ОПТИЧЕСКАЯ 3D-СПЕКТРОСКОПИЯ УЛЬТРАЯРКИХ РЕНТГЕНОВСКИХ ИСТОЧНИКОВ В ГАЛАКТИКАХ АНТЕННЫ

А. Ф. Валеев[1], **С. Н. Фабрика**[1], **О. Н. Шолухова**[1], **Ю. Поутанен**[2]

[1] *Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 369167, Россия*

[2] *Department of Physics, Astronomy division, P.O.Box 3000, 90014 University of Oulu, Finland*
e-mail: azamat@sao.ru, fabrika@sao.ru, olga@sao.ru, juri.poutanen@oulu.fi

Изучены панорамные спектры шести ультраярких рентгеновских источников (ULX) в галактиках Антенны. Построены карты межзвездного поглощения в областях этих объектов. С привлечением изображений, полученных с HST, были построены точные сетки координат и обнаружено, что все объекты ULX находятся рядом (50–240 пк) с молодыми массивными скоплениями. Фотометрия скоплений и сравнение с модельными треками Srarburst99 позволили определить возраста и массы скоплений. Все скопления оказались молодыми, не старше 5 млн лет. Массы звезд, предшественников ULX, – не менее 50 масс Солнца. Наши результаты показывают, что объекты ULX появились в результате эволюции наиболее массивных звезд, они, вероятно, были выброшены из своих родительских скоплений. Скорость выброса составляет 10–50 км/с. Это согласуется как со сценарием выброса звезд в результате близких прохождений, так и с вариантом выброса в результате взрыва сверхновой.

ВВЕДЕНИЕ

Точечные источники, не связанные с ядром галактики, рентгеновская светимость которых превышает 10^{39} эрг/с (эддингтоновский предел для черной дыры с массой $10M_{\odot}$), называются ультраяркими рентгеновскими источниками (ULX). Поскольку у многих ULX наблюдается переменность в рентгеновском диапазоне [5], предполагается, что энергетику большей части этих объектов можно объяснить аккрецией на компактный объект. Предполагается, что это могут быть либо черные дыры звездных масс с большим темпом аккреции и, возможно, с сильной анизотропией излучения, либо черные дыры промежуточных масс [4, 10].

Галактики Антенны (NGC 4038/4039), находящиеся на расстоянии 22 Мпк [11], являются прототипами взаимодействующих галактик [12]. Вспышки звездообразования, инициированные приливным взаимодействием, привели к образованию многочисленных скоплений разного возраста [13]. Как и в других взаимодействующих галактиках (NGC 3256/3257, NGC 5774/5775) в галактиках Антенны наблюдается большое число ультраярких рентгеновских источников [15].

НАБЛЮДЕНИЯ И АНАЛИЗ

Спектральные данные получены на 8.2-м телескопе VLT в Европейской южной обсерватории. Наблюдения проводились на приборе VIMOS (Visible Multi Object Spectrograph) [6] в режиме интегральной спектроскопии поля (IFU). При наблюдениях с высоким пространственным разрешением ($0.33''$/пкл) размер поля прибора составлял $13.5''\times13.5''$. Были получены спектры в двух диапазонах: 4150–6200 Å с дисперсией 0.6 Å/пкл и 5200–7400 Å с дисперсией 0.51 Å/пкл. Чистка космических частиц производилась, используя стандартные пакеты IRAF. Обработка спектров проводилась с помощью Vimos Pipeline [14], с доработанной функцией определения следов волокон при слабом уровне сигнала. После обработки формировались трехмерные кубы данных.

Фотометрические данные, использованные в данной работе, были получены на Hubble Space Telescope (HST) с использованием камеры WFPC2 в январе 1996 года. Из архива HST были получены изображения в следующих фильтрах: F336W, F439W, F555W и F814W. Апертурная фотометрия скоплений проводилась с использованием стандартных пакетов IRAF. Фон определялся рядом с оптическим объектом на сглаженном изображении, полученном после вычитания всех объектов в программе Sextractor [1]. Мы также использовали широкоформатное изображение NGC 4038/4039, полученное 20 июля 2004 года на ACS камере HST в фильтре F435W.

При сопоставлении рентгеновских и оптических объектов важным вопросом является точность привязки сеток координат. На изображение ACS была нанесена сетка координат по 15 объектам из каталога 2MASS [3], а затем, используя вторичные стандарты, сетка координат была перенесена на изображение WFPC2. Итоговая точность составляет $0.2''$. На 3D-кубе данных также была нанесена сетка координат с результирующей точностью $0.2''$ посредством центрирования по самому яркому объекту на

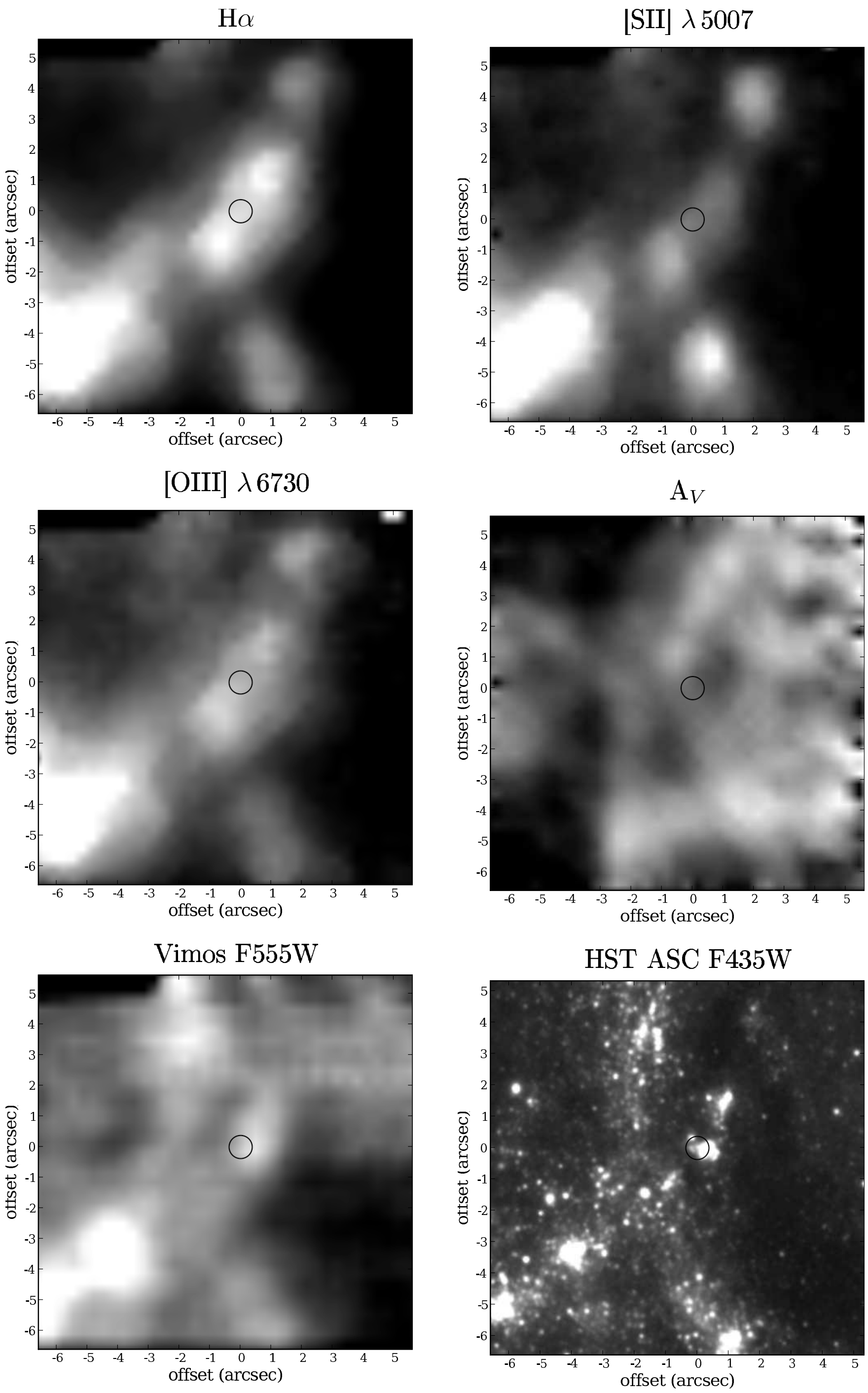

Рис. 1. Пример анализа 3D-изображения ультраяркого рентгеновского источника X11. Кружок диаметром 0.6″ соответствует положению рентгеновского источника. В верхних двух рядах представлены потоки в линиях и карта межзвездного поглощения. Более светлые области соответствуют бо́льшим величинам. Внизу представлена свертка изображений VIMOS с фильтром F555W, а также прямое изображение ACS в фильтре F435W

3D-изображении и на изображении ACS. Хотя абсолютная точность рентгеновских координат телескопа Chandra составляет 0.6″, внутренняя точность – 0.1″–0.2″ в зависимости от яркости объекта. Для согласования рентгеновских и оптических координат мы произвели линейный сдвиг оптической системы координат по источнику X37, который является квазаром [2] и положение которого надежно измеряется. Итак, внутренняя точность наших рентгеновских и оптических координат составляет 0.2″.

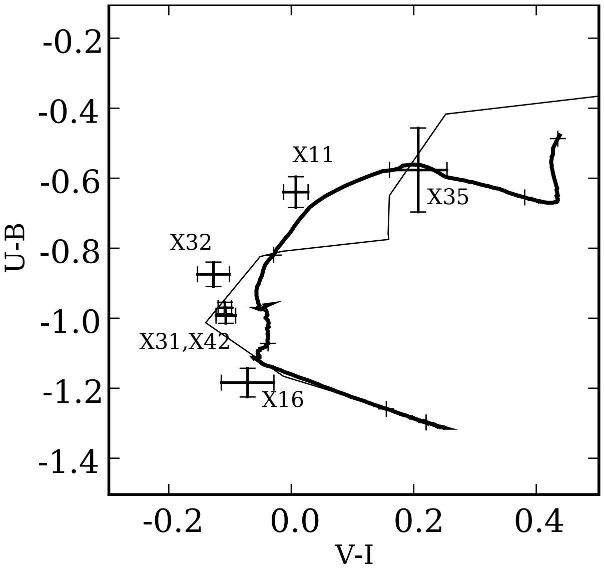

Рис. 2. Двухцветная диаграмма модельного расчета Starburst99 для металличностей $1Z_{\odot}$ (толстая линия, на которой крестиками отмечены возраста через 1 млн лет, начиная с 1 млн лет в нижней части диаграммы) и $2Z_{\odot}$ (тонкая линия). Показаны исправленные за межзвездное поглощения результаты фотометрии каждого скопления с боксами ошибок

На наших спектральных изображениях мы определили параметры линий туманностей (H_{α}, H_{β}, [O III], [S II]). Принимая во внимание, что в случае B переноса излучения в газовых туманностях отношение $H_{\alpha}/H_{\beta} = 2.87$ [9], и принимая закон межзвездного поглощения [8], мы построили карту поглощения A_V для каждого объекта (см. рис. 1).

ВОЗРАСТ И МАССЫ СКОПЛЕНИЙ, СВЯЗАННЫХ С ULX

Были рассчитаны два эволюционных трека с использованием программы Starburst99 [7] для единичной вспышки звездообразования, функцией Салпитера с $\alpha = 2.35$ и металличностями $1Z_{\odot}$ и $2Z_{\odot}$. На двухцветной диаграмме (U–B), (V–I) (рис. 2) показаны результаты модельных расчетов и исправленные за межзвездное поглощение результаты фотометрии. На эволюционном треке с $Z = 1Z_{\odot}$ обозначены моменты времени через 1 млн лет, и из соответствия цветов скоплений на треке можно сделать вывод о возрасте каждого скопления (см. табл. 1). Зная оценку возраста скопления по диаграмме V, (V–I) мы определяли массу скопления.

Таблица 1. Результаты анализа ULX в галактиках Антенны. Представлены рентгеновские координаты, возраст, масса скопления и расстояние от центра скопления до рентгеновских координат ULX

ULX	RA (2000.0)	Dec (2000.0)	Возраст, млн лет	Масса, $10^6 M_{\odot}$	Расстояние, пк
X-11	12:01:51.32	−18:52:25.3	4.3±0.5	4	46
X-16	12:01:52.08	−18:51:33.6	2.3±0.3	1.6	188
X-31	12:01:54.27	−18:52:01.9	2.8±0.3	2.5	240
X-32	12:01:54.35	−18:52:10.3	3.2±0.5	3.6	210
X-35	12:01:54.77	−18:52:52.1	5.0±0.5	4	62
X-42	12:01:55.65	−18:52:15.0	3.1±0.3	2.5	150

На рисунке 3 представлена гистограмма распределения возрастов. Из диаграммы можно сделать вывод, что масса звезд, взрывающихся как с сверхновые, составляет не менее $50 M_{\odot}$. Там же представлена гистограмма распределения проекционного расстояния между ULX и родительским скоплением. Каждый из объектов находится далеко от родительского скопления, что может говорить о том, что двойная система была выброшена в самом начале формирования скопления при тройных-четверных взаимодействиях, а затем эволюционировала, удаляясь от родительского скопления. Наши результаты свидетельствуют, что ULX это молодые объекты с возрастом менее 5 млн лет. Их предшественники были массивные звезды

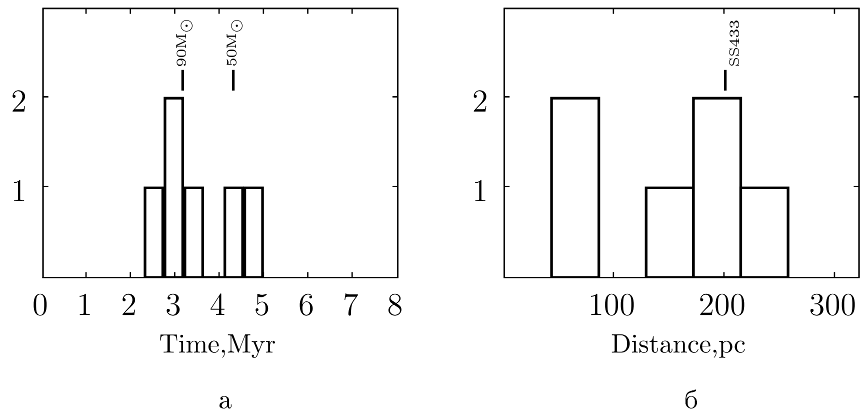

Рис. 3. Распределение возрастов скоплений, связанных с ULX. Штрихами показаны минимальные массы звезд, взрывающихся как сверхновые за данное время эволюции (*а*). Распределение проекционных расстояний от рентгеновского источника до центра скопления. Отмечено также расстояние от SS433 (возможного прототипа ULX в Галактике) до ближайшего скопления звезд (*б*)

с массами не менее $50M_{\odot}$. Если массивная звезда была выброшена из скопления во время вспышки сверхновой, то тогда масса предшественника ULX становится даже больше $50M_{\odot}$. Удаленность ULX от родительского скопления составляет 50–240 пк, и для прохождения такого расстояния скорость выброса из скопления должна составлять от 10 до 50 км/с.

[1] *Bertin E., Arnouts S.* SExtractor: Software for source extraction // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser. – 1996 – **117**. – P. 393–404.

[2] *Clark D. M., Christopher M. H., Eikenberry S. S., et al.* The Ultraluminous X-Ray Source X-37 Is a Background Quasar in the Antennae Galaxies // Astrophys. J. – 2005. – **631**. – P. L109–L112.

[3] *Cutri R. M., Skrutskie M. F., van Dyk S., et al.* 2MASS All Sky Catalog of point sources // The IRSA 2MASS All-Sky Point Source Catalog, NASA/IPAC Infrared Science Archive. – 2003. – http://irsa.ipac.caltech.edu/applications/Gator/.

[4] *Fabrika S.* The jets and supercritical accretion disk in SS433 // Astrophys. and Space Phys. Rev.–2004.–**12**.–P. 1–152.

[5] *Kubota A., Mizuno T., Makishima K., et al.* Discovery of Spectral Transitions from Two Ultraluminous Compact X-Ray Sources in IC 342 // Astrophys. J. – 2001. – **547**. – P. L119–L122.

[6] *LeFevre O., Saisse M., Mancini D., et al.* Commissioning and performances of the VLT-VIMOS instrument // Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series. – 2003. – **4841**. – P. 1670–1681.

[7] *Leitherer C., Schaerer D., Goldader J. D., et al.* Starburst99: Synthesis Models for Galaxies with Active Star Formation // Astrophys. J. Suppl. Ser. – 1999. – **123**. – P. 3–40.

[8] *O'Donnell J. E.* R_{ν}-dependent optical and near-ultraviolet extinction // Astrophys. J. – 1994. – 422. – P. 158–163.

[9] *Osterbrock D. E., Ferland G. J.* Astrophysics of gaseous nebulae and Active Galactic Nuclei (2nd edition). – University Science Books, 2005.

[10] *Poutanen J., Lipunova G., Fabrika S., et al.* Supercritically accreting stellar mass black holes as ultraluminous X-ray sources // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. – 2007. – **377**. – P. 1187–1194.

[11] *Schweizer F., Burns C. R., Madore B. F., et al.* A new Distance to the Antennae Galaxies (NGC 4038/39) Based on the Type Ia Supernova 2007sr // Astron. J. – 2008. – **136**. – P. 1482–1489.

[12] *Toomre A., Toomre J.* Galactic Bridges and Tails // Astrophys. J. – 1972. – **178**. – P. 623–666.

[13] *Whitmore B. C., Zhang Q., Leitherer C., et al.* The Luminosity Function of Young Star Clusters in "the Antennae" Galaxies (NGC 4038-4039) // Astron. J. – 1999. – **118**. – P. 1551–1576.

[14] *Zanichelli A., Garilli B., Scodeggio M., et al.* The VIMOS Integral Field Unit: Data-Reduction Methods and Quality Assessment // Publs Astron. Soc. Pacif. – 2005. – **117**. – P. 1271–1283.

[15] *Zezas A., Fabbiano G., Rots A. H., Murray S. S.* Chandra Observations of "The Antennae" Galaxies (NGC 4038/4039). II. Detection and Analysis of Galaxian X-Ray Sources // Astrophys. J. Suppl. Ser. – 2002. – **142**. – P. 239–260.