреции \dot{m} в единицах критического темпа:

$$T_{ph} = \begin{cases} 0.2 \text{кэВ } m^{-1/4} \dot{m}^{-1} & \text{for } v \propto r^{-1/2} \\ 0.8 \text{кэВ } m^{-1/4} \dot{m}^{-3/4} & \text{for } v = const, \end{cases} \quad (6)$$

здесь v — радиальная компонента скорости истекающего ветра, формирующегося внутри радиуса сферизации диска. $v \propto r^{-1/2}$ соответствует случаю, когда скорость всюду пропорциональна вириальной, $v = const$ для сравнительно быстрого ветра с постоянной скоростью.

Для темпов аккреции $\dot{m} \sim 10 - 100$ максимум в спектре излучения фотосферы попадает в область сотен ангстрем при светимостях $10^{39} \div 10^{40}$ эрг с^{-1} .

На рис. 10 мы представляем распределения энергии в спектре для стандартного многотемпературного локально-чернотельного диска (Shakura & Sunyaev, 1973; Mitsuda et al., 1984) вокруг IMBH различных масс и чернотельных фотосфер сверхкритических аккреционных дисков с различными температурами. Показано также распределение энергии в спектре NGC6946 ULX-1, полученное из рентгеновских и оптических наблюдений. Распределение энергии в наблюдаемом спектре выглядит существенно более плоским, чем чернотельное или для многотемпературного диска. Это может быть качественно объяснено наложением спектра двойной системы, в которой идет сверхкритическая аккреция (Fabrika et al., 2007). В этом случае имеются три тепловые компоненты: от канала аккреционного диска, излучающего $\sim 10^{39} - 10^{40}$ эрг с^{-1} в рентгеновском диапазоне, фотосферы ветра ($\sim 10^{39} - 10^{40}$ эрг с^{-1} в ЭУФ/УФ) и от массивной звезды-донора ($\sim 10^{38}$ эрг с^{-1} в ультрафиолетовом и оптическом диапазонах).

Если ULX действительно являются сверхкритическими аккреторами, то можно ожидать, что у них широкий диапазон темпов аккреции и как следствие — большое разнообразие фотосферных температур и ультрафиолетовых спектров при практически неизменных спектрах в рентгеновском диапазоне. Для $\dot{m} \sim 100$ вероятно существование яркого источника в экстремальном ультрафиолете и как следствие — фотоионизованной туманности. При $\dot{m} \lesssim 10$ туманность будет более слабой с яркими линиями высокого возбуждения, вроде He II $\lambda 4686$ и [O III] $\lambda 5007$. Вероятно, это соответствует случаю Ho II X-1 и M101 P098. Очень большие темпы аккреции ($\dot{m} > 1000$) должны проявляться в очень мягком спектре фотосферы и плотном ветре, создающем яркую оболочку с ударным возбуждением.

Как можно видеть на рис. 10, ULX доступна для изучения на космической обсерватории GALEX. Можно даже рассчитывать на получение ультрафиолетовых спектров источников с низким межзвездным поглощением. Основное ожидаемое различие SCAD и IMBH — разные наклоны спектров в ультрафиолетовом диапазоне. Кроме того, ожидается, что при сверхкритической аккреции свойства отождествленных источников ультрафиолета будут заметно различаться от объекта к объекту.

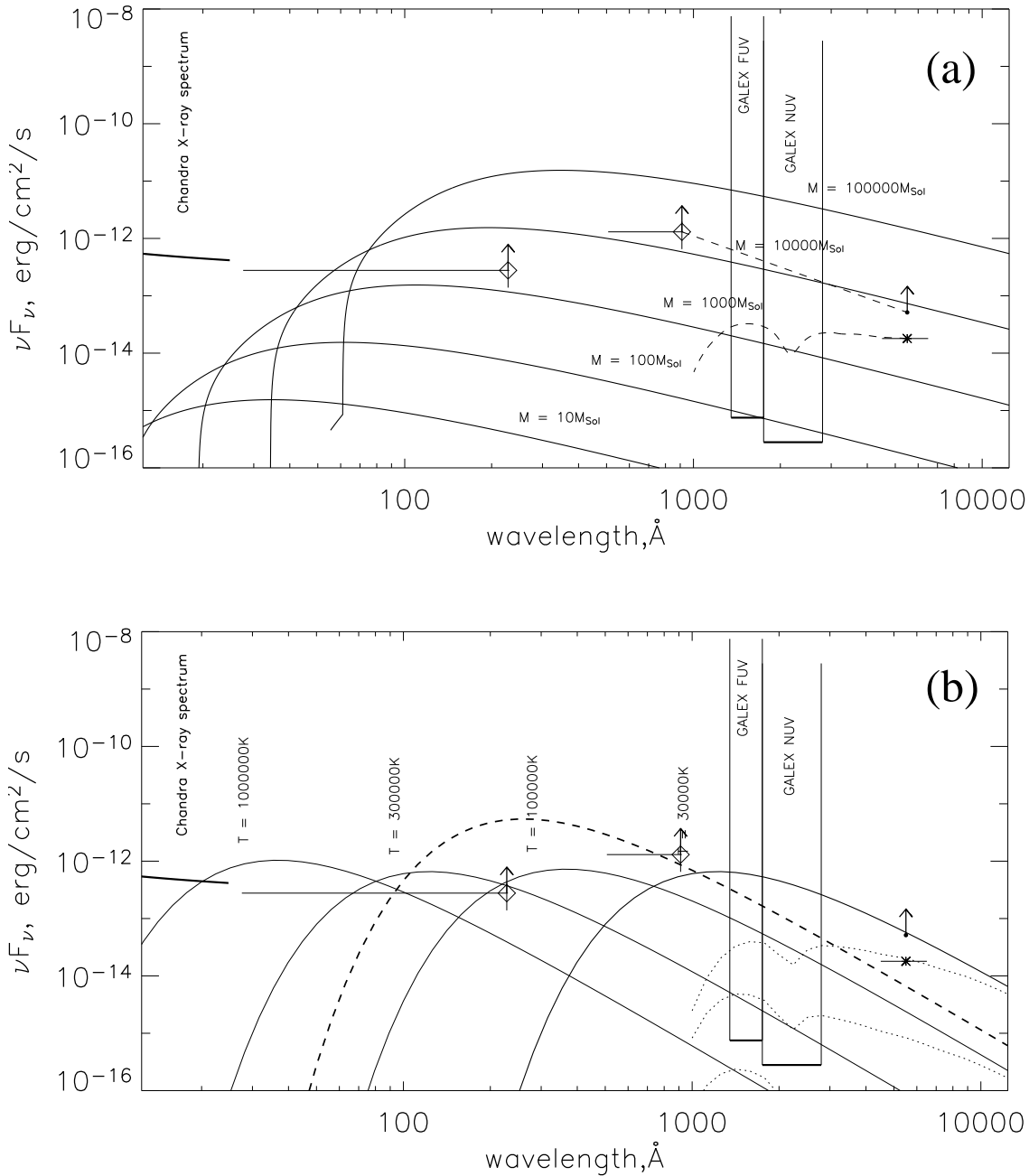


Рис. 10: Предполагаемая форма спектра для NGC6946 ULX-1. Оптический источник (приведен поток в полосе V) отмечен звездочкой, стрелка чуть выше – значение потока, исправленное за поглощение в Галактике (это нижний предел на непоглощенный поток, потому что не учитывается экстинкция в родительской галактике). Ромбы с барами ошибок – оценки светимости в диапазонах, ответственных за ионизацию водорода и вторичную ионизацию гелия. В качестве рентгеновского спектра приведена оптимальная модель для данных обсерватории Chandra (Roberts & Colbert, 2003). Показаны также две полосы, доступные для наблюдений на ультрафиолетовой космической обсерватории GALEX, и потоки, соответствующие $S/N = 3$ для экспозиции $t = 10^5$ с. (a) Модели многотемпературных дисков вокруг черных дыр различных масс, аккрецирующих с темпом $0.01 M_{cr}$, показаны сплошными линиями. Пунктир соответствует степенной интерполяции между ЭУФ и оптическим диапазоном без учета и с учетом галактического поглощения. Используются кривые покраснения Cardelli et al. (1998). (b) Спектры черных тел со светимостью $L = 10^{39}$ эрг s^{-1} показаны вместе с оптимальным источником ЭУФ, полученным в результате фотоионизационного моделирования. Пунктирные кривые соответствуют не исправленным за поглощение чернотельным спектрам.

5. Выводы

Мы подтверждаем связь между ULX и молодым звездным населением. Некоторые из них связаны со звездными скоплениями возрастом 5-10 миллионов лет. Большая часть ULX окружена туманностями. Исследование этих туманностей позволяет получить сведения о центральных источниках: о струйной/ветровой активности центральной машины и о распределении энергии в спектре в ЭУФ-диапазоне, недоступном прямым наблюдениям. Четыре из исследованных восьми туманностей (“группа А”) показывают высокое отношение $[O\ III]\lambda 5007/H\beta = 3 - 7$ (табл. 2), что свидетельствует о наличии жесткого источника в ЭУФ.

Для туманности NGC7331 X-1 мы анализируем остаточный эмиссионный спектр после вычитания спектра фотоионизационной модели CLOUDY (Abolmasov et al., 2007b) туманности, подсвечиваемой скоплением. В остаточном спектре (величины в скобках в табл. 2) ярче по отношению к линиям водорода как линии, возбуждаемые электронным ударом (вроде дублета $[S\ II]\lambda 6717, 6731$), так и $[O\ III]\lambda 4959, 5007$. Остаточный спектр туманности в NGC7331 X-1 подобен спектру MF16, но примерно в 2 раза слабее. Возможно, это более слабый аналог MF16.

Признаки жесткого источника фотоионизации (линии He II, [Fe III], [O III]) присутствуют в спектрах почти всех туманностей. Точно так же все изученные ULXN демонстрируют признаки ударного возбуждения, такие как высокие отношения интенсивностей $[S\ II]\lambda 6717, 6731/H\alpha > 0.3$, $[N\ II]\lambda 6548, 6583/H\alpha > 0.5$, иногда наличие ярких линий $[O\ I]\lambda 6300, 6364$ и $[N\ I]\lambda 5200$.

Итак, мы делим объекты на “группу А” (HoII X-1, NGC6946 X-1, M101 P098 и NGC5204 X-1, для туманностей которых требуется сильный УФ-источник, чтобы ионизовать кислород, и “группу В” (HoIX X-1, IC342 X-1, NGC7331 X-1 в ее остаточном спектре и M51 X-1, показывающие наиболее высокие отношения $[SII]\lambda 6717, 6731/H\beta = 2.3 - 4$, что требует ударной ионизации газа туманности). Следует заметить, что *все ULXN*, изученные нами, должны, по крайней мере частично, возбуждаться электронным ударом, так как в спектрах всех объектов $[SII]\lambda 6717, 6731/H\alpha > 0.3$.

Отсюда мы делаем предварительные выводы:

– Спектры всех ULXN содержат признаки ударного возбуждения, однако параметры местной межзвездной среды, конечно, могут заметно влиять на наблюдательные проявления ULXN.

– Для объяснения спектров половины из наблюдавшихся туманностей требуется наличие яркого ультрафиолетового источника.

Деление на “группы А” и “В” условно. Например, туманность IC342 X-1 (“группа В”), спектр которой показывает возбуждение ударными волнами, в своей центральной части излучает в линиях He II и [Fe III], что свидетельствует о наличии центрального источника фотоионизации. Фактически во всех туманностях (кроме двух объектов — M51 X-7 и NGC7331 X-1) или присутствует необычно яркая эмиссия He II $\lambda 4686$, или повышено отношение $[O\ III]\lambda 5007 / H\beta$, что свидетельствует о наличии источника фотоионизации светимостью не менее чем $\sim 10^{38}$ эрг s^{-1} . Скорее всего, ударные волны, рентгеновское и УФ-излучение действуют во всех объектах, различаясь по энергетике и степени влияния на наблюдаемый спектр.

Для некоторых ULXN были зарегистрированы градиенты скоростей ~ 100 км/с (Dunne et al. (2000), Pakull et al. (2006), Fabrika et al. (2006) и ссылки в последней работе). Исходя из этого, делаем дополнительный вывод: ULX должны производить сильные ветры (или струи) мощностью $\gtrsim 10^{39}$ эрг/с. Это согласуется с предположением, что ULX есть массивные рентгеновские двойные со сверхкритическими аккреционными дисками по типу SS433. Черные дыры промежуточных масс со стандартными аккреционными дисками не могут динамически исказить окружающую туманность и, следовательно, обеспечить ударное возбуждение газа за счет ударных волн.

По крайней мере некоторые из ULX должны быть яркими ультрафиолетовыми источниками со светимостями от $\sim 10^{38}$ до $\sim 10^{40}$ эрг s^{-1} . Такую светимость могут обеспечивать или очень массивные аккрецирующие черные дыры ($\gtrsim 10000 M_{\odot}$), или сверхкритическая аккреция в системах типа SS433. Будущие наблюдения в ультрафиолетовом диапазоне (в частности, на космической обсерватории *GALEX*, см. Martin et al., 2003) могут помочь в выборе между существующими моделями ULX.

Благодарности. Работа поддержана грантами РФФИ NN 05-02-19710, 04-02-16349, 06-02-16855.

Список литературы

- Афанасьев В.Л., Гажур Э.Б., Желенков С.Р., Моисеев А.В. 2005, Бюлл. Спец. астрофиз. обсерв., **58**, 90
 Abolmasov P., Fabrika S., Sholukhova O. & Afanasiev V., 2006, in Science Perspectives for 3D Spectroscopy, ed. M. Kissler-Patig, M. M. Roth. & J. R. Walsh (Springer Berlin / Heidelberg); astro-ph/0602369
 Abolmasov P., Fabrika S., Sholukhova O. & Afanasiev V., 2007a, *готовится к печати*
 Abolmasov P., Swartz D., Fabrika S. et al., 2007b, *готовится к печати*
 Abramowicz M. A., Calvani M., Nobili L., 1980, ApJ, **242**, 772

- Afanasiev V.L., Dodonov S.N., Moiseev A.V., 2001, in *Stellar dynamics: from classic to modern*, eds. Osipkov L.P., Nikiforov I.I., Saint Petersburg, 103
- Allen M. G., Dopita M. A., Tsvetanov Z. I., 1998, *ApJ*, **493**, 571
- Begelman M. C., 2002, *ApJ*, **568**, L97
- Blair W. P., Fesen R. A. & Schlegel E. M., 2001, *AJ*, **121**, 1497
- Blondin J., 2000, *New Astronomy*, **5**, 53
- Braun R. & Walterbos R. A. M., 1993, *A&AS*, **98**, 327
- Cardelli J. A., Clayton G. C. & Mathis J. S., 1998, *ApJ*, **345**, 245
- Colbert E. J. M. & Miller E. C., 2005, *astro-ph/0402677*
- Coluzzi R., 1996, *Bull. Inf. Centre Donnees Stellaires*, **48**, 15
- Conty P.S., Leep M.E. & Perry D.N., 1983, *ApJ*, **268**, 228
- Copperwheat C., Cropper M., Soria R., Wu K., 2005, *MNRAS*, **362**, 79
- Dopita M. A. & Sutherland R. S., 1996, *ApJS*, **102**, 161
- Dunne B. C., Gruendl R. A., Chu Y.-H., 2000, *AJ*, **119**, 1172
- Evans I., Koratkar A., Allen M., Dopita M., Tsvetanov Z., 1999, *ApJ*, **521**, 531
- Fabrika S., Mescheryakov A., 2001. In: *Galaxies and their Constituents at the Highest Angular Resolution*, IAU Symp. N205, ed. R.T. Schilizzi, p. 268
- Fabrika S., 2004, *Astrophys. and Space Phys. Rev.*, **12**, 1
- Fabrika S., Karpov S., Abolmasov P. & Sholukhova O., 2006, In *Populations of High Energy Sources in Galaxies*, IAU Symposium 230, ed. E. J. A. Meurs & G. Fabbiano, p. 278; *astro-ph/0510491*
- Fabrika S., Karpov S., Abolmasov P., 2007, *готовится к печати*
- Feldmeier J. J., Ciardullo R., Jacoby G. H., 1997, *ApJ*, **479**, 231
- Ferland G. J., Korista K.T., Verner D.A., Ferguson J.W., Kingdon J.B. & Verner E.M., 1998, *PASP*, **110**, 761
- Grisé F., Pakull M. W. & Motch C., 2006, in *Populations of High Energy Sources in Galaxies*, IAU Symposium 230, ed. E. J. A. Meurs & G. Fabbiano, p. 302; *astro-ph/0603768*
- Hopman C., Portegies Zwart S. F., Alexander T., 2004, *ApJ*, **604**, 101L
- Hughes S. M. G., Han M., Hoessel J. et al., 1998, *ApJ*, **501**, 32
- Kaaret P., Ward M. J., & Zezas A., 2004, *MNRAS*, **351**, 83
- Karachentsev I. D., Dolphin A. E., Geisler D., Grebel E. K., Guhathakurta P., Hodge P. W., Karachentseva E. V., Sarajedini A., Seitzer P., Sharina M. E., 2002, *A&A*, **383**, 125
- King A.R., Davies M.B., Ward M.J., Fabbiano G., Elvis M., 2001, *ApJLetters*, **552**, 109
- Krauss M. I., Kilgard R. E., Garcia M. R., Roberts T. P., Prestwich A. H., 2005, *ApJ*, **630**, 228
- Kuntz K. D., Gruendl R. A. & Chu Y.-H. et al., 2005, *ApJ*, **620**, 31
- Larsen S. S., 2000, *MNRAS*, **319**, 839
- Lehmann I., Becker T., Fabrika S. et al., 2005, *A&A*, **431**, 847
- Leitherer C., Schaerer D., Goldader J. D. et al., 1999, *ApJS*, **123**, 3
- Long K. S. & van Speybroeck L. P., 1983, *Accretion Driven Stellar X-ray Sources*, ed. W. H.G. Lewin, & E. P.J. van den Heuvel (Cambridge: Cambridge University Press), 141
- Madau P., Rees M. J., 2001, *ApJ*, **551**, L27
- Makarova L. N., Grebel E. K., Karachentsev I. D. et al., 2002, *A&A*, **396**, 473
- Martin C., 2003, *Bulletin of the American Astronomical Society*, **35**, 1363
- McMall M. L., 1984, *MNRAS*, **208**, 253
- Mescheryakov A., 2004, private communication
- Miller B. W., 1995, *ApJ*, **446**, L75
- Mitsuda K., Inoue H., Koyama K., Makishima K., Matsumoto M., Ogawara Y., Suzuki K., Tanaka Y., Shibazaki N., Hirano T., 1984, *PASJ*, **36**, 741
- Osterbrock D. E., 1974, "Astrophysics of Gaseous Nebulae", San Francisco, eds. W. H. Freeman and Company
- Pagel B. E. J., Simonson E. A., Terlevich R. J., Edmunds M. G., 1992, *MNRAS*, **225**, 325
- 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
- Pakull M.W., Grisé F., Motch C., 2006, in: "Populations of High Energy Sources in Galaxies": IAU Symposium 230, ed. E. J. A. Meurs & G. Fabbiano, p. 293; *astro-ph/0603771*
- Petit H., 1998, *A&AS*, **131**, 317
- Pilyugin L. S., Thuan L. X. & Vílchez J. M., 2003, *A&A*, **397**, 487
- Poutanen J., Fabrika S., Butkevich A., Abolmasov P., 2006 *сдана в печать*
- Roberts T. P., Colbert E. J. M., 2003, *MNRAS*, **341**, 49
- Roberts T. P., Goad M. R., Ward M. J., Warwick R. S., 2003, *MNRAS*, **342**, 709
- Saha A., Claver J., Hoessel J. G., 2002, *AJ*, **124**, 839
- Schlegel D. J., Finkbeiner P. F., Davis M., 1998, *ApJ*, **500**, 525
- Shakura N. I., Sunyaev R. A., 1973, *A&A*, **24**, 337
- Soria R., Cropper M., Pakull M., Mushotzky R., Wu K., 2005, *MNRAS*, **356**, 12
- Soria R., Fender R. P., Hannikainen D. C., Read A. M. & Stevens I. R., 2006, *MNRAS*, **368**, 1527
- Soria R., 2006, *astro-ph/0509573*
- Swartz A. D., Ghosh K. K., Tennant A. F. & Wu K., 2004, *ApJS*, **154**, 519
- Stetson P. B., Saha A., Ferrarese L. et al., 1998, *ApJ*, **508**, 491
- Terashima Y., Inoue H., Wilson A. S., 2006, *ApJ*, **645**, 264
- Tully R. B., 1988, "Nearby Galaxies Catalog" Cambridge: Cambridge University Press
- Tully R. B., Shaya E. J., Pierce M. J., 1992, *ApJS*, **80**, 479
- Vázquez G. A. & Leitherer C., 2005, *ApJ*, **621**, 695
- Zezas A., Fabbiano G., Rots A. H., Murray S. S., 2002, *ApJ*, **577**, 710